

# **Onderzoek naar overslag als gevolg van falen van verticale opslagtanks**

Peter Wellens  
George Gerber

1203189-000



**Titel**

Onderzoek naar overslag als gevolg van falen van verticale opslagtanks

**Opdrachtgever**

Rijkswaterstaat

**Project**

1203189-000

**Trefwoorden**

Verticale opslagtank; overslag; Navier-Stokes; Volume of Fluid;

**Samenvatting**

Verticale opslagtanks voor opslag van vloeistoffen voor de industrie staan door heel Nederland. Vaak staan deze tanks nabij oppervlaktewater. Waterkwaliteitbeheerders, waaronder Rijkswaterstaat, hebben de verantwoordelijkheid de risico's van verticale opslag voor het oppervlaktewater in te schatten. Instantaan falen van verticale opslagtanks kan een aanzienlijk risico voor het oppervlaktewater opleveren.

Opslagtanks staan vaak in een tankput. Deze is bedoeld om de opgeslagen vloeistof (tijdelijk) te bergen als deze door een calamiteit uit de tank stroomt. Dat gaat goed als het lek klein is en het resulterende debiet niet zo groot. Bij instantaan falen van een opslagtank stroomt alle vloeistof uit de tank en met een hoge snelheid. Als gevolg kan overslag van de tankput optreden, waarbij de vloeistof toch buiten de tankput terecht komt.

Deltares is gevraagd te onderzoeken of er methodes zijn om het overslagvolume te kwantificeren voor praktijksituaties en vervolgens met zo'n methode de invloed van verschillende maatregelen voor reductie van overslag te onderzoeken.

Na afloop van een literatuuronderzoek (Deltares, 2010), dat voorafging aan dit rapport, is een plan van aanpak voor het onderzoek opgesteld. Daarin werd voorgesteld de numerieke methode, vervat in het programma ComFLOW, te gebruiken om overslag te kwantificeren. ComFLOW is in het verleden veelvuldig ingezet en gevalideerd voor vergelijkbare stromingsprocessen als die optreden bij overslag van een tankput na instantaan falen van een tank.

Voor het verkrijgen van vertrouwen in de resultaten van ComFLOW is ook voor dit rapport een validatie uitgevoerd voor enkele stromingsprocessen die optreden na falen van tanks. Hiervoor zijn rekenresultaten van ComFLOW vergeleken met experimenteel verkregen meetgegevens voor overslag en voor het leegstromen van een reservoir. De rekenresultaten van ComFLOW komen goed overeen met de metingen.

Vervolgens is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met resultaten van ComFLOW-simulaties voor drie typische faalmechanismes: volledig falen, falen van een deel van de zijwand en falen van de aanhechting tussen bodem en wand. Hierbij zijn belangrijke parameters als tankhoogte en tankputhoogte systematisch gevarieerd en zijn de gevolgen van deze variatie voor overslag vastgesteld. De belangrijkste parameter blijkt de relatieve tankputhoogte te zijn, ofwel de hoogte van de tankput in verhouding tot de hoogte van de tank. Overslag neemt sterk af als de relatieve tankputhoogte toeneemt.

Met de kennis die tijdens de gevoeligheidsanalyse is opgedaan, is daarna een systematische studie gedaan naar mitigerende maatregelen voor overslag. Er werden er vijf onderscheiden: beperken van de vulhoogte, een concave vorm van de tankputwand, een schot in de tank om de uitstroom te vertragen, vergroten van de afstand van de tankputwand tot de tank, en tertiaire insluiting met een extra "tankput" om de tankput waar de tank in staat. Uit dit onderzoek blijken het beperken van de vulhoogte en tertiaire insluiting tot de grootste reductie van overslag te leiden.

Tot slot is ComFLOW toegepast voor drie situaties uit de praktijk die door Rijkswaterstaat zijn aangeleverd. Eén is een geplande uitbreiding van een opslagterrein in een haven. De volgende is een opslagterrein met tanks nabij een kanaal. De derde is een opslagterrein nabij een haven, waarvoor een nieuwe tankput en tertiaire insluiting zijn ontworpen. Alle situaties zijn geschematiseerd en voor ieder is een scenario opgesteld

**Titel**

Onderzoek naar overslag als gevolg van falen van verticale opslagtanks

**Opdrachtgever**  
Rijkswaterstaat

**Project**  
1203189-000

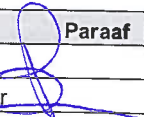



**Pagina's**  
70

waarbij één tank faalt en tot overslag leidt. Met ComFLOW is berekend hoeveel van het tankvolume in het oppervlaktewater terecht kan komen.

Op basis van dit onderzoek moet reductie van overslag vooral gezocht worden in het beperken van de vulhoogte voor tanks met gevaarlijke stoffen nabij oppervlaktewater. Het is mogelijk dat het beleid voor opslag op een terrein met tanks geoptimaliseerd kan worden: lage tanks bij de waterkant, hogere verder van de kade. Dat zou verder onderzocht moeten worden. Daarnaast kan tertiaire insluiting met voldoende afstand tussen de wand van de tankput en de additionele insluiting de hoeveelheid vloeistof die in het oppervlaktewater terecht komt sterk reduceren. De mogelijkheden om overslag te reduceren zijn afhankelijk van de situatie. ComFLOW is een instrument waarmee een situatiespecifiek ontwerp voor een opslagterrein getoetst kan worden.

**Referenties**

RWS zaaknummer 31040625/4500165361

<b>Versie</b>	<b>Datum</b>	<b>Auteur</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Review</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Goedkeuring</b>	<b>Paraaf</b>
	apr. 2011	Peter Wellens		Mart Borsboom		Wiel Tilmans	
		George Gerber					

## Inhoud

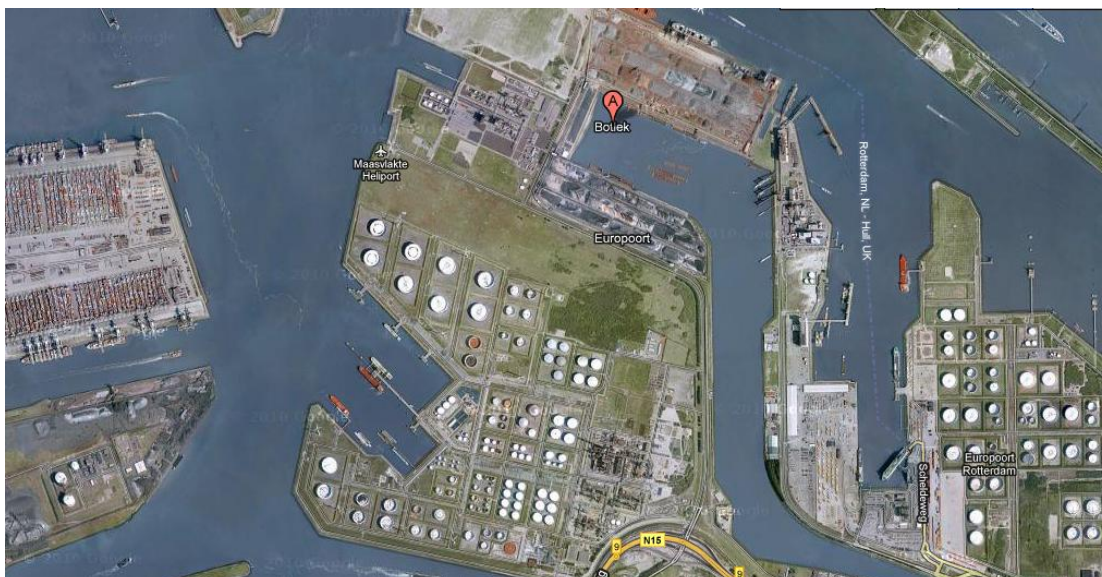
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doel van het onderzoek	3
1.3 Definities	3
1.4 Leeswijzer	5
<b>2 Beschrijving van ComFLOW</b>	<b>7</b>
2.1 Inleiding	7
2.2 Vergelijkingen die de fysica beschrijven	7
2.3 Numerieke methode in ComFLOW	7
2.4 Beperkingen van ComFLOW	8
2.5 Toepassingen van ComFLOW	9
<b>3 Validatie van ComFLOW voor overslag en leegstromen</b>	<b>13</b>
3.1 Inleiding	13
3.2 Validatie voor overslag	13
3.3 Validatie van leegstromen van een reservoir en de vervolgstroming over het terrein	16
<b>4 Gevoeligheidsanalyse voor overslag</b>	<b>21</b>
4.1 Inleiding	21
4.2 Methode van variëren	23
4.3 Volledig falen van de tank	24
4.4 Falen van de lasnaad in de zijwand	28
4.5 Falen van de aanhechting tussen bodem en wand	33
4.6 Vergelijking tussen faalmechanismes	38
4.7 Invloed van andere tanks in de tankput	39
4.8 Invloed van viscositeit op overslag	41
4.9 Discussie	41
<b>5 Mitigerende maatregelen voor overslag</b>	<b>43</b>
5.1 Inleiding	43
5.2 Concave vorm van de tankputwand: COAST	45
5.3 Intern schot: MOTIF	48
5.4 Afstand van de tankputwand tot de tank	50
5.5 Tertiaire insluiting	51
5.6 Discussie	53
<b>6 Terreinconfiguraties uit de praktijk</b>	<b>55</b>
6.1 Inleiding	55
6.2 Configuratie 1: uitbreiding opslagterrein nabij een haven	55
6.2.1 Configuratie van het terrein	55
6.2.2 Opzet van de simulatie	57
6.2.3 Resultaten van de simulatie	58
6.3 Configuratie 2: opslagterrein nabij een kanaal	60
6.3.1 Configuratie van het terrein	60
6.3.2 Opzet van de simulatie	62
6.3.3 Resultaten van de simulatie	63

6.4	Configuratie 3: nieuwbouw van tankput en tertiaire insluiting	66
6.4.1	Configuratie van het terrein	66
6.4.2	Opzet van de simulatie	67
6.4.3	Resultaten van de simulatie	68
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>71</b>
<b>8</b>	<b>Literatuur</b>	<b>73</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>Tabellen</b>	<b>A-1</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

In 2010 is Deltares benaderd door Rijkswaterstaat om studie te doen naar overslag als gevolg van falen van verticale opslagtanks. Verticale opslagtanks staan door heel Nederland en worden gebruikt om allerhande vloeistoffen op te slaan voor de industrie. Een bekend voorbeeld van een grootschalig opslagterrein is de Europoort (zie Figuur 1.1), maar ook langs kanalen, rivieren en zeearmen zijn opslagterreinen met vele verticale opslagtanks. Waterkwaliteitbeheerders, waaronder Rijkswaterstaat, hebben de verantwoordelijkheid te beoordelen wat het risico is van verticale opslag voor het oppervlaktewater.



Figuur 1.1 Opslagterrein met opslagtanks in de Europoort nabij Rotterdam (bron: Google Maps)

Verticale opslagtanks staan vaak in een tankput. Een tankput is een bak waar de tank in staat en die bedoeld is om vloeistof uit de tank te bergen als er een calamiteit optreedt. Soms heeft iedere tank een eigen tankput. Vaak ook staan er meerdere tanks in een tankput.

Het belangrijkste ontwerpcriterium voor de tankput laat zich als volgt parafraseren: deze dient het volledige volume van de grootste tank binnen de tankput te bergen, plus een zekere marge. De exacte ontwerpcriteria voor bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen in verticale cilindrische tanks komen uit de PGS29 (VROM2008):

*“De opvangcapaciteit van de tankput moet minimaal gelijk zijn aan de inhoud van de grootste tank vermeerderd met de grootste van de volgende twee volumina:*

- 10% van het volume van de overige tanks in die tankput,*
- het volume bluswater dat volgens de in de vergunning vereiste capaciteit in één uur in de tankput kan worden gebracht.*

*De hoogte van de putdijk wordt bepaald uit de benodigde opvangcapaciteit van de tankput, vermeerderd met 0,25 m voor mogelijk optredende windgolven, vermeerderd met de plaatselijk maximaal te verwachten zetting van de dijk tot de volgende hoogte-inspectie.”*

Als er een klein lek in een tank optreedt en de opgeslagen vloeistof met een klein debiet uit de tank stroomt, zal alle vloeistof bijna zeker binnen de tankput blijven. Als het lek echter groot is en het uitstroomdebiet significant, dan zal door de impuls van de vloeistof deze over de tankputwand slaan. Men spreekt dan van overslag of, in termen van Rijkswaterstaat, "topping".

Wanneer een tank zijn voornaamste functie – het bergen van vloeistof – verliest, spreekt men van tankfalen. De oorzaken van tankfalen zijn talrijk en divers. Veelgenoemde oorzaken (USEPA, 1997) zijn:

- slecht ontwerp
- slecht onderhoud
- slecht uitgevoerde aanpassing van de tank
- corrosie bij de aansluiting van de wand met de bodem van de tank
- brand
- explosie.

Tankfalen, met overslag van de tankputwand tot gevolg, gebeurt zo nu en dan. Exacte cijfers van de frequentie van voorkomen zijn niet bekend. Een aantal gevallen wordt vermeld in de ARIA database. De gevallen van tankfalen uit ARIA met overslag tot gevolg staan genoemd in Tabel 1.1.

Tabel 1.1: Samenvatting van incidenten met tanks waarbij sprake was van overtopping (uit de ARIA database)

Jaar	Land	Mechanisme	Bron
2007	Frankrijk (Gironde)	Scheur in de verbinding tussen bodem en wand, waardoor olie vrijkwam. De olie ging vervolgens over de tankputwal.	ARIA 32675
2005	België (Kallo)	Corrosie en verzwakte fundamente hebben tankfalen veroorzaakt. De tankputwal heeft de klap van de stromende vrijgekomen olie overleefd.	ARIA 30934
2004	Italië (-)	Een ontploffing zorgde voor overdruk, waardoor het dak en de wand van de fundering losscheurde. De vrijgekomen bitumen verspreidde zich vervolgens over 13.000m <sup>2</sup> (2% van raffinaderijgebied).	ARIA 32829
2003	Nederland (Rotterdam)	Falen van stoomleiding leidde tot overdruk met scheuren van de verticale lasnaad tot gevolg. Ortho-cresol stroomde uit de scheur.	ARIA 23866
1989	Rusland (Litouwen)	Overdruk in een cryogene ammoniaktank veroorzaakte een scheur in de aanhechting tussen bodem en wand. Hierdoor kwam een golf met vloeistof vrij.	ARIA 717
1988	Frankrijk (Berr l'Etang)	Scheur in een lasnaad die tijdens een reparatie was aangebracht. Het vrijgekomen olieproduct ging vervolgens over de tankputwal heen.	ARIA 163



Het onderzoek van Deltares naar overslag is verdeeld in twee fases. De eerste fase is in oktober 2010 afgesloten. In oktober is het verslag van een literatuuronderzoek naar overslag opgeleverd aan Rijkswaterstaat, zie Deltares (2010). Op basis van wat in de literatuur werd aangetroffen is daarin een plan van aanpak voor een vervolgstudie opgesteld. Het rapport dat u nu onder ogen heeft, doet verslag van de vervolgstudie met het onderzoek naar overslag. Alle relevante informatie uit het document met het plan van aanpak is opgenomen in dit rapport.

## 1.2 Doel van het onderzoek

Het doel van het onderzoek is om eerst en vooral te bekijken of er methoden zijn om overslag na instantaan falen van verticale opslagtanks te kwantificeren voor situaties uit de praktijk. Daarnaast dienen verschillende maatregelen om overslag te beperken onderzocht te worden en dient voor overslag de afhankelijkheid van de voornaamste parameters als de tankhoogte te worden bekeken.

In de literatuur zijn meerdere artikelen gevonden waarin experimenten worden beschreven om overslag te kwantificeren, zie bijvoorbeeld Atherton *et al.* (2008). In het plan van aanpak is echter voorgesteld om een numerieke methode te gebruiken om overslag te kwantificeren, met name omdat met een numerieke methode veel verschillende opstellingen van tanks en tankputten goedkoper kunnen worden geëvalueerd. Een belangrijk nadeel van een numerieke methode is dat de rekentijd vaak erg lang is, terwijl in een experiment, als de opstelling eenmaal staat, in korte tijd veel testen kunnen worden gedaan. In het geval van dit onderzoek, waarin veel verschillende opstellingen worden bekeken, wegen de voordelen van een numerieke methode zonder meer op tegen de nadelen.

Deltares heeft de beschikking over ComFLOW. Dat is een numerieke methode waarmee de stroming van een vloeistof met een willekeurige configuratie van het vrij oppervlak kan worden gesimuleerd. Dat is precies wat nodig is voor simulaties van overslag, omdat als de vloeistof uit de tank de tankputwand raakt, deze daarna alle kanten op schiet.

Om het doel van het onderzoek te bereiken moeten de volgende stappen worden genomen:

1. validatie van ComFLOW voor overslag na falen van verticale opslagtanks
2. een gevoeligheidsanalyse voor het overslagvolume als functie van tankhoogte, tankputgrootte en dergelijke.
3. onderzoek naar maatregelen om overslag te beperken
4. toepassen van ComFLOW voor een praktijksituatie.

Bovenstaande stappen zijn beschreven in dit rapport.

## 1.3 Definities

In dit eerste hoofdstuk zijn al enkele termen uit het jargon voor verticale opslagtanks gehanteerd. Nu worden deze termen gedefinieerd, zodat zij in het verdere rapport kunnen worden gebruikt zonder uitleg.

In het rapport spreken wij consequent van vloeistof en niet van het soort vloeistof zoals water of olie. Dit wordt gedaan omdat er in opslagtanks zeer veel verschillende soorten vloeistof worden opgeslagen, maar het soort vloeistof maakt in veel gevallen geen verschil uit voor de dynamica.

Een opslagtank, of een tank, is een cilindervormige constructie waarin vloeistof is opgeslagen. De tank heeft een hoogte, de tankhoogte, en een straal, de tankstraal. De vloeistof binnen de tank heeft een hoogte die niet noodzakelijk gelijk is aan de tankhoogte; dit noemen we de vulhoogte. De vulhoogte is bepalend voor de dynamica van de vloeistof na falen van de tank.

Tanks staan in een tankput. Dat is een bak waarin vloeistof die uit de tank lekt, kan worden opgevangen. Wij spreken van tankput, ondanks dat deze vaak niet verdiept is aangelegd ten opzichte van het maaiveld. Vervolgens wordt de term tankputhoogte gehanteerd voor de verticale afstand tussen de bodem van de tankput en het hoogste punt van de tankput (vaak de hoogte van de muur of het dijklichaam om de tank). De tankputhoogte ten opzichte van de tankhoogte is belangrijk voor de hoeveelheid overslag, zo zal uit dit rapport blijken.

Overslag is het fenomeen dat vloeistof buiten de tankput terecht komt. De hoeveelheid overslag wordt overslagvolume genoemd. Soms wordt het overslagvolume uitgedrukt als percentage van het volume opgeslagen vloeistof; dat noemen we overslagpercentage.

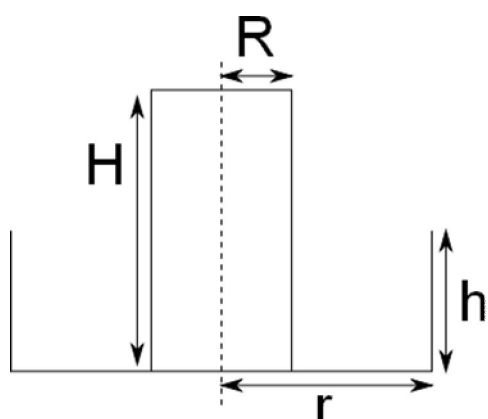
De tankput is vaak een vierkante bak. In dit rapport worden geen andere vormen van de tankput beschouwd. De wanden van de bak noemen we tankputwand. Soms zijn de wanden van een tankput uitgevoerd als een dijkje met taluds. Dan nog spreken we van tankputwand, maar deze specificeren we met de wandhelling. Voor een verticale tankputwand is de wandhelling  $90^\circ$ ; dit is de hoek van de wand met het maaiveld. Voor de uitvoering van de tankput met taluds spreken we van een tankputwand met een helling van bijvoorbeeld  $45^\circ$ . In dit rapport worden geen andere hellingen van de tankputwand beschouwd dan  $105^\circ$ ,  $90^\circ$  en  $45^\circ$ . Merk op dat bij  $105^\circ$  de tankputwand naar binnen helt; de overwegingen daarvoor komen in Hoofdstuk 5 aan bod.

Voor de parameters die het belangrijkste zijn voor overslag wordt een symbool gebruikt. Hier volgt de lijst met symbolen en de parameter die zij voorstellen met de eenheid waarin zij worden uitgedrukt:

- H: tankhoogte [m]
- h: tankputhoogte [m]
- R: tankstraal [m]
- r: kortste afstand van het middelpunt van de tank tot de tankputwand [m].

De afstand van het middelpunt van de tank tot de tankputwand heeft enige uitleg. De tankput is altijd een rechthoekige bak. De afstand van het middelpunt van de tank tot de tankputwand is dus niet langs de hele wand gelijk. Parameter r is de kortste afstand van het middelpunt van de tank tot de tankputwand. Voor een vierkante tankput is de grootste afstand daarmee  $r\sqrt{2}$ . Als de tankputwand zelf enig volume van betekenis heeft, bijvoorbeeld voor de uitvoering van een wand met taluds, dan wordt altijd de afstand tot het midden van de tankputwand bedoeld. Omdat in onze simulaties een dijkje altijd als een driehoek wordt geschematiseerd, valt het midden van de tankputwand samen met de naar boven gerichte punt van de driehoek.

De symbolen voor de belangrijkste parameters zijn weergegeven in Figuur 1.2.



Figuur 1.2 Belangrijkste parameters om tank en tankput te beschrijven.

De resultaten voor overslag worden gepresenteerd als functie van dimensieloze kentallen. Zo blijkt de relatieve tankputhoogte  $h/H$  een belangrijke parameter te zijn, die in veel gevallen maatgevend is voor de hoeveelheid overslag. Een andere parameter die gebruikt wordt is de relatieve tankstraal  $R/H$ . Het eerder genoemde overslagpercentage is natuurlijk ook een dimensieloze parameter; voor deze parameter wordt het overslagvolume gedeeld door het volume opgeslagen vloeistof.

#### 1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt een korte beschrijving van ComFLOW gegeven en wordt uitgelegd waarom ComFLOW goed toegepast kan worden voor simulaties met overslag na falen van opslagtanks.

Daarna is in hoofdstuk 3 een validatiestudie opgenomen waarin ComFLOW wordt vergeleken met experimentele gegevens. In deze experimenten worden stromingsprocessen beproefd die ook voorkomen bij het falen van opslagtanks. Het is belangrijk dat ComFLOW deze stromingsprocessen kan representeren en dat wordt in dit hoofdstuk aangetoond.

Hoofdstuk 4 bevat een gevoeligheidsanalyse waarin voor overslag de afhankelijkheid van parameters als tankhoogte wordt onderzocht. In dit hoofdstuk staan ook simulaties beschreven waarin de falende tank achter andere tanks in de tankput staat, en simulaties waarin de afhankelijkheid van viscositeit wordt bekeken.

Hoofdstuk 5 beschrijft het onderzoek naar verschillende maatregelen om overslag te beperken, zogeheten mitigerende maatregelen.

Hoofdstuk 6 beschrijft drie situaties uit de praktijk die zijn aangeleverd door Rijkswaterstaat. Voor deze situaties wordt een simulatie gedaan voor een scenario met een falende tank. Uit de uitvoer, die tijdens de simulatie wordt verkregen, kan worden afgeleid wat het overslagvolume is na falen van de tank.

Aan het eind van het rapport zijn de voornaamste conclusies en aanbevelingen van het onderzoek samengevat in Hoofdstuk 7.



## 2 Beschrijving van ComFLOW

### 2.1 Inleiding

Bij het opstellen van het plan van aanpak voor het onderzoek naar overslag als gevolg van het falen van verticale opslagtanks, is naar voren gekomen dat ComFLOW een geschikt model is voor het vaststellen van overslag. In dit hoofdstuk wordt uitgelegd waarom. De achtergrond van ComFLOW wordt gepresenteerd en we laten enige toepassingen zien waarvoor ComFLOW in het verleden met succes is toegepast. Voor meer informatie over ComFLOW wordt verwezen naar Kleefsman *et al.* (2005)

### 2.2 Vergelijkingen die de fysica beschrijven

In ComFLOW is een numerieke methode geïmplementeerd die gebaseerd is op de Navier-Stokes vergelijkingen. Deze vergelijkingen beschrijven behoud van massa en behoud van impuls voor vloeistoffen. In dit rapport worden zij in conservatieve vorm gepresenteerd. Voor massabehoud geldt de continuïteitsvergelijking:

$$\oint_{\Gamma} u \cdot n dS = 0 \quad (2.1)$$

Hierin is  $u$  de snelheidsvector,  $n$  een vector die de richting loodrecht op het oppervlak van een controlevolume beschrijft en  $\Gamma$  de afmeting van dat oppervlak  $S$ . Merk op dat  $dS$  een infinitesimaal klein deel is van dat oppervlak.

De vergelijking die impulsbehoud beschrijft, is als volgt:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial u}{\partial t} dV + \oint_{\Gamma} u(u \cdot n) dS = \frac{1}{\rho} \oint_{\Gamma} (\mu \nabla u \cdot n - pn) dS + \int_{\Omega} F dV \quad (2.2)$$

In vergelijking (2.2) is  $\Omega$  de maat van het controlevolume  $V$ ,  $\rho$  is de dichtheid,  $\mu$  de dynamische viscositeit,  $p$  de druk en  $F$  is een externe krachtvector. In veel gevallen is de zwaartekracht onderdeel van de vector voor de externe kracht. Merk op dat  $dV$  een infinitesimaal klein deel is van het volume  $V$ .  $\nabla$  is de gradiënt-operator. Met deze operator kunnen locale veranderingen van een grootheid worden weergegeven.

Tot slot geven we, naast de Navier-Stokes vergelijkingen, de vergelijking waarmee het vrij oppervlak verplaatst word. Deze is:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial F}{\partial t} dV + \oint_{\Gamma} (uF) \cdot n dS = 0 \quad (2.3)$$

Hierin is  $F$  een functie die gelijk is aan 1 beneden het vrij oppervlak en gelijk aan 0 boven het vrij oppervlak.

Deze vergelijkingen worden opgelost in ComFLOW. Zij kunnen niet exact worden berekend; daarom worden zij benaderd met een numerieke methode.

### 2.3 Numerieke methode in ComFLOW

In ComFLOW worden de vergelijkingen voor massabehoud en impulsbehoud met de *Finite Volume* methode benaderd op een Cartesisch rooster in 3D. De roosterlijnen lopen per richting dus allen parallel. Er wordt een methode gehanteerd om op een dergelijk rooster willekeurige geometrieën met een goede nauwkeurigheid te benaderen. Dit is de *cut-cell*

method, zie Verstappen en Veldman (2003). In Figuur 2.1 is een afbeelding gegeven van hoe een geometrie door het rooster snijdt.

E	E	E	E	E
E	E	S	B	B
S	S	F	F	B
F	F	F	F	F
F	F	F	F	F

Figuur 2.1 Cut-cell methode om een constructie in een Cartesisch rooster te representeren.

In Figuur 2.1 zijn roostercellen weergegeven. Het lichtgrijze gebied in de figuur is vloeistof; het donkergrijze gebied is constructie. Sommige roostercellen worden doorsneden door constructie. In het deel van de cel dat wordt ingenomen door constructie kan geen vloeistof aanwezig zijn. Dat is de essentie van de cut-cell methode, dat een administratie wordt bijgehouden van welk deel van de roostercel met vloeistof gevuld kan zijn en welk deel van de cel gesloten is voor vloeistof.

In de roostercellen staan labels. Deze labels geven aan waar in het rekendomein zich vloeistof bevindt. Alleen in de cellen waar zich water bevindt, in F-cellen en S-cellen, wordt gerekend. Met behulp van de basisvergelijkingen worden in het domein drukken en vervolgens snelheden uitgerekend die bij de vloeistofconfiguratie op dat moment passen. Daarna wordt met behulp van de snelheden de vloeistof verplaatst. Dat gebeurt volgens de *Volume-of-Fluid* methode, zie Hirt en Nichols (1981).

De simulatie is een tijdsintegratie met tijdstappen volgens de *Forward Euler* methode. Gedurende een simulatie zijn dit de stappen die in elke tijdstap worden doorlopen:

1. druk uitrekenen die past bij de vloeistofverdeling en de snelheden op dat moment
2. nieuwe snelheden uitrekenen
3. vloeistof verplaatsen.

De uitvoer van ComFLOW die wij kunnen krijgen zijn ook deze drie grootheden: druk, snelheid en vloeistofverdeling. Het is ook mogelijk om enkele afgeleide grootheden te laten bepalen, zoals de vloeistofhoogte op een locatie of de totale kracht op een constructie in een zekere richting. Hierbij geldt dat de kracht de resultante is van een drukintegratie over het oppervlak van de constructie.

## 2.4 Beperkingen van ComFLOW

ComFLOW is zeer geschikt voor situaties waarbij vloeistof met grote vaart tegen een constructie botst. Deze situaties worden gedomineerd door massastraagheid en zwaartekracht. Door de benaderingen in ComFLOW van met name de niet-lineaire term in de impulsvergelijking, is het minder geschikt voor situaties waarbij schuifspanningen domineren.

Met andere woorden: ComFLOW is zeer geschikt om een golfklap op een constructie door te rekenen, maar minder geschikt voor de wervelstraat achter een cilinder in een uniforme stroming.

Voor het falen van verticale opslagtanks, en de overslag die daarna optreedt, zijn de beperkingen van ComFLOW geen bezwaar. Het gaat in alle gevallen om vloeistof die eerst versnelt en vervolgens met grote vaart tegen constructies botst.

## 2.5 Toepassingen van ComFLOW

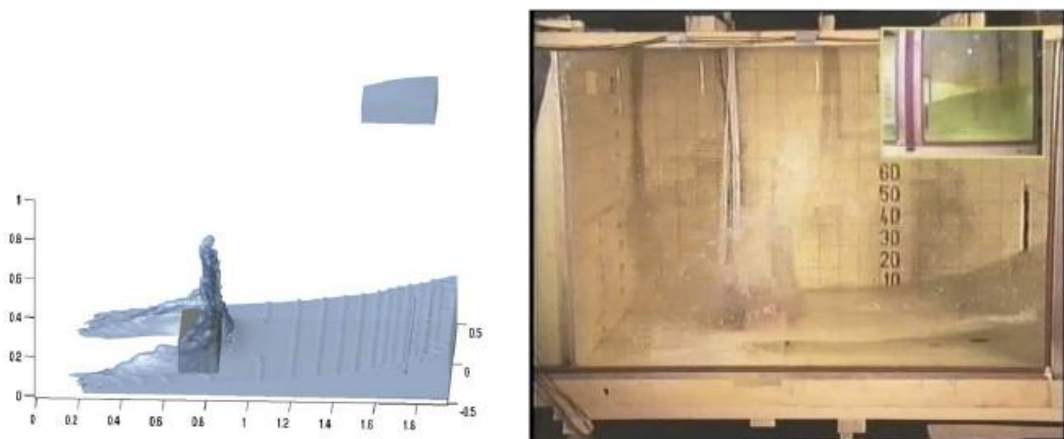
De eerste toepassing van ComFLOW was voor een met vloeibare brandstof gevulde satelliet. Hierbij was het belangrijk om de invloed van het klotsen van de vloeistof in de satelliet op de beweging van de satelliet vast te stellen.

Daarna is ComFLOW met name voor offshore toepassingen ingezet, zoals de krachten op een drijvend productieplatform als gevolg van extreme golven. Sinds een aantal jaar wordt ComFLOW bij Deltares gebruikt en ontwikkeld om krachten als gevolg van golven bij kustwaterbouwconstructies vast te stellen.

Sinds het begin van ComFLOW in 1995 tot nu zijn er vele validatiestudies geweest, waarin rekenresultaten van ComFLOW werden vergeleken met metingen. De meest relevante validatie voor de studie naar falende opslagtanks is die van de *dambreak tegen een obstakel*.

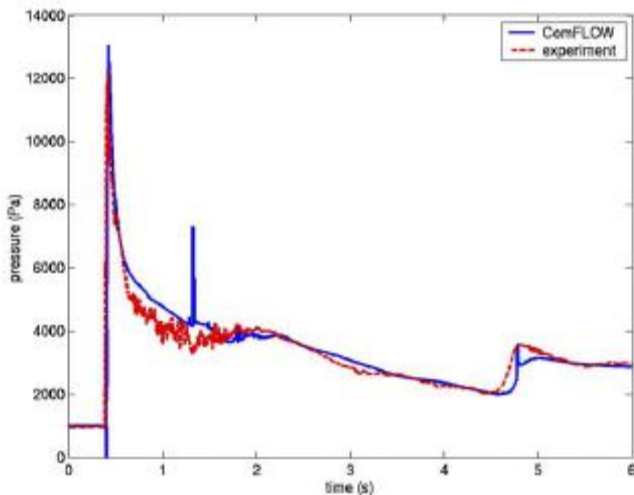
Het “dambreak”-probleem is een klassiek experiment, waarvoor, voor sterk vereenvoudigde omstandigheden, een analytische oplossing is. Hij wordt zeer vaak gebruikt om numerieke methodes mee te verifiëren. Bij een dambreak wordt een hoeveelheid water die volledig in rust is en een rechthoekige configuratie heeft, op een zeker moment losgelaten (door bijvoorbeeld een schuif weg te trekken). Vanaf dat moment zal de vloeistof zich in beweging zetten.

Bij MARIN is ooit het experiment daadwerkelijk uitgevoerd. Er zijn verschillende configuraties van het experiment geweest en een ervan was met een obstakel in de baan van de stroming. Een plaatje van het experiment, met daarnaast de simulatie, is weergegeven in Figuur 2.2.



Figuur 2.2 Dambreak tegen een obstakel. Links de ComFLOW simulatie, rechts het experiment. Getoond is het deel links van de schuif. De inzet in de rechterbovenhoek is het leegstromende reservoir.

Het obstakel was uitgerust met een groot aantal druksensoren, waar de druk als functie van de tijd werd geregistreerd. De registratie van de druk in een van de sensoren in de zijwand van het blokje is weergegeven in Figuur 2.3. Hierin worden ook de rekenresultaten van ComFLOW voor de druk in hetzelfde punt weergegeven.

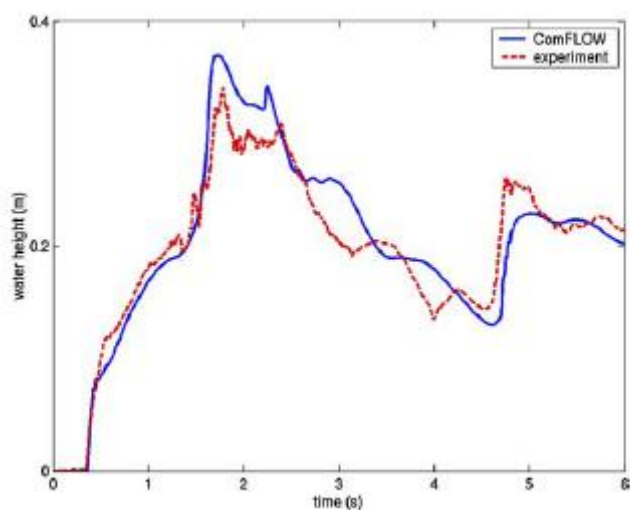


Figuur 2.3 Registratie van de druk in de tijd. Druk is gemeten in de zijwand van het obstakel. Gemeten druk wordt vergeleken met de druk die door ComFLOW werd uitgerekend.

Als de simulatie net begonnen is, wordt er nog geen druk geregistreerd, omdat er nog geen vloeistof bij het obstakel is aangekomen. Vervolgens botst de vloeistof tegen de constructie aan. Het signaal daarna, tussen 0.5s en 2s, is onrustig vanwege alle druppels die in het rond vliegen. In het ComFLOW-signaal is bij 1.2s een drukpiek te zien. Dit is een numeriek artefact dat een duur van één tijdstap heeft. Het heeft geen gevolgen voor het resterende deel van de simulatie, omdat de druk globaal hoger wordt en de drukgradiënten niet veranderen. Verder komen de gemeten druk en het ComFLOW-signaal goed overeen.

In het experiment werden ook waterstanden bepaald rond het obstakel. In Figuur 2.4 is een registratie afgebeeld van een van deze waterstanden. De waterstand begint bij nul na aanvang van het experiment. Dan komt er een grote golf water voorbij, terwijl de vloeistof langs en over het obstakel stroomt. Ook de registratie van de waterstand in het experiment en de rekenresultaten voor de waterstand in ComFLOW op dezelfde locatie komen goed overeen.





Figuur 2.4 Waterstand in het dambreak-experiment dichtbij het obstakel. Gemeten waarden worden vergeleken met rekenresultaten van ComFLOW.

Situaties voor overslag na falen van een verticale opslagtank lijken sterk op bovenstaand experiment voor de dambreak tegen een obstakel. Op basis van de getoonde resultaten menen wij ComFLOW te kunnen inzetten voor het onderzoek naar overslag na falen van tanks. Voor meer informatie over het beschreven experiment verwijzen we naar Kleefsman *et al.* (2005).



### 3 Validatie van ComFLOW voor overslag en leegstromen

#### 3.1 Inleiding

Validatie van numerieke methoden is belangrijk om vertrouwen te krijgen in de resultaten van een methode. Bij valideren worden rekenresultaten vergeleken met experimentele resultaten. Hetgeen in het experiment beproefd wordt, dient zo dicht mogelijk bij de toepassing te blijven waarvoor het numerieke model later wordt ingezet om er zeker van te zijn dat de belangrijkste processen daadwerkelijk getoetst worden.

De belangrijkste stromingsprocessen die optreden bij falen van een opslagtank zijn:

- het leeglopen van de gefaalde tank
- impulsieve interactie van de stroming met andere tanks in de tankput
- overslag van de tankputwand
- stroming van de vloeistof over het terrein buiten de tankput.

Voor de impulsieve interactie van de stroming met een obstakel is ComFLOW al uitgebreid gevalideerd. Zie daarvoor het hoofdstuk met de beschrijving van ComFLOW en Kleefsman *et al.* (2005). In de literatuur zijn twee experimenten gevonden die relevant zijn voor de overige stromingsprocessen die optreden na het falen van een opslagtank. Het eerste experiment is beschreven in Soares-Fraza (2007). In dit experiment wordt overslag gesimuleerd. In paragraaf 3.2 van dit hoofdstuk wordt het experiment nagerekend met ComFLOW.

Het tweede experiment is beschreven in Soares-Fraza en Zech (2007). In dit laatste experiment wordt leegstromen van een reservoir over een terrein gesimuleerd. Benedenstreams van het reservoir staat een rechthoekig obstakel dat de stroming zal beïnvloeden. De ComFLOW-resultaten voor dit experiment staan in paragraaf 3.3

Soares-Fraza heeft de meetgegevens van de experimenten aan Deltares beschikbaar gesteld. Daarvoor willen wij graag onze dank uitspreken.

#### 3.2 Validatie voor overslag

Het experiment van Soares-Fraza (2007) is als volgt opgezet. Er is een reservoir met vloeistof achter een rechte wand. Op enige afstand van de wand staat een obstakel in de vorm van een driehoek. Achter het driehoekige obstakel is nog een reservoir met vloeistof, maar met een veel lagere hoogte van de vloeistofspiegel. Tussen de wand en het driehoekig obstakel is initieel geen vloeistof aanwezig. Er zijn in het experiment drie vloeistofhoogtemeters aangebracht. Eén staat voor het obstakel en twee staan in de vloeistof achter het obstakel. De opstelling is in Figuur 3.1 schematisch weergegeven. Hierin zijn de vloeistofhoogtemeters aangeduid met G1, G2 en G3.



Figuur 3.1 Schematische weergave van het experiment van Soares-Fraza (2007).

De hoogte van de vloeistof achter de rechte wand is 0.111m. De hoogte van het obstakel is 0.065m en de hoogte van de vloeistof achter het driehoekige obstakel is 0.02m. De driehoek is 0.90m breed en het midden van de driehoek is op een afstand van 2.06m bij de wand vandaan. Het reservoir achter de wand is 2.39m lang. Het reservoir achter het obstakel is 0.70m lang. De totale opstelling is 5.6m lang. De posities van de vloeistofhoogtemeters zijn  $x_1=3.185\text{m}$ ,  $x_2=2.535\text{m}$  en  $x_3=1.545\text{m}$  ten opzichte van de wand van het reservoir. Daar ligt  $x=0\text{m}$ .

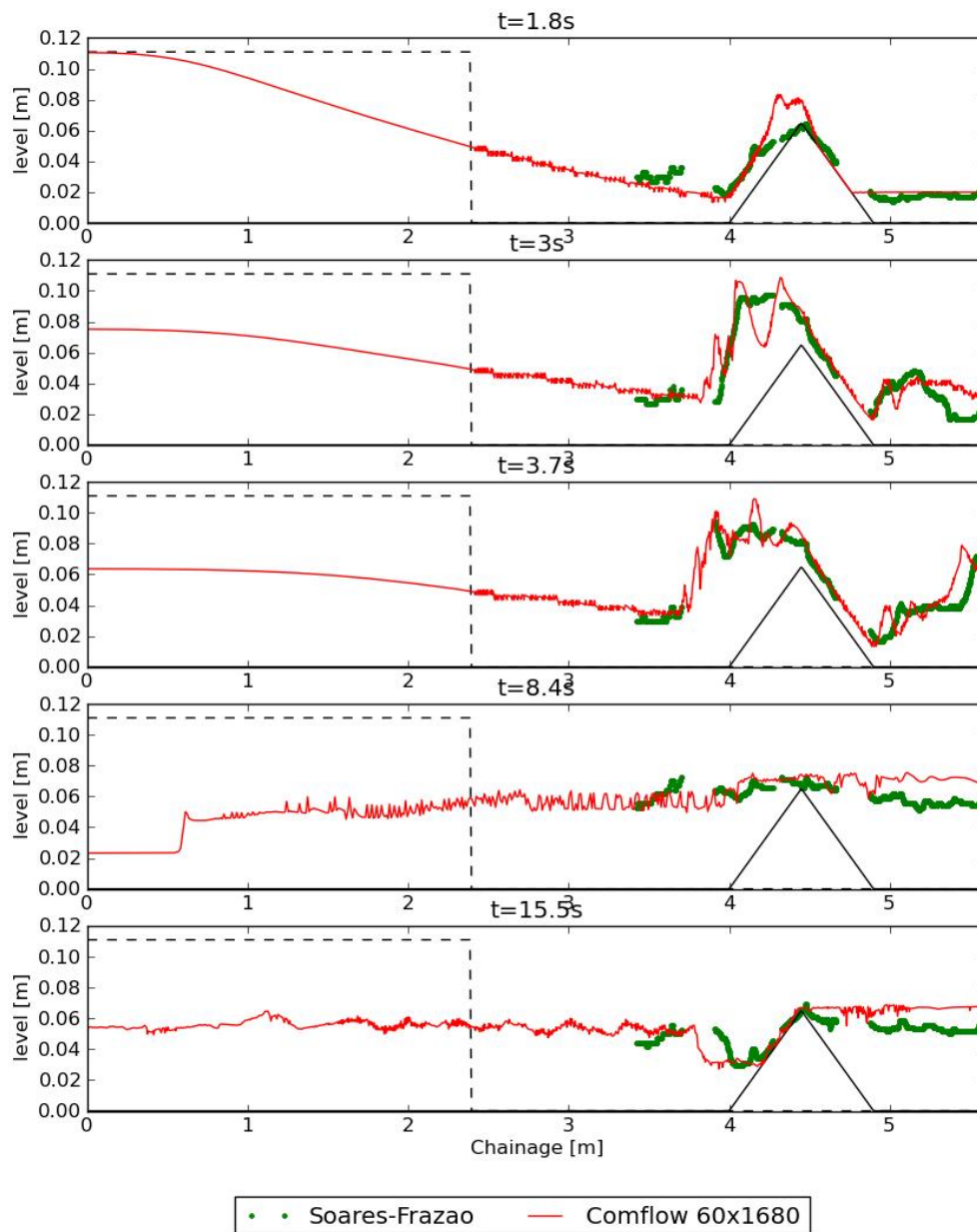
Bij het begin van het experiment wordt de wand waarachter de vloeistof rust, omhoog getrokken. De vloeistof zet zich in beweging en stroomt richting het driehoekig obstakel. Vervolgens treedt er overslag van het obstakel op en stroomt er vloeistof in het reservoir achter het obstakel. Nadat de vloeistof de achterwand getroffen heeft, stelt zich in het reservoir achter het obstakel een golfbeweging in. Het experiment duurt in totaal 45 seconden.

Dezelfde opstelling is in ComFLOW gemodelleerd. Omdat er in de richting dwars op de lengterichting van de opstelling geen variatie optreedt, is ervoor gekozen de som in 2D te doen. De lengterichting is dan de x-richting, de hoogterichting noemen we de z-richting. Het rekendomein is even lang als de opstelling van het experiment. De hoogte van het domein is 0.20m.

De roosterafstand in x-richting en in z-richting is 0.003m. In totaal zijn er dan 1680 bij 60 roostercellen gebruikt. De gesimuleerde tijd is 45 seconden. De tijdstap gedurende de simulatie was nooit groter dan 0.009s.

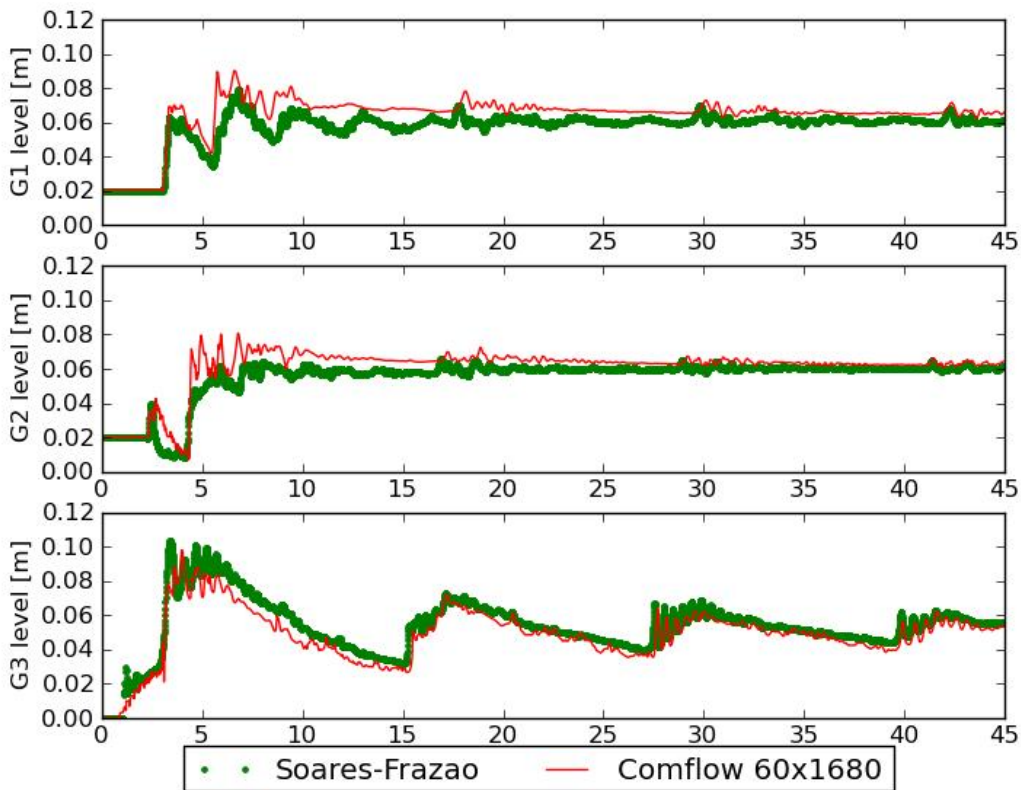
De rekenresultaten van ComFLOW worden in Figuur 3.2 vergeleken met de metingen. In Figuur 3.2 zijn afbeeldingen van de vloeistofhoogte in het hele domein op verschillende tijdstippen in relatie gebracht met metingen van de vloeistofhoogte ter plaatse van het driehoekig obstakel. Het reservoir met de oorspronkelijke vloeistofhoogte is met een onderbroken lijn in de afbeeldingen weergegeven.

De vloeistofbeweging is zeer gecompliceerd. De details in het vloeistofoppervlak uit de simulatie die kleiner zijn dan de grootte van het obstakel, komen niet altijd even goed overeen met de details uit de metingen. Variaties in het berekende vloeistofoppervlak ter grootte van het driehoekig obstakel komen wel goed overeen met de metingen. De overeenkomst tussen meting en berekening is daarom in globale zin goed te noemen.



Figuur 3.2 Vergelijking tussen het berekende en gemeten vloeistofoppervlak nabij het driehoekig obstakel op verschillende tijdstippen. Het oorspronkelijke reservoir is met een onderbroken lijn in de afbeeldingen weergegeven.

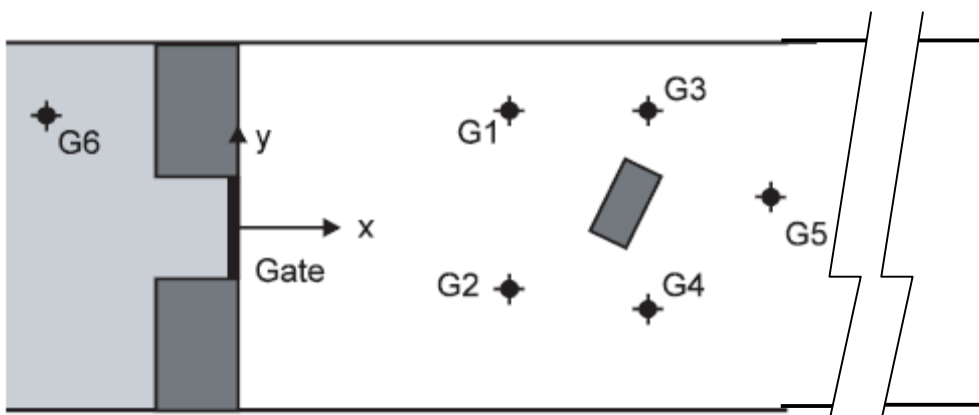
In Figuur 3.3 zijn de metingen van de drie vloeistofhoogtemeters in verband gebracht met de rekenresultaten op dezelfde posities. De figuur geeft de vloeistofhoogte als functie van de tijd. De zeer korte variaties in de berekening komen niet altijd overeen met de metingen. De langere variaties in de berekening, zoals de periode dat overslag van het obstakel optreedt tussen 3s en 5s, komen wel goed overeen met de meting. De overeenkomst tussen berekening en meting is daarom in globale zin goed te noemen.



Figuur 3.3 Vergelijking tussen berekende en gemeten vloeistofhoogte op drie meetlocaties als functie van de tijd.

### 3.3 Validatie van leegstromen van een reservoir en de vervolgstroming over het terrein

Het volgende experiment dat gebruikt wordt ter validatie is gepresenteerd in Soares-Frazaio en Zech (2007). In de opstelling van het experiment is een hoeveelheid vloeistof achter een poort in een reservoir opgeslagen. De poort beslaat slechts een deel van de gehele breedte van de opstelling. Het overige deel van de breedte bestaat uit vaste wanden. Op enige afstand van de poort staat een rechthoekig obstakel. Het obstakel, dat een hoek maakt ten opzichte van de oriëntatie van de poort, staat in een hoeveelheid vloeistof met een zeer veel kleinere hoogte dan de hoogte van de vloeistof in het reservoir. Rond het obstakel staan 5 vloeistofhoogtemeters opgesteld. Een zesde hoogtemeter staat in het reservoir. Een bovenaanzicht van de opstelling is weergegeven in Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Boven-aanzicht van de opstelling van Soares-Frazaio en Zech (2007)

De totale opstelling is 35.8m lang en 3.6m breed. Het reservoir is 7.7m lang en de poort die het reservoir scheidt van het overige deel van de opstelling is 1.0m breed. Het midden van het rechthoekig obstakel heeft een afstand van 4.0m tot de poort. De coördinaten van de hoekpunten van het obstakel ten opzichte van de oorsprong die in Figuur 3.4 is aangegeven, staan in Tabel 3.1. De posities van de hoogtemeters in dat assenstelsel staan weergegeven in Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Hoekpunten van het obstakel

x [m]	y [m]
3.44	-0.05
3.80	-0.23
4.15	0.49
3.79	0.67

Tabel 3.2 Posities van de vloeistofhoogtemeters

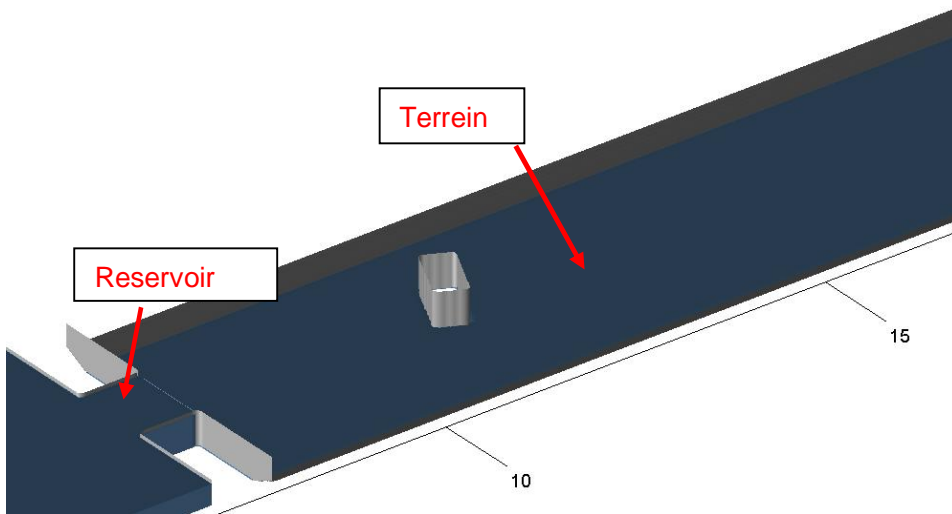
Name	x [m]	y [m]
G1	2.65	1.15
G2	2.65	-0.60
G3	4.00	11.15
G4	4.00	-0.80
G5	5.20	0.30
G6	-1.87	1.10

De hoogte van de vloeistof in het reservoir is 0.40m. De hoogte van de vloeistof buiten het reservoir is 2cm.

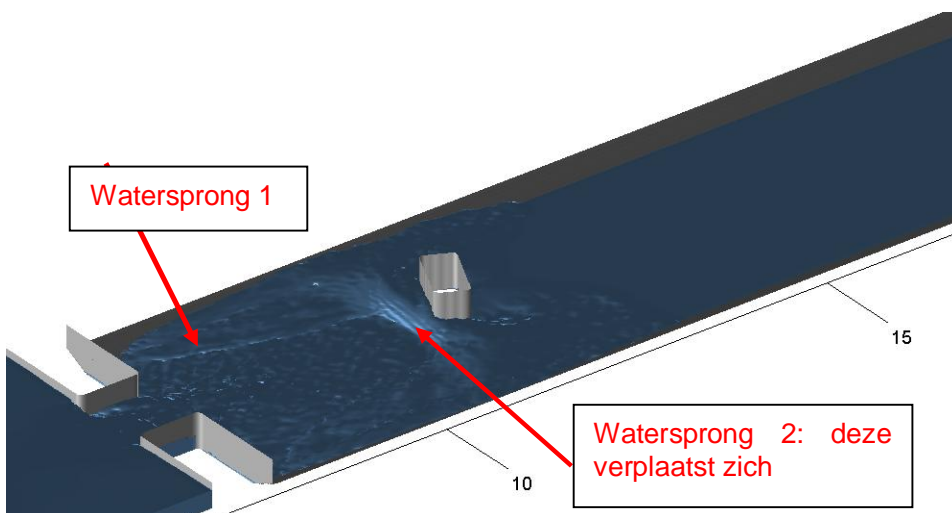
Bij aanvang van het experiment wordt de poort opengetrokken. De vloeistof in het reservoir zet zich in beweging en stroomt richting het obstakel. Vervolgens worden gedurende 30 seconden metingen gedaan met de vloeistofhoogtemeters rond het obstakel.

Met ComFLOW wordt een simulatie gedaan met dezelfde opstelling. De hoogte van het domein is 0.05m hoger dan de hoogte van de vloeistof in het reservoir; de domeinhoogte is dus 0.45m. Voor de hoogte van het obstakel is dezelfde hoogte gekozen als de hoogte van het domein. Het rooster is uniform in de drie hoofdrichtingen. In x-richting en in y-richting is de afstand 0.051m en in verticale richting is de roosterafstand 0.011m. In totaal zijn er 699 bij 70 bij 40 roostercellen gebruikt, bijna 2 miljoen. De gesimuleerde tijd is 30s. De tijdstappen gedurende de simulatie zijn variabel, maar de tijdstap was nooit groter dan 0.01s.

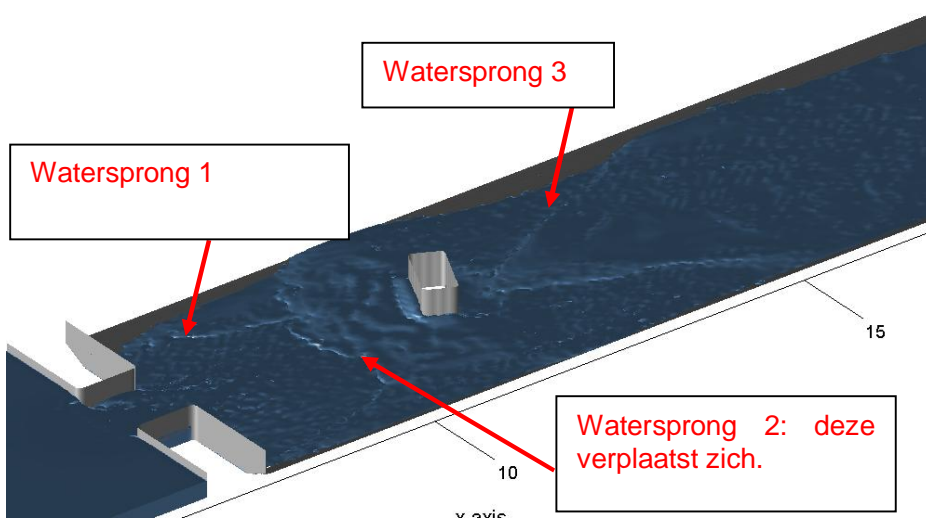
Afbeeldingen van kenmerkende momenten gedurende de simulatie zijn weergegeven in Figuur 3.5 tot 3.8.



Figuur 3.5 Initiële vloeistofverdeling op het terrein.

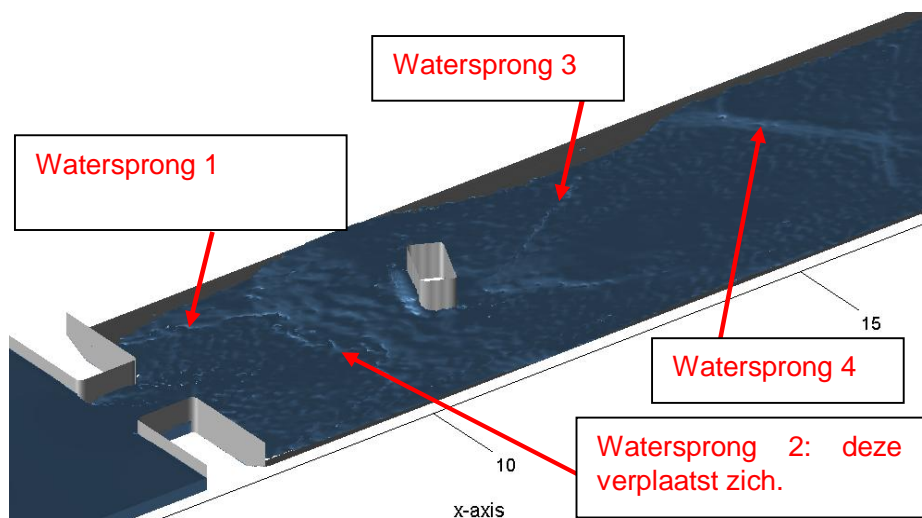


Figuur 3.6 Vloeistofverdeling op  $t=3s$ .



Figuur 3.7 Vloeistofverdeling op  $t=6s$ .





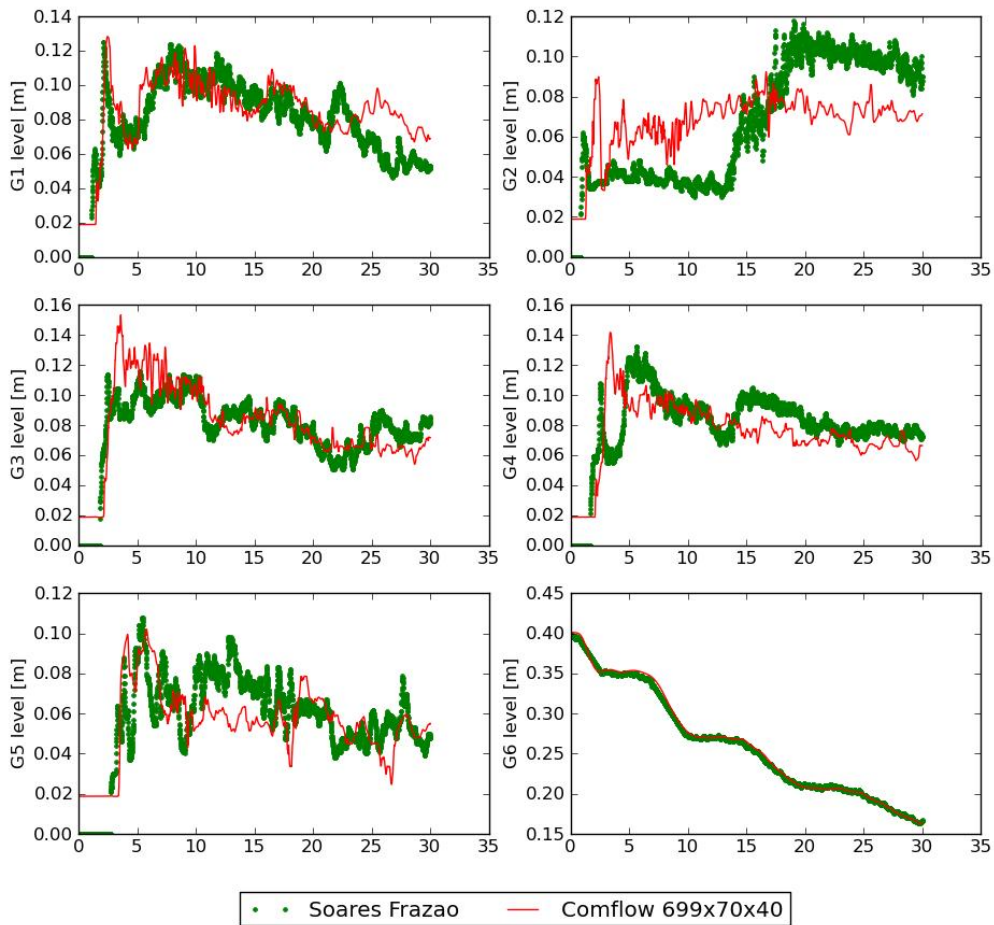
Figuur 3.8 Vloeistofverdeling op  $t=9s$ .

De verdeling van vloeistof op  $t=0s$  is weergegeven in Figuur 3.5. Dan begint de simulatie en stroomt de vloeistof uit het reservoir richting het obstakel. Aan weerszijden van de opstelling ontstaat een watersprong die een scheiding is tussen sneller en langzamer stromende vloeistof; dit is te zien in Figuur 3.6. Zodra de uitgestroomde vloeistof het obstakel treft, ontstaat aan bovenstroomse zijde van het obstakel eveneens een watersprong die zich vervolgens richting het reservoir verplaatst.

Daarna ontstaat ook achter het obstakel een patroon met aan weerszijden een watersprong, zie Figuur 3.7. Uiteindelijk ontstaan er op het terrein in de vloeistof rond het obstakel vier systemen met watersprongen. Deze zijn allen weergegeven in Figuur 3.8.

De vergelijking tussen de metingen en de rekenresultaten op de locaties van de vloeistofhoogtemeters is afgebeeld in Figuur 3.9. In de figuren zijn vloeistofhoogtes weergegeven als functie van de tijd. Aan de tijdseries is te zien dat de stroming zeer gecompliceerd is met zeer veel variaties. De korte variaties in de meting en de berekening komen niet allen overeen. De langere variaties lijken beter op elkaar. Daarom is de overeenkomst tussen metingen en berekeningen in globale zin goed te noemen.

Alleen de registratie van de vloeistofhoogte in meetpunt G2 komt niet goed overeen met de door ComFLOW berekende waarden. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat meetpunt G2 nabij een watersprong ligt. Daar treedt over een kleine afstand een grote variatie op. Er zijn twee mogelijke verklaringen: de eerste mogelijkheid is dat ComFLOW de positie van de watersprong niet helemaal goed voorspelt. De andere mogelijkheid is dat de positie van de meetlocatie niet juist is gerapporteerd. Omdat de overeenkomst tussen meting en berekening in de andere meetpunten wel redelijk is, is het verschil in waarden op locatie G2 niet verder onderzocht.



Figuur 3.9 Vloeistofhoogtes als functie van de tijd op 5 meetlocaties rond het obstakel. G6 is binnen het reservoir.

## 4 Gevoeligheidsanalyse voor overslag

### 4.1 Inleiding

In het voorgaande is met een validatie aangetoond dat ComFLOW kan worden ingezet voor het simuleren van de stromingsprocessen die bij tankfalen van belang zijn. In dit hoofdstuk laten wij zien hoe het overslagpercentage verandert als parameters als tankhoogte en tankputhoogte veranderen. We noemen deze studie een gevoeligheidsanalyse voor overslag.

In dit onderzoek worden drie faalmechanismes bestudeerd:

1. volledig falen
2. falen van de lasnaad in de tankwand
3. falen van de aanhechting tussen bodem en wand.

Met volledig falen wordt de situatie bedoeld dat de tank zijn constructieve eigenschappen volledig verloren heeft en dat (onderdelen van) de tank geen invloed meer uitoefenen op de stroming van de vloeistof. Dat zou misschien bij een explosie kunnen gebeuren. Modellen van volledig falen treft men veelvuldig aan in de literatuur, zie bijvoorbeeld Atherton *et al.* (2008). Het is echter onbekend of volledig falen een realistisch faalmechanisme is. Het is te verwachten dat (delen van) de tank de stroming altijd wel enigszins zullen beïnvloeden. Volledig falen zou daarom wel eens een onnodig conservatief model kunnen zijn. Om deze reden worden ook de twee andere mechanismes onderzocht.

Bij faalmechanismes 2 en 3 blijft een deel van de tank intact. De stroming van vloeistof wordt op deze manier beïnvloed door het resterende deel van de tank. Deze faalmechanismen zijn daadwerkelijk opgetreden, zie Tabel 1.1, en daardoor realistischer dan het mechanisme volledig falen. Door de gevolgen van deze mechanismes 2 en 3 te vergelijken met de gevolgen van volledig falen, kan beoordeeld worden of volledig falen onnodig conservatief is.

De faalmechanismen schematiseren we in ComFLOW en vervolgens zal, voor elk van de faalmechanismen, een aantal simulaties worden uitgevoerd om in kaart te brengen hoe het overslagvolume verandert als andere parameters veranderen. De faalmechanismen worden in afzonderlijke paragrafen behandeld.

Voor de faalmechanismen zullen we een aantal variaties onderzoeken met behulp van ComFLOW-simulaties. De tankput is in alle gevallen vierkant. De afstand van de tankputwand tot het middelpunt van de tank is daarom niet langs de gehele wand dezelfde. De kortste afstand van het middelpunt van de tank tot de tankputwand noemen we  $r$ . Deze wordt in dit hoofdstuk constant gehouden. De parameters die wel worden gevarieerd, zijn:

- tankhoogte  $H$
- tankstraal  $R$
- tankputhoogte  $h$
- helling van de tankputwand ( $45^\circ$ ,  $90^\circ$  of  $105^\circ$ ).

Voor elke variatie zal het overslagvolume worden vastgesteld. Op deze manier kan bekeken worden hoe het overslagvolume verandert als bijvoorbeeld de tankhoogte kleiner wordt. De hoeveelheid overslag wordt gepresenteerd als een percentage van het tankvolume en we zullen in het vervolg spreken van overslagpercentages.

Voor elke variatie wordt ook de maximale kracht per strekkende meter op de tankputwand gerapporteerd. Dit is de maximale kracht die gedurende de simulatie is opgetreden. De kracht is in alle gevallen maximaal als de vloeistof uit de tank voor het eerst tegen de wand aanstroomt.

De maximale kracht per strekkende meter wordt bepaald uit een drukintegratie over de tankputwand. Kracht is een uitvoervariabele van ComFLOW. Wij hebben deze voor elke strekkende meter van de tankputwand uitgevoerd en rapporteren alleen de grootste die optreedt langs de tankputwand en in de tijd. Kracht is een zinvolle parameter om verschillende tankputconfiguraties onderling met elkaar te vergelijken en geeft een goede indruk van de te verwachten belastingen op de tankputwand na falen van een tank. Om gevoel te krijgen voor de gerapporteerde kracht, is deze vergeleken met de maximale hydrostatische belasting per strekkende meter op de tankputwand. Deze is gelijk aan  $0.5 \cdot \rho \cdot g \cdot h^2$  wanneer de tankput volledig gevuld is. Hierin is  $\rho$  de dichtheid van de vloeistof,  $g$  de zwaartekracht en  $h$  de hoogte van de tankput.

De gerapporteerde kracht is niet meteen geschikt voor het constructief ontwerp van de tankputwand. Daarvoor heb je de verdeelde belasting, dat is druk, over de constructie nodig. De waarde van de druk varieert langs de gehele tankputwand. Het is met ComFLOW niet mogelijk om zoveel drukuitvoerpunten te specificeren, dat op een betrouwbare manier de maximale druk op de tankputwand is vast te stellen. Dat is de voornaamste reden waarom wij voor kracht en niet druk hebben gekozen om simulaties onderling te vergelijken.

Er zal gebruik gemaakt worden van enkele dimensieloze kentallen om de resultaten voor overslag te presenteren. Dat zijn: de relatieve tankputhoogte  $h/H$ , de relatieve tankstraal  $R/H$  en het relatieve tankputvolume  $V_p/V_t$ , met  $V_p$  het volume van de tankput en  $V_t$  het volume van de tank.

Voor alle simulaties werd het rekendomein gelijk gehouden. Het rekendomein meet 20m bij 20m in horizontale richting en 19m in verticale richting. De tankput is vierkant van vorm. De kortste afstand van het middelpunt van de tank tot het midden van de tankputwand bedraagt in alle gevallen 15m. In de praktijk is de afstand van de tank tot de tankputwand ook de moeilijkste parameter om aan te passen, omdat het direct gevolgen heeft voor het ruimtebeslag van het opslagterrein.

De roosterafmetingen zijn uniform in de drie hoofdrichtingen; in horizontale richting is de roosterafstand 0.2m en in verticale richting 0.1m. De simulatietijd was 20s, tenzij anders vermeld en de tijdstap is gedurende de simulatie niet groter geweest dan 0.01s.

Een overzicht van alle simulaties die voor dit hoofdstuk gemaakt zijn, staat in Appendix A. Daarin zijn overslag en maximale kracht opgenomen als functie van relatieve tankputhoogte, relatieve tankstraal, helling van de tankputwand en volume van de tankput.

In de tabellen van Appendix A zijn ook resultaten voor overslag uit Proteus opgenomen. Proteus is software van Rijkswaterstaat om risicoevaluaties voor terreinen met opslagtanks te verrichten. In Proteus is een eenvoudig polynoom opgenomen dat de hoeveelheid overslag geeft als functie van de relatieve tankputhoogte. De Proteus-resultaten voor overslag zijn in de tabel opgenomen om een snelle vergelijking tussen Proteus en ComFLOW te kunnen maken. De verwachting is dat de Proteus-resultaten afwijken van de ComFLOW resultaten, omdat de fysische grondslag voor Proteus beperkt is. Idealiter geeft Proteus een bovengrensbepaling voor overslag; dan wordt de risicoevaluatie conservatief uitgevoerd.

#### 4.2 Methode van variëren

In dit hoofdstuk is ervoor gekozen om de kortste afstand  $r$  van de tankputwand tot het midden van de tank constant te houden. Daarnaast is ervoor gekozen om dimensieloze parameters te variëren. Ten behoeve van een afleiding, definiëren we nu drie dimensieloze parameters,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

$\alpha$  is de relatieve tankputhoogte, ofwel:

$$\alpha = \frac{h}{H} \quad (4.1)$$

waarin  $h$  de tankputhoogte is en  $H$  de hoogte van de tank, beiden in meter.

$\beta$  is de relatieve tankstraal, of:

$$\beta = \frac{R}{H} \quad (4.2)$$

Hierin is  $R$  de straal van de tank.

Tot slot is  $\gamma$  het relatieve tankputvolume, of:

$$\gamma = \frac{V_p}{V_t} \quad (4.3)$$

met  $V_p$  het volume van de tankput en  $V_t$  het volume van de tank.

Het is mogelijk om waardes te kiezen voor deze drie dimensieloze parameters. Met deze waardes liggen, samen met de afstand  $r$ , verder alle parameters vast. Dat tonen wij aan door de tankputhoogte  $h$  uit te drukken in  $r$  en verder slechts dimensieloze parameters.

Als we ervan uitgaan dat de tankput een vierkante bak is met hoogte  $h$  en de tank een cilinder met hoogte  $H$ , dan kan het relatieve volume van de tankput kan als volgt geschreven worden:

$$\gamma = \frac{V_p}{V_t} = \frac{4r^2h}{\pi R^2H} \quad (4.4)$$

Door (4.2) anders te schrijven, krijgen wij een uitdrukking voor de straal van de tank:

$$R = \beta H = \frac{\beta h}{\alpha} \quad (4.5)$$

Substitutie van (4.5) in (4.4) geeft de volgende uitdrukking voor het relatieve tankputvolume:

$$\gamma = \frac{4r^2h}{\pi \left(\frac{\beta h}{\alpha}\right)^2 H} = \frac{4r^2\alpha^2 h}{\pi\beta^2 h^2 H} = \frac{4r^2\alpha^3}{\pi\beta^2 h^2} \quad (4.6)$$

Uit (4.6) kan nu de tankputhoogte worden opgelost::

$$h = \sqrt{\frac{4r^2\alpha^3}{\pi\beta^2\gamma}} \quad (4.7)$$

Nu is de tankputhoogte uitgedrukt in alleen  $r$  en de gedefinieerde dimensieloze parameters. Met (4.1) en (4.2) zijn dan vervolgens ook de andere parameters,  $H$  en  $R$ , vastgesteld.

In de grafieken in het vervolg van dit hoofdstuk zijn telkens twee lijnen getekend. Elke lijn verbindt waarden voor de overslag als functie van de relatieve tankputhoogte  $\alpha=h/H$  voor een vaste waarde van de overige twee. Voor de relatieve tankputhoogtes is altijd gekozen voor 0.1, 0.2, 0.3 en 0.4. Als wij nu voor de afstand tot de tankputwand  $r=15\text{m}$  kiezen, voor de relatieve tankstraal  $\beta=R/H=0.5$ , en voor het relatieve tankputvolume  $\gamma=V_p/V_t=140\%$  kiezen, dan zijn de parameters met dimensie zoals weergegeven in Tabel 4.1.

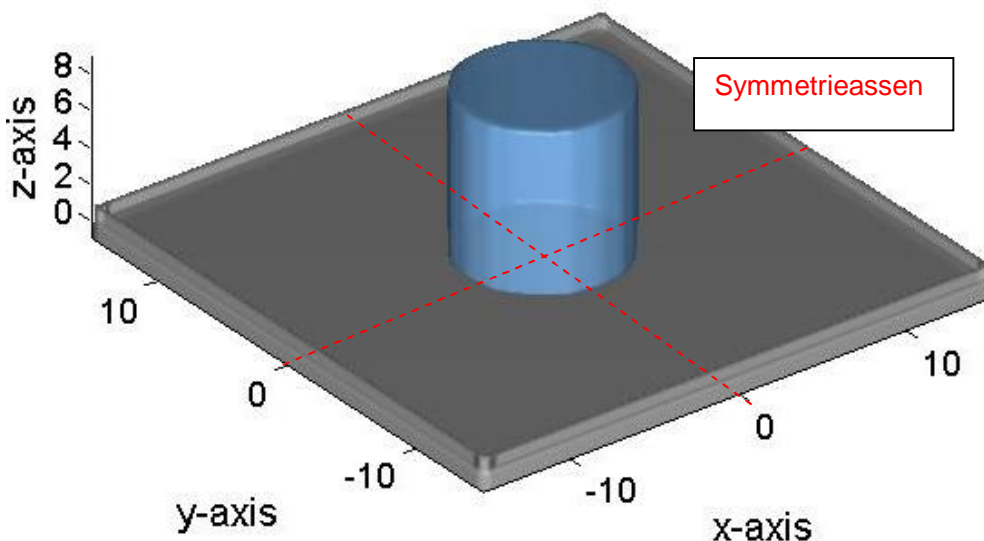
Tabel 4.1 Tank(put)parameters als functie van relatieve tankputhoogte (met  $R/h=0.5$  en  $V_p/V_t=140\%$ )

$h/H$ [-]	$h$ [m]	$H$ [m]	$R$ [m]	$V_p$ [m]	$V_t$ [m]
0.1	0.90	9.05	4.52	814	582
0.2	2.56	12.79	6.40	2303	1645
0.3	4.70	15.67	7.84	4231	3022
0.4	7.24	18.09	9.05	6514	4653

Met de parameters in Tabel 4.1 zijn de ComFLOW-simulaties opgezet. De overslag na falen van een tank wordt voor iedere combinatie van parameters bepaald en weergegeven in een grafiek. Deze grafieken vind u, voor ieder faalmechanisme afzonderlijk, in het vervolg van dit hoofdstuk.

### 4.3 Volledig falen van de tank

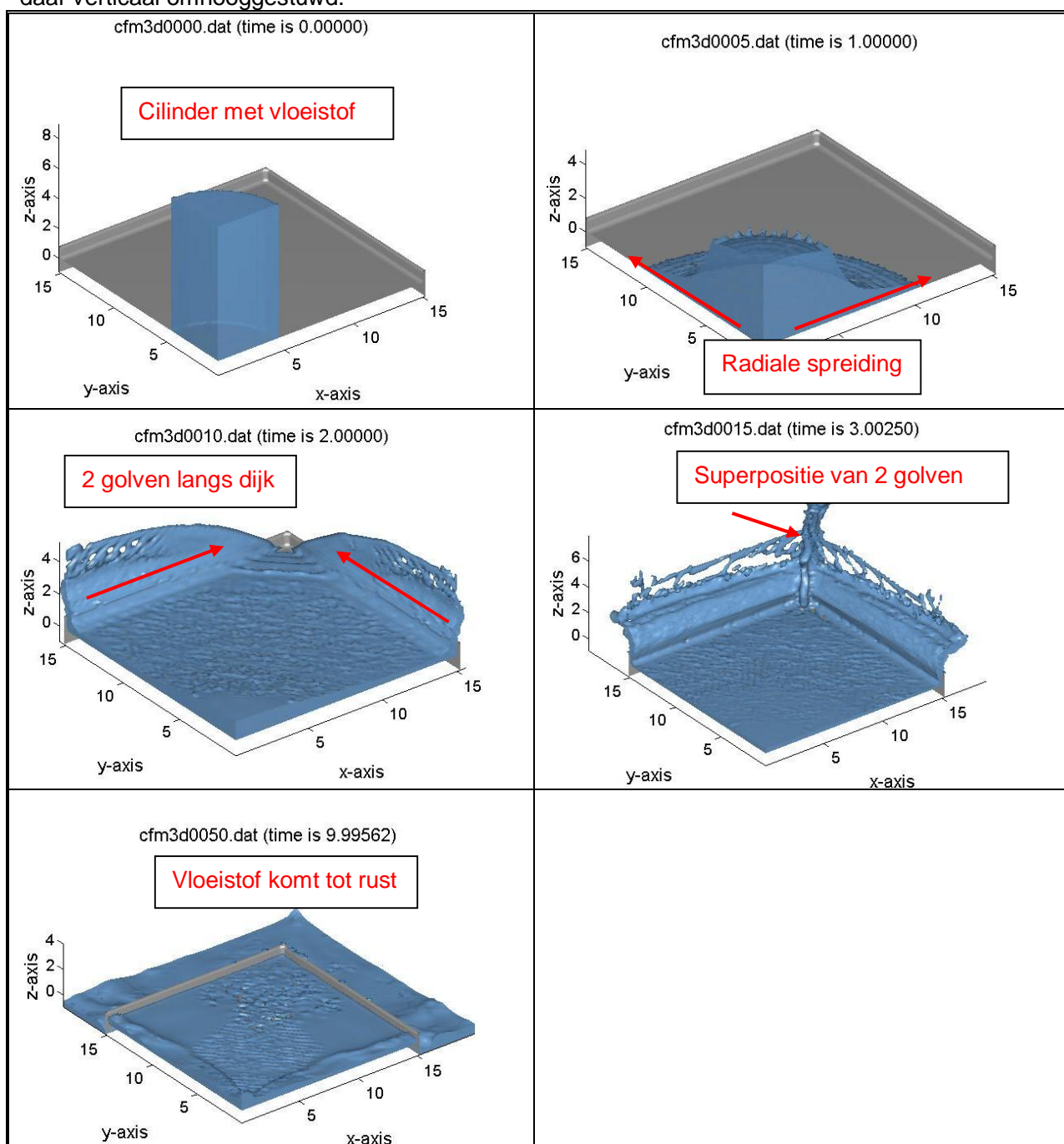
Volledig falen van een tank is een mechanisme dat vaak in de literatuur wordt aangetroffen, zie bijvoorbeeld Atherton *et al.* (2008). Volledig falen wordt geschematiseerd als een hoeveelheid water in de vorm van een tank zonder dat er nog iets van de constructie van de tank aanwezig is om de stroming van de vloeistof te beïnvloeden. In experimenten kan volledig tankfalen gemodelleerd worden door bij aanvang van het experiment een wand in de vorm van een tank met grote snelheid omhoog te trekken. In ComFLOW kan volledig tankfalen gemodelleerd worden door als beginvoorwaarde een cilinder met vloeistof met beginsnelheid nul voor te schrijven. Dat is afgebeeld in Figuur 4.1.



Figuur 4.1 Beginvoorwaarde voor volledig tankfalen in ComFLOW.

In Figuur 4.1 zijn ook symmetrieassen weergegeven. Omdat het probleem van volledig tankfalen, zoals afgebeeld, symmetrisch is in twee richtingen, volstaat het om slechts een kwart van het afgebeelde domein te simuleren. Dit wordt gedaan om rekentijd te besparen.

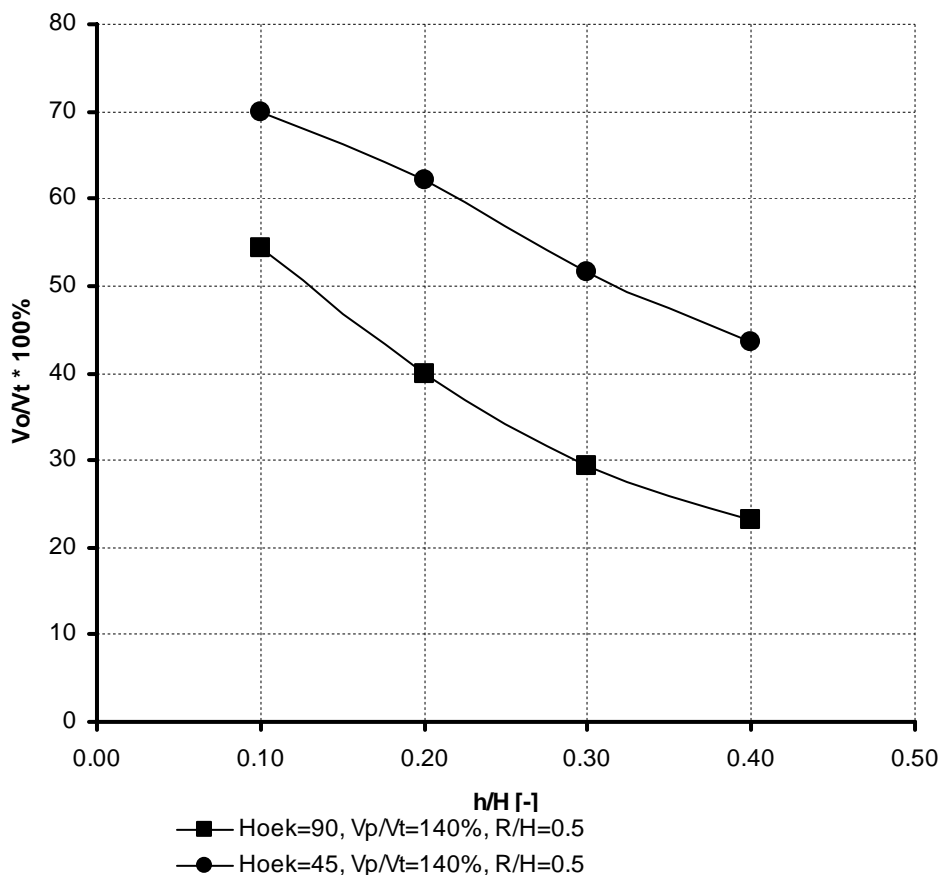
Een voorbeeld van een simulatie met het verloop van volledig tankfalen in de tijd is weergegeven in Figuur 4.2. De simulatie begint met een kwart van een cilinder vloeistof in rust, in een hoek van het rekendomein. De vloeistof zet zich in beweging en verspreidt zich radiaal terwijl de cilinder ineenzakt. Vervolgens treft de vloeistof de tankputwand en wordt daar verticaal omhooggestuwd.



Figuur 4.2 Verloop van volledig tankfalen in de tijd

Omdat de afstand van de tankputwand tot het centrum van de cilinder niet overal gelijk is, lijkt het alsof twee golven van in verticale richting bewegende vloeistof langs de tankputwand lopen. In de hoek van de tankput treffen de golven elkaar en doen daar twee stralen van vloeistof met hoge snelheid ontstaan, waarvan er één naar binnen de tankput gericht is en de ander naar buiten is gericht. Langs de tankputwand en vooral ook in de hoek van de tankput treedt overslag op. Na enige tijd is de vloeistof tot rust gekomen en kan het overslagvolume worden vastgesteld. Alle overslag is binnen 10s opgetreden.

Als eerste bekijken we de invloed van de helling van de tankputwand. In Figuur 4.3 staan twee lijnen weergegeven die het overslagpercentage als functie van de relatieve tankputhoogte beschrijven. De ene lijn is voor een helling van 45°, de andere is voor een helling van 90°.



Figuur 4.3 Invloed van wandhelling en tankputhoogte op overslagpercentage.

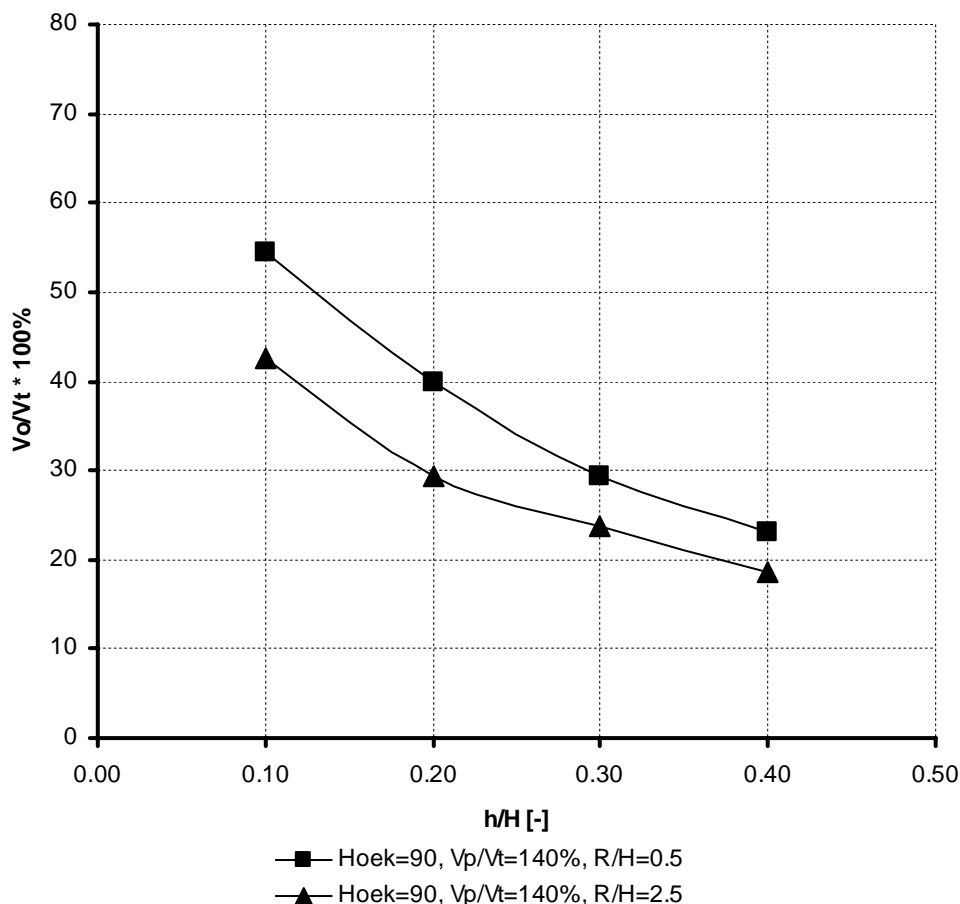
Uit deze figuur kunnen twee zaken worden opgemaakt. In de eerste plaats: het overslagpercentage neemt af als de relatieve tankputhoogte toeneemt. Andersom, neemt het overslagpercentage af, als de tankhoogte kleiner wordt ten opzichte van de tankputhoogte. Deze conclusie is algemeen geldig.

Ten tweede kan met Figuur 4.3 worden vastgesteld dat het overslagpercentage voor tankputten met wanden onder een hoek van 90° met het maaiveld, over de hele bandbreedte



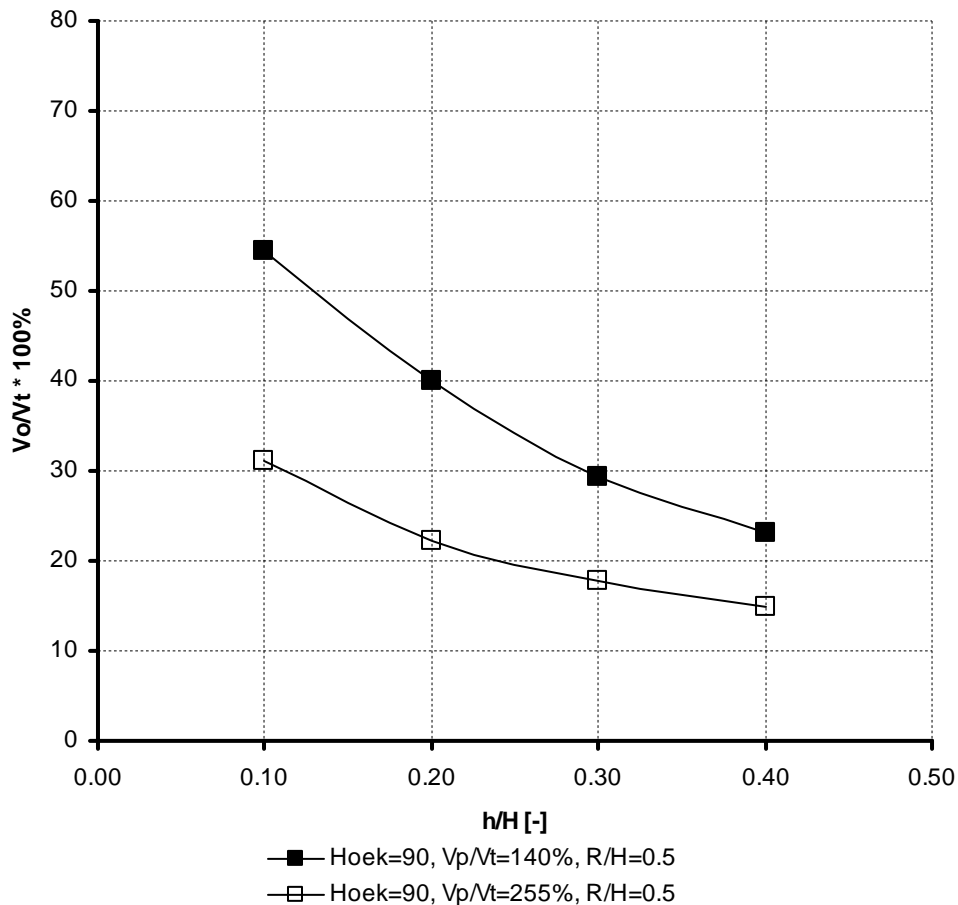
van relatieve tankputhoogtes lager is dan voor tankputten met wanden onder een hoek van 45°. Het is voor de reductie van overslag dus verstandig om de binnenzijde van de tankput met verticale wanden uit te voeren.

Vervolgens onderzoeken we de invloed van de verdeling van het tankvolume. In Figuur 4.4 staan twee lijnen weergegeven met het overslagpercentage als functie van de relatieve tankputhoogte. Voor de eerste lijn heeft de relatieve straal een waarde van 0.5, voor de andere lijn heeft deze een waarde van 2.5. Als de relatieve straal groter wordt, neemt het overslagpercentage over de gehele band van relatieve tankputhoogtes af. Als de vloeistof dus anders wordt verdeeld, meer in horizontale richting en minder in de hoogte, neemt het overslagpercentage af.



Figuur 4.4 Invloed van de verdeling van vloeistof en tankputhoogte op overslag.

Tot slot wordt de invloed van het tankputvolume onderzocht. In Figuur 4.5 staan wederom twee lijnen die het overslagpercentage weergegeven als functie van de relatieve tankputhoogte. Eén lijn is voor de situatie dat het tankputvolume 140% is van het tankvolume. De andere is voor een tankputvolume van 255% van het tankvolume. We kunnen zien dat wanneer het tankputvolume toeneemt, het overslagpercentage afneemt.



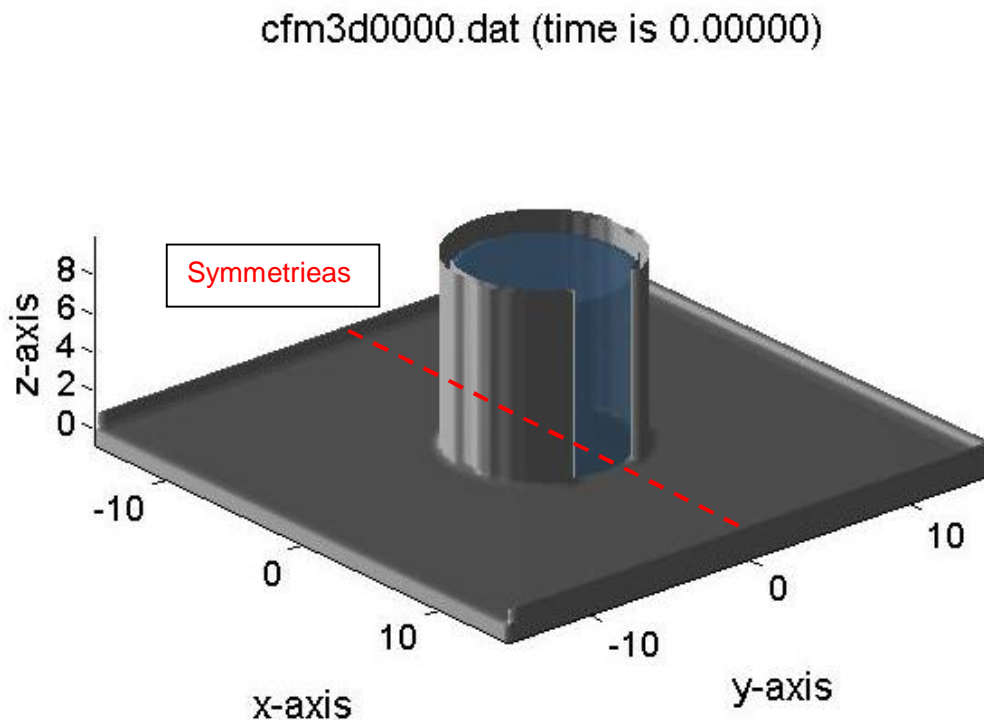
Figuur 4.5 Invloed van het tankputvolume en tankputhoogte op de hoeveelheid overslag.

Een samenvatting van de resultaten voor volledig falen uit Figuren 4.3, 4.4 en 4.5 is gegeven in Tabel A.1. In Tabel A.1 worden de resultaten van ComFLOW ook vergeleken met Proteus. Uit de vergelijking met Proteus kan worden opgemaakt, dat Proteus in nagenoeg alle gevallen een bovengrens voor overslag geeft. Echter, voor de situatie dat de verhouding van het tankputvolume tot het vloeistofvolume in de tank  $V_p/V_t$  140% is en de tankputwand is uitgevoerd als een dijkje met taluds onder  $45^\circ$ , dan berekent ComFLOW meer overslag dan met Proteus wordt vastgesteld.

#### 4.4 Falen van de lasnaad in de zijwand

Voor het falen van de lasnaad in de zijwand zijn geen uitstroomscenario's in de literatuur gevonden. Voor dit faalmechanisme zullen we op dezelfde manier als voor volledig falen in de vorige paragraaf vaststellen wat het overslagpercentage is wanneer de parameters die overslag beïnvloeden, gevarieerd worden.

Het falen van de lasnaad in de wand wordt geschematiseerd door een deel uit de wand van de tank te nemen. Op deze manier is het alsof de tank voor een deel openstaat en krijgen we een gerichte uitstroom richting de tankputwand. In totaal is er 12.5% van de omtrek van de tankwand verwijderd, dat is een segment van  $45^\circ$ . Een weergave van deze schematisatie is te zien in Figuur 4.6.

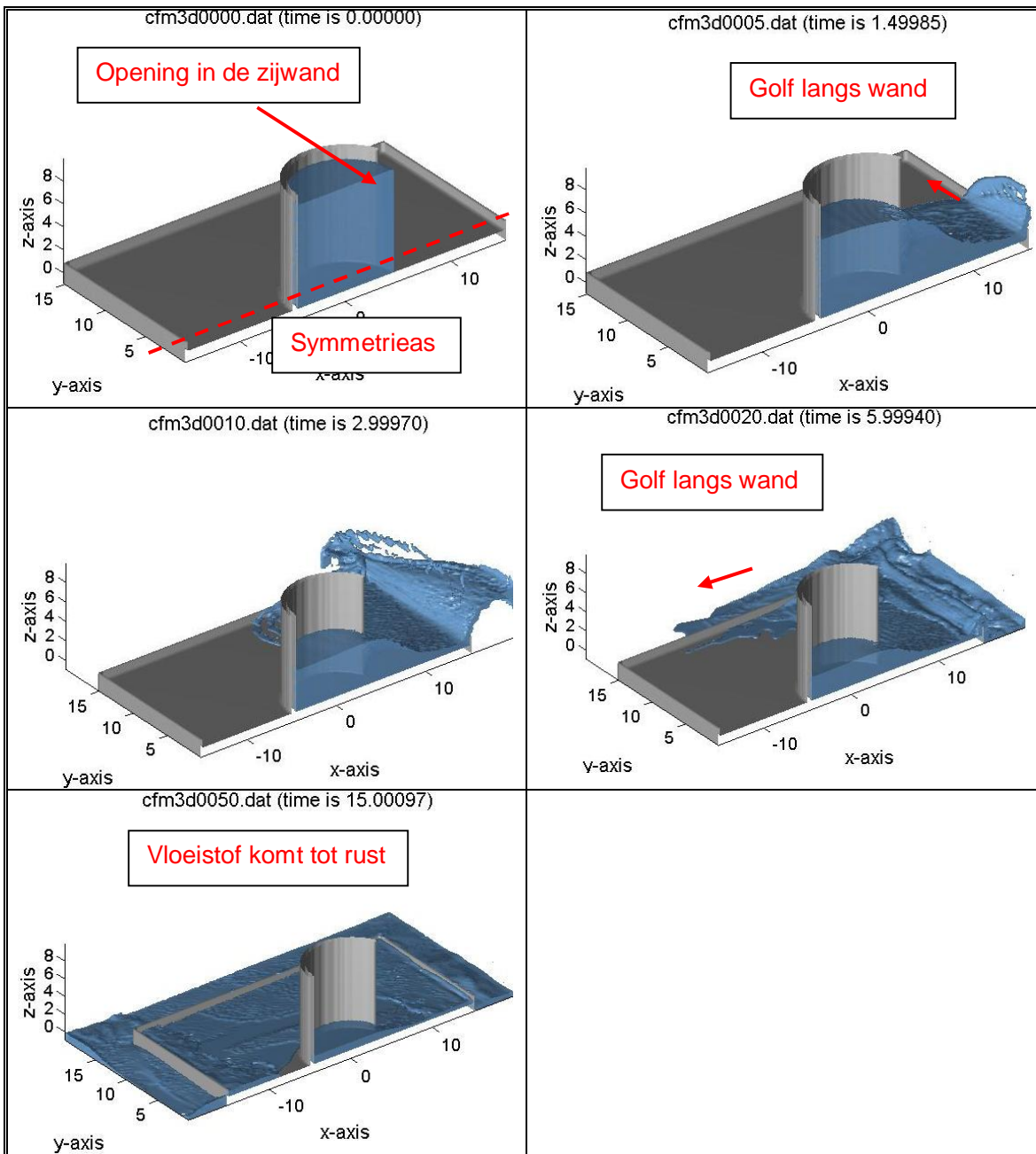


Figuur 4.6 Schematisatie van falen van de lasnaad in de zijwand.

In Figuur 4.6 is ook een symmetrieas te zien. Door gebruik te maken van symmetrie, hoeft slechts in de helft van het weergegeven domein te worden gerekend. Dit bespaart rekentijd. Om het probleem symmetrisch te houden, wordt altijd hetzelfde deel van de tankwand weggenomen. Er is ook niet gevarieerd met de grootte van het deel dat wordt weggenomen; dat is in alle gevallen 12.5% van de omtrek.

Als voorbeeld van hoe een simulatie voor een gefaalde zijwand verloopt, is Figuur 4.7 opgenomen. Daarin staan afbeeldingen van kenmerkende momenten tijdens de simulatie getoond.

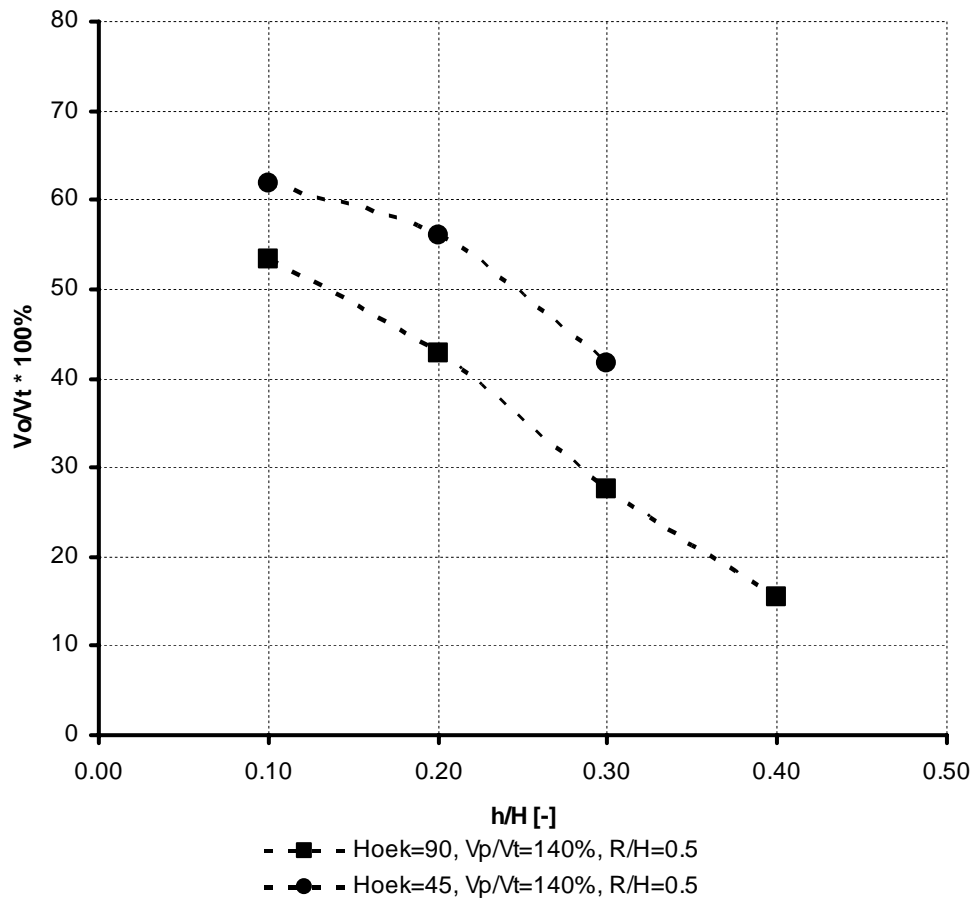
Bij aanvang van de simulatie is de vloeistof in de tank in rust. Onder invloed van de zwaartekracht zet deze zich vervolgens in beweging. Als de vloeistof de tankputwand treft, verandert de stromingsrichting van de vloeistof; een deel gaat verticaal, een ander deel stroomt langs de tankputwand. Terwijl de stroming van richting verandert, wordt een deel van de vloeistof over de tankputwand geslingerd. Dan treft de vloeistof de andere tankputwand. Ook daar treedt een verandering van richting op en komt weer een deel van de vloeistof buiten de tankput terecht. En hetzelfde gebeurt bij de laatste wand die de vloeistof tegenkomt. Deze is dan rond de tank gestroomd, terwijl langs elke tankputwand overslag heeft plaatsgevonden. De simulatie stopt als er geen overslag meer optreedt en de vloeistof nagenoeg tot rust is gekomen; dat is na 15 seconden.



Figuur 4.7 Voorbeeld van een simulatie voor het falen van de lasnaad in de zijwand.

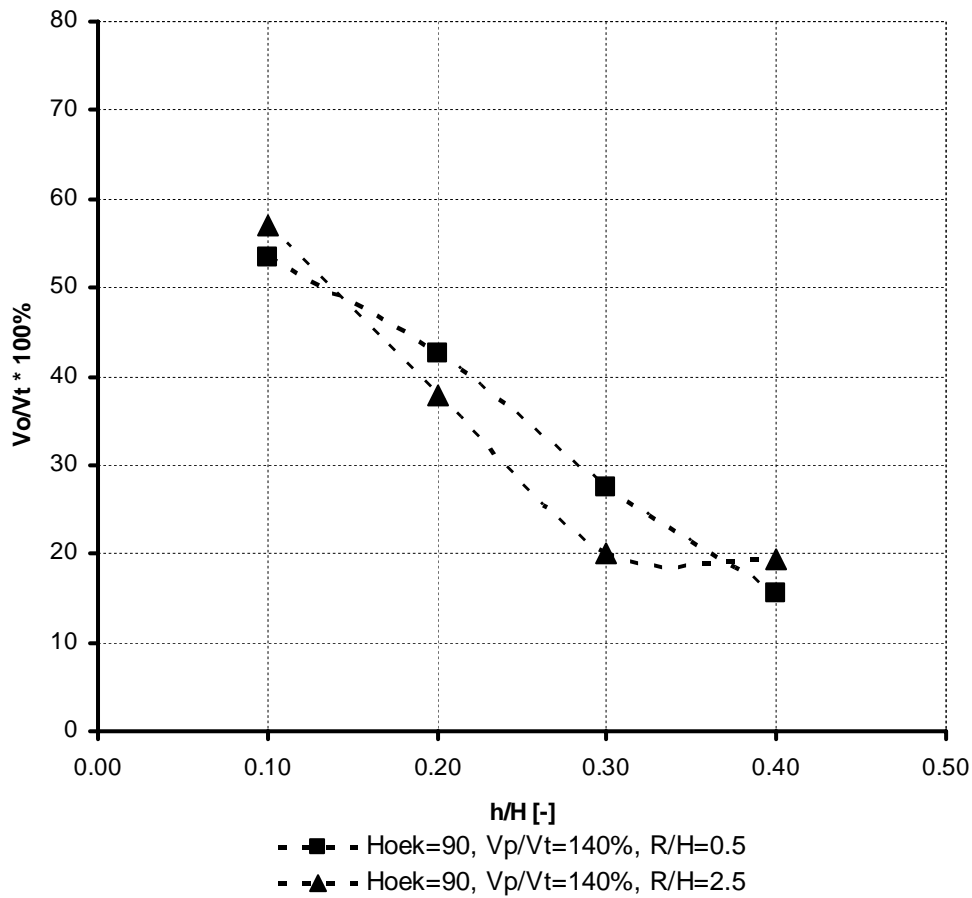
Figuur 4.8 toont hoe het overslagpercentage verandert als de helling van de tankputwand verandert van 45° naar 90°. Er is voor ieder van de twee hellingen een lijn opgenomen die het overslagpercentage als functie van de relatieve tankputhoogte weergeeft. Als de relatieve tankputhoogte toeneemt, neemt het overslagpercentage af. Een helling van de tankputwand van 45° geeft over het gehele bereik van relatieve tankputhoogtes meer overslag dan een verticale (90°) tankputwand.

Voor de hoogste tankput met taluds van 45°, waarbij  $h/H$  gelijk is aan 0.4, kon geen realistisch resultaat worden verkregen. De tankputwand neemt dan zoveel volume in dat deze raakt aan de tank en de uitstroming verhinderd wordt. Om deze reden zijn er voor de configuratie met taluds van 45° maar drie punten opgenomen in Figuur 4.8.



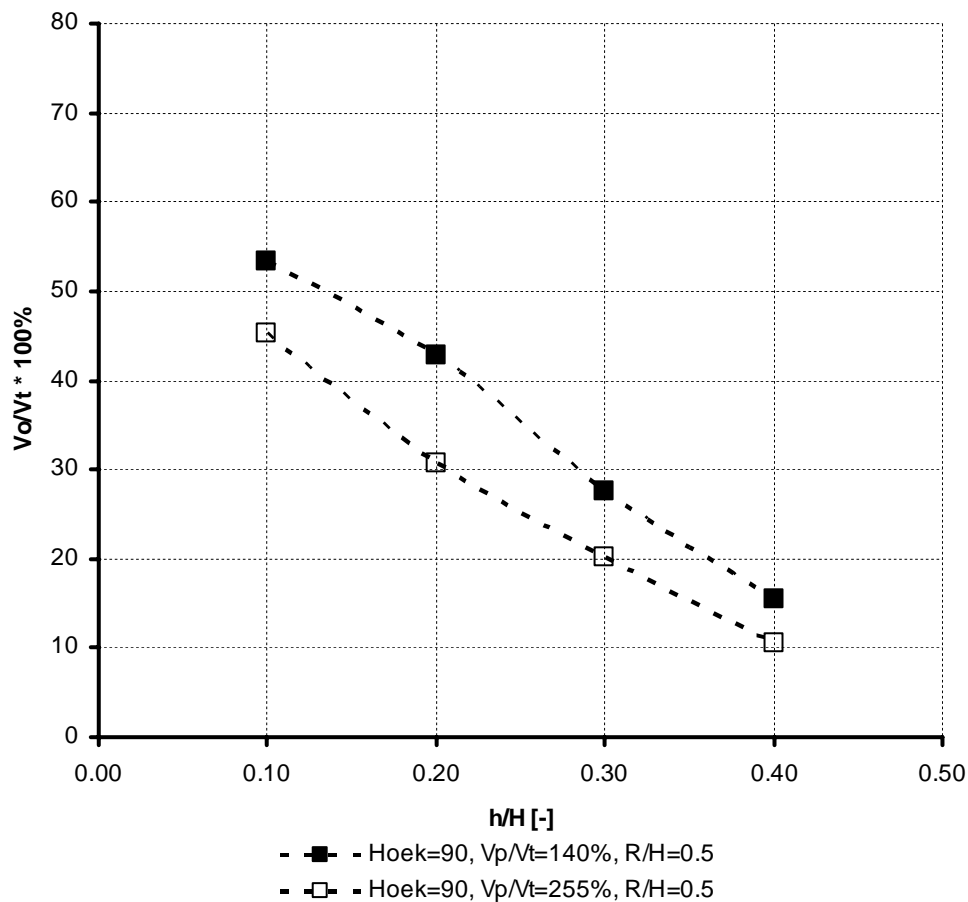
Figuur 4.8 Invloed van wandhelling en tankputhoogte op overslag

In Figuur 4.9 is weergegeven hoe het overslagpercentage verandert als de verdeling van de vloeistof in de tank verandert. De hoeveelheid vloeistof verandert niet ten opzichte van het tankputvolume, alleen de verhouding tussen straal en tankhoogte. Als de relatieve straal toeneemt, vermindert het overslagpercentage slechts over een deel van het bereik van relatieve tankputhoogtes. Voor een ander deel neemt de overslag juist toe. Als de relatieve tankputhoogte toeneemt, neemt het overslagpercentage bijna altijd af. Maar niet voor de toename van  $h/H=0.3$  naar  $h/H=0.4$  als de relatieve straal 2.5 is.



Figuur 4.9 Invloed van volumeverdeling en tankputhoogte op overslag

De invloed van een volumeverandering van de tankput is weergegeven in Figuur 4.10. Als het tankputvolume toeneemt van 140% naar 255% van het tankvolume, dan neemt de hoeveelheid overslag over de hele bandbreedte van relatieve tankputhoogtes af.

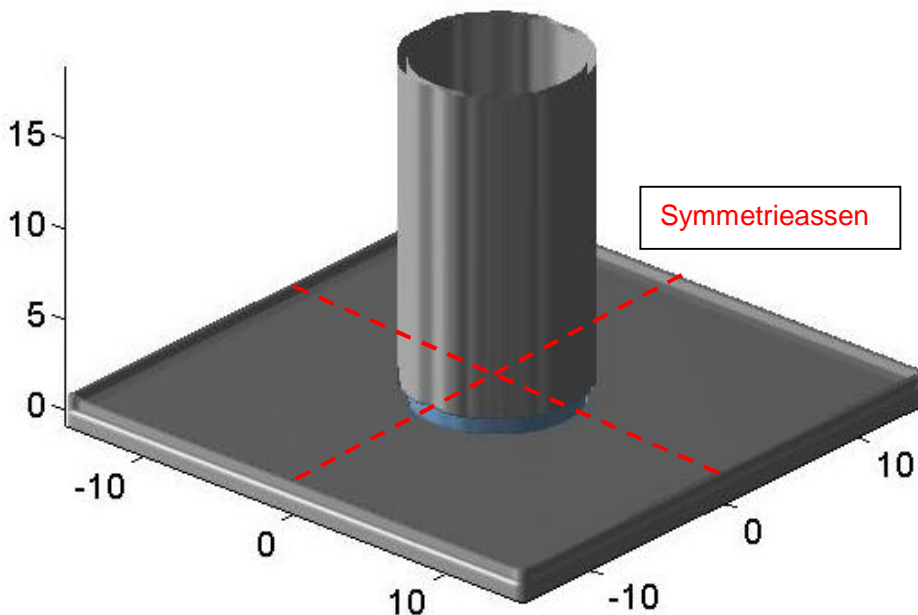


Figuur 4.10 Invloed van tankputvolume en tankputhoogte op overslag

Een samenvatting van de resultaten voor falen van de lasnaad in de zijwand van de tank uit Figuren 4.8, 4.9 en 4.10 is gegeven in Tabel A.2. In Tabel A.2 worden de resultaten van ComFLOW vergeleken met Proteus. Uit de vergelijking met Proteus kan worden opgemaakt, dat Proteus in alle gevallen een bovengrens voor overslag geeft.

#### 4.5 Falen van de aanhechting tussen bodem en wand

Voor het faalmechanisme waarbij de aanhechting tussen bodem en wand faalt, zijn geen experimenten uit de literatuur beschikbaar. Het mechanisme wordt geschematiseerd door langs de gehele omtrek van de wand een deel van wand bij de bodem weg te laten. Er wordt in alle simulaties 0.5 meter van de hoogte van de tank weggelaten. In Figuur 4.11 is de schematisatie getoond zoals deze in ComFLOW is gemodelleerd.



Figuur 4.11 Falen van de aanhechting tussen bodem en wand in ComFLOW

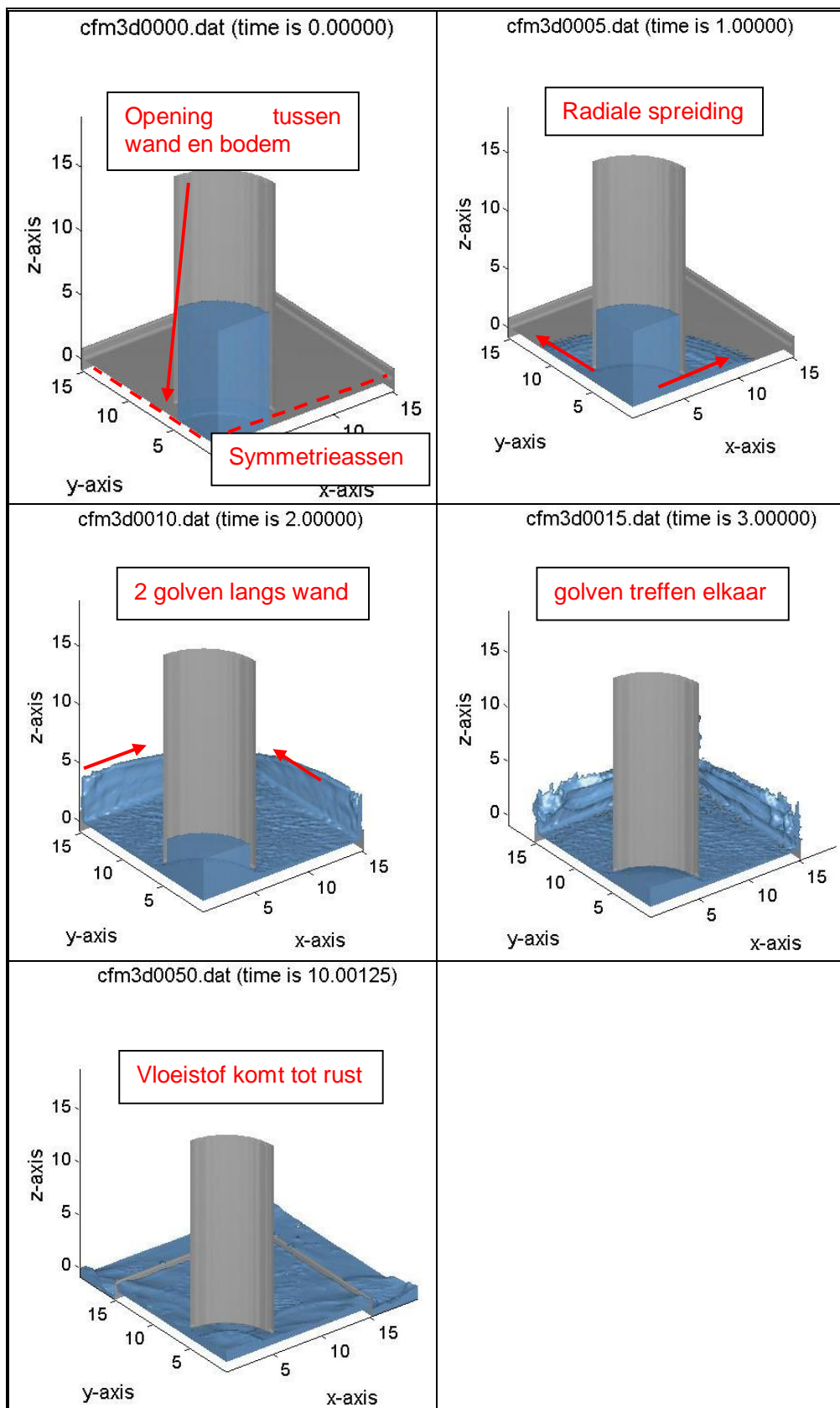
In Figuur 4.11 zijn ook twee symmetrieassen getoond. Door gebruik te maken van symmetrie hoeft in de simulaties voor dit faalmechanisme slechts een kwart van het domein te worden gerekend. Daarmee wordt rekentijd bespaard.

Een voorbeeld van het verloop van een simulatie voor het falen van de aanhechting tussen bodem en wand is gegeven in Figuur 4.12. Voor kenmerkende momenten in de tijd is daar de verdeling van de vloeistof in het rekendomein getoond.

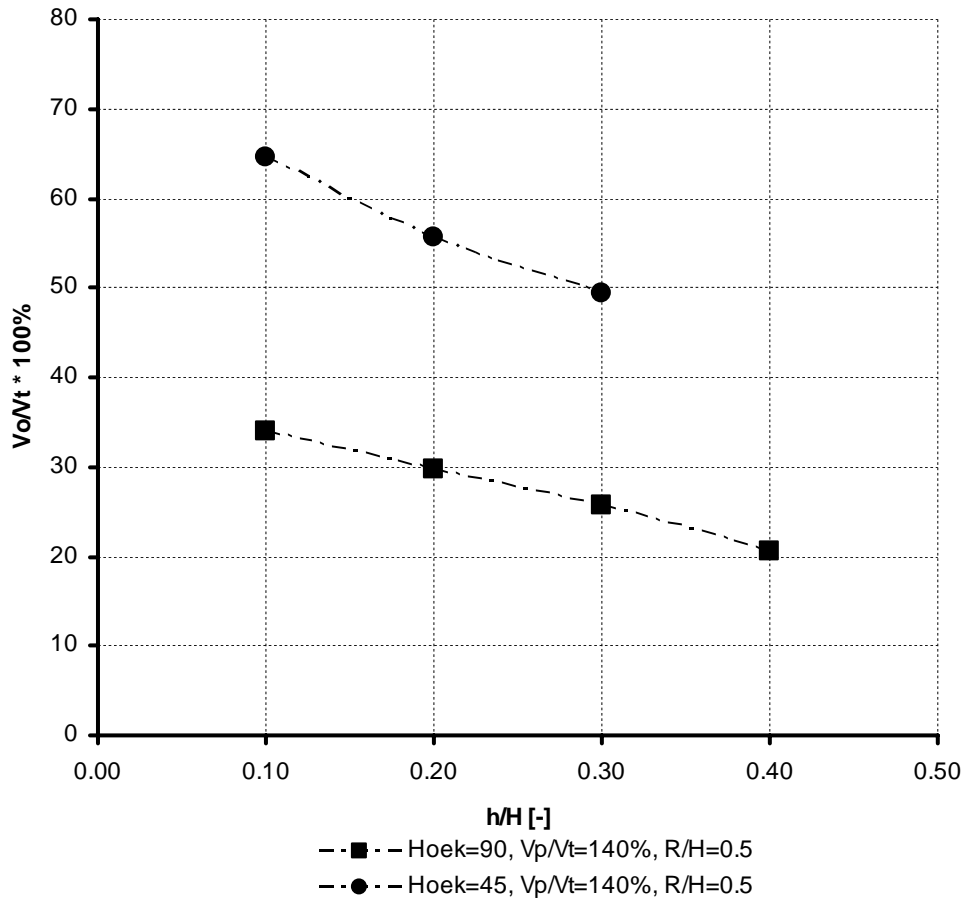
In Figuur 4.13 zijn lijnen weergegeven die voor verschillende waarden van de relatieve tankputhoogte het overslagpercentage geven. De ene lijn is voor een helling van de tankputwand van  $45^\circ$ . De andere lijn is voor een verticale wand. Het overslagpercentage neemt af naarmate de relatieve tankputhoogte toeneemt. Ook is in de figuur te zien dat bij het falen van de aanhechting tussen bodem en wand het overslagvolume sterk afneemt als de tankputwand een helling heeft van  $90^\circ$  in plaats van een helling van  $45^\circ$ .

Voor de hoogste tankput met taluds van  $45^\circ$ , waarbij  $h/H$  gelijk is aan 0.4, kon geen realistisch resultaat worden verkregen. De tankputwand neemt dan zoveel volume in dat deze raakt aan de tank en de uitstroming verhinderd wordt. Om deze reden zijn er voor de configuratie met taluds van  $45^\circ$  maar drie punten opgenomen in Figuur 4.13.



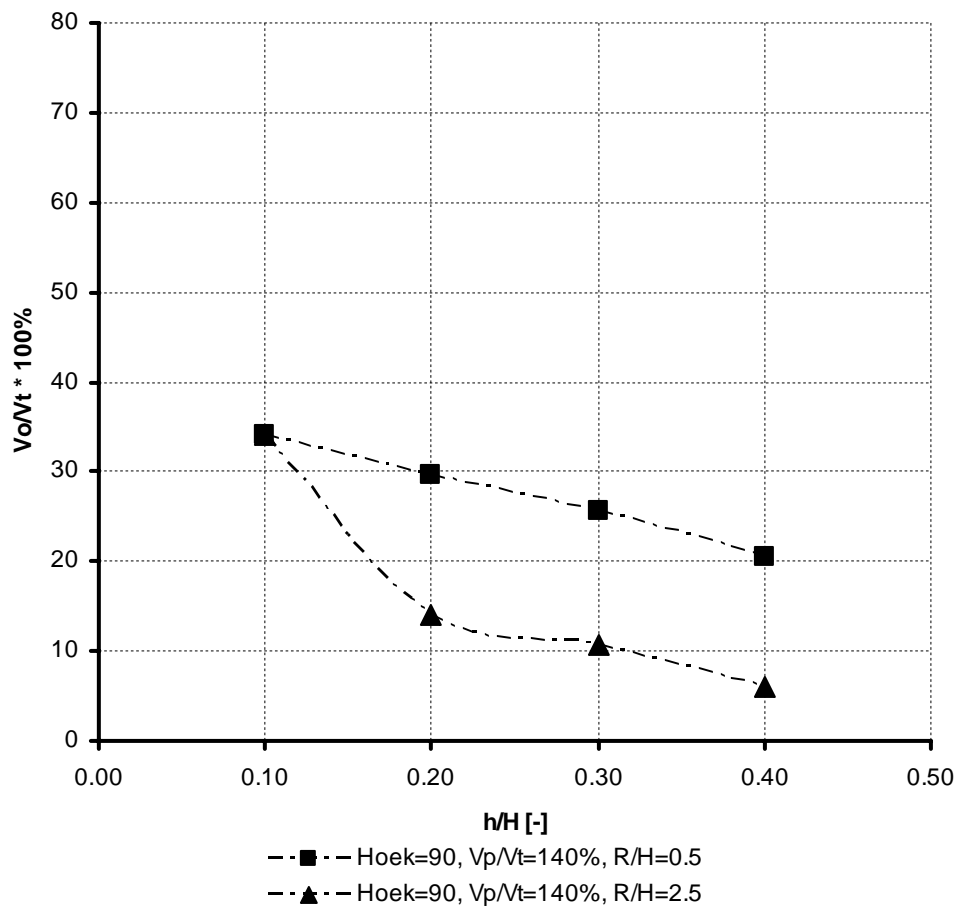


Figuur 4.12 Voorbeeld van het verloop van een simulatie voor het falen van de aanhechting tussen bodem en wand



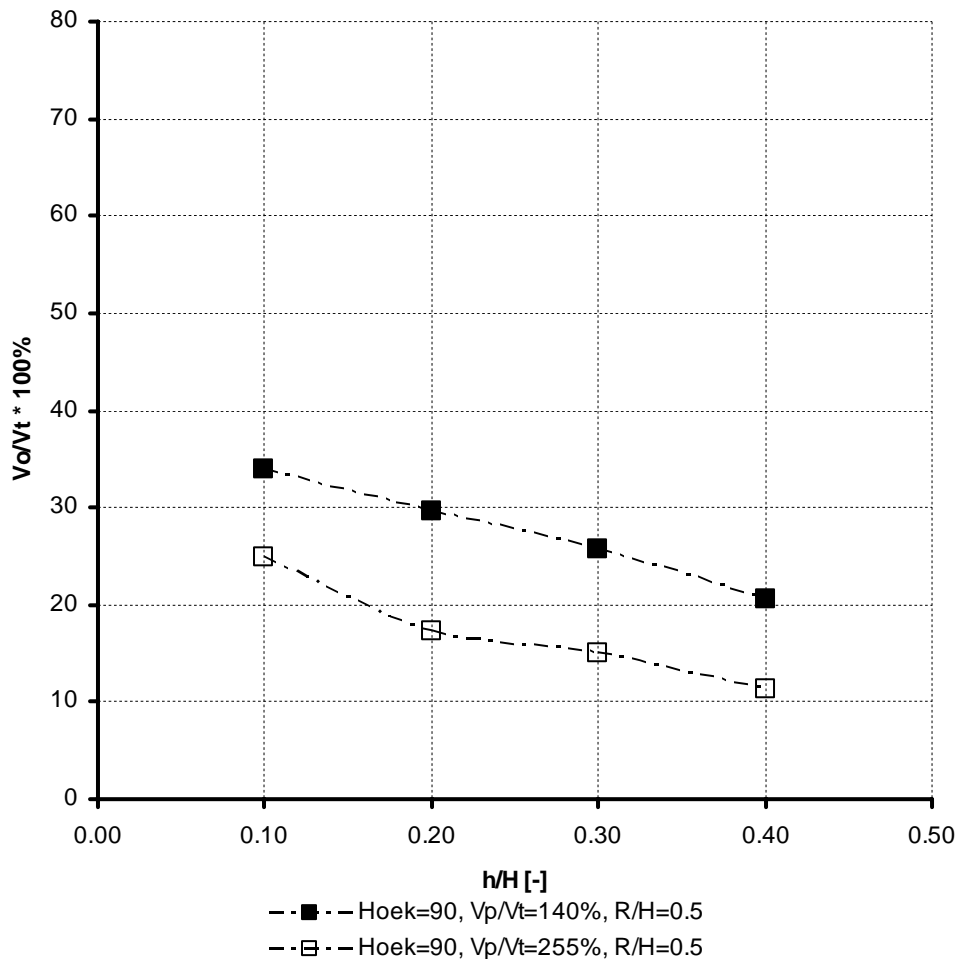
Figuur 4.13 Invloed van de wandhelling en tankputhoogte op overslag

Figuur 4.14 presenteert het overslagpercentage als functie van de relatieve tankputhoogte voor twee gevallen. In het ene geval is de relatieve straal gelijk aan 0.5, in het andere geval is de relatieve straal gelijk aan 2.5. Uit deze grafiek kan worden opgemaakt dat het overslagvolume sterk reduceert, als het volume van de tank anders verdeeld wordt.



Figuur 4.14 Invloed van de vloeistofverdeling van de tank en tankputhoogte op overslag

Figuur 4.15 toont de invloed van een groter tankputvolume op overslag. Overslag staat weergegeven als functie van de relatieve tankputhoogte en neemt af als de relatieve tankputhoogte toeneemt. Als het tankputvolume toeneemt van 140% naar 255%, dan neemt de overslag over de gehele band van relatieve tankputhoogtes af.



Figuur 4.15 Invloed van het tankputvolume en tankputhoogte op overslag

Een samenvatting van de resultaten voor volledig falen uit Figuren 4.13, 4.14 en 4.15 is gegeven in Tabel A.3. In Tabel A.3 worden de resultaten van ComFLOW vergeleken met Proteus. Uit de vergelijking met Proteus kan worden opgemaakt, dat Proteus in alle gevallen een bovengrens voor overslag geeft.

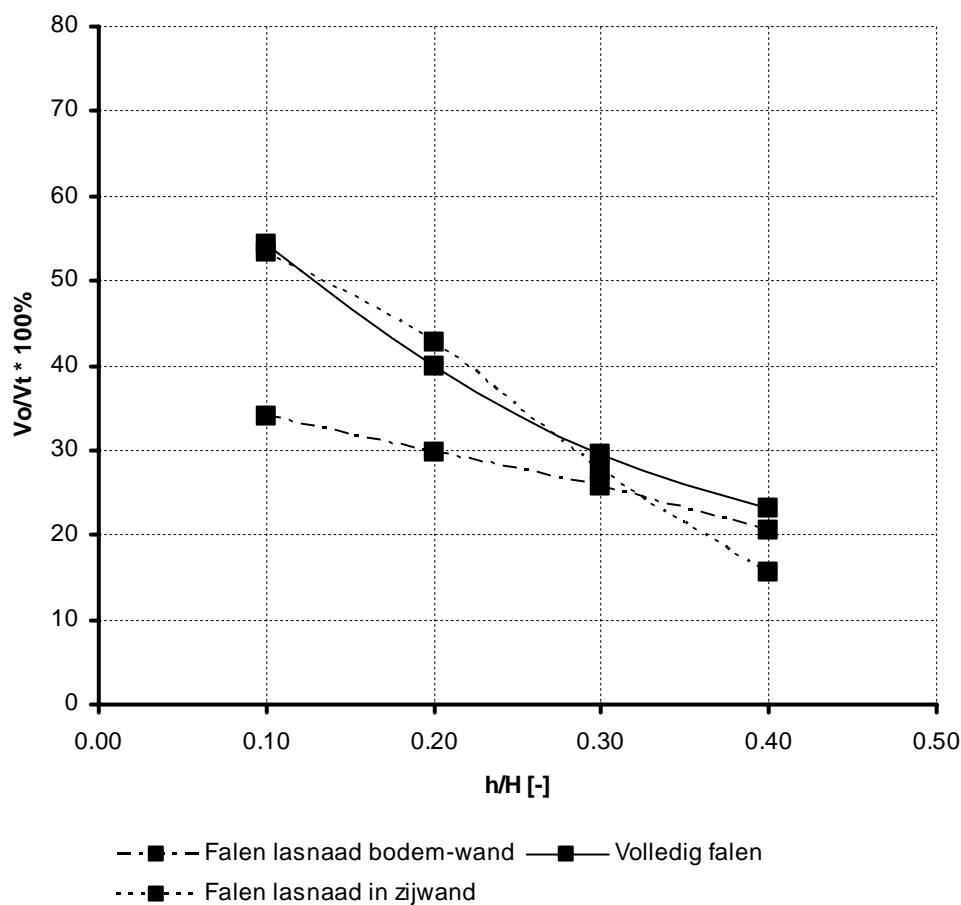
#### 4.6 Vergelijking tussen faalmechanismes

In Figuur 4.16 is voor de drie faalmechanismes – dat zijn volledig falen, falen van de lasnaad in de zijwand en falen van de aanhechting tussen bodem en wand – het overslagvolume gepresenteerd als functie van de relatieve tankputhoogte. Deze overslagvolumes zijn voor de situatie dat de afstand tussen de tankputwand en het middelpunt van de tank  $r=15\text{m}$ , rechte zijwanden ( $90^\circ$ ), het relatief tankputvolume  $V_p/V_t=140\%$  en de relatieve tankstraal  $R/H=0.5$ . Deze situatie is gekozen, omdat hij het meest realistisch lijkt.

In Figuur 4.16 is te zien dat het overslagvolume voor deze situatie tussen volledig falen en falen van de naad in de zijwand niet zoveel verschilt. Alleen bij grotere relatieve tankputhoogtes begint een verschil merkbaar te worden. Het scenario 'volledig falen', waarvoor experimenteel onderzoek is gedaan en waarop de overslagformule in Proteus is gebaseerd, is dus niet onnodig conservatief.

Voor het falen van de aansluiting tussen bodem en tankwand is het overslagvolume voor de lagere relatieve tankputhoogtes duidelijk lager dan de andere twee faalmechanismes. Bij hogere relatieve tankputhoogtes is het verschil minder duidelijk. Hier zijn de overslagvolumes voor de drie faalmechanismes bijna gelijk.

Het wordt aanbevolen nader onderzoek te doen naar het faalmechanisme waarbij de bodem losraakt van de wand. Het ziet er naar uit dat dit mechanisme aanmerkelijk lagere waarden voor overslag geeft voor relatieve tankputhoogtes tot en met  $h/H=0.2$ .



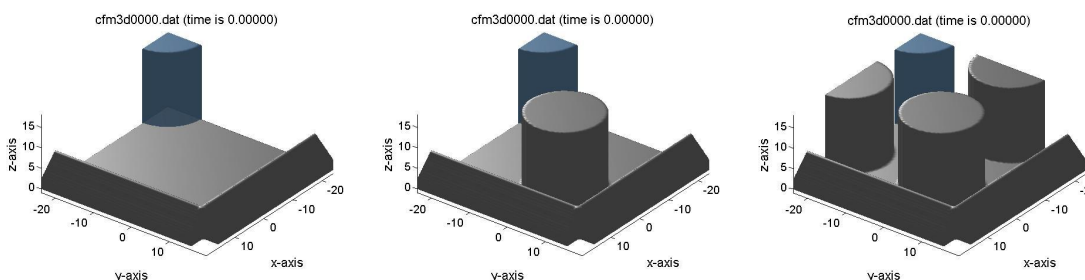
Figuur 4.16 Vergelijking tussen de drie faalmechanismes

#### 4.7 Invloed van andere tanks in de tankput

In deze paragraaf wordt onderzocht wat de invloed is van andere tanks in de tankput op overslag. Er zijn met meerdere tanks in de tankput zeer veel variaties mogelijk. Er worden twee typische voorbeelden beschouwd van situaties met meerdere tanks.

Er is gekozen voor een tankputwand met helling  $45^\circ$  omdat de overslag voor deze uitvoering in afwezigheid van andere tanks vaak groot is. De tankput is zeer groot ten opzichte van 1 tank. Op deze manier kunnen extra tanks in de tankput geplaatst worden, zonder dat we beneden een drempelwaarde voor het relatieve tankputvolume uitkomen.

Er worden drie simulaties uitgevoerd. In de eerste simulatie staat alleen de tank die faalt in de tankput. In de tweede simulatie staan er vijf tanks in de tankput: de tank die faalt in het midden en nog vier in de hoekpunten van de tankput. Bij de laatste simulatie staan er 9 tanks in de tankput: er staan dan behalve tanks op de hoekpunten van de tankput ook nog tanks daartussen op de middellijnen van de tankput. Er wordt vanwege symmetrie telkens een kwart van de tankput gesimuleerd. Afbeeldingen van de beginvoorwaarden van de simulaties zijn gegeven in Figuur 4.17.



Figuur 4.17 Beginvoorwaarden voor drie simulaties met meerdere tanks in de tankput

De gegevens van de eerste simulatie zijn als volgt: er staat een tank in de tankput. Het vloeistofniveau in de tank heeft een hoogte van 18m en een straal van 9m. Om de tank ligt een vierkante tankput. De kleinste afstand van de tankputwand tot het middelpunt van de tank is 40m. De hoogte van de tankputwand is 7m en de wanden hebben een helling van 45°. De tweede simulatie is gelijk aan de eerste. Er staan alleen extra tanks in hoekpunten van de tankput met het middelpunt op een afstand van  $24\sqrt{2}$ m van het middelpunt van de tank die faalt. In de laatste simulatie staan er nog vier tanks in de tankput. De afstand van het middelpunt van deze tanks tot het middelpunt van de tank die faalt, is 24m.

Het rekendomein is 50m bij 50m in horizontale richting (Figuur 4.16 toont niet het gehele domein). In verticale richting is het domein 20m. De roosterafstand voor de simulaties is 0.4m in horizontale richting en 0.2m in verticale richting. De simulatietijd is 20s. De tijdstap gedurende de simulaties was nooit groter dan 0.1s.

De resultaten voor overslag van deze drie simulaties staan in Tabel 4.2. In deze tabel staat ook de maximale horizontale kracht per strekkende meter die op de tankputwand is geregistreerd. De dynamische kracht is bepaald in de simulatie. De statische kracht op de tankputwand in de tabel is bepaald door de hydrostatische vloeistofdruk over de hoogte van de tankwand te integreren, ervan uitgaande dat de tankput volledig gevuld is met vloeistof (in dit geval water).

Tabel 4.2 Overslag en horizontale kracht op de tankputwand met meerdere tanks in de tankput

Beschrijving	Wandhelling [°]	Vp/Vt [%]	h/H [-]	Vo/Vt [%]	Dyn. Hor. kracht [kN/m]	Stat. Hor. Kracht [kN/m]
r=40, 1 tank	45	775	0,4	43	746	245
r=40, 5 tanks	45	620	0,4	4	28	245
r=40, 9 tanks	45	464	0,4	0	19	245

Uit Tabel 4.1 komt naar voren dat extra tanks in de tankput tussen de falende tank en de tankputwand een significante invloed hebben op het overslagvolume. Ook de maximale horizontale kracht per strekkende meter neemt sterk af. Merk op dat het overslagpercentage

zonder tanks met 43% nog zeer groot is, ondanks de grote tankput. Met extra tanks in de tankput tussen de falende tank en de tankputwand wordt het overslagpercentage teruggebracht tot 4% en 0.

#### 4.8 Invloed van viscositeit op overslag

Overslag van de tankput na falen van opslag tanks is voornamelijk een massa-traagheidsprobleem zolang de tankputwanden niet heel ver bij de tank vandaan staan. Viscositeit speelt, of eigenlijk schuifspanningen spelen slechts een rol van betekenis wanneer de vloeistof grote afstanden aflegt of wanneer de vloeistoflaag zeer dun is.

Het was de expliciete wens van Rijkswaterstaat dat de invloed van viscositeit op het overslagvolume werd onderzocht. Door de numerieke benaderingen in ComFLOW is er altijd enige *numerieke* viscositeit aanwezig. Numerieke viscositeit schaalt met de roosterafstand. Op de relatief grove roosters die in ComFLOW worden gebruikt, is de numerieke viscositeit, in ieder geval voor water, vaak groter is dan de viscositeit van de vloeistof zelf.

De rol van viscositeit kunnen we daarom met ComFLOW slechts onderzoeken door de waarde van de daadwerkelijke viscositeit sterk te overdrijven. Van water is de dynamische viscositeit bij kamertemperatuur ongeveer  $1 \cdot 10^{-3}$  kg/ms. Met ComFLOW zijn drie simulaties gedaan met verschillende viscositeit: in de eerste som is  $1 \cdot 10^{-3}$  kg/ms gebruikt, in de tweede  $1 \cdot 10^{-1}$  kg/ms en in de laatste  $1 \cdot 10^1$  kg/ms.

Het rekendomein voor de drie simulaties was 20m bij 20m in horizontale richting en 19m in verticale richting. Het vloeistofniveau in de tank lag op 10m. De tank had een straal van 5m. De tankput was vierkant van vorm en 1m hoog. De tankputwanden hadden een helling van 45°. De kortste afstand van het middelpunt van de tank tot het midden van de tankputwand bedroeg 15m.

De roosterafmetingen waren uniform in de drie hoofdrichtingen; in horizontale richting was de roosterafstand 0.2m en in verticale richting 0.1m. De simulatietijd was 10s en de tijdstap is gedurende de simulatie niet groter geweest dan 0.01s.

De waarden voor overslag en maximale kracht op de tankputwand uit de simulaties zijn opgenomen in Tabel 4.3. Uit de tabel kan worden opgemaakt dat de waarden nauwelijks veranderen wanneer de viscositeit wordt veranderd. Dit betekent dat de stroming voornamelijk een massa-traagheidsprobleem is.

Tabel 4.3 Overslag en horizontale kracht als de viscositeit van de vloeistof verandert

Dynamische Viscositeit [kg/ms]	Wandhelling [°]	Tankputvolume [%]	h/H [-]	Overslag [%]	Hor. kracht [kN/m]
0.001	45	140	0,1	70	22
0.1	45	140	0,1	70	22
10	45	140	0,1	70	21

#### 4.9 Discussie

In dit hoofdstuk zijn simulaties verricht voor verschillende faalmechanismes. De resultaten voor overslag voor de mechanismes zijn niet heel verschillend. Alleen het falen van de

aanhechting tussen bodem en wand geeft duidelijk lagere overslag voor lagere relatieve tankputhoogtes ( $h/H < 0.3$ ).

De invloed van meerdere tanks in de tankput is, op basis van de verrichte simulaties, significant te noemen. Dit moet systematisch uitgezocht worden in een volgend onderzoek.

Viscositeit, zo blijkt uit de simulaties die zijn gedaan, speelt een ondergeschikte rol bij het falen van opslagtanks. De afstand van de tank tot de tankputwand is in deze simulaties zo klein, en overslag treedt in zo'n korte tijd op, dat schuifspanningen geen merkbaar effect hebben. Overslag na falen van verticale opslagtanks is voornamelijk een massa-traagheidsprobleem.

In de tabellen in Appendix A zijn alle ComFLOW resultaten voor overslag gepresenteerd naast resultaten van Proteus. Als deze resultaten vergeleken worden, kan worden opgemerkt dat Proteus in nagenoeg alle gevallen een bovengrens geeft voor de overslag die kan optreden. Alleen voor het scenario "volledig falen", waarbij de tankputwand is uitgevoerd met taluds van  $45^\circ$  is Proteus niet conservatief. Dat moet nader uitgezocht worden in een volgend onderzoek.



## 5 Mitigerende maatregelen voor overslag

### 5.1 Inleiding

In de huidige ontwerprichtlijnen voor tankputten is geen rekening gehouden met het dynamisch gedrag van vloeistof die uit een gefaalde tank komt. Het voornaamste ontwerpcriterium is dat de tankput groot genoeg moet zijn om het volume van de grootste tank in de tankput te kunnen bergen met daaraan toegevoegd enige marge.

Bij falen van een tank – en we hebben daar in Hoofdstuk 4 drie mechanismes voor onderscheiden – zal er een versnelling van de vloeistof optreden bij het verlaten van de tank. Door de snelheid van de vloeistof, of liever de impuls, zal de vloeistof toch buiten de tankput terecht kunnen komen.

Het is de taak van Rijkswaterstaat te beoordelen wat de gevolgen van tankfalen zijn voor het oppervlaktewater. Vanuit deze verantwoordelijkheid heeft Rijkswaterstaat Deltares gevraagd te onderzoeken wat het effect op overslag is van een aantal maatregelen die bedoeld zijn om overslag te reduceren. We noemen dit mitigerende maatregelen voor overslag.

We onderzoeken in totaal vijf maatregelen om overslag te reduceren. De eerste is al uitgebreid aan bod gekomen, dat is het reduceren van de hoogte van de vloeistof binnen de tank. Als de vloeistofkolom in de tank lager is, zal er ook minder overslag optreden. Deze maatregel wordt in combinatie met alle andere maatregelen bekeken. Met andere woorden: elke keer als we een mitigerende maatregel onderzoeken, bekijken we ook de invloed van de hoogte van de vloeistof in de tanks.

De volgende twee van deze maatregelen komen uit de literatuur, namelijk COAST en MOTIF, zie Atherton *et al.* (2008). COAST is een Engels acroniem: Catastrophic Overtopping Alleviation of Storage Tanks. Bij deze maatregel geeft men de tankputwand een concave vorm. Door deze vorm zal vloeistof, die langs de wand omhoog wordt gestruwd, terug de tankput in worden gericht. Deze maatregel belooft overslag met 52% te reduceren. MOTIF is ook een Engels acroniem: Mitigation Of Tank Instantaneous Failure. Hier wordt een scherm in de tank aangebracht dat is bedoeld is om het uitstromen van vloeistof te vertragen. MOTIF zou het overslagvolume met 75% reduceren.

De twee laatste maatregelen zijn voorgesteld door Rijkswaterstaat zelf. De eerste daarvan is de afstand van de tankputwand tot de tanks. De gedachte daarbij is dat als de afstand vergroot wordt, de overslag afneemt. De laatste maatregel die zal worden bekeken is wat tertiaire insluiting wordt genoemd. Tertiaire insluiting komt neer op het aanleggen van een extra tankput rond de tankput waar de tanks in staan. De tank zelf is dan de primaire insluiting, de tankput de secundaire insluiting en de tankput daaromheen de tertiaire insluiting.

Het onderzoek is systematisch van opzet. We vergelijken overslagvolumes voor verschillende vulhoogtes en voor verschillende wandhoogtes. Daarbij vergelijken we de mitigerende maatregelen met een referentiesituatie waarin de maatregel niet is toegepast.

Alle maatregelen zijn beproefd in een rekendomein met dezelfde grootte. We rekenen slechts in een kwart van het domein. Dit deel van het domein was altijd 50m bij 50m in horizontale richting, bij 20m in verticale richting groot. De roosterafstand was in alle richtingen dezelfde

en 0.5m groot. Er zijn voor elke simulatie dus 200 maal 200 maal 80 roosterzellen gebruikt. Dat is meer dan drie miljoen roosterzellen.

Er werd 10s gesimuleerd. Dat was ruim voldoende om de tank te laten falen, de vloeistof over de tankput te zien gaan en vervolgens weer tot rust te laten komen. De tijdstap gedurende de simulaties was variabel en afhankelijk van het stabiliteitscriterium van de numerieke tijdsintegratie. De maximale tijdstap zegt iets over de nauwkeurigheid van de tijdsintegratie. Deze was nooit groter dan 0.01s.

Nu zullen we deze referentiesituatie beschrijven. In Hoofdstuk 4 is al naar voren gekomen dat tankputten met verticale wanden minder overslag tot gevolg hebben dan wanneer er een dijk met een talud rond de tank is aangelegd. In de referentiesituatie zullen daarom verticale wanden worden gebruikt. De tanks hebben een straal van 10m. De kleinste afstand van de tankputwand is 20m vanuit het centrum van de tank. De afstand van de wand van de tank tot de tankputwand is dus 10m.

Voor de referentiehoogte van de vloeistof in de tank kiezen we 20m. Als hoogte van de tankputwand kiezen we voor 2m en voor 4m. Voor de vulhoogte van 20m is dit, respectievelijk, 10% en 20% van de vulhoogte. Hogere tankputten komen minder vaak voor, maar zijn toch bekeken voor een volledig beeld.

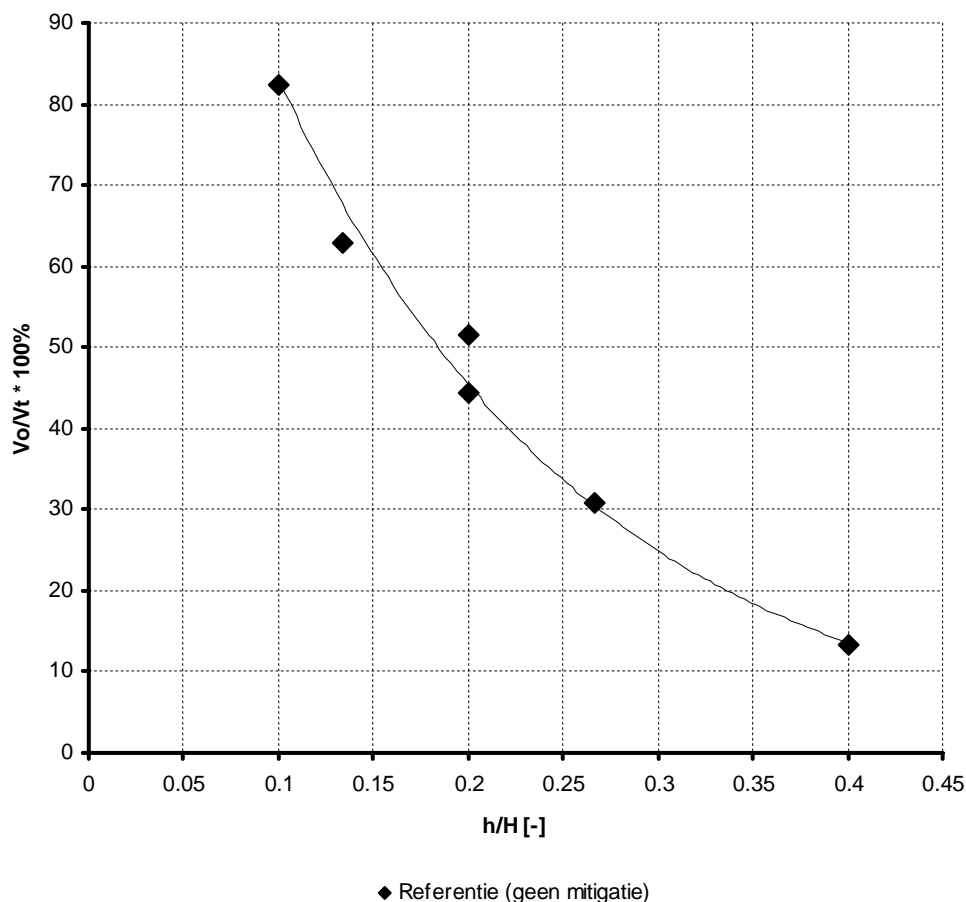
Er zijn 6 simulaties gedaan om het effect van het beperken van de vulhoogte ten opzichte van de referentiesituatie in kaart te brengen: voor beide tankputhoogtes drie vulhoogtes van 20m (referentiesituatie), 15m en 10m. Het voornaamste resultaat van de simulaties is het overslagvolume. In Tabel 5.1 tonen we het overslagvolume van de referentiesituatie als percentage van het vulvolume.

In de eerste kolom van de tabel is de naam van de simulatie weergegeven. De naamgeving kent een systeem en hierin is te herkennen welke waarden voor de te variëren parameters zijn gekozen. De parameters in Tabel 5.1 zijn van links naar rechts: de afstand D1 (in meter) van de tankputwand tot het middelpunt van de tank; vervolgens de vulhoogte H in meter; daarna komt de hoogte van de tankput, ook in meter; de een-na-laatste kolom toont het oorspronkelijk volume  $V_t$  van de vloeistof in de tank in kubieke meter; en, tot slot, in de laatste kolom staat het percentage  $V_{o1}/V_t$  van het oorspronkelijk vloeistofvolume dat buiten de tankput terecht is gekomen.

Tabel 5.1 Overslagpercentages wanneer de vulhoogte wordt beperkt

Simulatie	D1 [m]	H [m]	h [m]	$V_t$ [m <sup>3</sup> ]	$V_{o1}$ [m <sup>3</sup> ]	$V_{o1}/V_t$ [%]
1R10_H10_h2_d20_D25_i090_mn	20	10	2	785	350	45
1R10_H15_h2_d20_D25_i090_mn	20	15	2	1178	743	63
1R10_H20_h2_d20_D25_i090_mn	20	20	2	1571	1294	82
1R10_H10_h4_d20_D25_i090_mn	20	10	4	785	104	13
1R10_H15_h4_d20_D25_i090_mn	20	15	4	1178	362	31
1R10_H20_h4_d20_D25_i090_mn	20	20	4	1571	809	52

De gegevens in Tabel 5.1 kunnen ook in een grafiek worden weergegeven. Eerder zijn reeds grafieken getoond, waarin het overslagpercentage werd uitgezet tegen de relatieve tankputhoogte h/H. In Figuur 5.1 zijn de 6 waarden voor het overslagpercentage uit Tabel 5.1 uitgezet tegen de relatieve tankputhoogte.



Figuur 5.1 Overslagpercentage voor de referentiesituatie als functie van de relatieve tankputhoogte.

We zien dat de relatieve tankputhoogte een zinvolle parameter is: voor twee verschillende vulhoogtes (10m en 20m) gecombineerd met twee verschillende tankputhoogtes (2m en 4m, respectievelijk) is het overslagpercentage vergelijkbaar. Ook is er duidelijke een dalend verloop te zien van het overslagpercentage als functie van de relatieve tankputhoogte. Als deze hoogte toeneemt, neemt het overslagpercentage af.

Er kan worden opgemerkt dat het verlagen van de vulhoogte van een tank, dat is het vergroten van de relatieve tankputhoogte, een zinvolle mitigerende maatregel is. Het overslagvolume neemt sterk af als de vulhoogte wordt verlaagd.

In de volgende paragrafen komen na elkaar de volgende maatregelen aan bod:

1. COAST in 5.2
2. MOTIF in paragraaf 5.3
3. een vergrote afstand van de tankputwand tot de tank in 5.4
4. tertiaire insluiting, tot slot in 5.5

Dit hoofdstuk eindigt met enige conclusies over de mitigerende maatregelen.

## 5.2 Concave vorm van de tankputwand: COAST

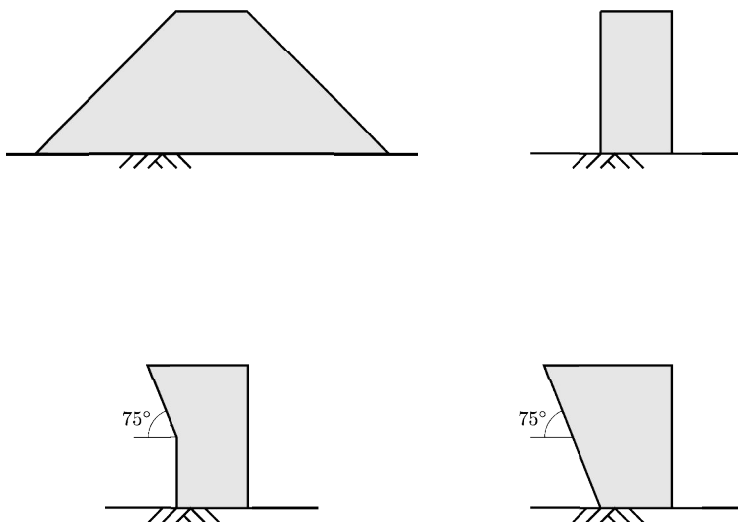
In Hoofdstuk 4 werden al twee types tankputwand beschouwd. In sommige gevallen is om de tank een dijkje aangelegd met taluds. In de geschematiseerde gevallen zijn we er vanuit

gegaan dat de taluds onder een hoek van  $45^\circ$  met het maaiveld waren aangelegd. Andere tankputten zijn met een verticale wand uitgerust. Het is gebleken dat tankputten die met verticale wanden zijn uitgerust voor minder overslag zorgen na tankfalen.

In Atherton *et al.* (2008) wordt een type tankput beschreven dat is uitgerust met concave tankputwanden. Hiervan wordt gezegd dat het overslag flink kan reduceren. Nergens staat deze tankputconfiguratie echter in detail beschreven en ook de resultaten van een systematisch onderzoek ontbreken. Deltares heeft geprobeerd contact te zoeken met Atherton en ook met meneer Ash, die over hetzelfde onderwerp heeft gepubliceerd en in dezelfde groep werkt als Atherton; dat is niet gelukt.

Omdat verdere informatie ontbreekt, is er voor een tankputconcept gekozen met naar binnen hellende wanden. De essentie is dat de tankputwand een naar binnen gerichte inclinatie krijgt, waardoor de vloeistof die tegen de tankputwand stroomt, terug de tankput in wordt afgebogen. Deze gedachtegang is uitgewerkt in Figuur 5.2. In de figuur staan van linksboven naar rechtsonder de volgende tankputconcepten weergegeven:

1. uitvoering met taluds
2. verticale wand
3. verticale wand waarvan een deel een inclinatie naar binnen heeft
4. wand met naar binnen gerichte inclinatie



Figuur 5.2 Tankputconcepten. Van linksboven naar rechtsonder: uitvoering met taluds, verticale wand, verticale wand met naar binnen gericht deel, naar binnen gerichte inclinatie van de tankputwand.

Om het aantal vrijheidsgraden te beperken is ervoor gekozen alleen het tankputconcept dat onder punt 4 wordt genoemd te onderzoeken.

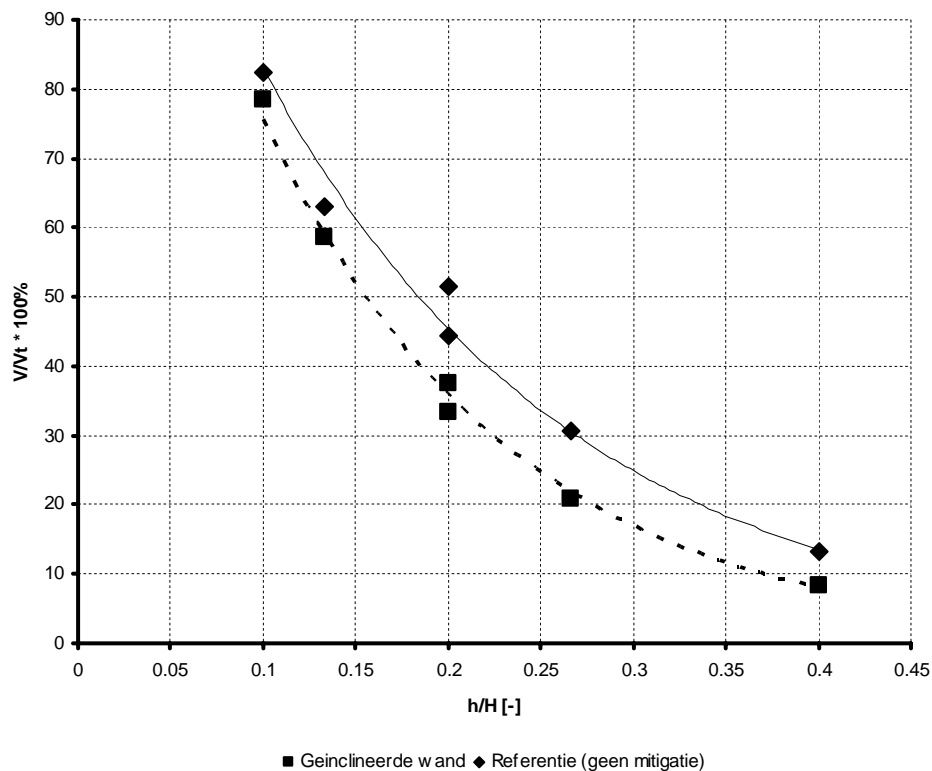
De tankputwand krijgt een inclinatie van  $75^\circ$ . Dat is weergegeven in Figuur 5.2. Eerder onderzochte tankputconfiguraties hebben wij genoemd naar de hoek die de wand maakt met het maaiveld. Zo zijn taluds met een hoek van  $45^\circ$  onderzocht en verticale wanden met een hoek van  $90^\circ$ . Om consistent te blijven met de eerdere naamgeving noemen we het ontwerp dat in deze paragraaf wordt onderzocht het concept met een wandinclinatie van  $105^\circ$  (dat is  $180^\circ$  min  $75^\circ$ ).

Voor een systematisch onderzoek naar de overslag van het concept met een inclinatie van  $105^\circ$ , zijn simulaties uitgevoerd met drie verschillende vulhoogtes, en voor iedere vulhoogte twee verschillende tankputhoogtes. In totaal dus zes simulaties. De vulhoogtes waren 20m, 15m en 10m. De tankputhoogtes waren 2m en 4m. De tankputwand stond in alle simulaties op een afstand van 20m van het middelpunt van de tank. De resultaten voor overslag staan in de laatste kolom van Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Overslagpercentages voor de tankputwand met een inclinatie van  $105^\circ$

Simulatie	D1 [m]	H [m]	h [m]	Vt [m <sup>3</sup> ]	Vo1 [m <sup>3</sup> ]	Vo1/Vt [%]
1R10_H10_h2_d20_D25_i105_mn	20	10	2	785	262.494	33
1R10_H15_h2_d20_D25_i105_mn	20	15	2	1178	691.766	59
1R10_H20_h2_d20_D25_i105_mn	20	20	2	1571	1232.23	78
1R10_H10_h4_d20_D25_i105_mn	20	10	4	785	65.024	8
1R10_H15_h4_d20_D25_i105_mn	20	15	4	1178	246.626	21
1R10_H20_h4_d20_D25_i105_mn	20	20	4	1571	588.017	37

De resultaten voor overslag in Tabel 5.2 laten zich als volgt interpreteren. Als de vulhoogte toeneemt, neemt het overslagvolume bij één tankputhoogte ook toe. Bij een hogere tankput, neemt het overslagvolume af. Het overslagpercentage, dat in Tabel 5.2 is weergegeven, is in Figuur 5.3 met een kort-gestreepte lijn uitgezet tegen de relatieve tankputhoogte  $h/H$ . De resultaten uit de vorige paragraaf zijn als getrokken lijn aan deze figuur toegevoegd.



Figuur 5.3 Overslagpercentage voor de situatie met geïnclineerde wand als functie van de relatieve tankputhoogte met de kort-gestreepte lijn. Met de getrokken lijn is het overslagpercentage voor de referentiesituatie weergegeven.

Uit Figuur 5.3 kan worden opgemaakt dat een geïnclineerde wand het overslagpercentage over de hele band van relatieve tankputhoogtes reduceert. Er is reductie van overslag. Maar vergeleken met het reduceren van de vulhoogte, is de reductie niet heel groot.

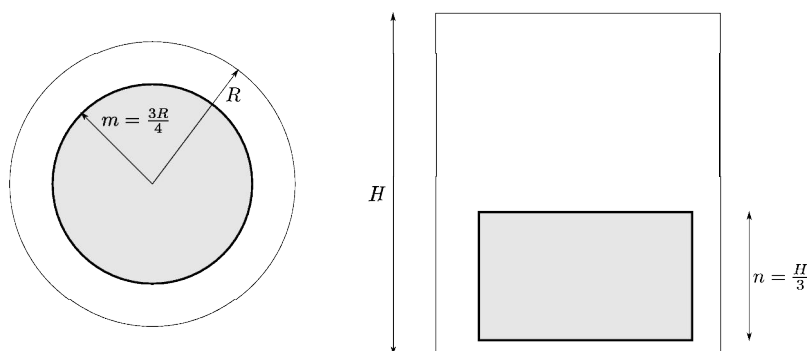
### 5.3 Intern schot: MOTIF

In Atherton *et al.* (2008) worden twee methodes besproken om overslag na tankfalen te beperken. De eerste is COAST. Het COAST-concept is in de vorige paragraaf toegepast in een systematisch onderzoek naar overslag.

De andere methode die in Atherton *et al.* (2008) wordt besproken is MOTIF. Van MOTIF kon worden vastgesteld dat het gaat om schotten die binnen in de tanks worden aangebracht. Deze schotten zijn zodanig uitgevoerd dat er nog steeds stroming boven het schot langs en onder het schot door optreedt. Het is dus geen insluiting, of een tank binnen een tank, maar eerder een methode om de stroming te vertragen.

Ook van MOTIF is het niet mogelijk geweest om de details te achterhalen, omdat Atherton geen reactie gaf op het verzoek van Deltares zijn concepten toe te lichten. Wij hebben daarom, met de beschikbare informatie, geprobeerd het concept te reconstrueren.

Uit de tekst van Atherton *et al.* (2008) kan worden opgemaakt dat de schotten tot ongeveer een derde van de vulhoogte van de tank reiken. Er is stroming onder het schot langs, maar het is niet gespecificeerd hoe dat plaatsvindt. Daarom wordt aangenomen dat het schot op een hoogte van één meter boven de grond staat. Het schot zal cilindervormig zijn, maar de straal ervan is niet gegeven. Wij hebben daarvoor de aanname gedaan dat de straal drie kwart van de straal van de tank bedraagt. Het concept zal in het vervolg als 'intern schot' worden aangeduid. In Figuur 5.4 is een afbeelding gegeven van het concept.



Figuur 5.4 Intern schot. De straal bedraagt driekwart van de straal van de tank. De hoogte bedraagt een derde van de vulhoogte van de tank. Er is aan de onderzijde een meter afstand tot de bodem van de tank.

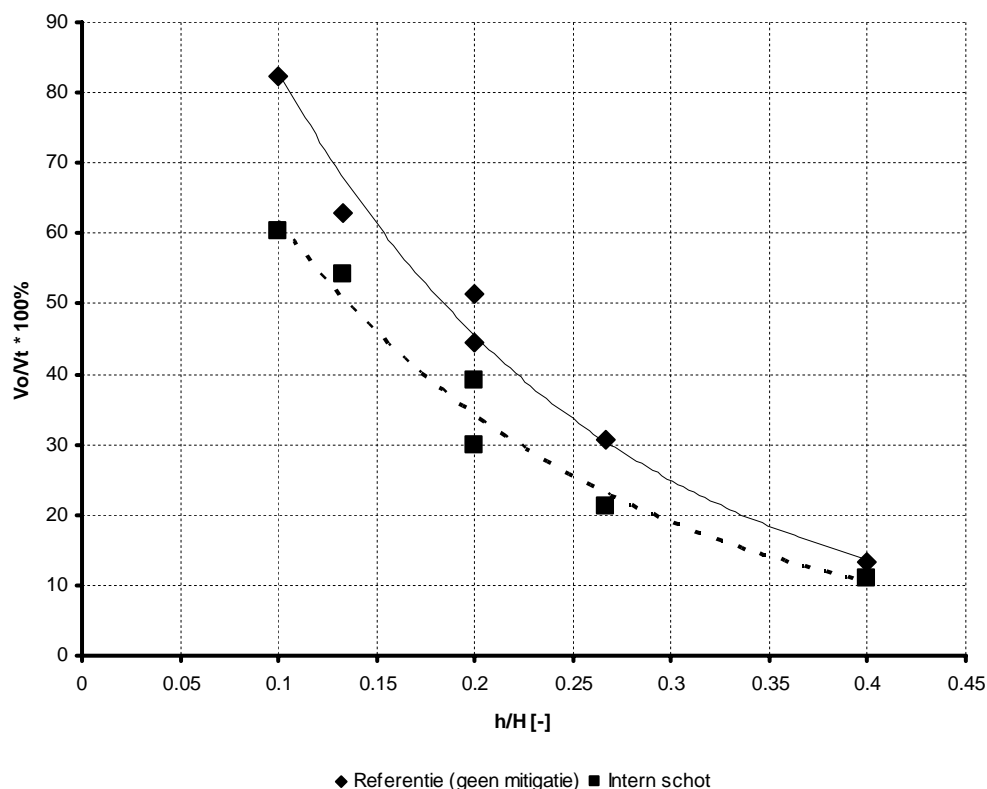
Er zijn drie vulhoogtes gebruikt, namelijk 20m, 15m en 10m. Per vulhoogte zijn er twee tankputhoogtes gesimuleerd. In totaal zijn er 6 simulaties uitgevoerd. De overslagvolumes, die het resultaat zijn van de simulaties, staan in Tabel 5.3 vermeld.

Tabel 5.3 Overslagvolumes voor de situatie met interne schotten

Simulatie	D1 [m]	H [m]	h [m]	Vt [m <sup>3</sup> ]	Vo1 [m <sup>3</sup> ]	Vo1/Vt [%]
1R10_H10_h2_d20_D25_i090_my	20	10	2	774	301.623	39
1R10_H15_h2_d20_D25_i090_my	20	15	2	1155	626.42	54
1R10_H20_h2_d20_D25_i090_my	20	20	2	1537	929.015	60
1R10_H10_h4_d20_D25_i090_my	20	10	4	774	85.305	11
1R10_H15_h4_d20_D25_i090_my	20	15	4	1155	243.674	21
1R10_H20_h4_d20_D25_i090_my	20	20	4	1537	459.08	30

Merk op dat de startvolumes, in de kolom aangegeven met  $V_{o1}$ , iets afwijken van de startvolumes in eerdere tabellen. Dat komt omdat in ComFLOW een constructie niet oneindig dun kan zijn. Omdat het interne schot in ComFLOW een zekere dikte heeft, en daardoor een volume, wordt het initiële volume vloeistof verminderd met het volume van het schot. Het gaat echter om zeer kleine verschillen, die de resultaten van de simulaties niet merkbaar zullen beïnvloeden.

Voor één tankputhoogte neemt het overslagvolume in Tabel 5.3 toe met de vulhoogte. Als de tankputhoogte toeneemt, neemt het overslagvolume af. De resultaten in Tabel 5.3 zijn rechtstreeks te vergelijken met die uit Tabel 5.1. De resultaten zijn ook als figuur weer te geven. In Figuur 5.5 staan de overslagvolumes als percentage uitgezet tegen de relatieve tankputhoogte voor de situatie dat er interne schotten zijn toegepast; dit is de kort-gestreepte lijn. De getrokken lijn geeft de resultaten uit paragraaf 5.1 weer.



Figuur 5.5 Overslagvolumes voor de situatie met interne schotten in het rood. Met de getrokken lijn is de referentiesituatie weergegeven.

Uit Figuur 5.5 kan worden opgemaakt dat interne schotten het overslagvolume reduceren ten opzichte van de resultaten uit paragraaf 5.1. De reductie is vooral merkbaar bij lagere relatieve tankputhoogtes.

#### 5.4 Afstand van de tankputwand tot de tank

In de volgende paragraaf wordt beproefd of het overslagvolume afneemt als de afstand toeneemt van de tankputwand tot de tank. In de referentiesituatie is de afstand van de tankputwand tot het middelpunt van de tank 20m. Deze afstand wordt nu systematisch vergroot tot 25m, 30m en 35m.

Voor iedere afstand van de tankputwand worden drie vulhoogtes gesimuleerd: 20m, 15m en 10m. En voor iedere vulhoogte zijn er twee tankputhoogtes. In totaal worden er dus 18 simulaties gedaan.

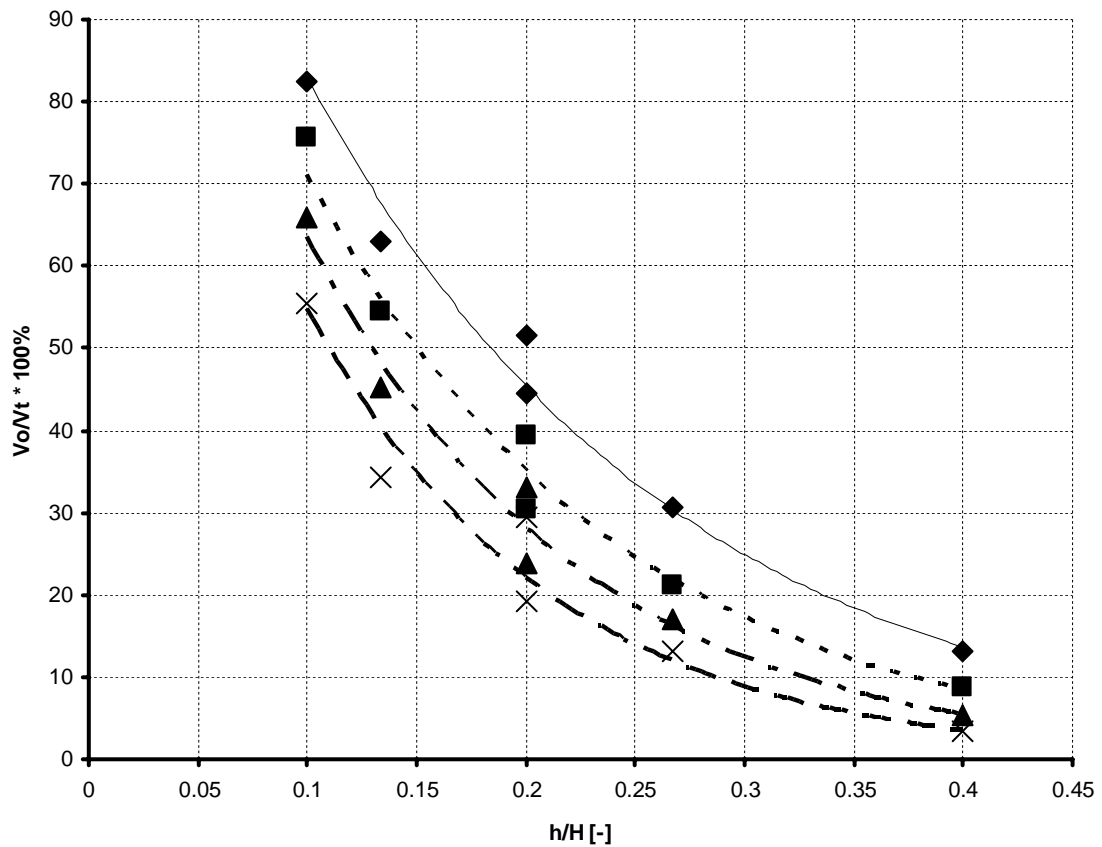
De resultaten van de simulaties in termen van overslagvolume staan in Tabel 5.4. Wanneer de vulhoogte toeneemt neemt ook het overslagvolume toe. Als de tankputhoogte wordt vergroot, dan neemt het overslagvolume af.

Tabel 5.4 Overslagvolumes voor verschillende afstanden van de tankputwand tot het middelpunt van de tank.

Simulatie	D1 [m]	H [m]	h [m]	Vt [m3]	Vo1 [m3]	Vo1/Vt [%]
1R10_H10_h2_d25_D40_i090_mn	25	10	2	785	238.99	30
1R10_H15_h2_d25_D40_i090_mn	25	15	2	1178	642.685	55
1R10_H20_h2_d25_D40_i090_mn	25	20	2	1571	1187.05	76
1R10_H10_h4_d25_D40_i090_mn	25	10	4	785	68.869	9
1R10_H15_h4_d25_D40_i090_mn	25	15	4	1178	248.75	21
1R10_H20_h4_d25_D40_i090_mn	25	20	4	1571	619.153	39
1R10_H10_h2_d30_D40_i090_mn	30	10	2	785	187.922	24
1R10_H15_h2_d30_D40_i090_mn	30	15	2	1178	532.993	45
1R10_H20_h2_d30_D40_i090_mn	30	20	2	1571	1037.2	66
1R10_H10_h4_d30_D40_i090_mn	30	10	4	785	42.312	5
1R10_H15_h4_d30_D40_i090_mn	30	15	4	1178	199.878	17
1R10_H20_h4_d30_D40_i090_mn	30	20	4	1571	521.364	33
1R10_H10_h2_d35_D40_i090_mn	35	10	2	785	149.706	19
1R10_H15_h2_d35_D40_i090_mn	35	15	2	1178	402.786	34
1R10_H20_h2_d35_D40_i090_mn	35	20	2	1571	870.111	55
1R10_H10_h4_d35_D40_i090_mn	35	10	4	785	26.105	3
1R10_H15_h4_d35_D40_i090_mn	35	15	4	1178	155.112	13
1R10_H20_h4_d35_D40_i090_mn	35	20	4	1571	463.059	30

De resultaten kunnen ook in een figuur worden weergegeven. In Figuur 5.6 staan de resultaten afgebeeld met behulp van verschillende lijnen. Elke lijn representeert het overslagvolume als functie van de relatieve tankputhoogte bij een bepaalde afstand van de tankputwand tot het middelpunt van de tank. De getrokken lijn geeft de resultaten uit paragraaf 5.1 weer, waarbij de tankputwand op een afstand van 20m van het middelpunt van de tank vandaan stond. De kort-gestreepte lijn is voor de afstand van 25m; de streepstippellijn voor 30m en de lang-gestreepte lijn is voor de afstand van 35m. Merk op dat de lijnen een benadering zijn van de daadwerkelijke meetpunten. De meetpunten voor het overslagvolume staan ook in de figuur afgebeeld.





♦ Referentie (geen mitigatie) ■ Afstand tankputw al 25m ▲ Afstand tankputw al 30m × Afstand tankputw al 35m

Figuur 5.6 Overslagvolume als functie van de relatieve tankputhoogte voor 4 verschillende afstanden van de tankputwand tot het middelpunt van de tank. De getrokken lijn is voor de referentiesituatie met de wand op 20m, de kort-gestreepte lijn is voor de afstand van 25m, de streep-stippellijn voor 30m en de lang-gestreepte voor 35m.

Met Figuur 5.6 kan worden vastgesteld dat het overslagvolume afneemt, naarmate de afstand van de tankputwand tot de tank toeneemt.

### 5.5 Tertiaire insluiting

De laatste manier om het overslagvolume te reduceren die in dit hoofdstuk behandeld wordt, is tertiaire insluiting. Bij tertiaire insluiting is om de tankput nog een tankput aangelegd. De tank wordt dan als primaire insluiting beschouwd, de tankput als de secundaire insluiting en de tweede tankput als de tertiaire insluiting.

Om het aantal mogelijke variaties beperkt te houden, is ervoor gekozen de tertiaire insluiting even hoog te maken als de tankputhoogte. Als de tankput 2m hoog is, dan is de tertiaire insluiting dat ook. De wand heeft ook dezelfde dikte. De enige variatie is daarmee de afstand van de tertiaire insluiting tot het middelpunt van de tank.

Er zijn simulaties gedaan om vast te stellen wat het overslagvolume is dat de tertiaire insluiting passeert. De simulaties zijn systematisch opgezet. De afstand van de tweede tankputwand tot het middelpunt van de tank heeft in de simulaties de volgende waarden: 25m, 30m en 35m.

Voor elke afstand van de tertiaire insluiting tot het middelpunt van de tank zijn drie vulhoogtes beschouwd en per vulhoogte twee hoogtes voor de tankput. In totaal zijn dat 18 simulaties. De resultaten van de simulaties in termen van overslag staan in Tabel 5.5. In kolom D2 van deze tabel is nu de afstand van de tertiaire insluiting gegeven. En met  $V_{o2}/V_t$  wordt bedoeld: het volume vloeistof dat de tertiaire insluiting passeert als percentage van het initiële tankvolume.

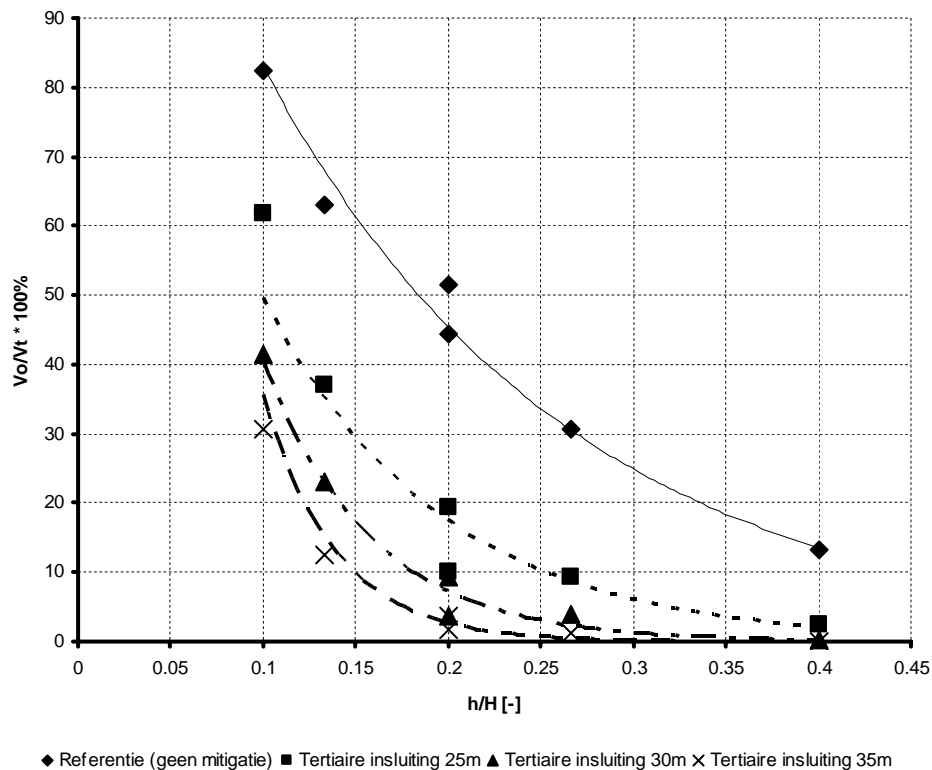
Tabel 5.5 Overslagvolumes voor de situatie met de tertiaire insluiting.

Simulatie	D1 [m]	D2 [m]	H [m]	h [m]	Vt [m3]	Vo2 [m3]	Vo2/Vt [%]
1R10_H10_h2_d20_D25_i090_mn	20	25	10	2	785	78.829	10
1R10_H15_h2_d20_D25_i090_mn	20	25	15	2	1178	437.343	37.1
1R10_H20_h2_d20_D25_i090_mn	20	25	20	2	1571	971.192	61.8
1R10_H10_h4_d20_D25_i090_mn	20	25	10	4	785	18.598	2.4
1R10_H15_h4_d20_D25_i090_mn	20	25	15	4	1178	109.883	9.3
1R10_H20_h4_d20_D25_i090_mn	20	25	20	4	1571	303.534	19.3
1R10_H10_h2_d20_D30_i090_mn	20	30	10	2	785	30.032	3.8
1R10_H15_h2_d20_D30_i090_mn	20	30	15	2	1178	270.791	23
1R10_H20_h2_d20_D30_i090_mn	20	30	20	2	1571	650.957	41.4
1R10_H10_h4_d20_D30_i090_mn	20	30	10	4	785	1.298	0.2
1R10_H15_h4_d20_D30_i090_mn	20	30	15	4	1178	46.204	3.9
1R10_H20_h4_d20_D30_i090_mn	20	30	20	4	1571	146.579	9.3
1R10_H10_h2_d20_D35_i090_mn	20	35	10	2	785	13.969	1.8
1R10_H15_h2_d20_D35_i090_mn	20	35	15	2	1178	146.323	12.4
1R10_H20_h2_d20_D35_i090_mn	20	35	20	2	1571	479.99	30.6
1R10_H10_h4_d20_D35_i090_mn	20	35	10	4	785	0.008	0
1R10_H15_h4_d20_D35_i090_mn	20	35	15	4	1178	13.698	1.2
1R10_H20_h4_d20_D35_i090_mn	20	35	20	4	1571	55.855	3.6

In Figuur 5.7 zijn de resultaten uit Tabel 5.5 grafisch weergegeven. Elke lijn in de grafiek representeert één afstand van de tertiaire insluiting tot de tank. Met de getrokken lijn zijn de resultaten uit paragraaf 5.1 weergegeven. Door de gevallen met tertiaire insluiting te vergelijken met deze resultaten wordt duidelijk wat deze maatregel oplevert.

De kort-gestreepte lijn representeert het overslagvolume als functie van de relatieve tankputhoogte, wanneer de tertiaire insluiting op een afstand van 25m van het middelpunt van de tank geplaatst is. De streep-stippellijn is voor de afstand van 30m en de lang-gestreepte lijn, tenslotte, geeft het overslagvolume wanneer de insluiting op een afstand van 35m staat.

Uit Figuur 5.7 kan worden opgemaakt dat het overslagvolume aanzienlijk gereduceerd wordt ten opzichte van de referentiesituatie wanneer tertiaire insluiting wordt toegepast. Naarmate de afstand van de tertiaire insluiting tot het middelpunt van de tank toeneemt, wordt het overslagvolume minder.



Figuur 5.7 Overslagvolume bij tertiaire insluiting. Weergegeven zijn lijnen voor verschillende afstanden van de tertiaire insluiting tot het middelpunt van de tank. De getrokken lijn is de referentiesituatie, de kort-gestreepte lijn is met een tertiaire insluiting op 25m, de streep-stippellijn voor 30m en de lang-gestreepte voor een insluiting op een afstand van 35m.

## 5.6 Discussie

In dit hoofdstuk zijn verschillende methoden aan bod gekomen om het overslagvolume na falen van een verticale opslagtank te reduceren. Deze methoden zijn:

1. reduceren van de vulhoogte ten opzichte van de tankpuithoogte
2. geïnclineerde wand
3. intern schot
4. afstand van de tankputwand tot het middelpunt van de tank vergroten
5. tertiaire insluiting

De mitigerende maatregelen slagen er nauwelijks in om het overslagvolume significant te reduceren. Vooral COAST en MOTIF bleken teleurstellend. Hier was ons een reductie beloofd van respectievelijk 52% en 72%. Uit de ComFLOW berekeningen kwam een reductie van maximaal 25% met MOTIF bij een h/H van 0.1. Voor andere relatieve tankpuithoogtes was de reductie minder.

Wanneer er voldoende ruimte op een terrein aanwezig is om een tertiaire insluiting te realiseren, dan is dat een redelijk effectieve methode. In de berekeningen in dit hoofdstuk bleek het mogelijk te zijn om een overslagvolume van minder dan 10% te verkrijgen. De relatieve tankpuithoogte was dan groter dan 0.15 en de afstand van de tertiaire insluiting tot het centrum van de tank 35m.

Wanneer er niet zoveel ruimte beschikbaar is op een opslagterrein, dan lijkt het reduceren van de vulhoogte de enige mogelijke maatregel. Op een terrein met meerdere tanks nabij elkaar, is het waarschijnlijk wel mogelijk om de verdeling van tanks over het terrein te optimaliseren. Bij de waterkant moet de vulhoogte van de tank beperkt blijven. Maar verder van de waterkant zou de vulhoogte wellicht een stuk hoger kunnen zijn, omdat er een aantal tanks tussen de betreffende tank en de waterkant staat. Het optimaliseren van de verdeling van tanks over een opslagterrein nabij water zou in een vervolgonderzoek nader moeten worden bekeken.

## 6 Terreinconfiguraties uit de praktijk

### 6.1 Inleiding

In het voorgaande is systematisch onderzoek gedaan naar overslag als gevolg van tankfalen. We hebben gezien hoe de overslag verandert als functie van, bijvoorbeeld, relatieve tankputhoogte en relatieve afstand van de tankputwand tot de tank. Dat onderzoek heeft zich met name gericht op afzonderlijke tanks in geïdealiseerde, vaak symmetrische, omstandigheden.

Het systematisch onderzoek is belangrijk: met de grafieken die voor verschillende faalmechanismes zijn bepaald, is het mogelijk een schatting te maken van het overslagvolume, wanneer er voor de beschouwde terreinconfiguratie nog geen gerichte simulatie is verricht.

Met een ComFLOW-simulatie is het mogelijk ook voor specifieke terreinconfiguraties het overslagvolume na tankfalen te bepalen. Het overslagvolume zal met een gerichte simulatie nauwkeuriger kunnen worden vastgesteld dan door een schatting met behulp van grafieken uit het systematisch onderzoek.

In dit hoofdstuk zullen voor drie terreinconfiguraties uit de praktijk gerichte simulaties worden beschreven. De terreinconfiguraties zijn aangeleverd door Rijkswaterstaat. De eerste terreinconfiguratie betreft de uitbreiding van een opslagterrein met nieuw te bouwen opslagtanks nabij een haven. Dit terrein en de resultaten van de simulatie voor dit terrein worden beschreven in paragraaf 6.2. De tweede configuratie betreft een opslagterrein nabij een kanaal. De simulatieresultaten voor dit terrein staan beschreven in paragraaf 6.3. De derde configuratie is voor een nieuw te bouwen tankput met een tertiaire insluiting. De resultaten voor deze configuratie worden gegeven in paragraaf 6.4.

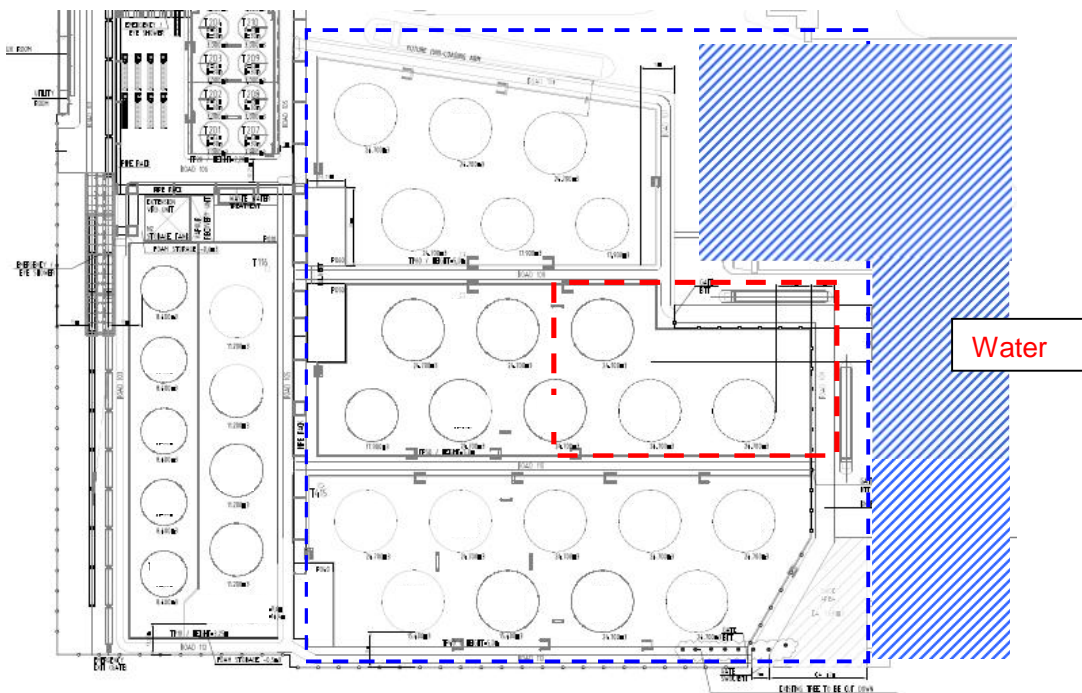
### 6.2 Configuratie 1: uitbreiding opslagterrein nabij een haven

#### 6.2.1 Configuratie van het terrein

De volledige terreinconfiguratie voor de nieuw te bouwen opslagtanks nabij een haven is afgebeeld in Figuur 6.1. In deze figuur staat met een blauw kader aangegeven voor welk deel van het terrein er plannen zijn voor nieuwbouw. Ook is met diagonale lijnen aangegeven waar zich het oppervlaktewater bevindt.

Het is niet mogelijk om het volledige terrein in ComFLOW te schematiseren en vervolgens met voldoende nauwkeurigheid de overslag als gevolg van falen van een individuele tank te bepalen. Om deze reden zal slechts een deel van het terrein geschematiseerd worden.

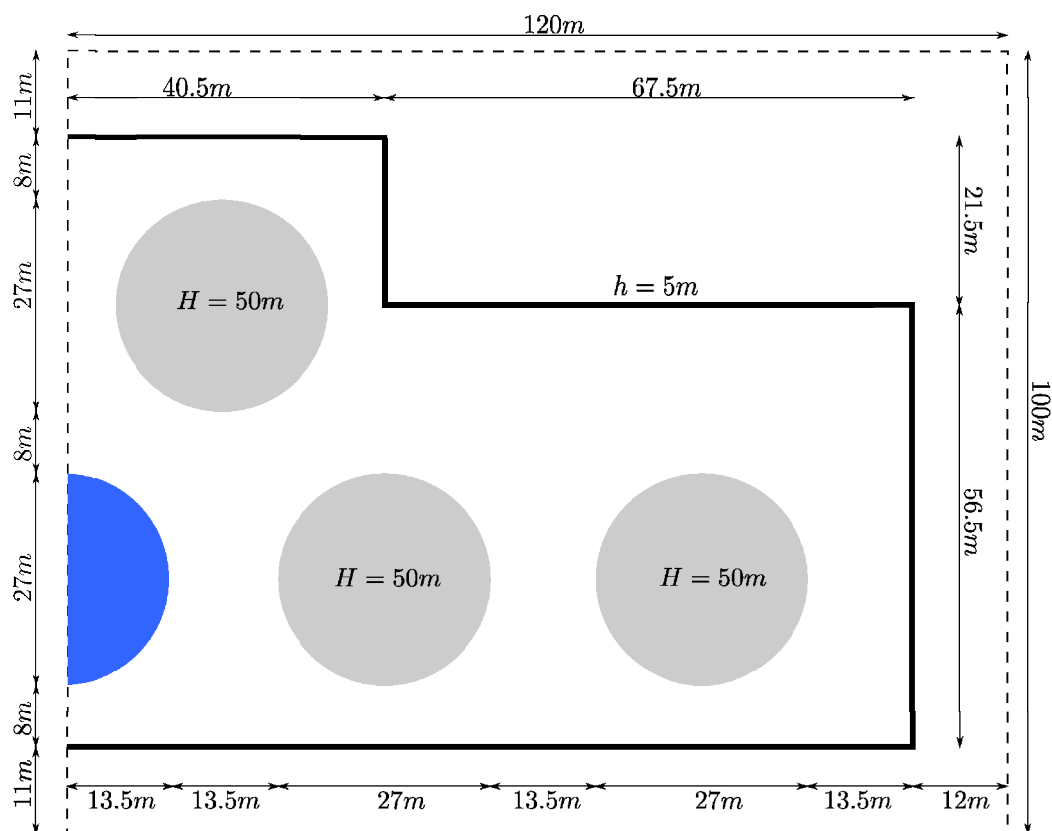
Omdat dit onderzoek voortkomt uit de behoefte om de gevolgen van tankfalen voor het oppervlaktewater te inventariseren (zie de inleiding van dit rapport), wordt het deel van het terrein nabij de waterkant het meest relevant geacht.



Figuur 6.1 Voorziene uitbreiding van een opslagterrein nabij een haven. De uitbreiding is blauw omkaderd en het water is met diagonale lijnen aangegeven. In rood is een deel van de uitbreiding omkaderd. Voor dit deel zal een simulatie van tankfalen worden gedaan; het is vergroot weergegeven in Figuur 6.2

Voor veel tanks nabij de waterkant is het mogelijk om met de resultaten van het systematisch onderzoek, beschreven in voorgaande hoofdstukken, een goede schatting van het overslagvolume te maken na falen van deze tank. Daarom is voor deze simulatie die betrekking heeft op een terreinconfiguratie uit de praktijk, juist gekozen voor een scenario waarbij het lastiger is om met de grafieken uit het systematisch onderzoek een goede schatting te maken. Het scenario is als volgt.

In Figuur 6.1 is een deel van het terrein met rood omkaderd. Dit deel is uitvergroot in Figuur 6.2. In deze figuur zijn meerdere tanks afgebeeld, die binnen één tankput staan opgesteld. De tanks zijn allen 50m hoog. Het scenario dat zal worden gesimuleerd is dat de tank, die binnen het aangegeven deel van het terrein het verst bij de waterkant vandaan staat, volledig faalt. In Figuur 6.2 is deze tank in blauw weergegeven. Met behulp van de simulatie zal worden vastgesteld wat het overslagvolume is, maar alleen dat deel dat in het oppervlaktewater terecht kan komen. We meten de overslag dus alleen langs dat deel van de tankputwand dat grenst aan het water (zie Figuur 6.1).



Figuur 6.2 Schematische weergave van een deel van het opslagterrein. Opslagtanks zijn grijs weergegeven; de hoogte van alle tanks is 50m. Om de tanks staat een wand van 5m hoog. De zijdes van het rekendomein zijn met een onderbroken lijn weergegeven. In blauw staat de tank afgebeeld waarvan het falen in ComFLOW is gesimuleerd

### 6.2.2 Opzet van de simulatie

De schematisatie van het terrein in ComFLOW is precies gelijk aan de afbeelding in Figuur 6.2. Het rekendomein is 120m bij 100m. De tankputwand staat op ruim 10m afstand van de wanden van het rekendomein. De wanden van het rekendomein zijn ondoorlatend. Met een ondoorlatende wand modelleren we een symmetrische stroming. Een symmetrieconditie is een goed model voor de linker wand van het rekendomein die de falende tank in tweeën snijdt. Voor de andere wanden is het niet zo'n goed model. De positie van de domeinwanden is zo gekozen dat er gedurende de simulatie geen overslag kan optreden in omgekeerde richting, van buiten de tankput naar binnen. De verstoring als gevolg van ondoorlatende zijwanden van het domein doet daarom niet ter zake.

Het gedeelte van het rekendomein tussen de tankputwand en de wand van het rekendomein, representeert een weg die daar in werkelijkheid zal zijn. Een deel van de vloeistof die op de weg komt, zou kunnen afstromen naar het oppervlaktewater, maar daar wordt in de resultaten van de simulatie geen rekening mee gehouden. Alleen de overslag die optreedt bij het deel van de tankput dat grenst aan het water wordt gemeten.

De tanks staan, op hun beurt, op ongeveer 8m afstand van de tankputwand. De onderlinge afstand tussen de tanks is gelijk aan de halve diameter van de tank. De diameter bedraagt 27m en de afstand is dus 13.5m.

De tankputwand is 5m hoog en in de simulaties is deze 0.5m dik. De vloeistofhoogte in de tanks is 50m hoog. Het vloeistofvolume van één tank is 28.627m<sup>3</sup>. De hoogte van het rekendomein is even hoog als de hoogte van de vloeistof: 50m.

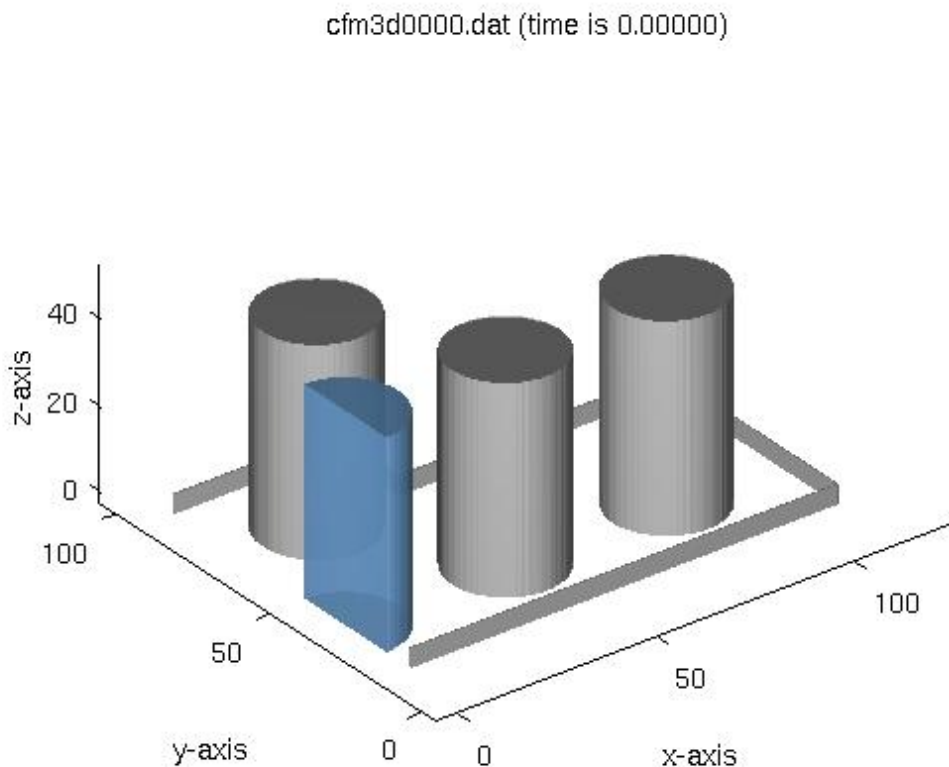
De roosterresolutie is in alle richtingen dezelfde: de maaswijdte is 0.5m. Het aantal cellen dat binnen het domein gebruikt wordt is daarmee gelijk aan 240 maal 200 maal 100. Dat bedraagt nagenoeg 5 miljoen cellen. Dit aantal cellen is ongeveer het maximum dat voor een simulatie gebruikt kan worden op de rekencomputers die binnen Deltares beschikbaar zijn.

De gesimuleerde tijd is 10s. De tijdstap waarmee gerekend wordt is variabel en is afhankelijk van het stabiliteitscriterium voor de tijdingegratie (zie de algemene beschrijving van ComFLOW). De grootste tijdstap bepaalt de nauwkeurigheid van de tijdingegratie. Bij deze simulatie was de tijdstap nooit groter dan 0.045s.

Voor de simulatie is ervan uitgegaan dat de opgeslagen vloeistof water is. Water heeft een dichtheid van 1000kg/m<sup>3</sup>.

### 6.2.3 Resultaten van de simulatie

De beginvoorwaarde van de simulatie staat afgebeeld in Figuur 6.3. De tank die faalt is gemodelleerd als een cilinder van vloeistof. De snelheden binnen de vloeistof zijn op tijdstip  $t=0s$  gelijk aan nul.



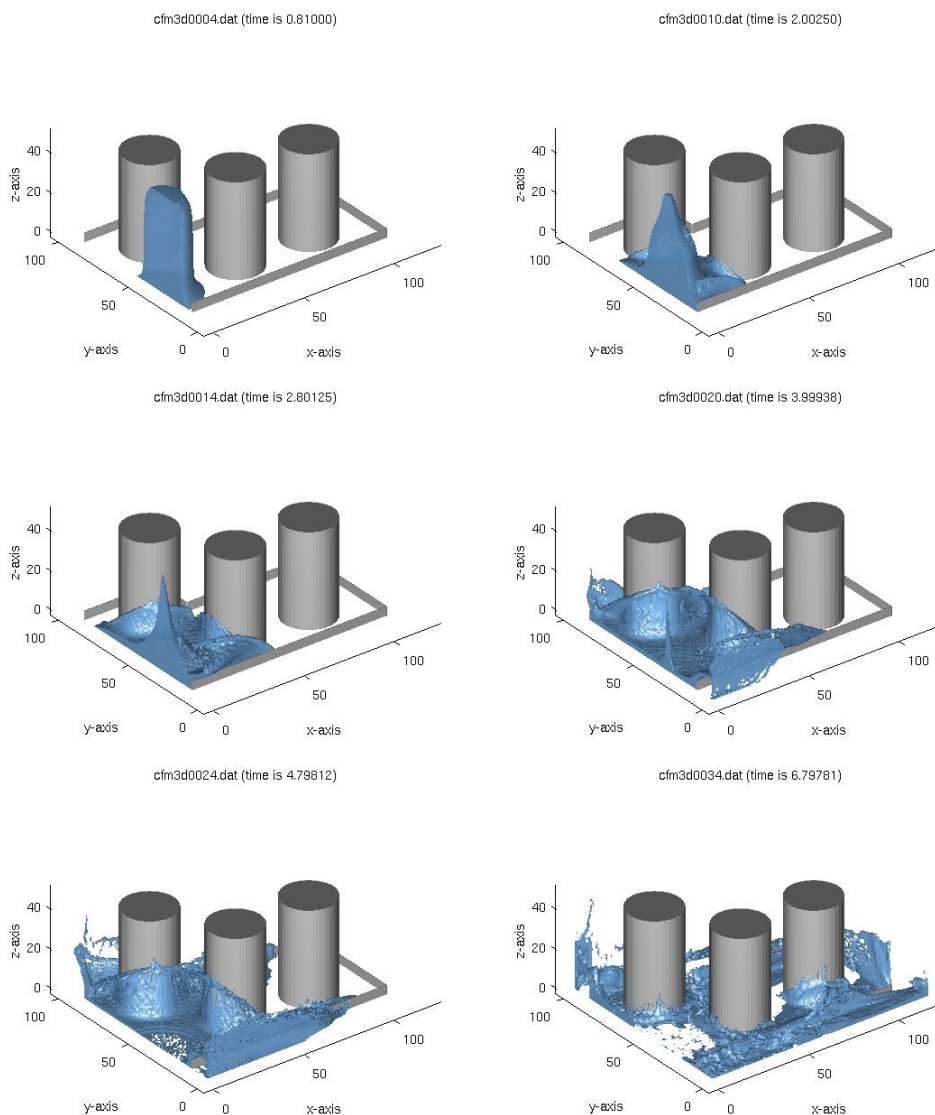
Figuur 6.3 Beginvoorwaarde van de simulatie voor terreinconfiguratie 1. Op  $t=0s$  zijn de snelheden in de vloeistof (in blauw weergegeven) allen gelijk aan nul.



Onder invloed van de druk in de waterkolom zal de vloeistof gaan versnellen. Initieel verloopt de druk hydrostatisch in de verticaal. In horizontale richting is de druk op elke afzonderlijke hoogte dezelfde. De vloeistof zal zich daarom radiaal verspreiden totdat het voor het eerst de naburige tanks en de tankputwand treft. Vervolgens, als de vloeistof om de tanks heen stroomt, is het stromingspatroon onregelmatiger. De vloeistof verplaatst zich met hoge snelheid richting de tankputwand die het dichtst bij de waterkant is. Bij de tankputwand aan de waterkant wordt de horizontale snelheid van de vloeistof omgezet in verticale, omhoog gerichte snelheid.

Als de vloeistof daarna onder invloed van de zwaartekracht weer naar beneden komt, belandt een deel ervan aan de buitenkant van de tankput. Dit deel zal afstromen naar het oppervlaktewater. Het overslagvolume na falen is ongeveer 10% van het tankvolume.

Kenmerkende stadia gedurende de simulatie staan afgebeeld in Figuur 6.4 met het tijdstip van het stadium boven de afzonderlijke afbeeldingen aangegeven.



Figuur 6.4 Stadia tijdens de simulatie met de vloeistofverdeling in blauw weergegeven. De tijdstippen van de stadia zijn boven de afzonderlijke figuren weergegeven.

## 6.3 Configuratie 2: opslagterrein nabij een kanaal

### 6.3.1 Configuratie van het terrein

De tweede terreinconfiguratie betreft een reeds bestaand terrein met opslagtanks. In Figuur 6.5 is een satellietfoto afgebeeld van het terrein (verkregen met behulp van Google Maps). Op de foto is een rij met tanks te zien die op een gemiddelde afstand van 25m bij de waterkant vandaan staan. Tussen de tanks en de waterlijn is deels een verharding aangelegd en een deel is onbebouwd.



Figuur 6.5 Satellietfoto van het opslagterrein (bron: Google Maps).

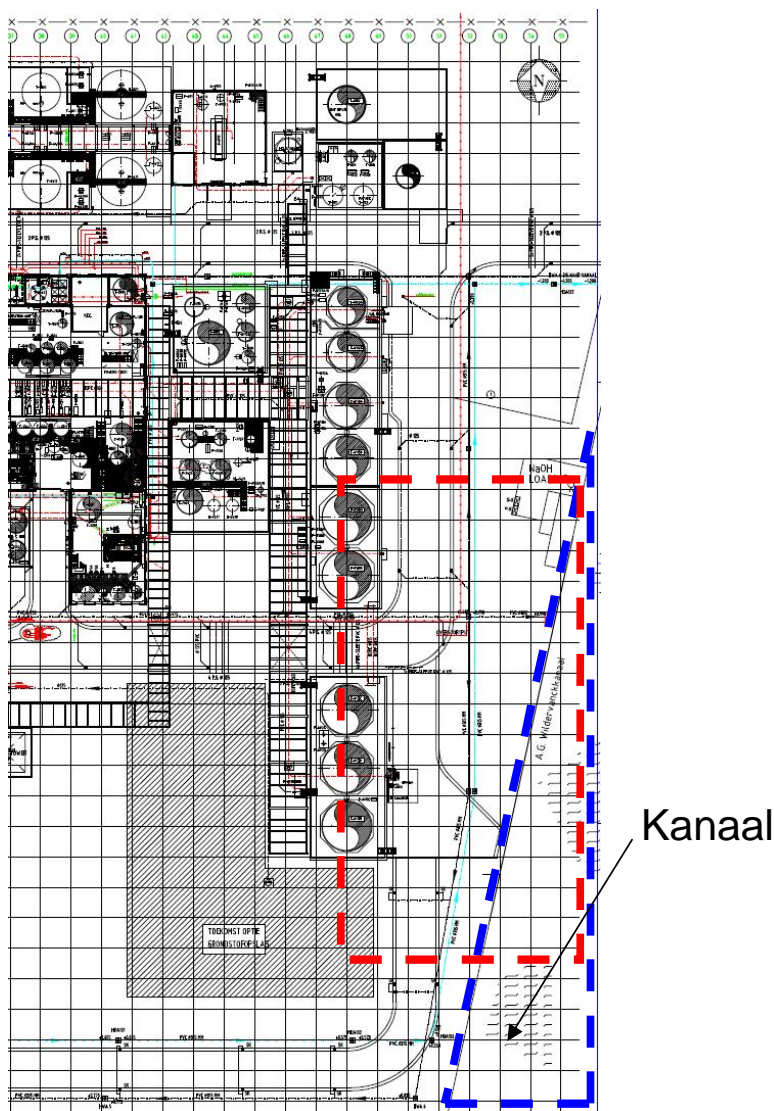
Van het terrein is een tekening aangeleverd door Rijkswaterstaat. Een deel van deze tekening is weergegeven in Figuur 6.6. De tekening heeft dezelfde oriëntatie als de satellietfoto. In Figuur 6.6 zijn ook twee kaders getekend. Het blauwe kader geeft de positie van het kanaal aan binnen de tekening. Het rode kader geeft het rekendomein aan, waarvoor een simulatie met ComFLOW is gedaan. Dit deel van het terrein is gekozen omdat de tanks in dit gedeelte het dichtst bij het kanaal staan en omdat het onderzoek in dit rapport bedoeld is om de gevolgen van tankfalen voor nabijgelegen oppervlaktewater te kwantificeren.

Binnen het deel van het terrein dat met rood omkaderd is, staan vijf opslagtanks. Deze tanks hebben een diameter van 7m en de vloeistof die erin is opgeslagen heeft een hoogte van 8m. De drie tanks aan de onderkant van het omkaderde gedeelte staan in één tankput. De twee andere staan in een tankput met nog vier opslagtanks.

De tankputten zijn verdiept ten opzichte van het maaiveld. Het bodemniveau van de put ligt op ongeveer 0.6m beneden maaiveld. Bovendien steekt de tankputwand ongeveer 0.6m boven het maaiveld uit. De hoogte van de tankputwand bedraagt dus ongeveer 1.2m. Deze hoogte zal in de simulatie worden gebruikt.

Een deel van het kanaal ligt binnen het rekendomein. Voor de simulatie wordt er vanuit gegaan dat het waterniveau in het kanaal 0.2m beneden maaiveld ligt. Dit is niet van belang voor de resultaten van de simulatie; dit peil is slechts gekozen ten behoeve van de visualisatie.

Op de tekening in Figuur 6.6 is een stramienmaat aangegeven. Hoewel het in de tekening niet staat aangegeven, is bepaald dat de stramienmaat ongeveer 5m bedraagt. Met behulp van de stramienmaat is het mogelijk horizontale afstanden in te schatten. De nauwkeurigheid van de schatting bedraagt ongeveer een halve meter.



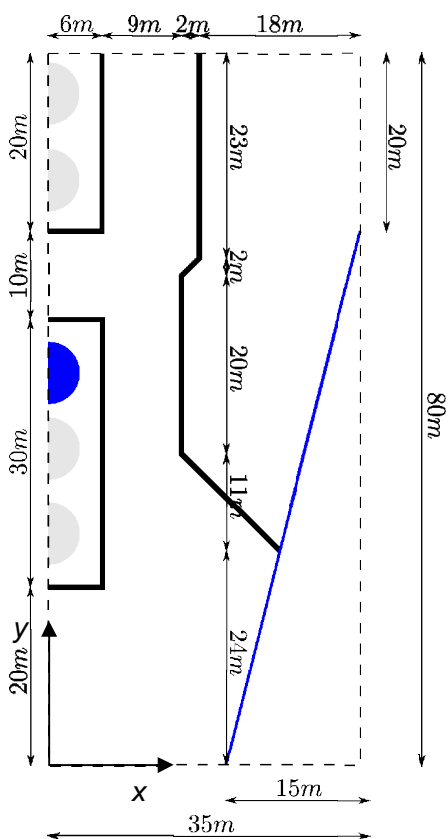
Figuur 6.6 Tekening van het opslagterrein. Met een blauw kader is aangegeven waar, binnen de tekening, zich het kanaal bevindt. Met een rood kader is het rekendomein van de simulatie aangegeven. De stramienmaat van de tekening is 5m.

Van het met rood omkaderde deel van het terrein is een schematisatie gemaakt. Figuur 6.7 toont een tekening waarin alle afstanden binnen het rode kader zijn geschat en weergegeven. In deze figuur zijn de opslagtanks in grijs weergegeven; de tankputwand dichtbij de tanks

wordt gerepresenteerd door een verdikte zwarte lijn; het rekendomein is met een onderbroken lijn weergegeven; en de waterlijn langs het kanaal heeft een blauwe kleur.

In Figuur 6.7 is nog een verdikte zwarte lijn weergegeven, namelijk tussen de tanks en het kanaal. Op de satellietfoto, die in Figuur 6.5 is afgebeeld, kan worden opgemaakt dat het onbebouwde deel tussen de tanks en het kanaal een hoger niveau heeft dan het maaiveld. Over dit deel is geen informatie verstrekt door Rijkswaterstaat en daarom schatten wij de hoogte van dit onbebouwde deel op dezelfde hoogte als die de tankputwand heeft ten opzichte van het maaiveld. Deze hoogte is 0.6m.

Eerder is al gemeld dat de tanks een diameter hebben van 7m. De afstand tussen de tanks wordt geschat op ongeveer 2m. Ook de afstand tussen de tanks en de tankputwand in y-richting is 2m. De afstand tussen de tanks en de wand in x-richting is 2.5m. Overige afstanden staan aangegeven in Figuur 6.7.



Figuur 6.7 Schematische weergave van het opslagterrein nabij het kanaal.

### 6.3.2 Opzet van de simulatie

Voor de simulatie zijn de afstanden gebruikt die zijn weergegeven in Figuur 6.7. Het rekendomein meet 35m bij 80m in horizontale richting. De hoogte van het rekendomein is even hoog als de hoogte van de opgeslagen vloeistof in de tanks, dat is 8m.

Het rekenrooster is uniform. In alle richtingen is dezelfde roosterafstand van 0.25m gekozen. Het totaal aantal cellen is daarom 140 maal 320 maal 32. In totaal zijn dat 1.4 miljoen cellen.

Merk op dat de tanks slechts voor de helft zijn weergegeven in Figuur 6.7. De linkerwand van het rekendomein is ondoorlatend. Hiermee wordt gemodelleerd dat de stroming symmetrisch is ten opzichte van deze wand. In dit geval is dat een goede schematisatie. De overige wanden van het domein zijn ook ondoorlatend. Dat is niet zo'n goede schematisatie en daarom zijn deze wanden zo ver bij het interessegebied rond de falende tank vandaan geplaatst, dat de stroming niet door deze ondoorlatende domeinwanden wordt verstoord.

Als simulatietijd is gekozen voor 15s. Binnen deze tijd voltrekt zich het falen van de tank, de overslag en is de vloeistof in de tankput weer enigszins tot rust gekomen. "Rust" betekent dat er geen overslag meer optreedt. De maximale tijdstap gedurende deze simulatie is gelijk aan 0.023s.

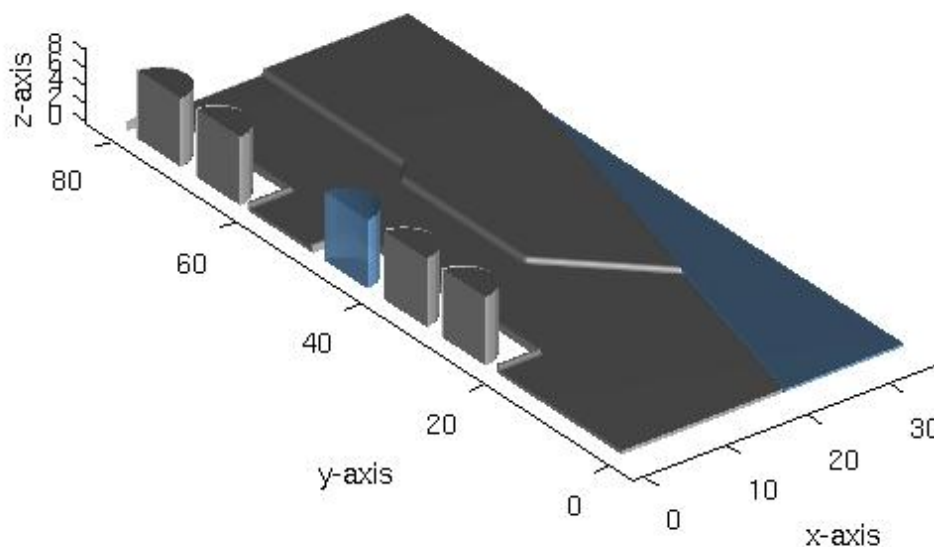
De tank die faalt tijdens de simulatie is in Figuur 6.7 blauw weergegeven. De dichtheid van deze vloeistof in de tank is 1.900kg/m<sup>3</sup>. Dit is als invoerparameter voor ComFLOW gebruikt.

Gedurende de simulatie meten we een aantal grootheden. Dat is in de eerste plaats de hoeveelheid vloeistof die over de tankputwand heen gaat en vervolgens in het kanaal terecht komt. In de tweede plaats worden de totale kracht op de naburige tank (in dezelfde tankput) en de druk gemeten. Voor het uitvoerpunt van de druk is gekozen voor de locatie op de naburige tank tegenover de falende tank, op een hoogte van 0.5m boven de tankputbodem. De exacte positie is dan  $(x,y,z) = (0.0, 38.5, 0.5)$ m ten opzichte van de oorsprong die in Figuur 6.7 is weergegeven.

### 6.3.3 Resultaten van de simulatie

De beginvoorwaarde voor de simulatie die betrekking heeft op het opslagterrein bij het kanaal is weergegeven in Figuur 6.8. De falende tank is afgebeeld als een kolom vloeistof. Op tijdstip  $t=0$ s zijn alle snelheden in de vloeistof gelijk aan nul.

cfm3d0000.dat (time is 0.00000)



Figuur 6.8 Beginvoorwaarde van de simulatie. De falende tank is in blauw afgebeeld. Binnen de vloeistof zijn op dit tijdstip alle snelheden gelijk aan nul.

Onder invloed van de zwaartekracht zal de vloeistof gaan versnellen. Initieel verspreidt de vloeistof nabij de basis van de falende tank zich in radiale richting. Bij de basis is de versnelling groter dan erboven, omdat de hydrostatische druk aan de basis, en daarmee het drukverschil met de buitenlucht, het grootst is.

Zodra de vloeistof de tankputwand en de naburige tank raakt, wordt het stromingspatroon onregelmatiger. Een deel van de vloeistof zal zich nu in verticale richting gaan voortbewegen. De vloeistof komt boven de tankputwand uit en een deel zal, als door de zwaartekracht de vloeistof weer naar beneden komt, buiten de tankput terecht komen.

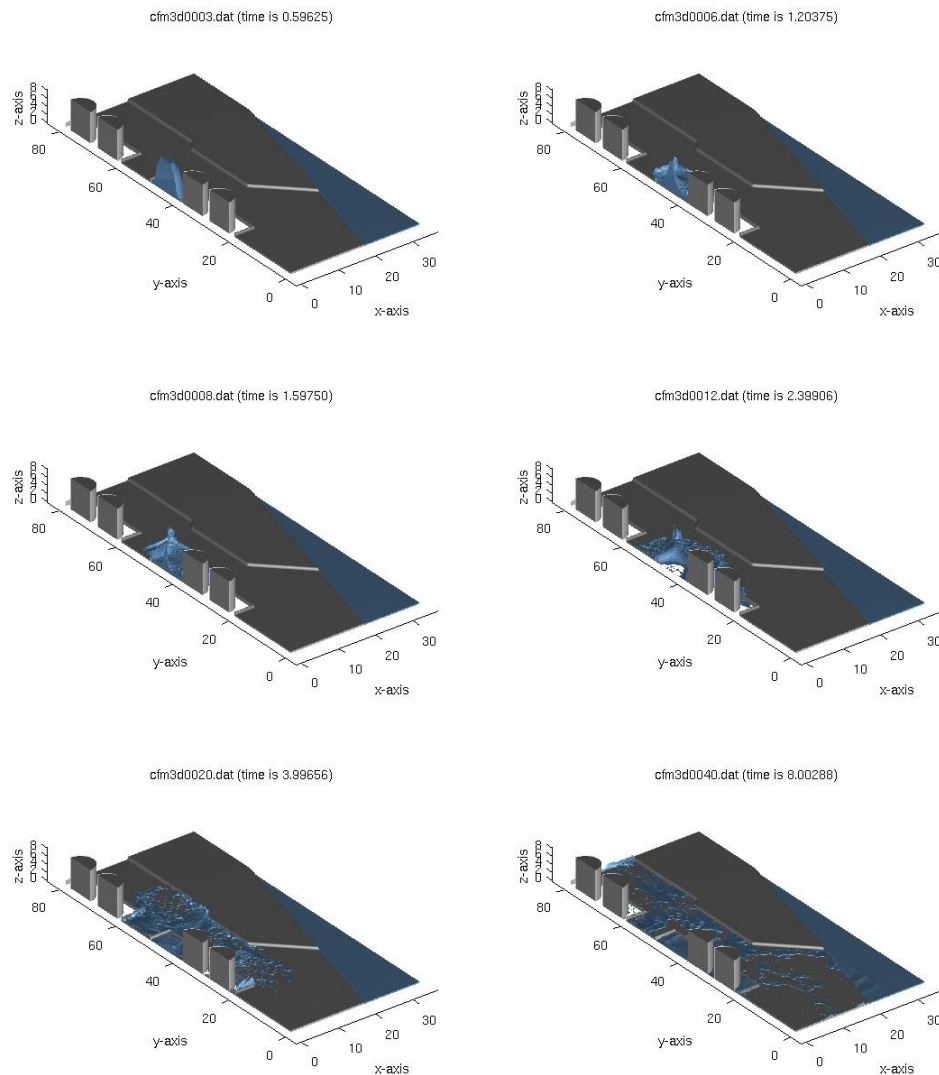
Buiten de tankput, blijft het merendeel van de vloeistof op het terrein. Er komt slechts zeer weinig in het kanaal terecht. Het volume dat tijdens de simulatie in het kanaal terecht komt, is ongeveer 1% van het volume vloeistof in de tank.

Dit is niet een heel nauwkeurig resultaat, omdat de precieze hoeveelheid die in het kanaal terecht komt, sterk afhangt van de glooiing van het terrein en van numerieke fouten als de laag zeer dun wordt. Wel kan met zekerheid gezegd worden dat, in deze simulatie, de afstand tussen tankput en kanaal niet rechtstreeks door de vloeistof uit de tank wordt overbrugd. Alle vloeistof komt met relatief lage horizontale snelheid op het terrein. Dat betekent dat met een lage opstaande rand bij het kanaal kan worden voorkomen dat vloeistof in het kanaal terecht komt.

Enkele kenmerkende momenten gedurende de simulatie zijn afgebeeld in Figuur 6.9. Boven iedere afbeelding in Figuur 6.9 staat de tijd weergegeven die verstreken is sinds het begin van de simulatie.

Gedurende de simulatie zijn ook drukken en krachten gemeten. In het punt  $(x,y,z) = (0.0, 38.5, 0.5)$ m is een registratie gemaakt van de druk als functie van de tijd. Deze registratie is weergegeven in Figuur 6.10, aan de linkerzijde. Het verloop van de druk is als volgt: initieel is de druk in dat punt gelijk aan nul, er is immers geen vloeistof. Als de vloeistof met een klap de tank raakt, loopt de druk snel op en bereikt een maximum. Hierna neemt de druk weer af tot nul. Dit betekent dat de vloeistof in de put niet tot een hoogte van 0.5m komt. Slechts af en toe nog wordt er een druk gemeten, omdat de vloeistof in de tankput zich heen en weer beweegt.

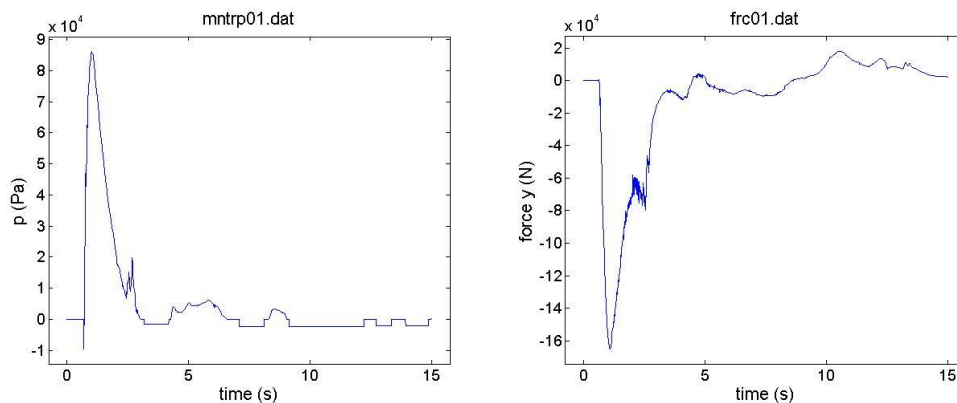
Om de maximale druk gedurende de klap in verhouding te zien, relateren we deze met de maximale hydrostatische druk in de naburige tank. De hydrostatische druk binnen de tank op een hoogte van 0.5m is  $140\text{kN/m}^2$ . De maximale druk in het uitvoerpunt gedurende de klap is  $90\text{kN/m}^2$ . Deze is zeer lokaal. De naburige tank moet, na falen van zijn buurman, de extra druk kunnen weerstaan om niet zelf ook te falen.



*Figuur 6.9 Kenmerkende momenten gedurende de simulatie met de vloeistofverdeling in blauw weergegeven. De verstreken tijd na het begin van de simulatie staat boven de afzonderlijke afbeeldingen weergegeven.*

Merk op dat in Figuur 6.10, voor het snel oplopen van de druk rond 0.5s, een negatieve druk wordt geregistreerd. Dat is niet fysisch: het is een numeriek artefact. Omdat aan het vrij oppervlak, dat zich op een willekeurige positie binnen een cel kan bevinden, de randvoorwaarde  $p=0\text{N/m}^2$  moet worden opgelost met behulp van een interpolatie tussen twee cellen, is in één van de twee cellen bij het vrij oppervlak de druk soms negatief.

Het verloop van de kracht op de naburige tank is ook weergegeven in Figuur 6.10. Door de keuze van het assenstelsel is de richting van de kracht in y-richting op de tank negatief. Later gedurende de simulatie is de kracht soms negatief en dan weer positief gericht. Dat is het resultaat van het heen-en-weer-bewegen van de resterende vloeistof in de tankput. Als de vloeistof in de tankput tot rust is gekomen, is de nettokracht in y-richting nul. Omdat de stroming symmetrisch is in de zijwand van het rekendomein, is er geen nettokracht in x-richting.

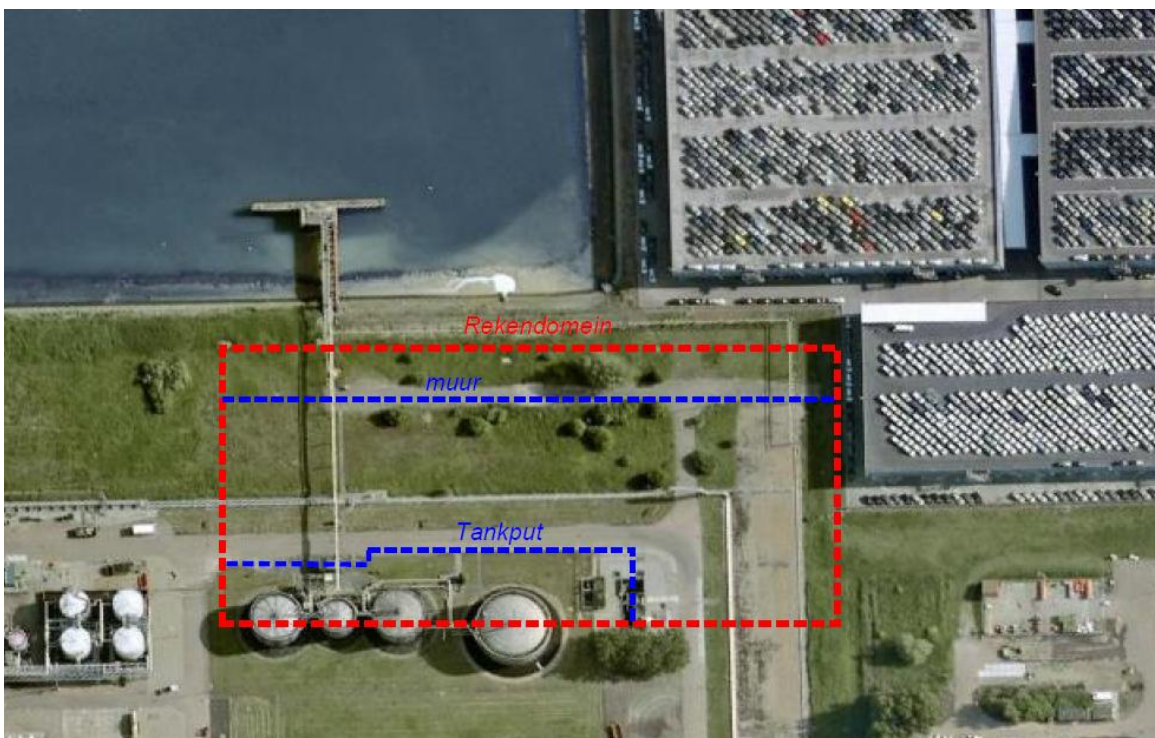


Figuur 6.10 Krachten op de naburige tank. Links het verloop van de druk in het punt  $(x,y,z)=(0, 38.5, 0.5)$ m. Rechts het verloop van de totale kracht in y-richting.

## 6.4 Configuratie 3: nieuwbouw van tankput en tertiaire insluiting

### 6.4.1 Configuratie van het terrein

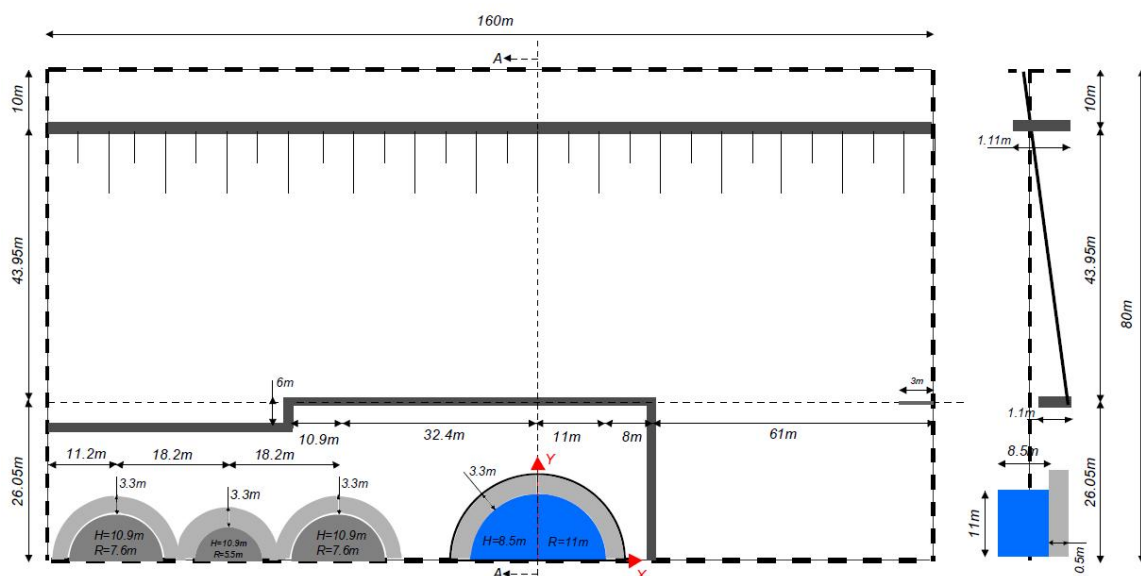
De derde terreinconfiguratie uit de praktijk betreft een aantal tanks in de buurt van oppervlaktewater, die momenteel niet van een tankput zijn voorzien. Er is nieuwbouw van de tankput voorzien en daar is een ontwerp voor gemaakt. Onderdeel van het ontwerp is een tertiaire insluiting tussen de tankput en het oppervlaktewater, bestaande uit een groep betonnen, L-vormige elementen die met elkaar verbonden worden tot een ondoorlatende muur. In Figuur 6.11 zijn de tanks te zien op een satellietfoto (aangeleverd door Rijkswaterstaat). Op foto zijn de plek van de tankput en de muur ingetekend met daaromheen het gebied dat binnen een rekendomein met een ComFLOW-simulatie zal worden beschouwd.



Figuur 6.11 Satellietfoto van een opslagterrein met daarin aangegeven het ontwerp voor de tankput, de muur van de tertiaire insluiting en de omtrek van het rekendomein van de simulatie.



In Figuur 6.12 is het deel van het terrein binnen de grenzen van het aangegeven rekendomein geschematiseerd weergegeven. De grote tank in het midden heeft een straal van 11m. Deze staat op een fundering die 0.5m hoog is. De hoogte van de vloeistof in de tank is 8.5m. Naast de grote tank staan nog drie kleinere tanks in de tankput. De ontworpen tankput om de tanks heeft een hoogte van 1.1m. Het terrein van de wand van de tankput tot en met de kade (dat is de positieve y-richting in Figuur 6.12) loopt 0.75m op over ruim 50m. Op 10m van de kade staat de muur. De muur heeft een hoogte van 0.5m. In de tekening in Figuur 6.12 staat een hoogte van 1.1m aangegeven. Deze hoogte is bepaald vanaf de onderkant van de fundering van de grootste tank (dat is  $44/54 - 0.75m + 0.5m$ ).



Figuur 6.12 Geschematiseerde weergave van het terrein met opslagtanks.

#### 6.4.2 Opzet van de simulatie

Voor de situatie, zoals deze geschematiseerd is in Figuur 6.12, is een ComFLOW-simulatie gedaan. Het scenario dat wordt gesimuleerd is dat de grootste tank volledig faalt. Voor de simulatie wordt aangenomen dat zich water bevindt in de tank met een dichtheid van  $1000\text{kg/m}^3$ .

In Figuur 6.12 is de falende tank in blauw weergegeven. Er staat een klein muurtje van 3m afgebeeld in het rechterdeel van genoemde figuur: dat muurtje staat er in werkelijkheid niet. Het is bedoeld om te voorkomen dat domeinwandeffecten de uitkomsten van de simulatie beïnvloeden. De domeinwanden zijn ondoorlatend. Dit is geen goede schematisatie voor de simulatie die we doen. De eerste maatregel die we nemen is de domeinwanden zover mogelijk bij de falende tank vandaan zetten. Dan nog zou er zich vloeistof langs de domeinwand kunnen verzamelen en vervolgens over de muur bij de kade stromen. Met het extra muurtje proberen we dat effect te beperken.

Het rekendomein is 160m bij 80m. De hoogte van het domein is 10m; dat is een meter hoger dan de funderingshoogte van de tank (0.5m), vermeerderd met de vloeistofhoogte in de tank (8.5m). Het rooster is uniform in alle richtingen. De roosterafstand in horizontale richting is gelijk aan 0.5m; in verticale richting is de roosterafstand 0.2m. In totaal zijn er 2.5 miljoen cellen gebruikt voor deze simulatie.

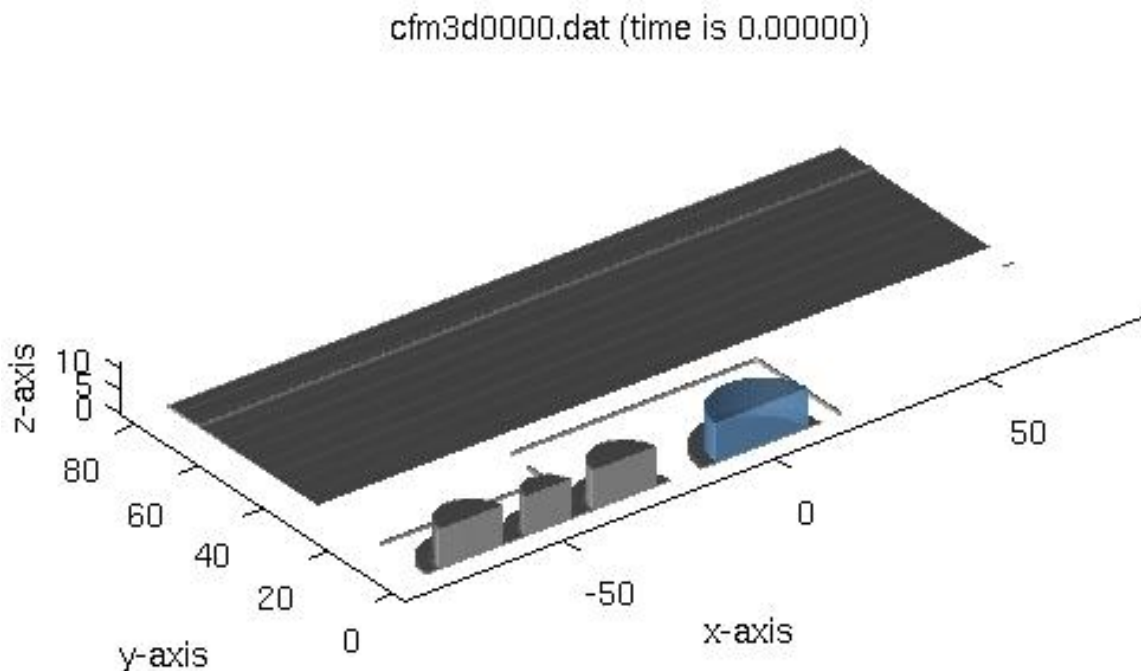
Er wordt 15s gesimuleerd. Dat is voldoende tijd om de tank te laten falen, overslag van de tankput te laten plaatsvinden en om de uitgestroomde vloeistof bij de muur langs de kade te laten aankomen. De tijdstap was gedurende de simulatie nooit groter dan 0.01s.

De belangrijkste parameter die we met de simulatie willen bepalen is de hoeveelheid vloeistof die na falen voorbij de muur bij de kade raakt en in het oppervlaktewater terecht zou kunnen komen.

#### 6.4.3 Resultaten van de simulatie

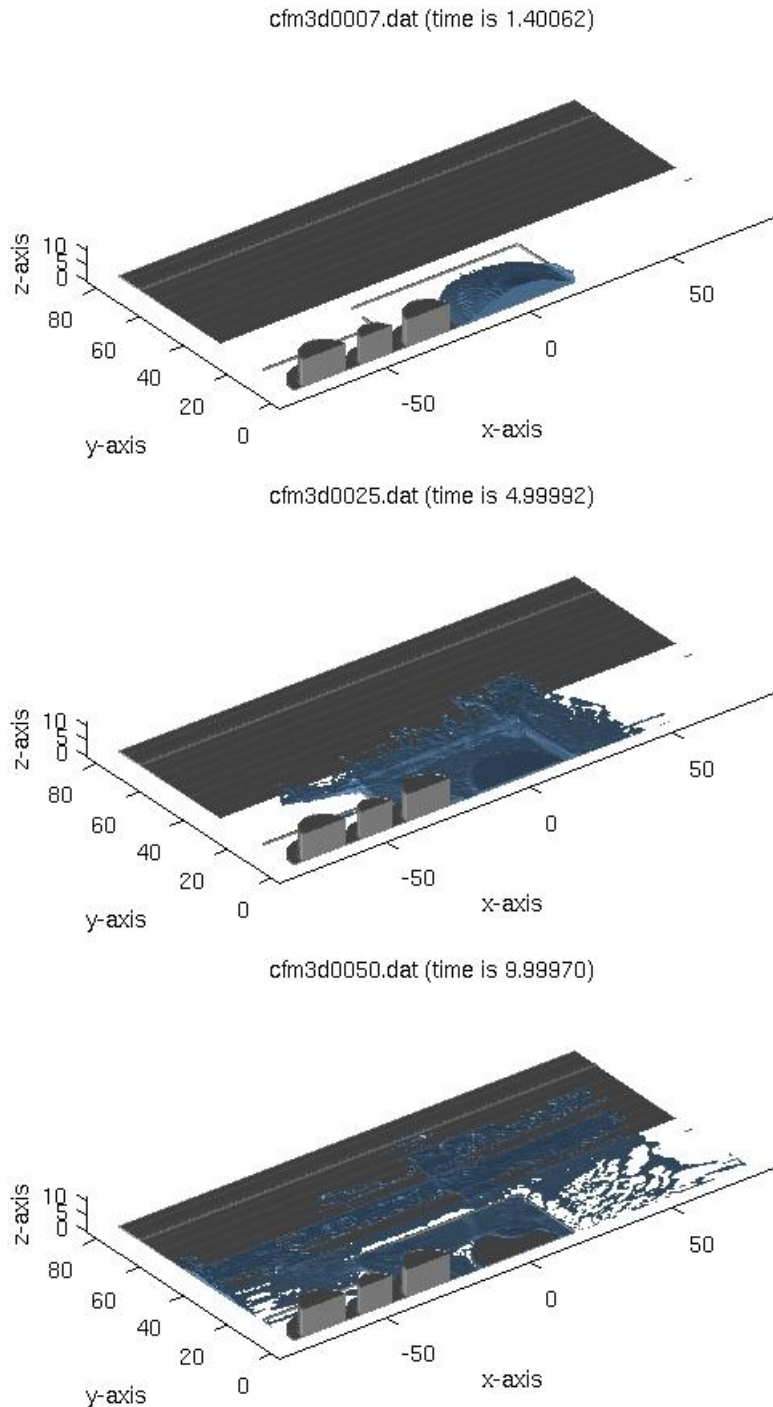
In Figuur 6.13 is de beginvoorwaarde van de simulatie getoond. Het oplopende terrein naar de kade is het grootste vlak dat grijs is weergegeven. Er is een muurtje dat over de gehele lengte van het domein (in x-richting) loopt, dat is het muurtje dat het dichtst bij de kade staat. Deze is in Figuur 6.13 net iets lichter grijs weergegeven dan de rest van het terrein, maar niet heel goed te zien.

De falende tank is in blauw afgebeeld. Deze staat in het midden van terrein in x-richting om zover mogelijk bij de zijwanden van het domein te zijn. In y-richting simuleren we slechts het deel van de vloeistof dat zich richting de kade zal verplaatsten. We nemen daarbij aan dat het xz-vlak dat door  $y=0\text{m}$  loopt een symmetrievlak is. Dat is in werkelijkheid niet zo, maar dat heeft slechts beperkte invloed op de resultaten van de simulatie.



Figuur 6.13 Beginvoorwaarde voor de simulatie.

Na falen, stroomt de vloeistof in radiale richting uit de tank totdat de vloeistof de tankputwand treft. Daar wordt de horizontale impuls van de vloeistof omgezet in verticale impuls. Een deel van de vloeistof komt daardoor buiten de tankput terecht. Vervolgens zal de vloeistof zich buiten de tankput verder verspreiden. Kenmerkende stadia gedurende de simulatie zijn afgebeeld in Figuur 6.14. Er komt in deze simulatie na falen geen vloeistof voorbij de muur langs de kade terecht.



Figuur 6.14 Kenmerkende momenten gedurende het uitstromen van vloeistof uit de gefaalde tank.



## 7 Conclusies en aanbevelingen

Het belangrijkste doel van dit onderzoek was het zoeken naar een methode om overslag te kwantificeren. Deltares heeft daartoe ComFLOW voorgesteld. In dit onderzoek is ComFLOW toegepast om overslag van tankputten te bepalen na falen van verticale opslagtanks. ComFLOW is software voor het simuleren van vloeistofstroming met een numerieke methode die gebaseerd is op de Navier-Stokes vergelijkingen. ComFLOW is al vaak ingezet voor problemen met vergelijkbare stromingsprocessen als die optreden bij overslag na falen van een tank.

In dit rapport is ComFLOW specifiek gevalideerd voor stromingsprocessen die optreden na falen van opslagtanks. Daarbij zijn rekenresultaten vergeleken met experimenteel verkregen gegevens uit drie verschillende onderzoeken. Er is een gevoeligheidsanalyse gedaan om de belangrijkste parameters voor overslag na falen te identificeren voor drie verschillende faalmechanismes. Vervolgens zijn vijf verschillende maatregelen om overslag te beperken onderzocht. Tot slot is ComFLOW toegepast voor drie situaties uit de praktijk die zijn aangeleverd door Rijkswaterstaat.

Met het onderzoek in dit rapport kan het volgende geconcludeerd worden:

1. Uit de ARIA database blijkt dat tankfalen met overslag als gevolg een reëel probleem is, dat in de afgelopen 20 jaar ten minste zes keer is voorgekomen.
2. Rekenresultaten van ComFLOW lijken sterk op meetgegevens uit experimenten met daarin stromingsprocessen zoals die na tankfalen optreden. ComFLOW kan daarom ingezet worden om overslag van de tankput na falen van verticale opslagtanks te kwantificeren.
3. De hoeveelheid overslag na tankfalen blijkt in deze studie ongevoelig voor de viscositeit van de vloeistof.
4. De hoeveelheid overslag is afhankelijk van andere tanks in de tankput, die tussen de falende tank en de tankputwand staan opgesteld. Daarvoor is in deze studie een beperkt aantal simulaties verricht.
5. Proteus geeft in bijna alle gevallen een bovengrens voor overslag. Dit is gewenst voor een snelle indicatieve methode. Alleen voor de situatie dat de tankputwand is uitgevoerd als een dijk met taluds die een hoek van 45° met het maaiveld maken, is Proteus soms niet conservatief.
6. De belangrijkste parameter waar overslag van de tankput na falen vanaf hangt, is de relatieve tankputhoogte. Dat is de verhouding tussen de hoogte van de tankput en de hoogte van de vloeistof in de tank. Als de relatieve tankputhoogte toeneemt, dan neemt het overslagvolume sterk af.
7. De voorgestelde maatregelen om het overslagvolume te beperken slagen er nauwelijks in om de hoeveelheid overslag na tankfalen significant te reduceren. Alleen het beperken van de vulhoogte en tertiaire insluiting met voldoende afstand tussen de falende tank en de tweede tankputwand brengt een significante reductie van overslag tot stand, mits de relatieve tankputhoogte groter is dan 0.15.
8. Met ComFLOW kunnen situaties uit de praktijk geschematiseerd worden. Met een gerichte ComFLOW-simulatie kan worden uitgerekend welk deel van het tankvolume na falen buiten de tankput terecht komt. Ook de vervolgstroming over het terrein buiten de tankput kan inzichtelijk worden gemaakt, zodat het mogelijk is om adequate maatregelen te nemen om te voorkomen dat de vloeistof in het oppervlaktewater terecht komt.

De volgende aanbevelingen kunnen worden gedaan:

1. Proteus is in een aantal gevallen niet conservatief voor de situatie dat de tankputwand is uitgevoerd als een dijkje met taluds onder 45°. Dat is ongewenst en daar is meer onderzoek voor nodig.
2. Er moet meer onderzoek gedaan worden naar de invloed van meerdere tanks in de tankput, waarbij de tanks tussen de falende tank en de tankputwand staan opgesteld.
3. Er is niet altijd tijd om een gerichte ComFLOW-simulatie van een praktijksituatie te maken. Voor ontwerpdoeleinden of voor het uitvoeren van een (milieu)risicoanalyse, kan het zinvol zijn om ontwerpgrafieken op te stellen of een neuraal netwerk te ontwikkelen. Het wordt aanbevolen met ComFLOW een database te vullen, waarin overslagvolumes zijn opgenomen als functie van parameters als de relatieve tankputhoogte en vorm van de tankputwand. De ontwerpgrafiek of het neurale netwerk interpoleert dan binnen de waarden in de database. Op deze manier kan snel en relatief nauwkeurig de overslag voor een specifieke situatie worden vastgesteld.
4. Het beperken van vulhoogte en tertiaire insluiting zijn, in dit rapport, de meest effectieve maatregelen om overslag te beperken. Het verdient aanbeveling om voor specifieke situaties uit de praktijk te onderzoeken, hoe deze maatregelen geoptimaliseerd kunnen worden en welke reductie van overslag dan bereikt kan worden. ComFLOW kan gebruikt worden om veel verschillende ontwerpen van tertiaire insluiting door te rekenen. Ook kan ComFLOW worden ingezet om een plan te maken voor de verdeling van vulhoogtes van tanks over een terrein, zodat de overslag van gevaarlijke vloeistoffen zoveel mogelijk beperkt wordt.
5. Het wordt aanbevolen om voor definitieve ontwerpen van opslagterreinen met meerdere opslagtanks experimenteel onderzoek te doen en dit aan te vullen met numeriek onderzoek. Experimenteel onderzoek heeft voordelen en nadelen. Zo ook numeriek onderzoek. Door gecombineerde inzet van experimenteel en numeriek onderzoek worden de nadelen van ieder minder belangrijk. Bij experimenteel onderzoek kunnen schaafeffecten voor onnauwkeurigheid zorgen. Bij numeriek onderzoek kunnen stromingsdetails ter grootte van de roosterafstand niet nauwkeurig worden gerepresenteerd. Het is moeilijk om van tevoren in te schatten welke details nog van belang zijn voor het resultaat en op basis daarvan een goede roostermaat te kiezen. Daarom moet altijd met experimenteel verkregen resultaten worden vergeleken.

## 8 Literatuur

- Analysis, Research and Information on Accidents (ARIA) database, <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr>
- Atherton, W., Ash, J.W. and Alkhaddar, R.M. (2008). "*The modeling of spills resulting from the catastrophic failure of above ground storage tanks and the development of mitigation.*" International oil spill conference, 949-956
- Deltares (2010), "*Onderzoek naar overtopping na falen van verticale opslagtanks - Literatuuronderzoek*", Deltares report
- Hirt, C. W. and B. D. Nichols (1981), "*Volume Of Fluid (VOF) Method For The Dynamics Of Free Boundaries*". Journal Of Computational Physics, 39(1):201–225
- Kleefsman, K.M.T., G. Fekken, A.E.P. Veldman, B. Iwanowski, and B. Buchner (2005), "*A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems*", Journal of Computational Physics, 206(1):363–393
- Soares-Frazao, S. (2007). "*Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill.*" Journal of Hydraulic Research, 45, 19-26
- Soares-Frazao S en Y. Zech Y (2007), "*Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle*", Journal of Hydraulic Research, Volume: 45(SI):27-36
- Verstappen, R.W.C.P. and Veldman, A.E.P. (2003), "*Symmetry-preserving discretization of turbulent flow.*" Journal of Computational Physics, 187(1):343–368.
- VROM (2008), "*Richtlijn voor bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen in verticale cilindrische tanks*", PGS 29, Publicatierreeks Gevaarlijke Stoffen, uitgegeven door het ministerie van VROM;  
<http://content.publicatierreeksgevaarlijkestoffen.nl/documents/PGS29/PGS29-2008-v0.1.pdf>
- USEPA (1997). "*Chemical safety Alert: Catastrophic failure of storage tanks*", EPA 550-F-97-002b





## A Tabellen

Tabel A.1 Overslagpercentages en horizontale krachten op tankputwand voor volledig falen

Case	Wand- helling [°]	Vp/Vt [%]	R/H [-]	h/H [-]	Vo/Vt Comflow [%]	Vo/Vt Proteus [%]	h [m]	H [m]	R [m]	Vp [m <sup>3</sup> ]	Vt [m <sup>3</sup> ]	Dyn Hor. kracht* [kN/m]	Stat Hor. kracht* [kN/m]
a	90	140	0,5	0,1	54	65	0,90	9,05	4,52	814	581	51	4
b	90	140	0,5	0,2	40	54	2,56	12,79	6,40	2303	1644	171	32
c	90	140	0,5	0,3	29	44	4,70	15,67	7,83	4230	3020	341	108
d	90	140	0,5	0,4	23	35	7,24	18,09	9,05	6513	4650	583	257
e	45	140	0,5	0,1	70	65	0,90	9,05	4,52	814	581	23	4
f	45	140	0,5	0,2	62	54	2,56	12,79	6,40	2303	1644	84	32
g	45	140	0,5	0,3	52	44	4,70	15,67	7,83	4230	3020	278	108
h	45	140	0,5	0,4	44	35	7,24	18,09	9,05	6513	4650	746	257
i	90	255	0,5	0,1	31	65	0,67	6,71	3,35	604	237	18	2
j	90	255	0,5	0,2	22	54	1,90	9,49	4,74	1708	671	67	18
k	90	255	0,5	0,3	18	44	3,49	11,62	5,81	3137	1232	126	60
l	90	255	0,5	0,4	15	35	5,37	13,42	6,71	4830	1897	204	141
m	45	255	0,5	0,1	55	65	0,67	6,71	3,35	604	237	9	2
n	45	255	0,5	0,2	51	54	1,90	9,49	4,74	1708	671	30	18
o	45	255	0,5	0,3	47	44	3,49	11,62	5,81	3137	1232	68	60
p	45	255	0,5	0,4	41	35	5,37	13,42	6,71	4830	1897	164	141
q	90	140	2,5	0,1	43	65	0,18	1,81	4,52	163	116	1	0
r	90	140	2,5	0,2	29	54	0,51	2,56	6,40	461	329	7	1
s	90	140	2,5	0,3	24	44	0,94	3,13	7,83	846	604	22	4
t	90	140	2,5	0,4	19	35	1,45	3,62	9,05	1303	930	33	10
u	45	140	2,5	0,1	63	65	0,18	1,81	4,52	163	116	2	0
v	45	140	2,5	0,2	46	54	0,51	2,56	6,40	461	329	3	1
w	45	140	2,5	0,3	38	44	0,94	3,13	7,83	846	604	6	4
x	45	140	2,5	0,4	32	35	1,45	3,62	9,05	1303	930	12	10

Tabel A.2 Overslagpercentages en horizontale krachten op tankputwand voor falen van de lasnaad in de zijwand

Case	Wand-helling [°]	Vp/Vt [%]	R/H [-]	h/H [-]	Vo/Vt Comflow [%]	Vo/Vt Proteus [%]	h [m]	H [m]	R [m]	Vp [m3]	Vt [m3]	Dyn Hor. kracht* [kN/m]	Stat Hor. kracht* [kN/m]
a	90	140	0,5	0,1	53	65	0,90	9,05	4,52	814	581	73	4
b	90	140	0,5	0,2	43	54	2,56	12,79	6,40	2303	1644	336	32
c	90	140	0,5	0,3	28	44	4,70	15,67	7,83	4230	3020	776	108
d	90	140	0,5	0,4	16	35	7,24	18,09	9,05	6513	4650	1253	257
e	45	140	0,5	0,1	62	65	0,90	9,05	4,52	814	581	40	4
f	45	140	0,5	0,2	56	54	2,56	12,79	6,40	2303	1644	173	32
g	45	140	0,5	0,3	42	44	4,70	15,67	7,83	4230	3020	493	108
h	45	140	0,5	0,4	NA	35	7,24	18,09	9,05	6513	4650	NA	NA
i	90	255	0,5	0,1	45	65	0,67	6,71	3,35	604	237	26	2
j	90	255	0,5	0,2	31	54	1,90	9,49	4,74	1708	671	111	18
k	90	255	0,5	0,3	20	44	3,49	11,62	5,81	3137	1232	257	60
l	90	255	0,5	0,4	11	35	5,37	13,42	6,71	4830	1897	472	141
m	45	255	0,5	0,1	46	65	0,67	6,71	3,35	604	237	16	2
n	45	255	0,5	0,2	46	54	1,90	9,49	4,74	1708	671	63	18
o	45	255	0,5	0,3	39	44	3,49	11,62	5,81	3137	1232	195	60
p	45	255	0,5	0,4	26	35	5,37	13,42	6,71	4830	1897	406	141
q	90	140	2,5	0,1	57	65	0,18	1,81	4,52	163	116	2	0
r	90	140	2,5	0,2	38	54	0,51	2,56	6,40	461	329	9	1
s	90	140	2,5	0,3	20	44	0,94	3,13	7,83	846	604	21	4
t	90	140	2,5	0,4	19	35	1,45	3,62	9,05	1303	930	36	10
u	45	140	2,5	0,1	65	65	0,18	1,81	4,52	163	116	2	0
v	45	140	2,5	0,2	49	54	0,51	2,56	6,40	461	329	4	1
w	45	140	2,5	0,3	33	44	0,94	3,13	7,83	846	604	12	4
x	45	140	2,5	0,4	27	35	1,45	3,62	9,05	1303	930	23	10

Tabel A.3 Overslagpercentages en horizontale krachten op tankputwand voor falen van de aanhechting tussen bodem en zijwand

Case	Wand- helling [°]	Vp/Vt [%]	R/H [-]	h/H [-]	Vo/Vt Comflow [%]	Vo/Vt Proteus [%]	h [m]	H [m]	R [m]	Vp [m3]	Vt [m3]	Dyn Hor. kracht* [kN/m]	Stat Hor. kracht* [kN/m]
a	90	140	0,5	0,1	34	65	0,90	9,05	4,52	814	581	24	4
b	90	140	0,5	0,2	30	54	2,56	12,79	6,40	2303	1644	84	32
c	90	140	0,5	0,3	26	44	4,70	15,67	7,83	4230	3020	150	108
d	90	140	0,5	0,4	20	35	7,24	18,09	9,05	6513	4650	216	257
e	45	140	0,5	0,1	65	65	0,90	9,05	4,52	814	581	12	4
f	45	140	0,5	0,2	56	54	2,56	12,79	6,40	2303	1644	42	32
g	45	140	0,5	0,3	49	44	4,70	15,67	7,83	4230	3020	93	108
h	45	140	0,5	0,4	NA	35	7,24	18,09	9,05	6513	4650	NA	NA
i	90	255	0,5	0,1	25	65	0,67	6,71	3,35	604	237	7	2
j	90	255	0,5	0,2	17	54	1,90	9,49	4,74	1708	671	32	18
k	90	255	0,5	0,3	15	44	3,49	11,62	5,81	3137	1232	63	60
l	90	255	0,5	0,4	11	35	5,37	13,42	6,71	4830	1897	94	141
m	45	255	0,5	0,1	48	65	0,67	6,71	3,35	604	237	5	2
n	45	255	0,5	0,2	36	54	1,90	9,49	4,74	1708	671	16	18
o	45	255	0,5	0,3	27	44	3,49	11,62	5,81	3137	1232	32	60
p	45	255	0,5	0,4	19	35	5,37	13,42	6,71	4830	1897	61	141
q	90	140	2,5	0,1	34	65	0,18	1,81	4,52	163	116	0	0
r	90	140	2,5	0,2	14	54	0,51	2,56	6,40	461	329	2	1
s	90	140	2,5	0,3	11	44	0,94	3,13	7,83	846	604	5	4
t	90	140	2,5	0,4	6	35	1,45	3,62	9,05	1303	930	9	10
u	45	140	2,5	0,1	47	65	0,18	1,81	4,52	163	116	1	0
v	45	140	2,5	0,2	30	54	0,51	2,56	6,40	461	329	2	1
w	45	140	2,5	0,3	14	44	0,94	3,13	7,83	846	604	5	4
x	45	140	2,5	0,4	9	35	1,45	3,62	9,05	1303	930	10	10