



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

Onderwijsseenheid 5 – Exacte Wetenschappen en Informatica

Stroomlijnvisualisatie rondom de scheepsstructuur door middel van windtunneltesten met een scheepsmodel.

Vincent Snel

Scriptie voorgedragen tot het behalen van de graad van Master in de Nautische Wetenschappen.

Promotor: Dr. Deirdre Luyckx
Co-Promotor: Kapitein t.l.o. Werner Jacobs
Academiejaar: 2010 – 2011



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

Onderwijsseenheid 5 – Exacte Wetenschappen en Informatica

Stroomlijnvisualisatie rondom de scheepsstructuur door middel van windtunneltesten met een scheepsmodel.

Vincent Snel

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van Master in de
Nautische Wetenschappen.

Promotor: Dr. Deirdre Luyckx
Co-Promotor: Kapitein t.l.o. Werner Jacobs
Academiejaar: 2010 – 2011

Woord Vooraf

Als autosportliefhebber ben ik enorm gefascineerd door alles wat met auto's te maken heeft, dus ook de ontwikkeling en het testen van auto's. Daar hoort natuurlijk windtunnelonderzoek bij. Ik heb ook altijd veel interesse gehad in fysica en chemie. Dus wanneer tijdens de scriptiebeurs mijn aandacht viel op het onderwerp 'Windtunnelonderzoek aan boord van gastankers', was mijn interesse snel gewekt en de keuze voor een scriptieonderwerp net zo snel gemaakt. Dit onderwerp combineert de drie genoemde interesses. Het onderzoek naar windstromingen en gasdispersie is compleet anders dan het ontwikkelen van auto's en die twee vallen moeilijk met elkaar te vergelijken. Toch zijn er aspecten en fysische principes die overeen komen en die ik al kende en mij aldus geholpen hebben inzicht in de materie te verwerven.

Het is mijn naam die het grootst vermeld staat op de voorkant van dit werk, maar de totstandkoming ervan is allerm minst een soloaangelegenheid geweest. Verscheidene personen en een instituut hebben daartoe bijgedragen en hen wil ik dan ook graag bedanken.

Mevrouw Deirdre Luyckx en meneer Werner Jacobs, mijn promotor en co-promotor, tevens initiator van dit onderzoek, voor hun geduld en steun. Mevrouw Carine Reynaerts en meneer Peter Bueken. Zij hebben mij met aanwijzingen, invallen en nieuwe zienswijzen in de juiste richting geleid.

Het Von Karman Instituut (VKI) voor het ter beschikking stellen van hun testfaciliteiten en de heren Jeroen van Beeck en István Horváth van het VKI voor hun hulp inzake de niet altijd even eenvoudige materie. Het wordt enorm gewaardeerd.

Als laatste gaat mijn dank uit naar mijn ouders, zonder wie ik nooit aan mijn opleiding aan de Hogere Zeevaartschool zou hebben kunnen beginnen, laat staan aan dit onderzoek.

Allen van harte bedankt!!!

Inhoudsopgave

Woord Vooraf	i
Lijst van figuren	vii
Lijst van tabellen	x
Verklarende woordenlijst	xi
Inleiding	1
Deel I: Praktische aspecten van stromingsvisualisatie rond een scheepsmodel	4
Hoofdstuk 1 Beschrijving van de meetopstelling	5
1.1 De Windtunnel	5
1.2 Het Scheepsmodel	6
1.3 De Rookmachines	7
1.4 Laser en Camera	8
1.5 Beeldverwerking	9
Hoofdstuk 2 Gelijkvormigheid	11
2.1 De voorwaarden om gelijkvormigheid te krijgen	11
2.2 Dimensieloze parameters	11
2.2.1 Het Rossby-getal	11
2.2.2 Het Reynoldsgetal Re	12
2.2.3 Het Prandtl-getal	15
2.2.4 Het Peclet-getal en Reynolds-Schmidt produkt	15
2.2.5 Het Froude-getal	15
2.3 Grenswaarden	16
2.3.1 Stromingsdynamica	16
2.3.2 Bepaling van de stroomsnelheid w met de wet van Bernouilli	19

2.3.3	Bepaling van de uitstroomsnelheid w volgens Mott	19
2.4	Boundary Layer.....	20
Hoofdstuk 3	Snelheidsmetingen	25
3.1	Manometers	25
3.1.1	De U-Buis	25
3.1.2	De Pitot-Buis.....	27
3.2	Flowmeters (Rotameter)	28
3.3	Anemometers	28
3.3.1	Hotwire Anemometers.....	28
3.3.2	Schijf Snelheid Indicator.....	29
3.4	Peristaltische Pomp	31
Deel II:	Literatuuronderzoek en data-analyse.....	33
Hoofdstuk 4	Stroming onder invloed van obstakels.....	34
4.1	Inleiding.....	34
4.2	Concentraties achter en naast gebouwen en obstakels.....	34
4.3	Concentraties van contaminanten rondom en op een gebouw ...	38
4.4	Stromingen rond en achter een gebouw	43
4.5	Stromingsvisualisatie rond de superstructuur van een schip.....	47
4.5.1	Configuratie 'b'.....	48
4.5.2	Configuratie 'c'	49
4.6	Conclusie	50
Hoofdstuk 5	(rook)pluimen uit twee identieke bronnen	52
5.1	Inleiding.....	52
5.2	De menging van twee bronnen in een watertank (a).....	53
5.3	De menging van twee bronnen in een windtunnel.....	55
5.4	De menging van twee bronnen in een watertank (b).....	61
5.5	Conclusie en aanbevelingen.....	63

Hoofdstuk 6	Logboek	67
Hoofdstuk 7	Beeldverwerking.....	69
7.1	Algemene beeldverwerking	69
7.1.1	Eerste beeldverwerking	69
7.1.2	Gemiddelde foto	69
7.1.3	Gecorrigeerde intensiteit	70
7.1.4	De relatieve concentratie C/C_s	70
7.2	Bronbepaling	72
7.2.1	Het bepalen van de bron	72
7.2.2	Werking van het programma Sourcelocater	73
7.2.3	Waarom werkt Sourcelocater niet in één stap?	74
7.2.4	Problemen met Sourcelocater.....	75
7.2.5	De Potential Core	77
7.3	Meetpunten bepalen	80
7.3.1	Verschillende camerastandpunten.....	80
7.3.2	Referentiepunten.....	82
7.3.3	Variantie- en maximummaskers	83
7.3.4	Eén grote foto	85
7.3.5	Vijf vaste punten	86
7.3.6	Elf vaste punten	87
Hoofdstuk 8	Lineaire en affiene transformaties.....	89
8.1	Inleiding.....	89
8.2	Rotatie van driehoek $a_0b_0c_0$ tot driehoek $a_1b_1c_1$	90
8.3	Schaling van driehoek $a_1b_1c_1$ tot driehoek $a_2b_2c_2$	92
8.4	Afschuiving van driehoek $a_2b_2c_2$ tot driehoek $a_3b_3c_3$	93
8.5	Translatie van driehoek $a_3b_3c_3$ tot driehoek $a_4b_4c_4$	94

8.6	Alle transformaties samengevoegd	95
8.7	Transformatie van meetpunten aan de hand van vaste punten..	97
8.7.1	Foto's met verschillende camerastandpunten vergelijken	97
8.7.2	Eerste manier: de onderlinge afstand van vijf vaste punten ..	97
8.7.3	Tweede manier: de gemiddelde affiene transformatie	99
8.7.4	Derde manier: de mediaan van de hondervijfenzestig transformaties.....	101
8.7.5	Vierde manier: Median Transformation rond het middelpunt van de foto	102
8.7.6	Vijfde manier: rotatie op 0 zetten	103
Hoofdstuk 9	Bespreking van de meetresultaten.....	104
9.1	Uitwerken van formule 1 of 25.....	104
9.2	Bespreking van de verkregen meetresultaten	108
9.2.1	De 171703-reeks.....	108
9.2.2	De 181315a-reeks	112
9.2.3	De 181315b-reeks.....	115
9.2.4	De 181448-reeks.....	118
9.2.5	De 191000-reeks.....	120
9.2.6	Waardoor ontstaat het verschil in belichting?	121
9.3	Conclusie	123
Hoofdstuk 10	Aanpassingen bij toekomstig onderzoek	124
10.1	Inleiding.....	124
10.2	Grotere ventilatie-uitlaten en meer ventilatie-uitlaten	124
10.3	Minder reflectie	125
10.4	Vaste camerapositie	125
10.5	Het modelleren van de grenslaag	126
10.6	Een veranderbaar kasteel en meer dan één bron.....	126

10.7	Een actief model in plaats van een passief en drukmetingen ...	127
10.8	Maximale bronwaarde	128
10.9	Constante belichting	128
Hoofdstuk 11	Testschema voor volgende onderzoeken	129
11.1	Dag 1: Opstellen en proefdraaien	129
11.2	Dag 2: Testen met één bron	129
11.3	Dag 3: Vervolg dag 2 + twee bronnen met diverse hoeken φ .	131
11.4	Dag 4: Testen met verschillende configuraties van het kasteel	133
11.5	Dag 5: Vervolg dag 4 + reserve	134
Besluit.....		135
Bibliografie.....		138
Lijst van Bijlagen		143
Bijlage 1: Bepaling van de verhouding ρ_s/ρ_a		144
Bijlage 2: De meetpunten op referentiefoto 181448.....		145
Bijlage 3: De meetpunten van testreeks 171703		146
Bijlage 4: De meetpunten van testreeksen 181315a en 181315b		147
Bijlage 5: De meetpunten van testreeks 191000		148
Bijlage 6: De plots van testreeks 171703		149
Bijlage 7: De plots van testreeks 181315a.....		150
Bijlage 8: De plots van testreeks 181315b		151
Bijlage 9: De plots van testreeks 181448		152
Bijlage 10: De plots van testreeks 191000		153
Bijlage 11: CD met scriptie en bijlagen - Inhoud		154
Bijlage 12: CD met scriptie en bijlagen - De CD		155

Lijst van figuren

Figuur 1: De L-1B Windtunnel van het Von Karman Instituut.....	5
Figuur 2: Het model op het draaiplateau	6
Figuur 3: De rookmachine van het VKI	7
Figuur 4: De Colt 4	7
Figuur 5: Het schip onder laserstralen	8
Figuur 6: De bewerkte afbeelding.	10
Figuur 7: Uitstroomsnelheid volgens Mott	20
Figuur 8: Laminaire en turbulente stroming.....	21
Figuur 9: De Boundary Layer Rake.....	23
Figuur 10: Een U-buis	25
Figuur 11: Een Inclinatiemanometer	26
Figuur 12: De Goniometrische Driehoek.....	27
Figuur 13: Een Rotameter.....	28
Figuur 14: Enkele verschillende peilstiften van hotwire anemometers....	29
Figuur 15: De Schijf Snelheid Indicator.....	29
Figuur 16: Een Peristaltische Pomp	31
Figuur 17: Coördinatenstelsel gebruikt door Cheung en Melbourne.....	35
Figuur 18: De verschillende opstellingen van Cheung en Melbourne	35
Figuur 19: Concentraties op grondniveau in de y-richting	36
Figuur 20: Concentraties op grondniveau in de x-richting	37
Figuur 21: De door Higson et al. gebruikte testopstellingen.....	38
Figuur 22: De meetpunten a t/m n en de bronnen i), ii) en iii).....	39
Figuur 23: Verloop van de concentratie op meetpunt d	40
Figuur 24: Verloop van de concentratie op meetpunt g	41
Figuur 25: De meetresultaten voor alle bronlocaties i), ii) en iii)	42
Figuur 26: Dwarsdoorsnede van het concentratieverloop op $X/H = 2$	43
Figuur 27: De Hoefijzer Vortex	44
Figuur 28: Stroming rond een kubus en een toren	45
Figuur 29: Stroming rond een balk.....	46
Figuur 30: De gebruikte modellen van Kulkarni et al.	47
Figuur 31: Configuratie 'b' bij verschillende verhoudingen w/u	48
Figuur 32: Configuratie 'c' bij verschillende verhoudingen w/u.....	49

Figuur 33: Stroming rond een kubus bij verschillende bronlocaties.....	50
Figuur 34: De testopstelling van Contini en Robins.....	53
Figuur 35: De invloed van φ op de pluimstijging	54
Figuur 36: De testopstelling van Contini et al.	55
Figuur 37: Pluimstijging E uitgezet tegen $\sin \varphi$	55
Figuur 38: De gemiddelde concentratie op afstand X van de bron	57
Figuur 39: Concentratieverdeling bij $\varphi = 0^\circ$ op een afstand $X=20D$	58
Figuur 40: Concentratieverdeling bij $\varphi = 45^\circ$ op een afstand $X=20D$	59
Figuur 41: Concentratieverdeling bij $\varphi = 90^\circ$ op een afstand $X=20D$	60
Figuur 42: Bijdrage aan de concentratie van de verschillende bronnen ..	62
Figuur 43: De gebruikte ventilatie-uitlaten in ons model	65
Figuur 44: De 'gemiddelde' foto van sessie 171709.....	69
Figuur 45: Gemiddelde foto van reeks 161637, inclusief raster.	73
Figuur 46: 161637, met submatrix $y:(200:350)$ en $x:(450:550)$	73
Figuur 47: 161637, met submatrix $y:(200:300)$ en $x:(450:550)$	74
Figuur 48: 161637, met submatrix $y:(235:255)$ en $x:(485:505)$	74
Figuur 49: Reflectie bij bron 161445 SB6.....	75
Figuur 50: Meerdere bronnen in reeks 161705	75
Figuur 51: 161156, overbelicht.....	76
Figuur 52: Potential Core	77
Figuur 53: De grootte van de Potential Core bij diverse Froude-getallen	78
Figuur 54: Een collage van 10 foto's uit deel 1.	80
Figuur 55: Een collage van 9 foto's uit deel 2.	81
Figuur 56: Twee foto's die niet in deel 1 of deel 2 vallen.	82
Figuur 57: Maximummasker toegepast op run 171712	83
Figuur 58: Variantiemasker toegepast op run 171712	83
Figuur 59: Foto van run 171712 met maximum- en variantiemasker.....	84
Figuur 60: Inlaat van machinekamer en accommodatie	85
Figuur 61: 170926 met vaste punten	86
Figuur 62: Referentiefoto 181448 en de elf gebruikte vaste punten.....	87
Figuur 63: Rotatie van driehoek $a_0b_0c_0$ tot driehoek $a_1b_1c_1$	91
Figuur 64: Rek met factor 2 in de x-richting en factor 3 in de y-richting.	92
Figuur 65: Afschuiving in de y-richting met factor $5/8$	93

Figuur 66: De translatie van driehoek $a_3b_3c_3$ tot driehoek $a_4b_4c_4$	94
Figuur 67: Alle transformaties samen	96
Figuur 68: De positie van de meetpunten in referentiefoto 181448	98
Figuur 69: De Mean Transformation van de meetpunten, 171703	100
Figuur 70: De Median Transformation van de meetpunten, 171703	101
Figuur 71: Median Transformation, rotatie rond middelpunt, 171703 ...	102
Figuur 72: Median Transformation met translatie = 0, 171703	103
Figuur 73: De verhouding C/C_s bij diverse windsnelheden, 171703	105
Figuur 74: Intensiteiten voor meetpunten gelegen achter het kasteel ..	111
Figuur 75: Foto van run 181315 met statief achter het kasteel	112
Figuur 76: De gemiddelde foto van run 181340	113
Figuur 77: De gemiddelde foto van run 181343	114
Figuur 78: De gemiddelde foto van run 181416	115
Figuur 79: De gemiddelde foto van run 181419	116
Figuur 80: De gemiddelde foto van run 181616	118
Figuur 81: De gemiddelde foto van run 181625	119
Figuur 82: De gemiddelde foto van run 181630	119
Figuur 83: De zes verschillende belichtingen in run 181630	121

Lijst van tabellen

Tabel 1: De gebruikte bronnen per testreeks.....	64
Tabel 2: De ventilatie-uitlaten dicht bij het kasteel en hun hoeken φ	66
Tabel 3: De vaste punten per testreeks en hun locatie.....	88

Verklarende woordenlijst

Achtergrondfoto	Foto van de eerste run van een reeks. Hier zijn zowel de windsnelheid u als de uitstroomsnelheid w gelijk aan 0.
Bron(nen)	De ventilatie-uitlaat of ventilatie-uitlaten die gebruikt wordt/worden tijdens een run.
Boundary Layer	Grenslaag. Wanneer een vloeistof of gas langs een oppervlak stroomt wordt deze afgeremd vanwege de viskeuze wrijving. De vloeistof- of gasdeeltjes blijven als het ware aan het oppervlak plakken. Hierdoor ontstaat een laagje (de grenslaag) waarin de snelheid van de deeltjes varieert van nul aan het oppervlak tot aan de ongestoorde snelheid van de vrije stroming.
Dispersie	De verspreiding en verdunning van deeltjes in de atmosfeer.
Downwash	Aan de lijzijde van een schoorsteen of afgaskanaal kan een lijwervel ontstaan, die de rookpluim naar beneden trekt. Dit fenomeen wordt down-wash genoemd.
Reeks	Een serie runs die bij elkaar horen, bestaande uit één run zonder uitstroom- of windsnelheid en een aantal runs waarbij de windsnelheid u varieert van 0 ms^{-1} tot 10 ms^{-1} . De uitstroomsnelheid w is constant. Binnen één reeks worden ook de bronnen constant gehouden. De naam van een reeks is dezelfde als de naam van de eerste run van de reeks, degene waar de achtergrondfoto genomen wordt.
Run	Eén windtunnelproef, met een constante waarde voor de windsnelheid u en uitstroomsnelheid w . Tijdens één run worden 369 foto's genomen waaruit één gemiddelde foto wordt gevormd. De naam van de run wordt bepaald aan de hand van datum en tijdstip waarop de proef genomen is. 171703 is bijvoorbeeld de proef gedaan op 17 september om 17.03 uur.

u	Windsnelheid in de windtunnel in ms^{-1} .
w	Uitstroomsnelheid van rookdeeltjes uit gesimuleerde ventilatie-uitlaten in ms^{-1} .
6PS	Eén van de twee buitenste ventilatie-uitlaten op de 6 ^e rij van voren gezien, aan de bakboordzijde (links) van het scheepsmodel.
6PS-Centre	Eén van de twee middelste ventilatie-uitlaten op de 6 ^e rij van voren gezien, aan de bakboordzijde (links) van het scheepsmodel.
6SB	Eén van de twee buitenste ventilatie-uitlaten op de 6 ^e rij van voren gezien, aan de stuurboordzijde (rechts) van het scheepsmodel.
6SB-Centre	Eén van de twee middelste ventilatie-uitlaten op de 6 ^e rij van voren gezien, aan de stuurboordzijde (rechts) van het scheepsmodel.

Inleiding

Deze eindverhandeling borduurt voort op onderzoekswerk gedaan naar de aanwezigheid van toxische ladingsdampen aan boord van chemicaliëntankers. Deze dampen zijn afkomstig van ladingen zoals benzeen, toluen, xyleen... en komen vrij bij de ventilatie-uitlaten tijdens normale ladingsoperaties. De centrale vraag in het onderzoek van Kapitein Jacobs is: hoe beïnvloeden de windrichting en windkracht, de vorm en de grootte van het kasteel en dergelijke de concentratie van ladingsdeeltjes bij de inlaten van de airconditioning van de accommodatie en de machinekamer? Wat is de meest gunstige locatie van deze inlaten?

Mathematische modellen zijn tot nu toe niet geschikt om de dispersie of de verspreiding van contaminerende stoffen onder invloed van obstakels zoals gebouwen en heuvels, in dit geval het kasteel van het schip, te berekenen. Daarom heeft men eerst testen gedaan aan boord van de chemicaliëntanker 'Crystal Emerald' door monsters te nemen op verschillende locaties aan boord, bij verschillende windsnelheden. Vervolgens hebben Cédric Brichart, Laurent De Kerf en Kapitein Jacobs windtunneltesten met een schaalmodel van de 'Crystal Emerald' gedaan in de lagesnelheid windtunnel van het Von Karman Instituut, waar de omstandigheden aan boord zo getrouw mogelijk werden nagebootst (Brichart, 2009, en De Kerf, 2009). Het doel van de windtunneltesten is het valideren van de resultaten verkregen bij de staalnamen. Mijn aandeel in dit werk is het analyseren van de verzamelde data van deze testen, en aanbevelingen doen aangaande toekomstig onderzoek.

Mijn scriptie behandelt de analyse van de gegevens verkregen tijdens de windtunneltesten. Welke stappen volgen we om van de ruwe data te komen tot werkbare gegevens, waaraan conclusies verbonden kunnen worden? Welke testreeksen zijn bruikbaar voor data-analyse, welke niet? We willen lering trekken uit de behaalde resultaten, zowel de positieve en negatieve. Wat is goed gedaan? Wat is verkeerd gedaan? Wat moeten we beter en/of anders aanpakken om tot betere resultaten te komen?

Mijn bachelorscriptie en masterscriptie horen bij elkaar. Om herhaling te voorkomen en om niet steeds naar de bachelorscriptie te moeten verwijzen, neem ik deze op als onderdeel van de eindverhandeling. Dit eindwerk zal dus uit de volgende delen bestaan:

Deel I: een kopie van mijn bachelorscriptie.

Deel II: literatuuronderzoek en analyse van de data verkregen uit eerder gedaan onderzoek van Cédric Brichart, Laurent De Kerf en Kapitein Werner Jacobs.

De proefopstelling in de windtunnel, het scheepsmodel, de rookmachines, de gebruikte laser en camera worden beschreven in mijn bachelorscriptie, hoofdstuk 1. In hoofdstuk 2 worden de voorwaarden besproken waaraan voldaan moet worden om gelijkvormigheid tussen de werkelijkheid en de testopstelling in de windtunnel te verkrijgen. De belangrijkste zijn het Reynoldsgetal Re , het rookpluimmoment en de uitstroomsnelheid w . De criteria waaraan de grenslaag in de windtunnel moet voldoen worden ook behandeld. Hoofdstuk 3 behandelt de snelheidsmetingen die gedaan moeten worden om dat goed te kunnen afstellen.

In de eerste twee hoofdstukken van deel II, hoofdstukken 4 en 5, wordt de literatuurstudie behandeld. Hoofdstuk 4 gaat over de invloed die obstakels geplaatst in (lucht)stromingen hebben op die stromingen en de dispersie van verontreinigende stoffen, hoofdstuk 5 behandelt de invloed die een extra bron hierop heeft.

De overige hoofdstukken van deel II gaan over de verwerking van de meetgegevens uit het windtunnelonderzoek gedaan in september 2008 en de analyse van deze bewerkte gegevens. Hoofdstuk 6 beschrijft de inhoud van het logboek dat bijgehouden werd tijdens het windtunnelonderzoek. In de hoofdstukken 7 en 8 wordt beschreven hoe de data verwerkt wordt om interpreteerbare gegevens over te houden. Hoofdstuk 7 beschrijft de beeldverwerking van de foto's die genomen zijn tijdens de testen. Onder andere de volgende punten worden besproken: de gemiddelde foto, de

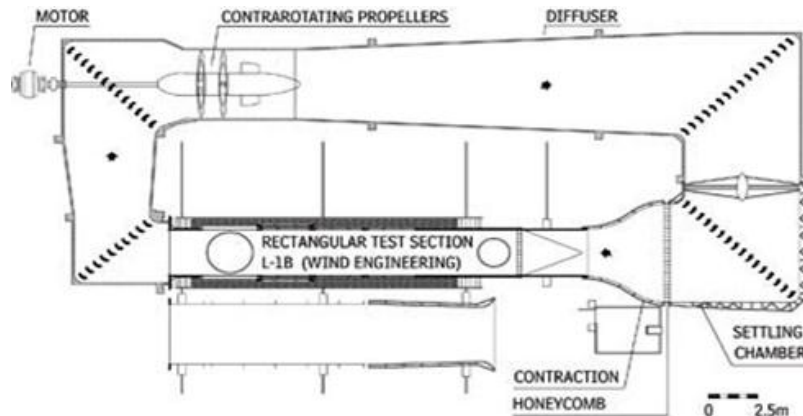
relatieve intensiteit C/C_s , de bronbepaling met het programma 'Sourcelocater', verschillende cameraperspectieven, referentiepunten op het scheepsmodel. Tussen de proeven die gedaan zijn in de windtunnel zijn er verschillen in de gebruikte testopstellingen. Dat leidt tot verschillen in de testresultaten. Om de resultaten toch met elkaar te kunnen vergelijken moeten meetpunten gebruikt bij de ene testopstelling getransformeerd worden naar de goede locatie bij een andere testopstelling. In hoofdstuk 8 wordt beschreven hoe dat gedaan wordt.

Hoofdstuk 9 behandelt de analyse van de meetgegevens. Bij alle testsessies gedaan in de windtunnel, oftewel de reeksen, wordt bekeken welke reeks wel of niet geschikt is voor analyse. Tussen de reeksen die voldoen blijkt er verschil in belichting op te treden die de uitkomsten van het onderzoek beïnvloeden. In hoofdstuk 10 worden aanbevelingen gedaan voor eventuele volgende windtunnelproeven. Aanpassingen aan de testopstelling en de testmethode worden besproken. Hoofdstuk 11 tenslotte geeft een mogelijk testschema dat gebruikt kan worden bij die vervolgprouven.

Deel I: Praktische aspecten van stromingsvisualisatie rond een scheepsmodel

Hoofdstuk 1 Beschrijving van de meetopstelling

1.1 De Windtunnel



Figuur 1: De L-1B Windtunnel van het Von Karman Instituut

Bron: Von Karman Instituut (2009)

De gebruikte windtunnel van het Von Karman Instituut (VKI) is de grootste lagesnelheid windtunnel van België, de L-1B. Het is een windtunnel van het gesloten circuit type, dus de lucht die over en door het testgedeelte stroomt wordt gerecirculeerd en daarna weer opnieuw gebruikt. Dat heeft als voordeel dat er heel weinig uitwisseling is met de lucht buiten de tunnel. De kwaliteit van de luchtstroom is dus onafhankelijk van wat er verder in het gebouw gebeurt en van de weersomstandigheden. Een groot nadeel is wel dat bij gebruik van rook om stromingen te visualiseren de lucht verzadigd raakt van rook en er dus een mogelijkheid moet bestaan om de tunnel te kunnen purgeren.

De testsectie van de tunnel is 2 m hoog, 3 m breed en 20 m lang. Aan het einde van de testsectie bevindt zich een draaiplateau met een diameter van 2,60 m waardoor verschillende windrichtingen gesimuleerd kunnen worden, door de testobjecten te draaien ten opzichte van de wind.

De omstandigheden die nagebootst worden zijn een omgevingstemperatuur van 11 °C en een relatieve wind met een snelheid tot 16 knopen variërend van 15° stuurboord tot 15° bakboord. De

temperatuur in de testsectie bedraagt slechts 6 °C, maar dat is slechts van weinig invloed op onze onderzoeken en wordt dus zo gehouden.

1.2 *Het Scheepsmodel*

Het gebruikte schip is een model in balsahout van de chemicaliëntanker de 'Crystal Emerald' op een schaal 1:56. Er is voor deze verhouding gekozen uit praktische overwegingen en omwille van fysische beperkingen. In de testen wordt het schip gedraaid om aldus de relatieve wind uit verschillende richtingen te laten komen. Als het schip dwars op de wind staat, mag het niet meer dan 10% van de dwarsdoorsnede van de windtunnel in beslag nemen, om versnelling van de luchtstromen te voorkomen. Dit leidt tot een maximale lengte van 2,30 m, welke herleid is tot 2,00 m. Aangezien het schip een werkelijke lengte over alles heeft van 112 m, is de schaalverhouding 1:56.



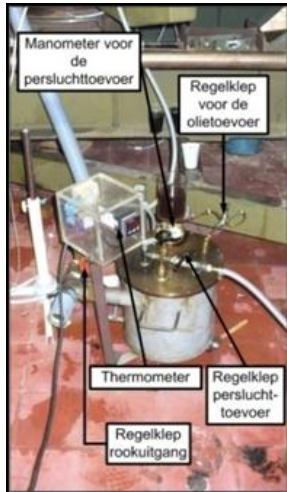
Figuur 2: Het model op het draaiplateau

Bron: De Kerf (2009, p. 95)

De romp kan verhoogd worden door er een deel onder te bevestigen, om verschillende diepgangen na te kunnen bootsen. De uitlaatopeningen van de gesimuleerde ladingsdampen zijn vervaardigd uit koperen buizen waaraan flexibele, verstevigde slangen zijn bevestigd die naar de rookmachine leiden. De buizen hebben een diameter van 0,8 centimeter. Zoals later duidelijk zal worden gemaakt, is deze maat van groot belang en zij dient ook nauwkeurig de werkelijkheid weer te geven!

1.3 De Rookmachines

In onze testen maken we gebruik van twee rookmachines. Eén gemaakt in eigen beheer door het Von Karman Instituut en één in eigendom van de Hogere Zeevaartschool, de Colt 4 Turbo gefabriceerd door Concept



Figuur 3: De rookmachine van het VKI

Bron: De Kerf (2009, p. 85)

Engineering Ltd. Er is gekozen voor twee rookmachines omdat bij gebruik van alleen de rookmachine van het von Karman instituut de kwaliteit van de rook niet voldoende was en als alleen de Colt 4 gebruikt werd was het debiet van de machine niet voldoende. Gecombineerd voldeden de rookmachines wel aan onze eisen.

De werking van rookmachines is universeel en dus voor beide machines hetzelfde. Eerst wordt op een warme plaat olie verhit die daardoor verdampt. De verdampte warme olie wordt gemengd met de koudere omgevingslucht, waardoor de olie condenseert. De condensdruppeltjes hebben een doorsnede van $0,2 \mu\text{m}$ tot $0,3 \mu\text{m}$ en vormen een aerosol die zichtbaar is als rook (mist is technisch gesproken een betere term). De rook wordt opgevangen in een bufferdoos, om een voldoende rookhoeveelheid voor onze testen te krijgen, een continue stroom te kunnen garanderen en om de rook nog verder de temperatuur van de omgevingslucht aan te laten nemen. Vanuit de bufferdoos wordt de rook door overdruk door flexibele slangen gedreven om daarna uit de uitlaatopeningen van het scheepsmodel te stromen. Cedric en Laurent wisten nog niet welke waarden de snelheid w van de uitstromende rook moest hebben en hebben uiteindelijk hun testen gedaan met snelheden variërend van $0,65 \text{ ms}^{-1}$ tot $4,0 \text{ ms}^{-1}$. Zoals verderop zal blijken is hun onderste waarde dicht in de buurt van de gewenste snelheid.

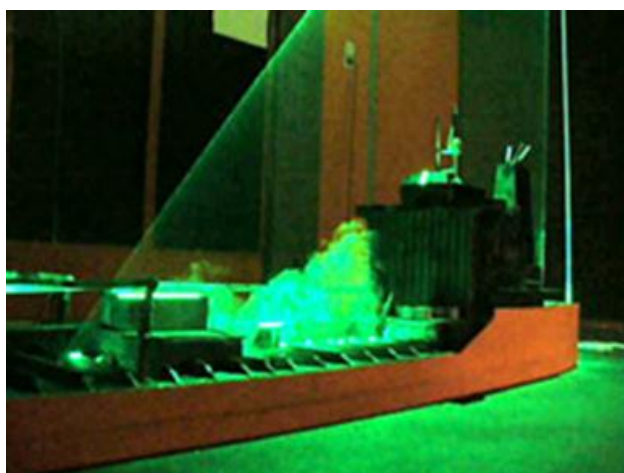


Figuur 4: De Colt 4

Bron: Concept Engineering Ltd. (2011)

1.4 Laser en Camera

Om een aerosol te detecteren kan gebruik worden gemaakt van lichttransmissie of van een detectiemethode gebaseerd op lichtweerkaatsing. De eerste methode meet hoeveel licht er wordt doorgelaten tussen een lichtbron en een lichtsensor. Hoe meer licht de sensor bereikt, hoe minder deeltjes er zijn. Bij lage concentraties van een aerosol heeft de lichttransmissie methode als groot nadeel dat de gedetecteerde waarden vergelijkbaar zijn met afwijkingen die ontstaan door kleine druk- en temperatuursveranderingen. De meetmethode gebaseerd op weerkaatsing daarentegen geeft alleen signalen als er een aerosol aanwezig is. Er is dus gekozen voor de methode van lichtweerkaatsing. Een laserstraal wordt gebruikt om het scheepsmodel en vooral de rookpluimen te belichten. De lichtstraal weerkaatst op de aanwezige rookdeeltjes. Hoe meer rook er zich op een bepaald punt bevindt, hoe sterker het licht weerkaatst wordt op dat punt. De hoeveelheid weerkaatst licht is dus een maat voor de concentratie van rookdeeltjes op dat punt.



Figuur 3: Het schip onder laserstralen
Bron: De Kerf (2009, p. 8)

De laserstraal is afkomstig van een Spectra-Physics Argon-laser, type Stabilite 2017-AR. Deze produceert een groene lichtstraal met een golflengte van 514,5 nm en een vermogen van 2 W. Een waterstroom van $8,4 \text{ lmin}^{-1}$ zorgt voor de noodzakelijke koeling van de laser om oververhitting te voorkomen.

De laser staat buiten de windtunnel opgesteld om interferentie met de testopstelling te voorkomen, maar dat betekent wel dat de laserstraal nog tot bij het model geleid moet worden. Dat wordt gedaan door de laserstraal door middel van prisma's in de gewenste richting te

weerkaatsen. Een laserstraal op zich bestrijkt een heel klein gebied van het model in het donker. Dit probleem wordt ondervangen door de laserstraal te richten op een oscillerende spiegel. Deze beweegt met een hoge frequentie van zijn beginpunt met uitwijking 0 naar zijn eindpunt met maximale uitwijking en dan weer terug naar 0 heen en weer en weerkaatst aldus de laserstraal, een groot gebied bestrijkend. Onze ogen en de gebruikte camera kunnen beiden slechts beelden met een kleine frequentie onderscheiden, waardoor het lijkt alsof het gebied in één keer bestreken wordt. Dit is echter niet het geval! De camera die gebruikt wordt is een zogenaamde Pixelfly, een camera die afbeeldingen neemt met een grijswaardenschaal variërend van zwart (volledig donker) tot wit (volledig licht). De camera neemt foto's met een frequentie van 10 Hz, terwijl de spiegel met een gelijke frequentie of een veelvoud hiervan oscilleert. Om ervoor te zorgen dat de camera een foto neemt op het moment dat het model belicht is, zijn beiden ten opzichte van elkaar gesynchroniseerd.

1.5 *Beeldverwerking*

De zwart-wit beelden van de Pixelfly worden bewerkt met het programma Scilab. Eerst wordt van de beelden met de laserstraal en reflecties op de rookdeeltjes een standaardfoto afgetrokken. Op deze manier wordt de lichtintensiteit van de achtergrond geëlimineerd uit de bewerking. Bij de beelden die aldus verkregen zijn, worden waarden toegekend aan de lichtintensiteit van een groepje pixels: 0 voor helemaal zwart en 1 voor helemaal wit, en alle waarden daartussen. Aan die waarden wordt dan weer een kleur gekoppeld, bijvoorbeeld blauw voor 0 – 0,1 en groen voor 0,1 – 0,2 enzovoorts. Deze kleuren worden vervolgens in het eerder verkregen beeld gevoegd.

De concentratie C van de rookdeeltjes op een willekeurig punt wordt gegeven door volgende formule:

$$\frac{C}{C_s} = \frac{I - I_b}{I_s - I_{bs}} \quad (\text{Formule 1})$$

Hierin zijn C en C_s de concentraties op het willekeurige punt en bij de ventilatie-uitlaten, I en I_s de lichtintensiteit op die twee plaatsen en I_b en I_{bs} zijn de bijbehorende achtergrondintensiteiten.



Figuur 4: De bewerkte afbeelding.
Bron: Eigen bewerking

Bij zeer hoge hoeveelheden deeltjes in het fluïdum worden de weerkaatste lichtstralen nog één of meerdere keren weerkaatst door andere rookdeeltjes, waardoor een gedeelte van de lichtstralen de camera niet meer zal bereiken. De lichtintensiteit en daaruit volgend de concentratie van deeltjes die bepaald wordt in dit geval zal dus een onderschatting zijn van de werkelijkheid (Nakiboğlu et al., 2009, p. 3399).

Hoofdstuk 2 Gelijkvormigheid

2.1 De voorwaarden om gelijkvormigheid te krijgen

Dit onderzoek behelst niet alleen de stromingen van lucht en gasdeeltjes, maar ook en vooral de dispersie van een contaminant in de lucht. We gaan uit van het feit dat de contaminant passief en neutraal is. Dat wil zeggen dat de contaminant geen invloed uitoefent op de vergelijkingen en zelf geen veranderingen ondergaat in het fluidum. Het heeft dus dezelfde eigenschappen als lucht. Stromingen in een testopstelling dienen aan een aantal voorwaarden te voldoen om een getrouwe weergave te zijn van de werkelijkheid. Hiervoor moeten vijf dimensieloze parameters en een aantal dimensieloze grensvoorwaarden in het model overeenkomen met die in werkelijkheid. Als de dimensieloze parameters en grensvoorwaarden in deze vergelijkingen identiek zijn, zal de dispersie in het model hetzelfde zijn als in werkelijkheid. Verder nog dient de luchtlaag aan het oppervlak, de grenslaag ofwel boundary layer dezelfde eigenschappen te hebben.

2.2 Dimensieloze parameters

De relevante parameters zijn het Rossby-getal, Reynoldsgetal, Prandtl-getal, Peclet-getal en Reynolds-Schmidt produkt, en het Froude-getal (Snyder, 1972).

2.2.1 Het Rossby-getal

Het Rossby-getal beschrijft de verhouding tussen locale versnellingen onder invloed van de stroming ten opzichte van de Coriolisversnelling en kan verwaarloosd worden als het model een werkelijkheid beschrijft die kleiner is dan 5 km. Dit is bij ons duidelijk het geval.

2.2.2 Het Reynoldsgetal Re

Zonder invloed van Corioliskrachten en temperatuursveranderingen zijn van twee verschillende stromingssystemen waarvan de grensvoorwaarden dimensieloos zijn gespecificeerd op basis van de windsnelheid u (of w) de turbulente stromingsstructuur gelijkaardig bij voldoende hoge waarden voor het Reynoldsgetal Re (Townsend, 1956, pp. 53 en 54). Het Reynoldsgetal is een maat om te bepalen of een stroming laminair ($Re < 2.300$) of turbulent ($Re > 2.300$) is. Zie ook Figuur 6. De meeste dimensieloze functies zijn gebaseerd op plaats- en tijdsvoorwaarden, en kunnen verwaarloosd worden, er vanuit gaande dat het Reynoldsgetal Re voldoende groot is. Een uitzondering hierop is onder andere de stroming vlakbij de grenslaag. Deze is erg afhankelijk van de viscositeit van het fluïdum. Om de effecten van de viscositeit te vermijden, kan men het oppervlak van het model opruwen. Onze vrees dat het schaalmodel een te ruw oppervlak zou hebben bleek dus ongegrond. Ook geldt dat de oppervlakten van gebouwen en in ons geval een schip als aerodynamisch ruw worden beschouwd bij een hoge waarde van Re . Bij het verkleinen van het model om het in de windtunnel te laten passen wordt tegelijkertijd de waarde van Re verlaagd, zodat de oppervlakte van ons model aerodynamisch glad wordt. Ook in dit opzicht is het voordelig dat het model een ruw oppervlak heeft.

De gehele testopstelling moet een Reynoldsgetal Re groter dan 15.000 hebben (Snyder, 1981, p. 47):

$$Re = u \cdot H / \nu \quad (\text{Formule 2})$$

Hier is u de windsnelheid, H de hoogte van het model en ν de kinematische viscositeit van de rookgassen. Verder laten we de viscositeit van de verschillende gassen buiten beschouwing, maar om het Reynoldsgetal te kunnen bepalen is de viscositeit wel van belang.

We beschouwen de rookgassen als ideaal gas met dezelfde eigenschappen als lucht en kunnen dus volgende formule gebruiken:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_a} \quad (\text{Formule 3})$$

waarbij ρ_a de dichtheid van de buitenlucht is en μ de dynamische viscositeit van lucht.

Aan de hand van de ideale gaswet wordt ρ_a bepaald:

$$\rho_a = \frac{P_a}{R \cdot T} \quad (\text{Formule 4})$$

Waarbij geldt:

$$P_a = \text{omgevingsdruk. } [P_a] = \text{Pa} = \text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$$

$$R = \text{gasconstante, } 287 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$T = \text{omgevingstemperatuur. } [T] = \text{K}$$

De dichtheid van lucht is dus:

$$\rho_a = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-2}}{287 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1} \cdot 279 \text{ K}} = 1,265 \text{ kgm}^{-3}$$

Vervolgens bepalen we met Sutherland's Viscositeitswet (Devenport en Hartwell, 2006) de dynamische viscositeit μ :

$$\mu = \frac{1,4578 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,5}}{T + 110,4} \quad (\text{Formule 5})$$

$$T = 279 \text{ K, dus is } \mu = 1,744 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$$

$$\text{Dan is } \nu = \frac{1,744 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}}{1,265 \text{ kgm}^{-3}} = 1,3791 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

Het Reynoldsgetal Re wordt dus:

$$Re = \frac{8 \text{ ms}^{-1} \cdot 0,53 \text{ m}}{1,3791 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}} = 307.000 \text{ en dat is ruimschoots meer dan de}$$

vereiste 15.000.

De uitstroom van de rookgassen dient ook een minimaal Reynoldsgetal te hebben. Dit wordt het Stack Reynoldsgetal Re_s genoemd en bedraagt minimaal 2300 (Snyder, 1981, p. 46). Die wordt op analoge wijze bepaald als in formule 2 en dus geldt in ons model:

$$Re_s = \frac{w \cdot D_s}{\nu} \quad (\text{Formule 6})$$

$$Re_s = \frac{0,7 \text{ ms}^{-1} \cdot 0,022 \text{ m}}{1,3791 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}} = 1.117$$

w is de uitstroomsnelheid van de rookgassen, en D_s is de diameter van de uitlaatopeningen en is recht evenredig met de lengte en breedte en dus de oppervlakte die de mangaten in werkelijkheid hebben. De oppervlakte van één mangat is $1,222 \text{ m}^2$ in werkelijkheid. Op schaal is dat dan $1,222/56^2 = 0,00039 \text{ m}^2$. Dat komt overeen met cirkelvormige openingen met een diameter D van 2,22 cm en straal r van 1,11 cm. De nu gebruikte waarden zijn $D = 0,8 \text{ cm}$ en $r = 0,4 \text{ cm}$. De diameter van de uitstroomopeningen is dé maat waarop alle verhoudingen en groottes in het model zijn gebaseerd, dus moet de diameter voor toekomstig onderzoek zeker aangepast worden (Snyder, 1981, pp. 63 en 64).

Zelfs met een waarde genomen voor de diameter van de openingen die groter is dan toegepast op het scheepsmodel heeft Re_s een waarde die meer dan twee keer kleiner is dan vereist. Een oplossing hiervoor kan zijn de uitstroomsnelheid w te vergroten. Het plumemomentum (zie paragraaf 2.3.1) dient wel behouden te worden en dus moet de dichtheid van de rook omlaag gebracht worden. Een lagere dichtheid van de rookgassen geeft wel weer moeilijkheden met de buoyancy, maar dat is alleen belangrijk ver weg van het schip, en is dus van geen belang in dit onderzoek (Barlow et al., 1999, p. 613). Tijdens de vergadering met Jeroen van Beeck op de Hogere Zeevaartschool op donderdag 6 mei 2010 heeft Jeroen van Beeck vermeld dat het minder belangrijk is om de waarde 2.300 aan te houden. Hoewel dit in tegenspraak is met wat Snyder en anderen waaronder Nakiboğlu et al. (2009, p. 3397) zeggen, worden ook lagere waarden voor Re_s aangehouden. Arya en Lape (1990,

pp. 292-293) noemen 600 een voldoende hoge waarde, terwijl Hoult en Weil nog lager gaan en 300 aanhouden (1972, p. 530). Als dus de diameter van de uitstroomopeningen in ons model vergroot wordt, is de waarde van $Re_s = 1.117$ groot genoeg en hoeft de uitstroomsnelheid w niet verhoogd te worden, wat veel complicaties vermijdt.

2.2.3 Het Prandtl-getal

Dit is de verhouding tussen impulsoverdracht en warmteoverdracht tussen deeltjes en is bij gebruik van lucht als fluïdum hetzelfde in het testmodel en in de werkelijkheid. Verder gaan wij uit van een ideaal gas en dus is er geen warmteoverdracht.

2.2.4 Het Peclet-getal en Reynolds-Schmidt produkt

Deze beschrijven de verhouding tussen warmteoverdracht via straling en via convectie en moleculaire diffusie en mogen ook genegeerd worden als het model een voldoende hoge waarde van Re heeft (Snyder, 1981, p. 31).

2.2.5 Het Froude-getal

Bij voorwerpen volledig ondergedompeld in één fluïdum, zoals het geval is in een windtunnel, en die stijf zijn en gefixeerd in de ruimte, zijn de resultaten niet afhankelijk van het Froude-getal. Zij zijn alleen afhankelijk van het Reynoldsgetal, voor stromingsnelheden lager dan Mach 0,3 (Barlow et al., 1999, pp. 9 en 13).

2.3 Grenswaarden

2.3.1 Stromingsdynamica

Om de luchtstromingen waarheidsgetrouw weer te geven, dient het testmodel aan bepaalde schaalvoorwaarden te voldoen. Deze voorwaarden betreffende de stromingsdynamica zijn de volgende:

ρ_a = dichtheid van de omgevingslucht. $[\rho] = \text{kgm}^{-3}$

ρ_s = dichtheid van de gassen/benzeendampen/.... $[\rho] = \text{kgm}^{-3}$

u = relatieve windsnelheid. $[u] = \text{ms}^{-1}$

w = uitlaatsnelheid van het gas ten opzichte van het schip. $[w] = \text{ms}^{-1}$

θ = hoek van w ten opzichte van u . $[\theta] = \text{x}^\circ$

A = referentievlak van het schip, hier het frontale oppervlak. $[A] = \text{m}^2$

D_s = diameter van de uitlaatopeningen. $[D_s] = \text{m}$. $D_s = \sqrt{4A_s/\pi}$ waarbij A_s de oppervlakte van de uitlaatopeningen is.

g = valversnelling. $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$

De geometrie van het schip is onveranderlijk, net als de lokale valversnelling. Deze waarden worden dus niet in beschouwing genomen.

Volgende parameters voor gelijkvormigheid werden gevonden:

- 1) θ Initiële hoek van gassen ten opzichte van de gemiddelde windstroming.
- 2) $\rho_a \cdot u^2 / \rho_s \cdot w^2$ Initiëel rookpluimmoment (plumemomentum) P_{mv} .
- 3) $\rho_s \cdot w \cdot D^2 / \rho_a \cdot u \cdot A$ Rookpluimmassa stromingsratio $P_{m\dot{}}$.
- 4) $\Delta\rho \cdot g \cdot D / \rho_a \cdot w^2$ Rookpluimbuoyancy P_{buoy} . $\Delta\rho$ is het verschil in dichtheid tussen de rook en de omgevingslucht.

Om dynamische gelijkvormigheid in twee verschillende stromingen, zijnde de werkelijkheid en het windtunnelmodel, te verkrijgen, moeten de waarden van parameters 1 tot en met 4 hetzelfde zijn voor beide

stromingen. Dat is praktisch niet haalbaar, dus kiezen we de groepen die het meest belangrijk zijn in dit specifieke geval. De waarde voor θ is in beide situaties 90° . Verder is in veel gevallen gebleken dat de waarden van parameter 4, de rookpluimbuoyancy ofwel het drijfvermogen van de rookpluim, vrij klein zijn bij het schip op ware grootte. Relatief ten opzichte van momentumkrachten zijn de buoyancykrachten klein en hebben ze dus een kleine invloed op de stromingen dicht bij de uitlaatopeningen. Ze hebben wel een significante invloed ver verwijderd van het schip, maar dat is van geen belang in deze studie. In dit geval wordt de buoyancy genegeerd en bekijken we alleen het rookpluim-momentum en de massa stromingsratio. Van deze twee is het momentum veruit het belangrijkste, en wij concentreren er ons dan ook op om aan deze voorwaarde voor gelijkvormigheid te voldoen (Barlow et al., 1999, pp. 612-614).

Dus om een testopstelling gelijkwaardig te laten zijn aan de werkelijkheid dienen alle waarden van volgende vergelijking te worden bepaald en moet het quotiënt in formule 7 voor beide gevallen even groot zijn:

$$\rho_a \cdot u^2 / \rho_s \cdot w^2 \quad (\text{Formule 7})$$

ρ_a De dichtheid van de omgevingslucht wordt bepaald door gebruik van de algemene gaswet (zie formule 4) en bedraagt $1,265 \text{ kgm}^{-3}$ bij 6°C .

u^2 u is de relatieve windsnelheid in ms^{-1} . Bij het windtunnelmodel geldt hier de windsnelheid in de windtunnel. Bij ware grootte wordt de snelheid van de relatieve wind ten opzichte van de lengterichting van het schip in knopen uitgedrukt. 1 knoop = 1 zeemijl per uur. Dat is gelijk aan 1852 mh^{-1} en dat is weer gelijk aan $0,514444 \text{ ms}^{-1}$. In goede benadering kunnen we stellen dat een snelheid van 1 knoop gelijk staat aan $0,5 \text{ ms}^{-1}$.

ρ_s Dichtheid van de uitlaatgassen. Benzeendampen hebben een dichtheid $\rho_{benzeen} = 2,09 \text{ kgm}^{-3}$. Het benzeen is echter dusdanig

veel verdund dat geldt $\rho_s = \rho_a = 1,265 \text{ kgm}^{-3}$. Ook geldt bij het testmodel volgens de gegevens van de fabrikant van de rookmachine dat de neerslagsnelheid van de rook varieert van 8,14 mm/uur tot 15,16 mm/uur voor druppeldoorsnedes van 0,2 μm tot 0,3 μm . Dat is een dusdanig kleine waarde dat ze als 0 wordt aangenomen. Dat impliceert dat ρ_s gelijk wordt gesteld aan ρ_a voor waarden aangaande het testmodel.

w^2 w is de uitstroomsnelheid van de rookgassen. De bepaling van w wordt als volgt gedaan. Op ware grootte is het debiet Q van het benzeen/lucht mengsel $11.000 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ in totaal voor 4 mangaten. Per mangat is dat $2.750 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. De oppervlakte A van een mangat is $1,222 \text{ m}^2$.

$$w = Q/A \quad (\text{Formule 8})$$

Snelheid w is dan $w = 2.750 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/1,222 \text{ m}^2 = 2.249,204 \text{ mh}^{-1}$. Dat komt overeen met $0,625 \text{ ms}^{-1}$. Het bepalen van w bij het schaalmodel wordt gedaan door de gelijkheid van het quotiënt in formule 7 op ware grootte en bij het testmodel. Met volgende waarden:

$$p_a = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$R = 287 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$T = 284 \text{ K (11 } ^\circ\text{C)}$$

$$u = 8 \text{ ms}^{-1}$$

$$w = 0,625 \text{ ms}^{-1}$$

bedraagt het plumemomentum op ware grootte 163,956. Om bij het schaalmodel dezelfde waarde te bereiken, uitgaande van volgende waarden:

$$p_a = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$R = 287 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$T = 279 \text{ K } (\cong 6^\circ \text{ C})$$

$$u = 7 \text{ ms}^{-1}$$

moet $w = 0,55 \text{ ms}^{-1}$ zijn.

De moeilijkheid bestaat er nu in om w in te stellen op $0,55 \text{ ms}^{-1}$.

2.3.2 Bepaling van de stroomsnelheid w met de wet van Bernouilli

Voor de stromingssnelheid van een fluïdum geldt volgens de wet van Bernouilli dat zij afhangt van het verschil in druk op twee plaatsen en de dichtheid van het fluïdum:

$$w = \sqrt{2\Delta p/\rho} \quad (\text{Formule 9})$$

Bij een temperatuur van 6° C is de dichtheid van lucht $1,265 \text{ kgm}^{-3}$, waaruit volgt:

$$0,55^2 \text{ m}^2 = 2\Delta p/1,265 \text{ kgm}^{-3}$$

$$\Delta p = 0,19 \text{ Pa}$$

Het drukverschil tussen de bufferdoos en de omgeving dient dus $0,2 \text{ Pa}$ te zijn. Om drukverschillen in die orde van grootte te kunnen meten, is zeer gevoelige apparatuur nodig.

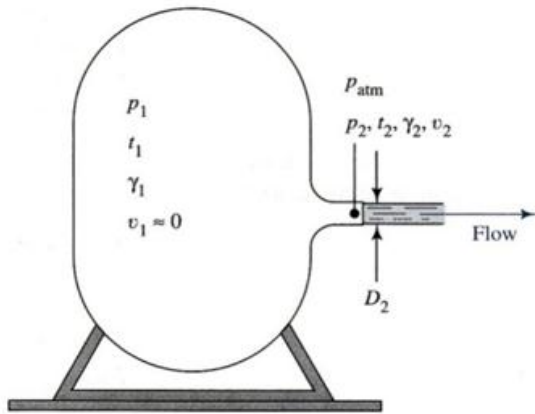
2.3.3 Bepaling van de uitstroomsnelheid w volgens Mott

Mott (2006, p. 557) zegt dat bij verschillende binnen- en buitendruk de uitstroomsnelheid van een fluïdum gegeven wordt door de formule:

$$w = \{(2g \cdot p_1)/\rho_1\} \cdot \left(\frac{k_1}{k_1-1}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k_1-1}{k_1}}\right]^{1/2} \quad (\text{Formule 10})$$

Hierbij is k_1 de adiabatistische constante met waarde $k_1 = 1,40$. Om waarden voor w van $0,55 \text{ ms}^{-1}$ te verkrijgen moet p_1 gelijk zijn aan $0,3 \text{ Pa}$. Ook deze waarde is dusdanig klein dat zeer nauwkeurige meetapparatuur vereist is.

Het instellen van de snelheid w door de druk in de bufferbak zodanig af te stellen dat de gewenste druk bereikt wordt, wordt zeker als rekening gehouden wordt met meet- en correctiefouten, als praktisch onmogelijk



Figuur 5: Uitstroomsnelheid volgens Mott

Bron: Mott (2006, p. 557)

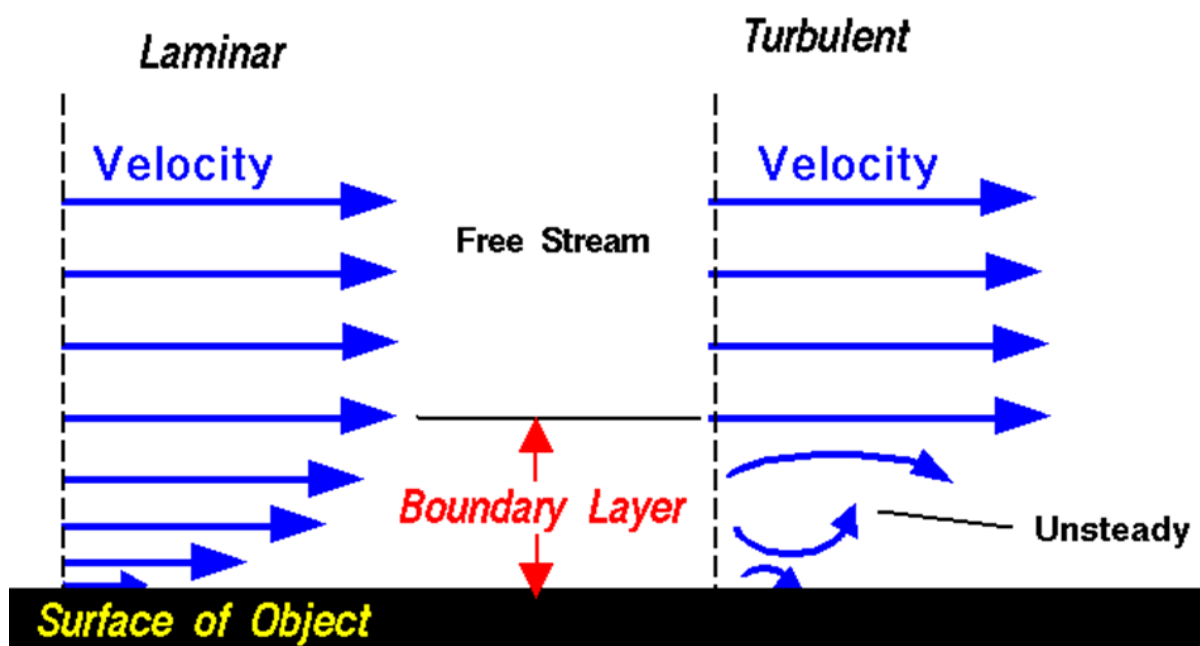
beschouwd en verder ook niet overwogen. Beter is het om uitstroomsnelheid w te meten en de druk in de bufferbak zodanig bij te regelen totdat de gewenste uitlaatsnelheid w bereikt wordt. Een andere manier is om een peristaltische pomp met een zeer fijn instelbaar debiet te gebruiken (Barlow et al., 1999, p. 209). Snelheids- en drukmetingen en

peristaltische pompen worden in hoofdstuk 3 besproken.

2.4 Boundary Layer

Eerst een korte uitleg over wat een boundary layer (grenslaag) en de daarmee samenhangende termen roughness length (ruwheidslengte), zero plane displacement (verschuiving van het 0-vlak) en friction-velocity (frictie-snelheid) zijn. Aerodynamische krachten zijn op een complexe manier afhankelijk van de viscositeit van een fluïdum. Wanneer een fluïdum langs een voorwerp beweegt, blijven de moleculen net boven het oppervlak van het voorwerp aan het oppervlak 'kleven'. De moleculen daar weer net boven worden afgeremd in hun snelheid door deze moleculen aan het oppervlak. Hoe verder van het oppervlak verwijderd, hoe minder de moleculen van het fluïdum afgeremd worden door het oppervlak van het voorwerp.

Dat resulteert in een dunne laag van het fluidum waarin de stromingsnelheid varieert van nul aan het oppervlak tot de vrije stromingsnelheid daarboven (zie Figuur 6). Deze dunne laag wordt de boundary layer (grenslaag) genoemd (Benson, s.a.). De 'roughness length' z_0 is de hoogte ten opzichte van het oppervlak tot waar de windsnelheid u gelijk is aan nul, en is een maat voor de ruwheid van het oppervlak. De 'zero plane displacement' is een correctiefactor die wordt toegepast op de 'roughness length'. En ten slotte is de frictiesnelheid een referentiesnelheid.



Figuur 6: Laminaire en turbulente stroming

Bron: Benson (2009)

Om een goede nabootsing van de dispersie op ware grootte in de windtunnel te verkrijgen, is het naast de voorwaarden beschreven in de vorige paragraaf noodzakelijk om basisvoorwaarden van de atmosferische grenslaag, zoals profielen voor de windsnelheid en turbulentie, te simuleren in de testopstelling.

Het klassieke verticale wind profiel is:

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{k_2} \ln\left(\frac{z-d_0}{z_0}\right) \quad (\text{Formule 11})$$

Hierbij is $u(z)$ de windsnelheid op een bepaalde hoogte z , u_* is de frictiesnelheid, k_2 is de von Karman constante, met $k_2 = 0,40$. Dit is niet dezelfde k als eerder vermeld, daar was het de adiabatische constante! z_0 is de zogenaamde 'roughness length' en d_0 de 'zero plane displacement', welke genegeerd mag worden bij waarden van z_0 kleiner dan 0,2 m (Snyder, 1981, p. 79, en Robins et al., 2001, p. 2246). Oplossen voor u_* geeft de volgende vergelijking:

$$u_* = \frac{k_2 \cdot u(z)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (\text{Formule 12})$$

Om deze vergelijking op te kunnen lossen moet eerst z_0 worden bepaald. De windsnelheden $u(z_1)$ en $u(z_2)$ op hoogtes z_1 en z_2 worden gegeven door de formules:

$$u(z_1) = u(\text{ref}) \cdot \ln(z_1/z_0) \quad (\text{Formule 13})$$

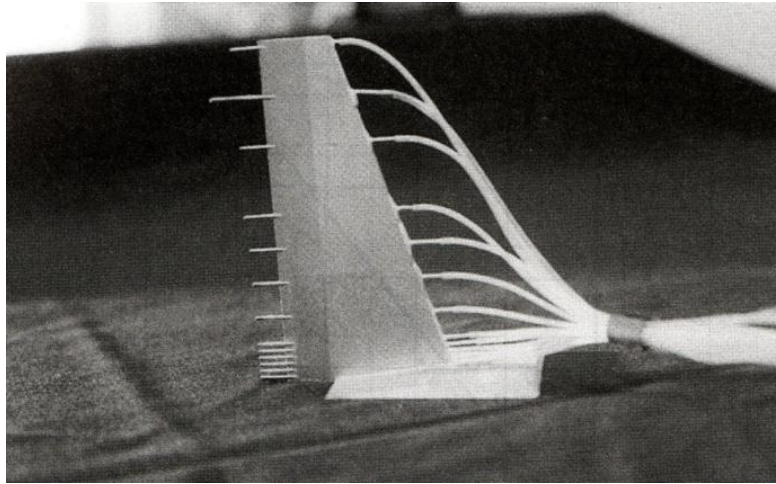
$$u(z_2) = u(\text{ref}) \cdot \ln(z_2/z_0) \quad (\text{Formule 14})$$

De windsnelheid op de referentiehoogte $u(\text{ref})$ is onbekend maar valt weg uit de vergelijkingen als we oplossen naar z_0 . z_0 wordt dan gegeven door de volgende vergelijking:

$$z_0 = e^{\left[\frac{u(z_2) \cdot \ln(z_1) - u(z_1) \cdot \ln(z_2)}{u(z_2) - u(z_1)}\right]} \quad (\text{Formule 15})$$

Als nu de windsnelheden $u(z_1)$ en $u(z_2)$ en de hoogtes z_1 en z_2 ingegeven worden, kan z_0 worden berekend. z_0 ligt normaal gesproken in de orde van grootte van 0,001 tot 0,030 m. Voor de fictieve waarden $z_1 = 1$ m, $z_2 = 2$ m, $u(z_1) = 7,2 \text{ ms}^{-1}$ en $u(z_2) = 8 \text{ ms}^{-1}$ geldt dat $z_0 = 0,002$ m. Met deze waarden voor z_0 en z_1 geldt verder dat $u_* = 0,4616 \text{ ms}^{-1}$.

De verschillende waarden $u(z_n)$ kunnen gemeten worden met een 'boundary layer rake', een meetinstrument samengesteld uit meerdere pitot-buizen (zie Figuur 9), of door gebruik van hotwire anemometers.



Figuur 7: De Boundary Layer Rake
Bron: Barlow et al. (1999, p. 228)

Om nu de turbulente grenslaag goed te simuleren, moet de opstelling voldoen aan een minimaal ruwheids Reynoldsgetal Re_* (Nakiboğlu et al., 2009, p. 3397 en Robins et al., 2001, p. 2244).

Re_* wordt gegeven door:

$$Re_* = \frac{u_* \cdot z_0}{\nu} \quad (\text{Formule 16})$$

Met onze fictieve waarden voor u_* en z_0 en de waarde voor ν gevonden in paragraaf 2.2.2 met de formules 3, 4 en 5 berekenen we Re_* en krijgen:

$$Re_* = \frac{0,4616 \cdot 0,002}{1,3791 \cdot 10^{-5}} = 65,37$$

Er is weinig consistentie in de literatuur over welke waarde Re_* minimaal moet hebben om een turbulente grenslaag te verkrijgen. Snyder en Castro (1998, p. 1532) zeggen 0,5, Plate (1982, p. 578) zegt 5 en Sutton (1949, pp. 53-54) zegt 2,5. Om zeker te zijn nemen we de hoogste waarde, nl. 5.

Zoals eerder vermeld zijn de waarden gebruikt om Re^* te berekenen fictief, maar het toont wel aan dat onze testopstelling naar alle waarschijnlijkheid de juiste condities van de boundary layer bezit. Maar om zeker te weten dat we goede overeenstemming in ons model verkrijgen, dienen we wel eerst de waarden voor $u(z_1)$ en $u(z_2)$ te meten, en dan aan de hand van die waarden z_0 , u^* en Re^* te bepalen.

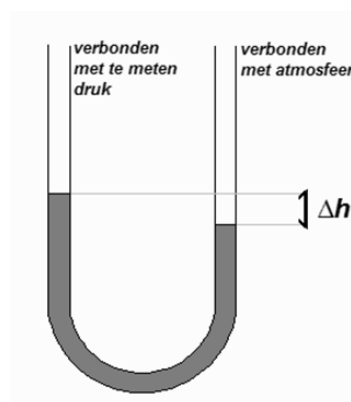
Hoofdstuk 3 Snelheidsmetingen

Aangaande het plumemomentum zijn er twee snelheden die bepaald dienen te worden, zijnde de windsnelheid u en de uitstroomsnelheid w . u is in de orde van grootte van 4 tot 8 ms^{-1} en $w = 0,7 \text{ ms}^{-1}$. Wat betreft de boundary layer moeten er verschillende waarden voor u op verschillende hoogtes z_1 en z_2 gemeten worden. De snelheid w wordt gemeten met een andere methode dan de verschillende snelheden u_n , omdat de zeer lage waarde van w specifieke problemen met zich meebrengt.

Snelheden kunnen bepaald worden met anemometers, die de windsnelheid meten, met manometers, die de druk bepalen en met flowmeters, die het debiet bepalen. Ze kunnen ook gegeven worden door het gebruik van fijn afstelbare pompen waarbij het debiet op voorhand geijkt wordt. Bij manometers wordt aan de hand van formule 9 de snelheid berekend. Bij flowmeters wordt het debiet met de doorsnede van de buizen waarin de rookgassen stromen verrekend om de stromingssnelheid te bekomen. Allen zullen in de volgende paragrafen besproken worden.

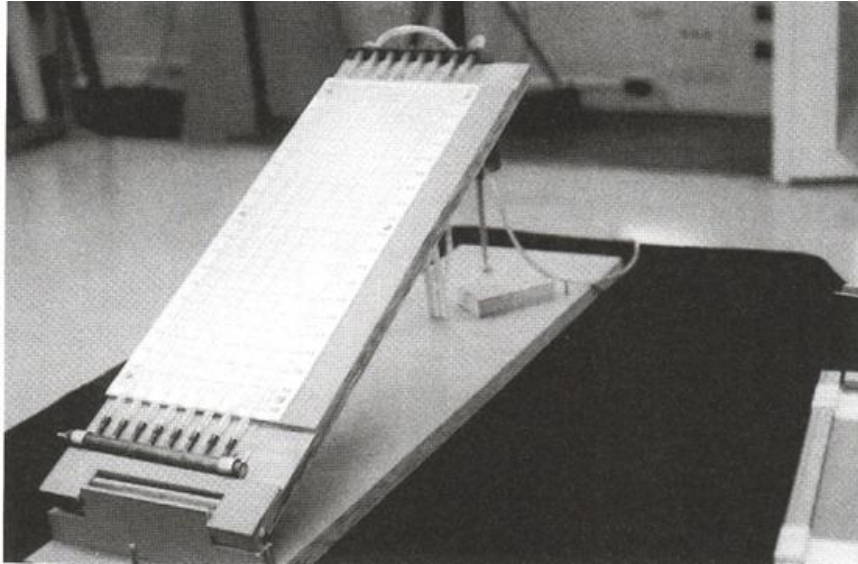
3.1 Manometers

3.1.1 De U-Buis



Figuur 8: Een U-buis

Bron: Wikipedia (2011)



Figuur 9: Een Inclinatiemanometer

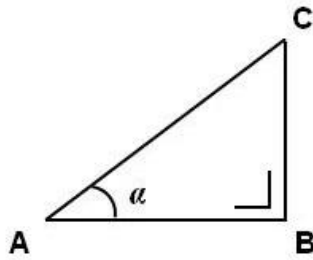
Bron: Barlow et al. (1999, p. 141)

De U-Buis bestaat ofwel uit twee buizen, met elkaar verbonden door een slang, ofwel uit één U-vormig profiel, gevuld met een vloeistof. De ene kant van de buis staat in contact met de atmosfeer, de andere met de te meten druk. De manometer wordt gebruikt om drukverschil tussen deze twee te meten. Dat gebeurt door het verschil in hoogte van de vloeistofkolom in de twee buizen te bepalen, zie Figuur 10. Het drukverschil wordt dan bepaald door volgende formule:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (\text{Formule 17})$$

ρ is hier de dichtheid van de gebruikte vloeistof, g de valversnelling en Δh het hoogteverschil tussen de twee vloeistofkolommen. Voor het bepalen van grote drukverschillen wordt kwik als vloeistof genomen, voor kleine drukverschillen neemt men alcohol. Om kleine drukverschillen duidelijker af te kunnen lezen gebruikt men ook wel een 'inclinatiemanometer', zie Figuur 11. Door de buizen schuin te monteren kan men de waarde van Δh aflezen op de schuine zijde AC. Deze waarde van Δh wordt gegeven door de formule:

$$\Delta h = \sin \alpha \cdot (\text{de waarde van } \Delta h \text{ op AC}) \quad (\text{Formule 18})$$



Figuur 10: De Goniometrische Driehoek

Bron: Wikisage (2011)

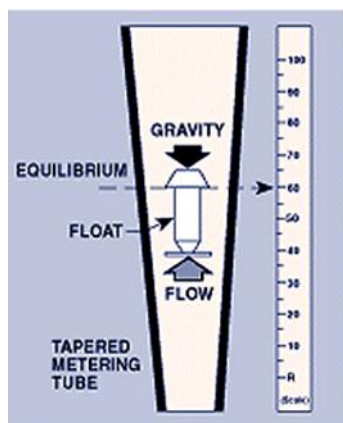
Door de waarde van de hoek α zo klein mogelijk te nemen kan men de nauwkeurigheid van de aflezing serieus vergroten. Voor $\alpha = 10^\circ$ is de sinus 0,1736 en is de nauwkeurigheid van de meting dus $1/0,1736 = 5,76$ keer groter geworden. Maar zelfs met een dergelijke kleine hoek α , en de manometer gevuld met water, zou een drukverschil van minder dan 1 Pa betekenen dat we een hoogteverschil op schuine zijde AC moeten kunnen aflezen op 0,1 mm na nauwkeurig. Een dusdanig klein verschil is niet accuraat af te lezen. Alcohol wordt in deze niet overwogen omdat het te vluchtig is. De standaard- en inclinatiemanometers worden als niet gevoelig genoeg beschouwd om in deze proefopstelling van nut te kunnen zijn.

3.1.2 De Pitot-Buis

De pitot-buis meet twee drukken, de statische omgevingsdruk en de totale druk van de stroom, die bestaat uit de statische druk en de dynamische druk, uitgeoefend door de beweging van het fluidum. Het verschil tussen deze twee wordt bepaald en aan de hand van formule 9 wordt dan de stromingssnelheid bepaald. De nauwkeurigheid van pitot-buizen is evenwel niet groot genoeg om bruikbaar te kunnen zijn voor het meten van w (Leutheusser en Motycka, 1978, p. 1315) en ze worden daarvoor dus ook niet gebruikt. Voor het meten van de verschillende waarden voor $u(z_n)$ is het gebruik van pitot-buizen zeker het overwegen waard.

3.2 Flowmeters (Rotameter)

Een andere optie is het gebruik van rotameters tussen elke flexibele slang en elke uitstroomopening. Een rotameter bepaalt het debiet van een stroom. Een drijver met een bepaald gewicht wordt in een wijd uitlopende buis geplaatst. De drijver wordt omlaag getrokken door de zwaartekracht en omhoog geduwd door de stroming. Een snellere stroom heeft een grotere doorsnede tussen de drijver en de buis nodig om te kunnen



Figuur 11: Een Rotameter
Bron: Scheer (2011)

passeren. Als een evenwicht is bereikt, kan de stroomsnelheid afgelezen worden. In tegenstelling tot wat het woord zegt, 'drijft' de drijver niet. De drijver heeft een grotere dichtheid dan het te meten fluïdum, anders zou ze naar de top van de meter drijven, zelfs als er geen stroming is. Rotameters kunnen echter niet gebruikt worden omdat de rook in de stroming leidt tot onnauwkeurige debiet metingen (Nakiboğlu et al., 2009, p. 3405).

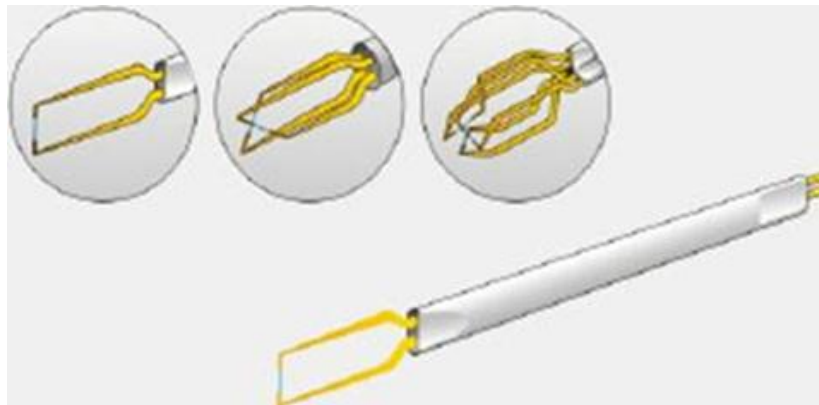
3.3 Anemometers

De naam is afgeleid van het griekse woord ανεμος (anemos) dat 'wind' betekent.

3.3.1 Hotwire Anemometers

Hotwire anemometers worden gebruikt om snelheidsmetingen te verrichten met snelle feedback in (turbulente) stromingen. Ze maken gebruik van peilstiften bestaande uit één of meerdere erg dunne metalen draden (zie Figuur 12) met een diameter van slechts enkele μm die verwarmd wordt tot boven de omgevingstemperatuur. De stroming langs de draad heeft een afkoelend effect. Aangezien de elektrische weerstand van een metaal afhankelijk is van zijn temperatuur, is die weerstand een maat voor de afkoeling van het metaal, en dus ook voor de

stromingsnelheid van het fluïdum. Hotwire anemometers hebben als nadeel dat ze bij lage stromingsnelheden erg gevoelig zijn voor de hoek ten opzichte van de wind waarin ze gehouden worden, zoals aangetoond door Snyder en Castro in 1998. Tevens is de calibratieprocedure uitgebreid en ingewikkeld.

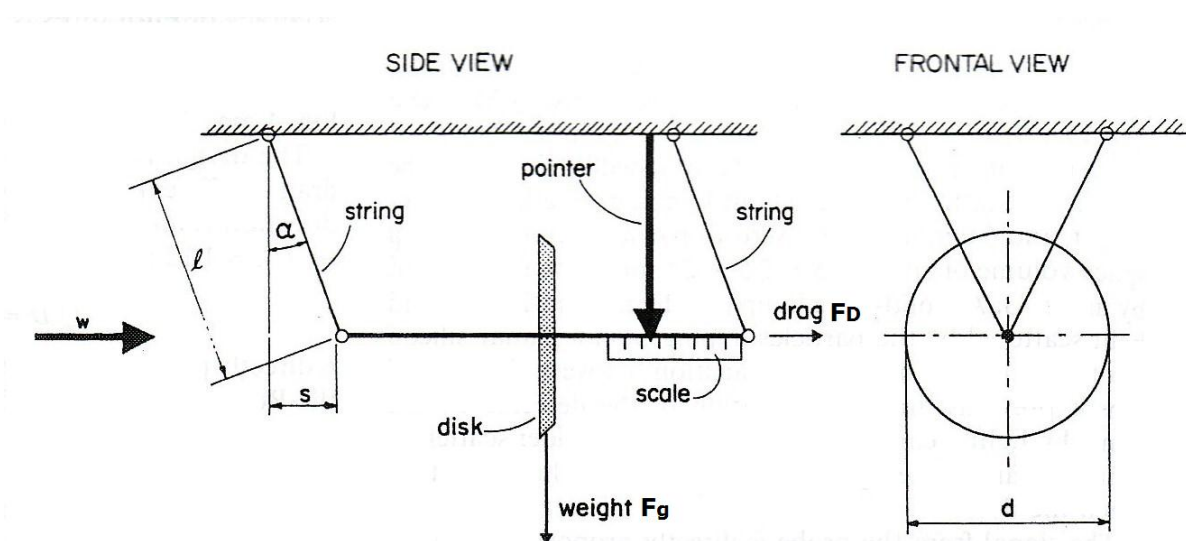


Figuur 12: Enkele verschillende peilstiften van hotwire anemometers

Bron: Dantec Dynamics A/S (2011)

Om degelijke metingen bij snelheden lager dan $1,0 \text{ ms}^{-1}$ eenvoudig te kunnen verrichten is dus een andere meetmethode nodig. Het gebruik van een 'Schijf Snelheid Indicator' is zeker te overwegen.

3.3.2 Schijf Snelheid Indicator



Figuur 13: De Schijf Snelheid Indicator

Bron: Leutheusser en Motycka (1978, p. 1316)

Het ontwerp van de indicator is gebaseerd op het feit dat de weerstandscoëfficiënt C_D van een cirkelvormige schijf loodrecht op de stromingsrichting van een fluïdum constant is, namelijk $C_D = 1,12$.

Daaruit volgend is de weerstandskracht F_D op de schijf gelijk aan:

$$F_D = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (\text{Formule 19})$$

vooropgesteld dat het Reynoldsgetal Re van de stroom groter is dan 1000 (Leutheusser en Motycka, 1978, p. 1315). Het Reynoldsgetal Re wordt als volgt bepaald met formule (zie formules 2 en 6):

$$Re = w \cdot D/\nu \quad (\text{Formule 20})$$

Hierin is w = uitstroomsnelheid van de rookgassen, D = diameter van de schijf en ν = kinematische viscositeit. Het Reynoldsgetal wordt dan:

$$Re = 1000 = 0,55 \text{ ms}^{-1} \cdot D/1,3791 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

Om aan de voorwaarde van een constante C_D te kunnen voldoen is het noodzakelijk dat bij een luchtsnelheid van $0,55 \text{ ms}^{-1}$ de diameter van de schijf minstens 2,5 cm bedraagt, bij een temperatuur van $6 \text{ }^\circ\text{C} / 279 \text{ K}$.

Uit Figuur 15 blijkt:

$$\frac{s}{l \cdot \cos \alpha} = \frac{F_D}{F_g} \quad (\text{Formule 21})$$

en met formule 19 komen we tot:

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot F_g \cdot s}{C_d \cdot A \cdot \rho \cdot l \cdot \cos \alpha}} \quad (\text{Formule 22})$$

Waarbij geldt:

$$\alpha = \sin^{-1}(s/l) \quad (\text{Formule 23})$$

l = lengte van de snaar, F_g = gewicht van de schijfconstructie, en s = de horizontale verschuiving.

Formule 22 drukt de stroomsnelheid uit als functie van de horizontale verschuiving van de schijf, en kan worden gebruikt om een direct afleesbare snelheidsschaal te maken voor de snelheidsindicator. De nauwkeurigheid van het systeem hangt alleen af van de geometrie van het systeem, dus is er geen nood om het te kalibreren. De gevoeligheid en het meetbereik van de snelheidsindicator kan worden aangepast door het gewicht F_g te veranderen.

3.4 Peristaltische Pomp

De kern van een peristaltische pomp bestaat uit een flexibele slang (zwart in Figuur 16) die gebogen ligt aan de binnenkant van het pomphuis (rood). De ronddraaiende rotor (geel) drukt de slang samen en daardoor de vloeistof of het gas in de slang naar voren. Na het passeren van de rotorkop komt de slang door zijn flexibiliteit weer in zijn originele staat en zuigt aldus nieuwe vloeistof of gas aan. De oppervlakte van de mangaten in werkelijkheid is $1,222 \text{ m}^2$. Dat komt overeen met een oppervlakte van $3,89 \text{ cm}^2$ bij het testmodel. De uitstroomsnelheid $w = 0,55 \text{ ms}^{-1}$ wat neerkomt op een debiet $Q = 0,55 \text{ ms}^{-1} \cdot 3,89 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 = 2,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.



Figuur 14: Een Peristaltische Pomp

Bron: Watson-Marlow (2011)

Dat is $0,214 \text{ l s}^{-1}$ per uitstroomopening. Er kunnen dan 4 Peristaltische pompen gebruikt worden, of één centrale pomp die een debiet van $0,856 \text{ l s}^{-1}$ dient te hebben. Peristaltische pompen worden veel gebruikt in medische en chemische toepassingen waarbij het noodzakelijk is een goed instelbaar debiet te hebben. De debieten lopen uiteen van $1 \mu\text{l s}^{-1}$ tot 100-en m^3h^{-1} , afhankelijk van de grootte van de pomp. Er is dus zeker een goede pomp voor onze doeleinden te vinden.

Deel II: Literatuuronderzoek en data-analyse

Hoofdstuk 4 Stroming onder invloed van obstakels

4.1 Inleiding

De stroming en dispersie van de ventilatiedampen wordt allereerst beïnvloed door de fysische en chemische samenstelling van de dampen zelf. Daarna zijn de vorm en de grootte van de ventilatie-uitlaten, de uitstroomsnelheid w en de windsnelheid u van belang. En ten laatste spelen de eventuele aanwezigheid van één of meerdere gebouwen, de geografische omstandigheden en het feit of er al dan niet meerdere tanks tegelijk geventileerd worden een grote rol. De aanwezigheid van een gebouw, in ons geval het kasteel van het schip, is van grote invloed op de stroming en dispersie van fluïda, in de eerste plaats vanwege het feit dat waar het kasteel zich bevindt, het fluïdum zich niet kan bevinden. Verder beïnvloedt het de stroming door het creëren van plaatsen van hogere druk en plaatsen van lagere druk, waardoor er stromingspatronen ontstaan die heel anders zijn dan die bij afwezigheid van het kasteel. De invloed van de aanwezigheid van het kasteel zal in dit hoofdstuk aan de hand van voorbeelden uit de literatuur worden besproken.

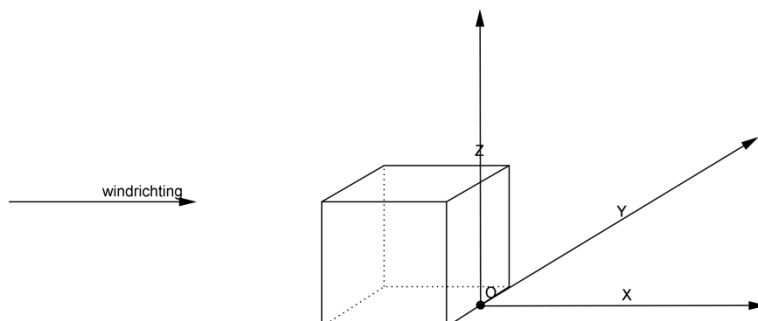
4.2 Concentraties achter en naast gebouwen en obstakels

Verscheidene onderzoeken zijn gedaan naar het effect van gebouwen op de stromingen, concentraties en dispersie van gassen en pluimen uit schoorstenen. De meeste van die studies zijn echter uitgevoerd met de uitlaat op het dak of aan de lijzijde¹ van het gebouw, terwijl ze bij onze studie aan de loefzijde² staan. Hoewel er dus niet te veel conclusies verbonden mogen worden aan dergelijke studies in het licht van onze situatie zijn er wel een paar aspecten die overeenkomen en dus van belang zijn voor ons onderzoek. Bij de studie van Cheung en Melbourne uit 1995 bijvoorbeeld worden heel duidelijk de relatieve concentraties op

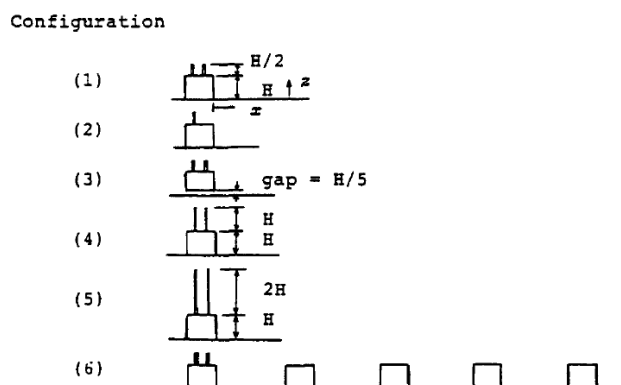
¹ Lijzijde of lij is de zijde van een voorwerp dat in de luwte van de wind ligt.

² Loefzijde of loef is de zijde van een voorwerp waar de wind op staat.

punten die verplaatst zijn in de x-, y- en z-richting onder invloed van verschillende gebouw/schoorsteen configuraties weergegeven.



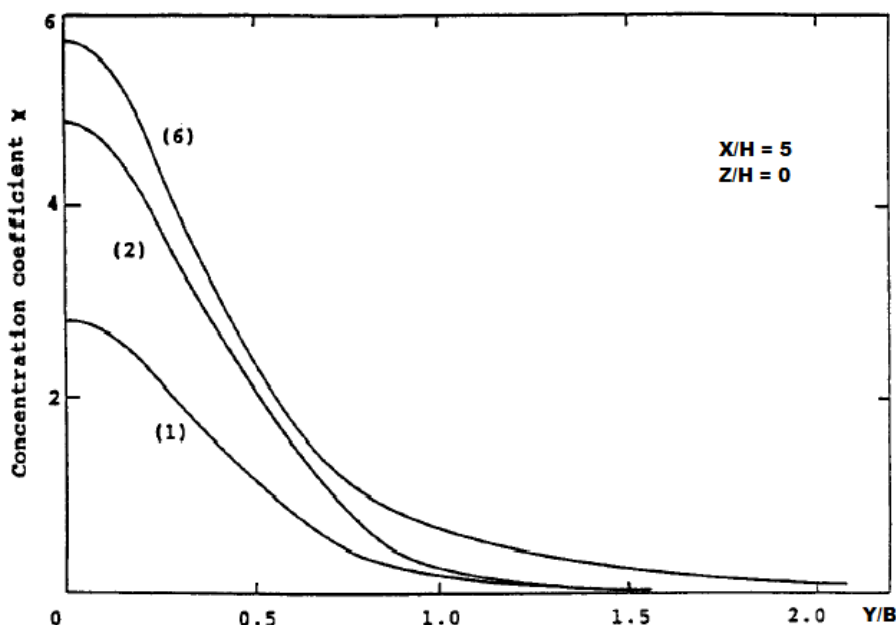
Figuur 15: Coördinatenstelsel gebruikt door Cheung en Melbourne
Bron: Eigen bewerking naar Cheung en Melbourne



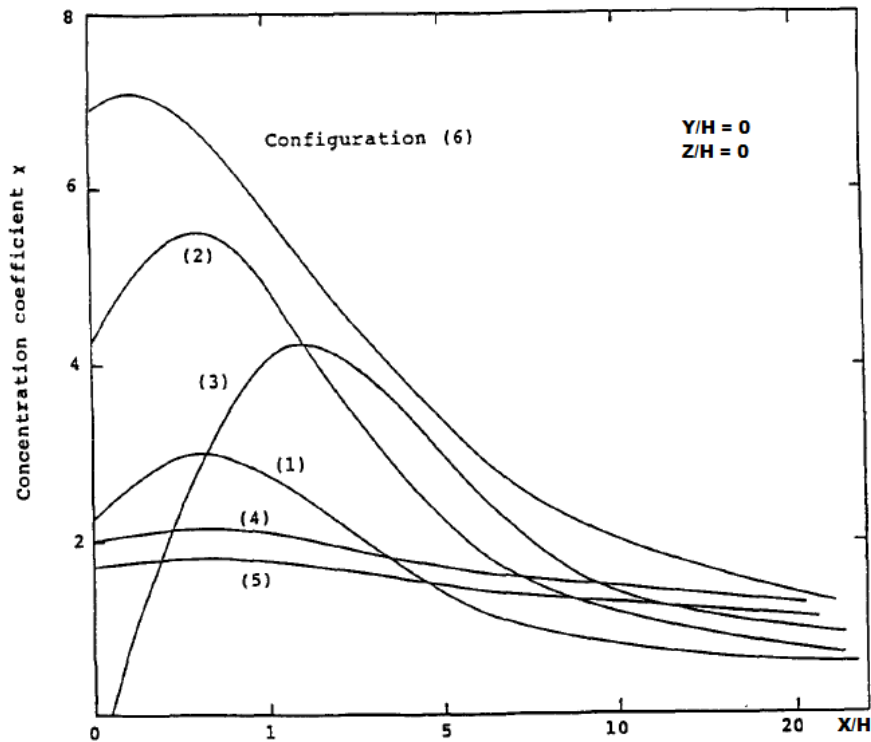
Figuur 16: De verschillende opstellingen van Cheung en Melbourne
Bron: Cheung en Melbourne (1995, p. 546)

Deze posities worden uitgedrukt in afstanden relatief ten opzichte van de hoogte H en breedte B van het obstakel. Als een punt zich op $X/H = 1$ bevindt, wil dat zeggen dat het op de x-as ligt, op een afstand van 1 maal de hoogte H verwijderd van de oorsprong. $Y/B = 2$ wil zeggen dat het punt op de y-as ligt, op een afstand van 2 maal de breedte B verwijderd van de oorsprong. Zie Figuur 18 voor de door Cheung en Melbourne gebruikte opstellingen.

Ze maken gebruik van kubusvormig obstakel, dus $H = B$. Op het obstakel worden één of meerdere schoorstenen geplaatst met verschillende hoogtes: $H/2$, H en $2H$. De uitlaatopeningen liggen dus op de hoogtes $3/2H$, $2H$ en $3H$ ten opzichte van de grond. De uitstroomsnelheid $w = 8,7 \text{ ms}^{-1}$ en de windsnelheid $u = 10,7 \text{ ms}^{-1}$. Deze waarden zijn constant gedurende het hele onderzoek. Bij de concentratieverdeling in de y -richting zien we dat de concentratie het hoogst is bij $Y/B = 0$, dat komt omdat de bron zich ook op $Y/B = 0$ bevindt. Tot $Y/B = 0,10 - 0,15$ blijft de concentratie echter redelijk gelijk, en pas daarbuiten neemt ze snel af. Dat wil dus zeggen dat in deze gevallen, met één enkele bron of twee bronnen in lijn, op een gebied met een breedte van $0,20 - 0,30B$ gelegen op de middellijn van de opstelling, de concentratie vrij hoog is (zie Figuur 19). In onze testopstelling ligt de bron een klein stukje naast het midden van de opstelling, dus verwachten we op de middellijn iets lagere concentraties dan die we gemeten hebben. Dat verschil is echter vrij klein.



Figuur 17: Concentraties op grondniveau in de y -richting
Bron: Cheung en Melbourne (1995, p. 547)



Figuur 18: Concentraties op grondniveau in de x-richting
Bron: Cheung en Melbourne (1995, p. 546)

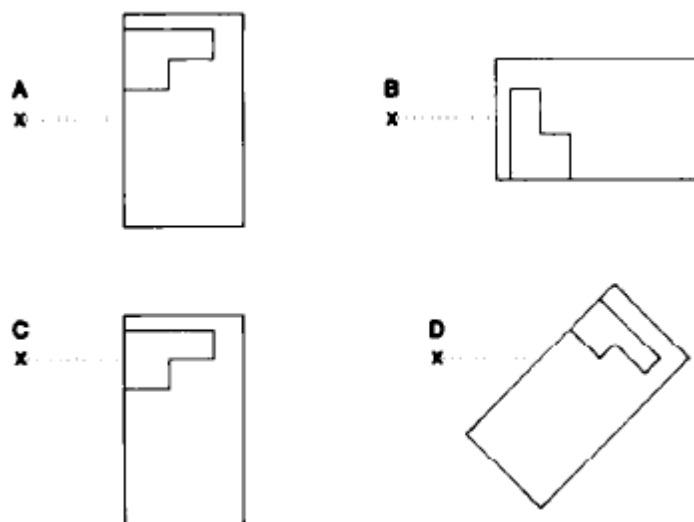
Op Figuur 20 zien we dat de concentratie op de grond voor steeds hogere schoorstenen (configuraties (1), (4) en (5)) meer en meer afneemt. Dat geldt tot op een afstand van $X/H = 4$ en is dus zeker in overeenstemming met het gebied waarop wij onze metingen verrichten. De hoogte van de door ons gebruikte uitlaten is echter zo goed als 0, dus de concentratiecurve zou nog boven curve (1) komen te liggen. We houden er in dit geval natuurlijk ook rekening mee dat in deze studie de uitlaten op het gebouw staan, in plaats van er voor zoals bij ons, dus het verloop van de curve zal bij ons hoogst waarschijnlijk enigszins anders zijn.

Tevens merken we op dat bij op een afstand $X/H = 0$, dus tegen het gebouw aan, de verschillende concentraties al vrij hoog liggen. Alleen bij configuratie (3), waarbij het gebouw opgetild is, is de concentratie recht achter het gebouw gelijk aan 0. Verder naar achter neemt de concentratie wel toe vanwege de 'downwash'. Voor het begrip 'downwash' bestaat er geen Nederlandse vertaling. In 'Het Nieuwe Nationaal Model', een model voor de verspreiding van luchtverontreiniging uit bronnen over korte

afstanden gebruikt door het Nederlands Ministerie voor Milieu wordt 'downwash' als volgt gedefinieerd: "Aan de zijzijde van een schoorsteen of afgaskanaal (of gebouwen) kan een werveling ontstaan, die de rookpluim naar beneden kan trekken. Deze daling wordt 'downwash' genoemd" (s.n., 'Het Nieuwe Nationaal Model', 2002, p. 249). Configuratie (3) komt overeen met de situatie die men bij binnenschepen wel aantreft, waarbij de stuurhut op een paal staat, of op een soort harmonicaconstructie die verhoogd en verlaagd kan worden. Lucht kan nu vrij onder het kasteel door stromen en daardoor is er minder ophoping van gas of rookdeeltjes.

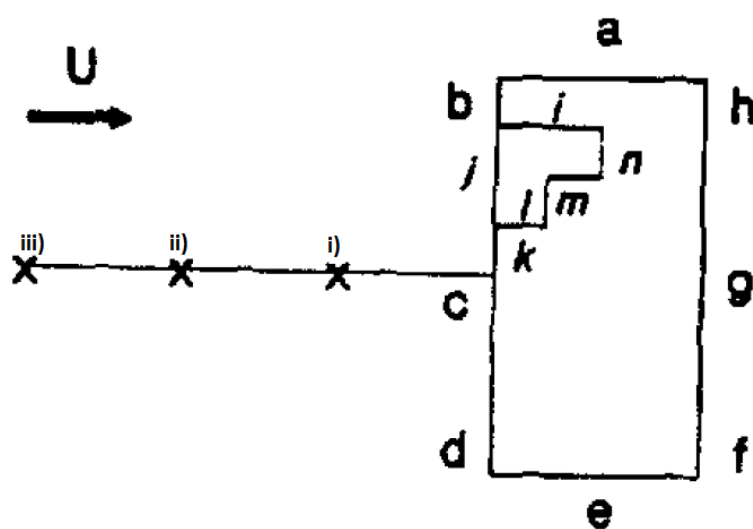
4.3 Concentraties van contaminanten rondom en op een gebouw

Bij het plaatsen van de inlaat- en uitlaatopeningen van de ventilatie van een gebouw is het van groot belang om het stromingspatroon rond het gebouw te kennen. Op die manier kun je voorkomen dat de uitlaatgassen worden opgezogen door de inlaat, of dat de inlaat gepositioneerd wordt op juist die plek waar de hoogste concentraties van schadelijke stoffen voorkomen (Higson et al., 1994, p. 1827).



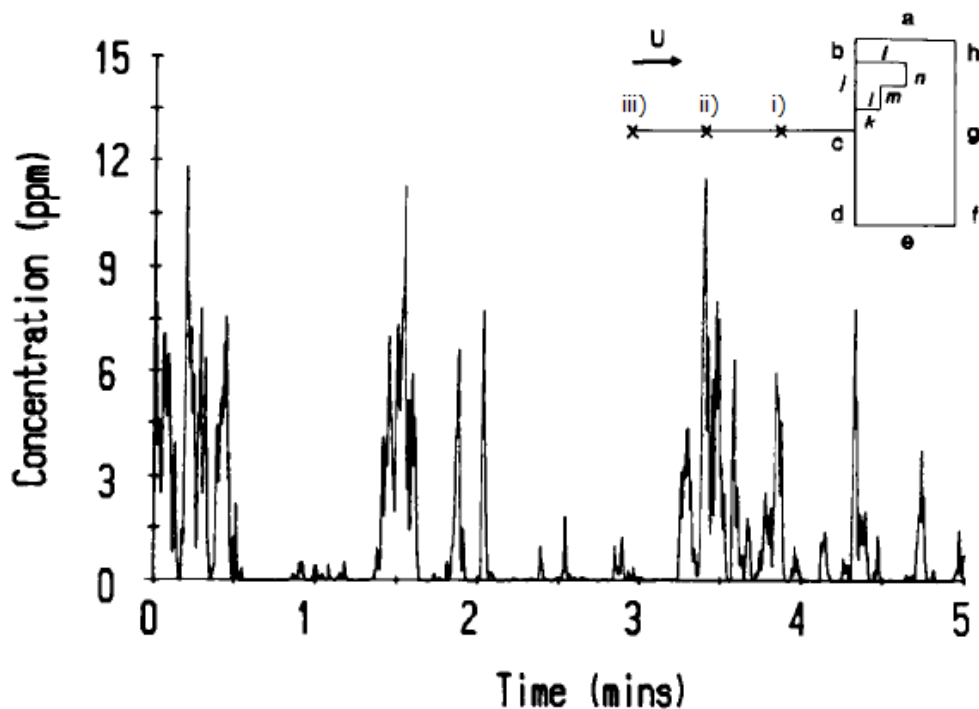
Figuur 19: De door Higson et al. gebruikte testopstellingen
Bron: Higson et al. (1994, p. 1829)

Higson et al. hebben in 1994 een vergelijkende studie gedaan tussen resultaten behaald tijdens testen in het veld en diezelfde testen op schaal in de windtunnel. Zij gebruikten een model van een rechthoekig gebouw met op het dak een L-figuur dat een penthouse voorstelde (zie Figuur 21). Hun model was 360° draaibaar om verschillende oriëntaties van het gebouw ten opzichte van de wind te kunnen bestuderen. Alleen hun reeks A is voor ons van belang, de situatie waarbij het model in de breedte loodrecht op de wind staat. Bij reeks B staat het model in de lengterichting opgesteld, wat bij ons niet het geval is. Bij reeks C is de bron te veel van de middellijn van de opstelling verwijderd, en bij D is het model verdraaid ten opzichte van de bron. Dat is niet hetzelfde als de wind die van richting verandert, daarbij blijft de onderlinge afstand en oriëntatie van bron en model gelijk. Verder maakten ze gebruik van drie bronlocaties: één dichtbij het gebouw zodat de ontstane rookpluim een breedte had die kleiner was dan de breedte van het gebouw op het moment dat het gebouw bereikt werd, één iets verder verwijderd zodat de rookpluim een breedte had die vergelijkbaar was met het model en één het verst verwijderd waardoor de rookpluim breder was dan het gebouw. Deze worden weergegeven als i), ii) en iii) in Figuur 22.



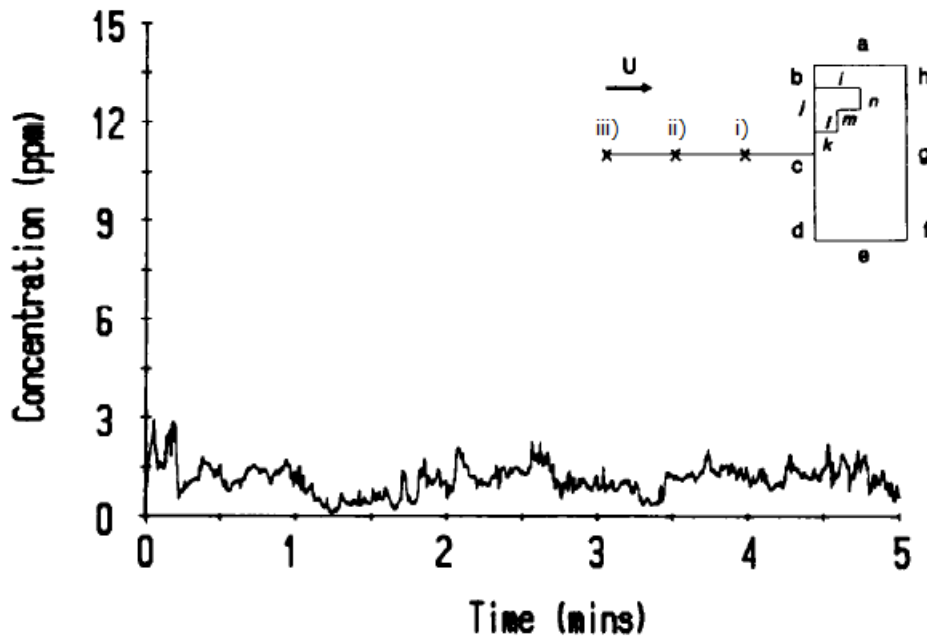
Figuur 20: De meetpunten a t/m n en de bronnen i), ii) en iii)
Bron: Higson et al. (1994, p. 1830)

Bronnen i), ii) en iii) bevinden zich respectievelijk op een afstand $7,5H$, $34H$ en $83H$ (of $1,07W$, $4,84W$ en $11,82W$) van de voorkant van het model. Dat zijn net als bij Cheung en Melbourne relatieve afstanden gerelateerd aan de hoogte H van het gebouw, of de breedte W (naar het Engelse 'Width', wijdte).



Figuur 21: Verloop van de concentratie op meetpunt d
Bron: Higson et al. (1994, p. 1830)

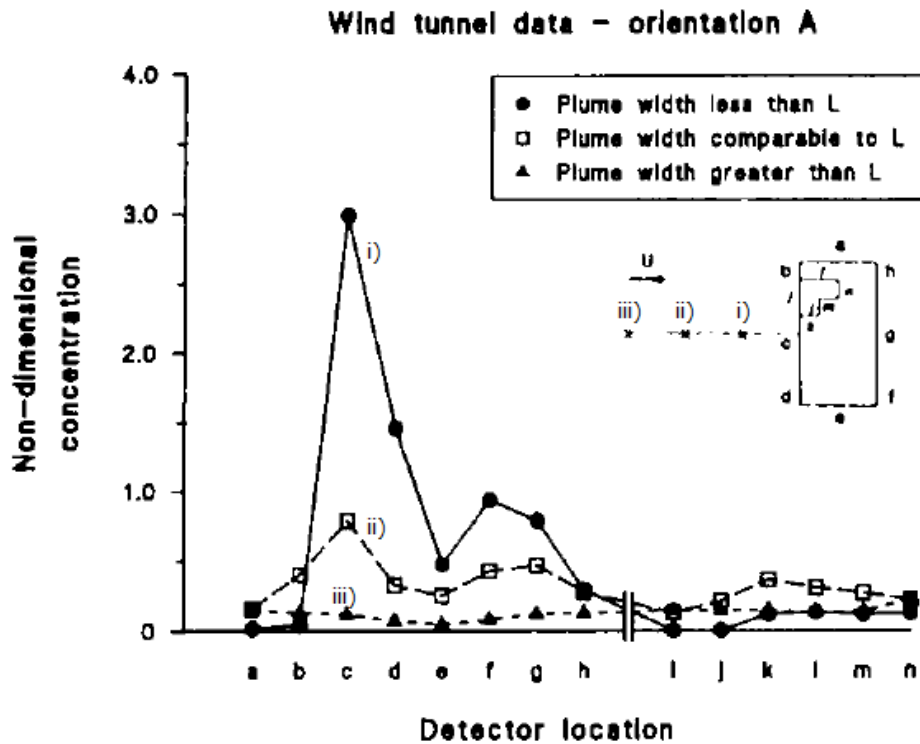
De concentratiemetingen werden gedaan op locaties a tot en met h, op een hoogte van $0,5H$ rondom het gebouw, en locaties i tot en met n, op een hoogte van $H+0,5h$ rondom het penthouse. H is hier de hoogte van het eigenlijke gebouw, en h is de hoogte van het penthouse. De concentratiemetingen werden gedaan over een periode van 5 minuten, en als we kijken naar de grafieken van locaties d en g, met bronlocatie i), zien we dat die een heel verschillend verloop kennen. Bij meetlocatie d (Figuur 23) is het verloop van de concentratie veel grilliger. We zien veel hogere maxima, en ook veel periodes met minima gelijk aan 0 of vlak daarboven.



Figuur 22: Verloop van de concentratie op meetpunt g
Bron: Higson et al. (1994, p. 1830)

Bij locatie g (Figuur 24) is het verloop veel vloeiender, zonder hoge maxima en slechts één keer een 0-waarde. Dat komt omdat in de relatief korte afstand vanaf i) tot de voorkant van het gebouw de pluimdeeltjes nog niet volledig hebben kunnen mengen met de luchtstroming. Aan de lijszijde van het gebouw is de stroming al veel turbulenter en zijn de pluimdeeltjes al goed gemengd met de luchtstroming. De gemiddelde concentraties zijn voor beide locaties echter vergelijkbaar, met de concentratie bij g ongeveer 5% hoger dan die bij d.

In Figuur 25 zien we een grafiek waarin de gemiddelde concentraties op meetpunten a tot en met n voor de verschillende bronposities worden afgebeeld. Voor de situaties waarin de pluim smaller is dan het model of ongeveer even breed (bronlocaties i) en ii)), zijn de krommen voor de meetpunten rond het gebouw, punten a tot en met h, ongeveer gelijkvormig. De maximale waarden bij i) zijn echter hoger dan bij ii), en de minima zijn lager.



Figuur 23: De meetresultaten voor alle bronlocaties i), ii) en iii)
 Bron: Higson et al. (1994, p. 1832)

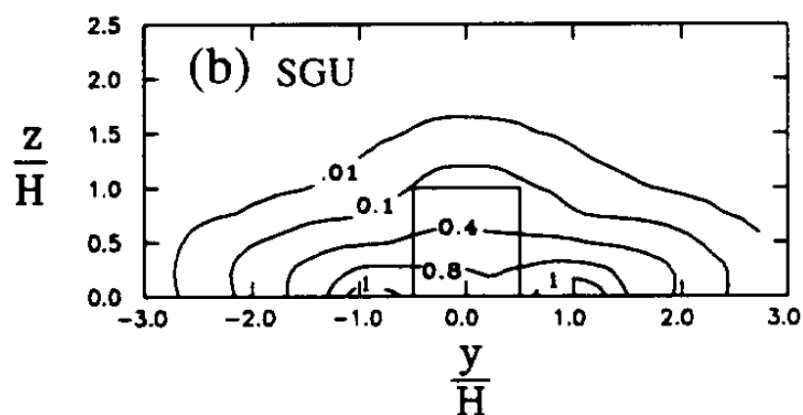
Dat komt omdat in geval ii) de pluim zich al meer in de horizontale en verticale richting heeft kunnen verspreiden. Bij de concentraties voor de meetpunten rond het penthouse, punten i tot en met n, valt voornamelijk de betere verticale spreiding goed waar te nemen. Daar zijn alle concentraties voor serie ii) hoger dan voor serie i). Voor serie iii) zijn dan de meeste concentratiewaarden weer lager dan bij i) en ii) omdat over de langere afstand van iii) tot aan het gebouw de rookpluim al veel meer verdund is in de omgevingslucht.

Bij de meetpunten aan de voorkant van het gebouw is de concentratie het hoogst in het midden (punt c). Aan de achterkant hebben punten f en g ongeveer even hoge waarden, alleen bij punt h ligt dat fors lager, en dan vooral bij testreeks i). Dat ligt waarschijnlijk aan de aanwezigheid van het penthouse, dat vooral bij deze reeks van invloed is, omdat de extra hoogte die het met zich meebrengt van groter belang is als de rookpluim nog niet tot volle ontwikkeling gekomen is.

Bij het vergelijken van de testdata verkregen in de windtunnel met de data uit het veldonderzoek, valt op dat de concentratiewaarden in de windtunnel aanzienlijk hoger zijn dan in het veldexperiment. Dat komt vooral door het feit dat de hogere turbulentie in de buitenlucht niet of nauwelijks op schaal valt na te bootsen in de windtunnel. De steeds veranderende windrichting en windsnelheid in het veld in tegenstelling tot de constante wind in de windtunnel speelt ook een rol. Die zorgt ervoor dat de pluimdeeltjes meer verdund worden, en dus de concentraties lager zijn. Mavroidis et al. trekken in hun studie dezelfde conclusie (2003, p. 2915).

4.4 Stromingen rond en achter een gebouw

Het rapport van Lee et al. uit 1991 handelt over een videosysteem om de stroming van een rookpluim rond een obstakel, de dispersie van de rookdeeltjes en de concentratie van de rook te kunnen analyseren. Zij gaan uit van dezelfde theorie als wij, namelijk dat de hoeveelheid weerkaatst licht op de rook op een bepaalde plaats evenredig is aan de hoeveelheid rookdeeltjes op die plaats. Dat wordt hier niet verder besproken, zie hiervoor Deel I. Wat we wel nader bestuderen zijn de beelden die zij gemaakt hebben, en de gevolgtrekkingen die daaruit gemaakt kunnen worden.



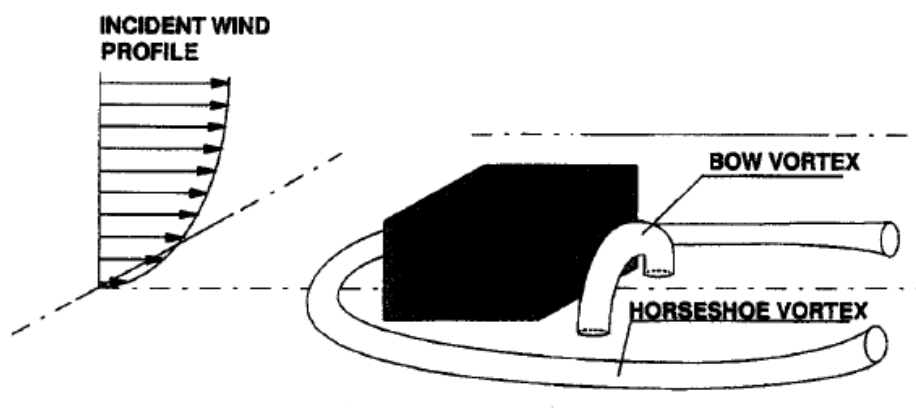
Figuur 24: Dwarsdoorsnede van het concentratieverloop op $X/H = 2$

Bron: Lee et al. (1991, p. 1216)

Lee et al. hebben de stroming van een rookpluim rond verscheidene objecten onderzocht. Ze gebruikten een kubus met zijde H, een toren met een hoogte/breedte verhouding van $H/W = 3$, een balk opgesteld in de lengte, met lengte/hoogte verhouding van $L/H = 3$ en een balk opgesteld in de breedte ($W/H = 3$). In tegenstelling tot de opstelling gebruikt door Higson et al. staat hun bron relatief dicht bij het obstakel opgesteld. Ze geven geen waarde, maar er valt op te maken dat de afstand tot aan het obstakel ongeveer $0,10H$ tot $0,20H$ bedraagt. Figuur 26 laat zien dat bij een bron voor het model van de kubus, opgesteld op de grond (Source Ground Upwind = SGU) er aan de lijszijde twee maxima zijn. Op grondniveau bevinden zich aan de linker- en rechterzijde van de kubus twee kleine gebiedjes waar de concentratie gelijk is aan 1. Daar rond, tot ongeveer een hoogte van $0,25H$ is de concentratie 0,8 en deze vermindert tot 0,4 op $h = 0,50H$ en $0,10$ bovenop het model. De non-dimensionele concentratie χ wordt hier gegeven door:

$$\chi = CU_H H^2 / Q \quad (\text{Formule 24})$$

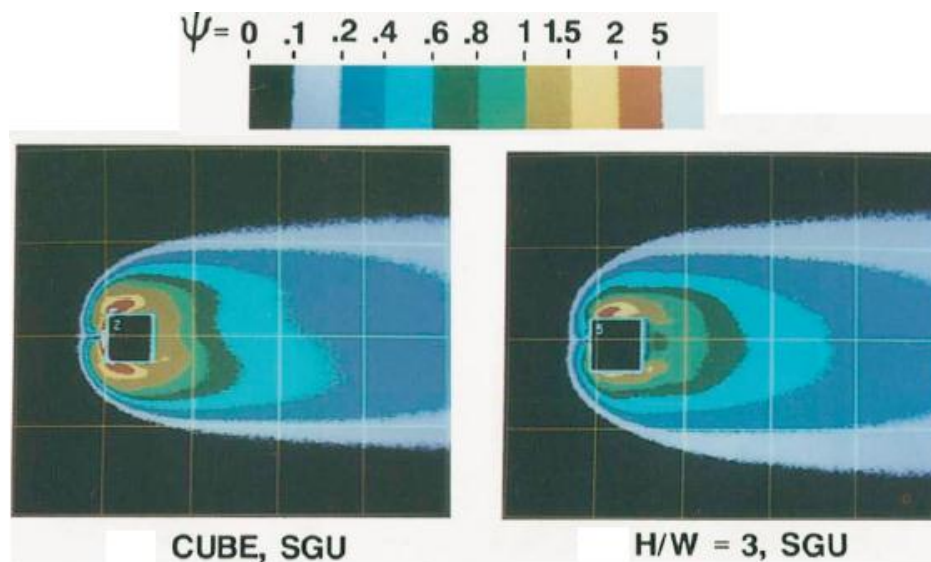
Hierbij is C de concentratie op een bepaald punt, U_H de windsnelheid op gebouwhoogte H, H de hoogte van het gebouw en Q is het debiet van de bron. Deze formule kunnen wij zelf niet gebruiken omdat wij het debiet van onze bron noch de puntconcentraties kennen. Het ontstaan van de twee maxima links en rechts van de middellijn is te wijten aan de Horseshoe Vortex, ofwel Hoefijzer Vortex (zie Figuur 27).



Figuur 25: De Hoefijzer Vortex

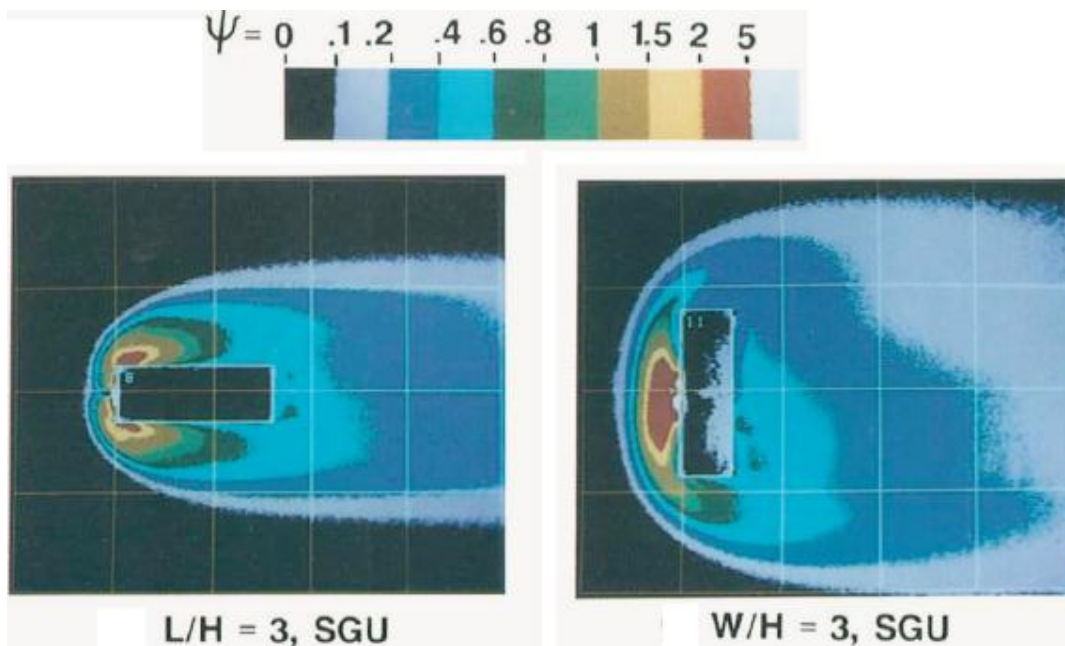
Bron: Leuzzi en Monti (1997, p. 206)

Deze ontstaat wanneer een fluïdum tegen een obstakel botst. Het fluïdum splitst zich in twee delen welke zich rond het obstakel bewegen, en zo verontreinigende deeltjes meevoeren naar de achterkant van het gebouw.



Figuur 26: Stroming rond een kubus en een toren
Bron: Lee et al. (1991, p. 1221)

Figuur 28 laat ons het stromingspatroon rond een kubus met zijde gelijk aan H en een toren met $l \times b \times h = H \times H \times 3H$ zien. De dispersie rond de toren is meer uitgesproken dan bij de kubus. De gebieden van hoge concentratie links en rechts van het model hebben daar een lagere concentratie (1 tot 1,5 in plaats van 2+) en ze lopen niet helemaal rond. De concentratie achter de toren is ook lager (0,6 tot 0,8 in plaats van 1 tot 1,5). Ook zien we in beide situaties dat de concentraties naast het model hoger zijn dan erachter. Bij de studie van Higson et al. zagen we dat de concentratiewaarden naast het model juist lager waren dan de waarden erachter. Dit ligt waarschijnlijk aan de locatie van de bron. Bij Higson et al. was de bron verder verwijderd van het model (minimaal $7,5H$). De rookdeeltjes leggen een langer traject af, en zijn nu beter gemengd met de omgevingslucht, wat weer leidt tot andere concentratieverhoudingen.



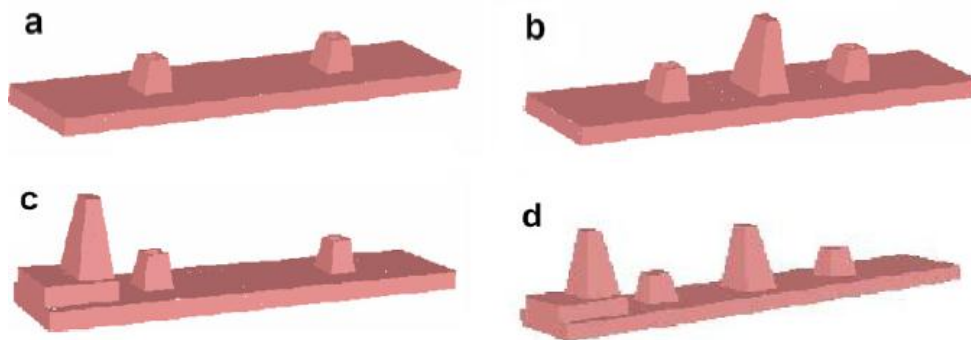
Figuur 27: Stroming rond een balk

Bron: Lee et al. (1991, p. 1222)

In Figuur 29 kunnen we het effect zien dat een lang obstakel of een breed obstakel heeft. Vergelijken we de balk in de lengterichting met de kubus, dan zien we dat het fluïdum moeilijker rond het obstakel stroomt. De hoogste concentraties bevinden zich vooraan het gebouw en vooraan de zijkanten. Halverwege is de concentratie nog 0,6 tot 0,8 en achteraan 0,4 tot 0,6. Voor een balk opgesteld in de breedterichting is de dispersie rond het gebouw nog minder. We zien een ophoping van rookdeeltjes voor de balk, en deze raakt slechts aan de rechterzijde gedeeltelijk langs het gebouw. Achteraan is de concentratie gezakt tot waarden die variëren van 0,2 tot 0,4. Bij ons scheepsmodel heeft het kasteel tot en met de hoogte van het navigatiedek de volgende dimensies: $H = 25\text{cm}$, $B = 24\text{cm}$, $L = 30\text{cm}$. Het stuurhuis dat daar nog bovenop staat heeft de volgende dimensies: $H = 7\text{cm}$, $B = 14\text{cm}$, $L = 18\text{cm}$. De verhouding H/B is dus $25/24 \approx 1$ of $32/24 = 1,33$ en de verhouding L/H is $30/25 = 1,20$ of $30/32 \approx 1$. Het kasteel is nergens aanzienlijk langer/korter of breder/smaller dan dat het hoog is en daarom vergelijken we het beste met de testopstelling met de kubus in de studie van Lee et al.

Net als bij hun kubus verwachten wij in onze testopstelling een Hoefijzer Vortex die rond het kasteel stroomt en voor relatief hoge concentraties erachter zorgt. Omdat wij echter metingen doen in het verticale vlak (van opzij bekeken) en niet in het horizontale vlak (van bovenaf bekeken) is de Vortex die zich naast het kasteel zou kunnen bevinden voor ons niet waarneembaar.

4.5 Stromingsvisualisatie rond de superstructuur van een schip



Figuur 28: De gebruikte modellen van Kulkarni et al.

Bron: Kulkarni et al. (2005, p. 43)

Veel wetenschappelijk onderzoek is nog niet gedaan rond de luchtstromingen aan boord van schepen. De weinige testen die er wel gedaan zijn behandelen voornamelijk het gedrag van de rook uit de schoorsteen en de studie van Kulkarni et al. uit 2005 is daarop geen uitzondering. In Figuur 30 zijn de kleine torentjes de schoorstenen en de grotere torens stellen het kasteel of kastelen voor. De lay-outs van de gebruikte scheepsmodellen zijn niet in overeenstemming met de lay-out van ons scheepsmodel, en ze gebruiken slechts de structuur bovendeks, met andere woorden het complete vrijboord komt te vervallen, maar toch zijn er enkele aspecten uit hun onderzoek die belangrijke raakvlakken vertonen met dat van ons.

Configuratie 'a' en configuratie 'd' komen helemaal niet overeen met ons model en zullen we dus ook niet bespreken. Bij configuratie 'b' zullen we alleen kijken naar de rook uit de linker schoorsteen, dus voor het kasteel. Configuratie 'c' lijkt op ons model, maar schijn bedriegt. Aangezien het schip naar links 'vaart', is het precies omgekeerd. Eén interessant aspect zullen we echter toch bespreken.

4.5.1 Configuratie 'b'



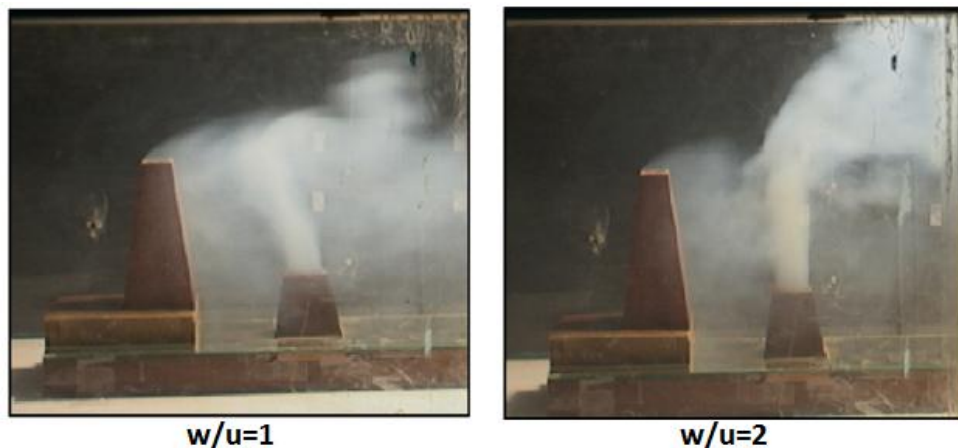
Figuur 29: Configuratie 'b' bij verschillende verhoudingen w/u
Bron: Kulkarni et al. (2005, p. 48)

Figuur 31 laat het verschil zien tussen de stromingen van de rook bij twee verschillende verhoudingen $w/u = K$. $w/u = 1,5$ is een grens waaronder de uitstroom van gassen 'downwash' vertoont, daarboven heeft de pluim genoeg momentum en ondervindt ze geen effect van het lagedrukgebied achter de schoorsteen (Snyder en Lawson Jr., 1991, p. 2837). De uitstroomsnelheid w had een vaste waarde van $11,8 \text{ ms}^{-1}$, de windsnelheid u was $11,8 \text{ ms}^{-1}$ voor $w/u = 1$ en $5,9 \text{ ms}^{-1}$ voor $w/u = 2$.

Bij $w/u = 1$ raakt bijna de volledige pluim van de voorste bron het kasteel en komt slechts een klein gedeelte er boven uit. Als $w/u = 2$ wordt, beschrijft de rookpluim een hogere baan en komt ze bijna helemaal boven het kasteel uit. Het onderste gedeelte van de pluim heeft een veel grotere afstand tot het dek. De concentratie van rookdeeltjes op het dek en de onderkant van het kasteel is nu een stuk lager. Aangezien de

windsnelheid nu twee keer zo laag ligt, is de verdunning van de rookdeeltjes veel minder. De concentratie aan de bovenkant en op het kasteel is in dit geval dan ook fors toegenomen.

4.5.2 Configuratie 'c'



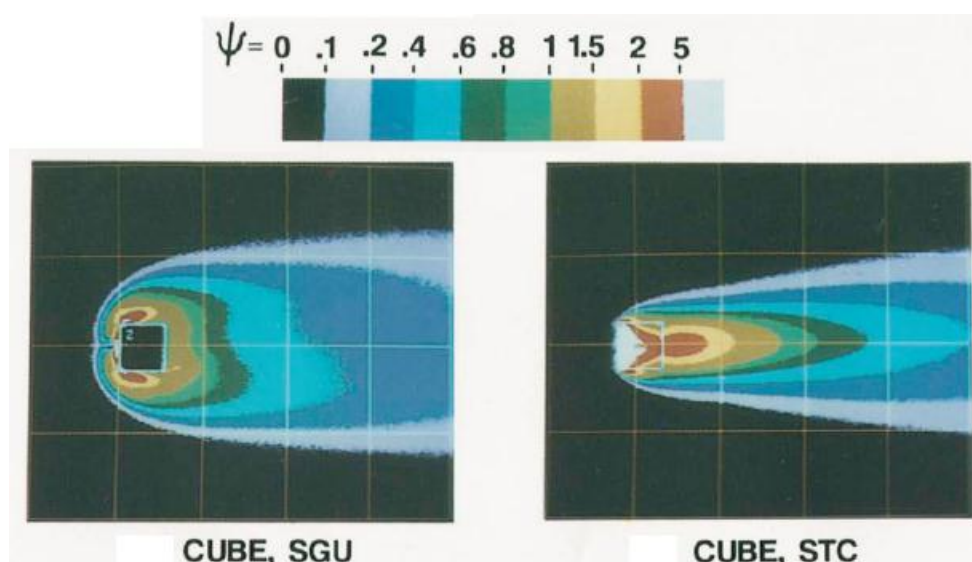
Figuur 30: Configuratie 'c' bij verschillende verhoudingen w/u

Bron: Kulkarni et al. (2005, p. 52)

In Figuur 32 zien we dat bij $w/u = 2$ de rook recht omhoog stijgt in plaats van dat ze naar achter wordt afgebogen zoals in Figuur 31. Blijkbaar zorgt de aanwezigheid van het kasteel voor een aerodynamische afscherming. Hierdoor heeft de wind bijna geen invloed meer op de pluim. Bij $w/u = 1$ is de windsnelheid hoger en in combinatie met de aanwezigheid van het kasteel wordt waarschijnlijk een gebied met onderdruk (Wu, 1972, pp. 245 en 246) of lagere druk (Dimitriadis, 2011, p. 18) gecreëerd. Als nu het rookpluimmoment en de rookpluimbuoyancy te laag liggen, wordt de rookpluim naar dit gebied gezogen (Cheung en Melbourne, 1995, p. 543) zoals zichtbaar op de linkerafbeelding in Figuur 32. In ons onderzoek zijn echter geen drukmetingen uitgevoerd dus kunnen we niet zeggen of een gebied van lagere druk een aanzuigend effect heeft gehad.

4.6 Conclusie

Lee et al. (1991, p. 1221) hebben behalve een bron opgesteld voor het obstakel ook een bron die opgesteld staat op het obstakel onderzocht, net als Cheung en Melbourne. Als we deze twee opstellingen met elkaar vergelijken zien we dat het concentratiepatroon anders verloopt, zie Figuur 33.



Figuur 31: Stroming rond een kubus bij verschillende bronlocaties
Bron: Lee et al. (1991, p. 1221)

Bij de opstelling waar de bron op het dak staat opgesteld (STC: Source Top Centre) is de pluim minder breed en ligt de maximale concentratie op en achter de kubus in plaats van voor en naast de kubus bij de opstelling waar de bron voor de kubus staat. De concentratie net achter de kubus is 2 tot 5 in plaats van 1 tot 1,5. Naast de kubus is de concentratie 1 tot 1,5 in plaats van 1,5 tot 5. Beide opstellingen van Lee et al. en de studie van Cheung en Melbourne laten wel zien dat we de hoogste concentratie kunnen verwachten vlak achter de bron, dus in onze opstelling voor het kasteel.

Bij Higson et al. zien we dat de maximale concentraties in het midden voor het obstakel liggen, achter het obstakel zijn ze lager en naast het obstakel zijn ze nog lager. Ook is duidelijk dat de concentratie op het obstakel minder is dan bij de lager gelegen meetpunten. De concentratie

op het obstakel neemt wel toe als de bron verder verwijderd is omdat de verontreinigende deeltjes dan al beter in de hoogte verspreid zijn. Net als bij Lee et al. heeft een verhoging van het obstakel tot gevolg dat de concentratie achter het obstakel lager wordt. In onze situatie verwachten we dus de hoogste concentraties voor het kasteel en de laagste concentraties ernaast. Dat laatste hebben wij echter niet gemeten.

Uit de studie van Lee et al. leiden we af dat dat er een 'Horseshoe Vortex' kan optreden, maar die is in onze testopstelling niet waar te nemen.

Als we de testgegevens van Higson et al. en Lee et al. combineren, zien we dat bij een bron opgesteld dicht bij het obstakel de concentratie naast het obstakel hoger is dan erachter. Wanneer de bron verder af geplaatst wordt, is de concentratie achter het obstakel dan weer hoger.

Kulkarni et al. laten ons zien dat het kasteel een luwte creëert die een aanzuigend effect kan hebben. We verwachten dus achter het kasteel nog redelijk veel rook.

Onze studie is echter zeer specifiek en komt slechts op onderdelen overeen met elk van deze situaties, nooit helemaal. We dienen hier dan ook terdege rekening mee te houden en kunnen niet zomaar de conclusies uit deze studies overnemen en projecteren op onze testen. We moeten in het achterhoofd houden dat onze situatie anders is en dus kunnen de uitkomsten ook anders zijn.

Hoofdstuk 5 (rook)pluimen uit twee identieke bronnen

5.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk hebben we de invloed van een gebouw of obstakel op de dispersie van gasdeeltjes besproken. In dit hoofdstuk behandelen we het effect dat een extra bron heeft op de stroming van de rookpluim. In onze windtunnelmetingen hebben we verschillende situaties onderzocht. We maakten gebruik van één bron, en van twee bronnen naast elkaar. Ook zijn er sessies geweest waarbij er 3 of 4 bronnen zijn gebruikt, waardoor de bronnen dus gelijktijdig achter elkaar en schuin achter elkaar stonden. Twee bronnen achter elkaar opgesteld is niet getest, dat moet in een volgend windtunnelonderzoek zeker gedaan worden. Uit de testsituaties waarbij met meer dan twee bronnen gelijktijdig werd getest, zijn helaas geen valabele conclusies te trekken.

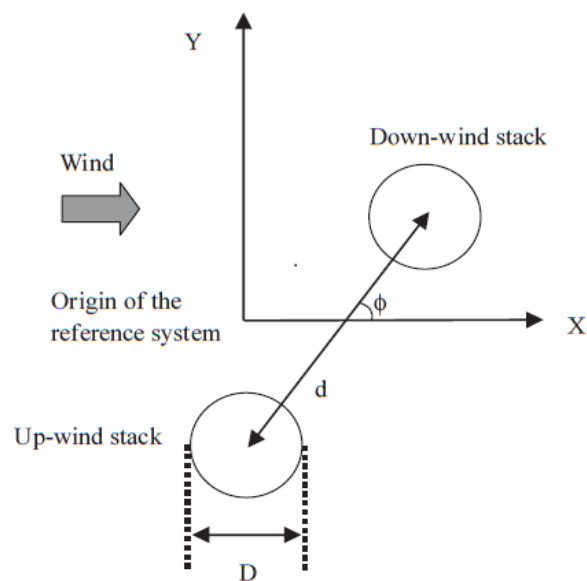
Wat is nu de invloed van de tweede bron op de concentratie op een bepaald punt? Kun je stellen dat bij twee bronnen de concentratie twee keer zo hoog is als bij één bron? Dus als de concentratie van ladingsdeeltjes op een willekeurig punt (x,y) als gevolg van het ventileren van tank a gelijk is aan C_a , en de concentratie op hetzelfde punt (x,y) bij het ventileren van tank b C_b bedraagt, kun je dan zeggen dat bij het gelijktijdig ventileren van tank a en tank b de concentratie ladingsdeeltjes op punt (x,y) gelijk is aan $C_a + C_b = C_{\text{totaal}}$? Kun je dit zo simpel stellen, of spelen er andere factoren een rol die de uiteindelijke concentratie C_{totaal} bepalen?

In de literatuur heb ik geen algemene theorie gevonden die het mengen van twee of meerdere (rook)pluimen beschrijft. Er zijn wel verscheidene studies uitgevoerd die bepaalde aspecten van het effect van de interactie tussen rookpluimen toelichten, en dan met name de extra stijging van meerdere pluimen ten opzichte van de stijging van één enkele pluim met dezelfde emissiekenmerken.

In dit hoofdstuk zullen drie studies besproken worden. De eerste is een studie gedaan door Contini en Robins uit 2004 waarin het mengen van

twee pluimen onderzocht wordt in een watertank. De tweede studie is een vergelijkbaar onderzoek gedaan door Contini et al. uit 2006 waarin ze de menging van twee pluimen onderzoeken in een windtunnel. De derde studie tenslotte is gedaan door Kolář en Savory in 2007 en behandelt het mengen en interageren van twee pluimen in een watertank.

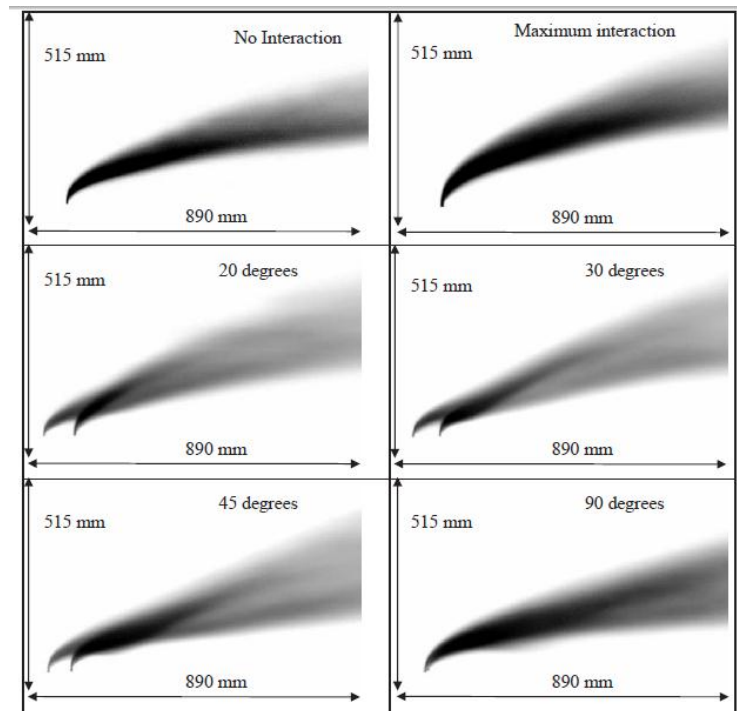
5.2 De menging van twee bronnen in een watertank (a)



Figuur 32: De testopstelling van Contini en Robins
Bron: Contini en Robins (2004, p. 3575)

Contini en Robins (2004) beschrijven in hun studie een testopstelling in een watertank die het verband onderzoekt tussen de hoek ϕ van twee schoorstenen in lijn ten opzichte van de stromingsrichting en het gedrag van de samengestelde of samen reagerende pluimen. Twee onderlinge afstanden d van de schoorstenen worden onderzocht, namelijk 12 en 22 keer de diameter D van de schoorstenen, $d = 12D$ en $d = 22D$. Bij een hoek $\phi = 0^\circ$ staan de twee schoorstenen recht achter elkaar in de richting van de stroming, bij een hoek $\phi = 45^\circ$ staan ze schuin achter elkaar, en bij een hoek $\phi = 90^\circ$ staan ze naast elkaar, dwars op de stroming. Eerst onderzoeken ze het effect van de opstelling van de schoorstenen op de pluimstijging van de samengestelde pluim. Om te

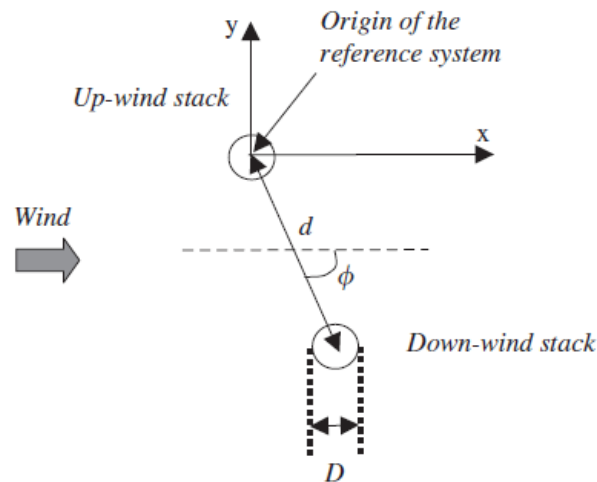
kunnen vergeleken wordt ook een enkele pluim bekeken (helemaal geen interactie) en een dubbele pluim op één punt (dubbel debiet, met een schoorsteendiameter die een factor $\sqrt{2}$ zo groot is, dus de oppervlakte is 2 maal zo groot). Deze laatste stelt het theoretische geval van maximale interactie tussen de twee pluimen voor.



Figuur 33: De invloed van ϕ op de pluimstijging
Bron: Contini en Robins (2004, p. 3576)

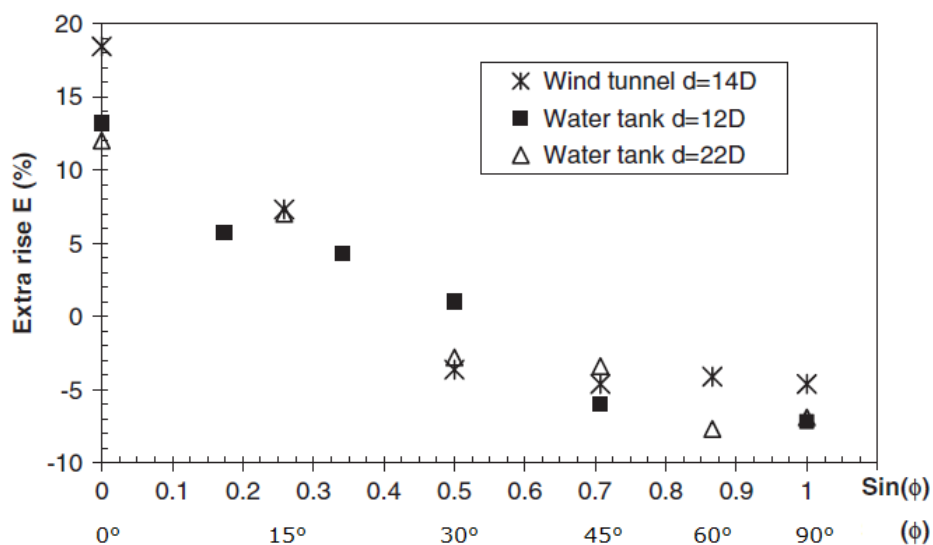
Nemen we de stijging van een enkele bron als referentie, dan blijkt dat voor waarden van ϕ van 0° tot en met 30° geldt dat de samengestelde pluim een hogere stijging heeft dan een enkele pluim. Bij hogere waarden voor ϕ , te weten 45° en 90° geldt dat er een negatieve pluimstijging is, zeg maar een daling (zie Figuur 35). Dat komt omdat door een ophoping van pluimmaterie het massacentrum van de pluim lager komt te liggen, en dat geeft een soort 'downwash'-effect (Contini en Robins, 2004, p. 3575).

5.3 De menging van twee bronnen in een windtunnel



Figuur 34: De testopstelling van Contini et al.
Bron: Contini et al. (2006, p. 7846)

Contini en Robins hebben samen met Hayden in 2006 een soortgelijk onderzoek gedaan als dat uit 2004, ditmaal in een windtunnel. Ze gebruikten een iets andere opstelling. Nu zijn de twee bronnen gespiegeld opgesteld zodat de rechtse bron (gezien van achter de opstelling, tegen de wind in kijkend) vooraan in de wind staat. Ook hebben ze de oorsprong van hun assenstelsel verplaatst van tussen de bronnen in naar de rechtse bron (zie Figuur 36).

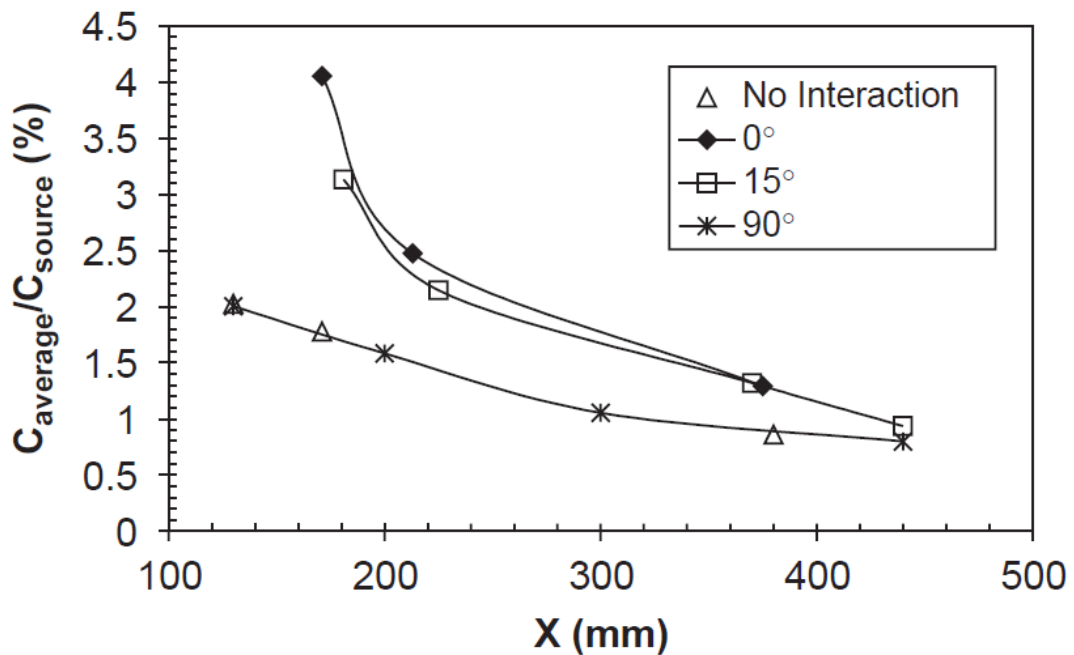


Figuur 35: Pluimstijging E uitgezet tegen $\sin \phi$
Bron: Contini et al. (2006, p. 7849)

Figuur 37 geeft een beeld van de pluimstijging afgezet tegen $\sin \varphi$ voor beide studies gecombineerd. Hieruit valt af te leiden dat er een verband bestaat tussen de relatieve pluimstijging (Plume Rise Enhancement, E) en $\sin \varphi$. Ter verduidelijking is er in de legenda ook een lijn voor φ toegevoegd.

Voor waarden van φ groter dan 0° vermindert de extra pluimstijging, tot ongeveer 30° , waarna hij negatief wordt. Bij $\varphi = 60^\circ$ wordt de minimale waarde van -7% bereikt, en die waarde blijft nagenoeg constant tot $\varphi = 90^\circ$. Die daling van 7% is voor de testopstelling in de watertank, in de windtunnel bedraagt de maximale daling 4% . Bij de opstelling in de watertank was de verhouding tussen de dichtheid van de uitstroom en de dichtheid van het water in de tank $\rho_s/\rho_a = 1,0968$ (Contini en Robins, 2004, p. 3574), in de windtunnel was de verhouding tussen de dichtheid van de uitstroom en de dichtheid van de lucht in de windtunnel $\rho_s/\rho_a = 0,79$ (Contini et al., 2006, p. 7844). Zie bijlage 1 voor de berekeningen van deze waarden op basis van gegevens uit beide studies. Uit deze waarden valt af te leiden dat in de watertank de uitstroom een hogere dichtheid heeft dan het water in de tank en dus zinkt. Dat klopt, ze hebben dan ook hun test 'omgekeerd' uitgevoerd en de meetgegevens omgedraaid. Een daling van de pluim met hun zware vloeistof komt dus overeen met een stijging van de pluim met een lichte vloeistof.

In Figuur 38 is het verband tussen de gemiddelde concentratie op een afstand X van de bron of bronnen ten opzichte van de concentratie aan de bron weergegeven voor verschillende waarden van φ . De concentratie is het hoogst voor lage waarden van φ , en vermindert naarmate φ stijgt. Bij $\varphi = 90^\circ$ zijn de waarden voor de concentratie nagenoeg hetzelfde als bij een enkele bron zonder interactie. Bij $\varphi = 0^\circ$ en $\varphi = 15^\circ$ bereiken de concentraties waarden die meer dan 2 keer zo hoog kunnen zijn dan bij een enkele bron.

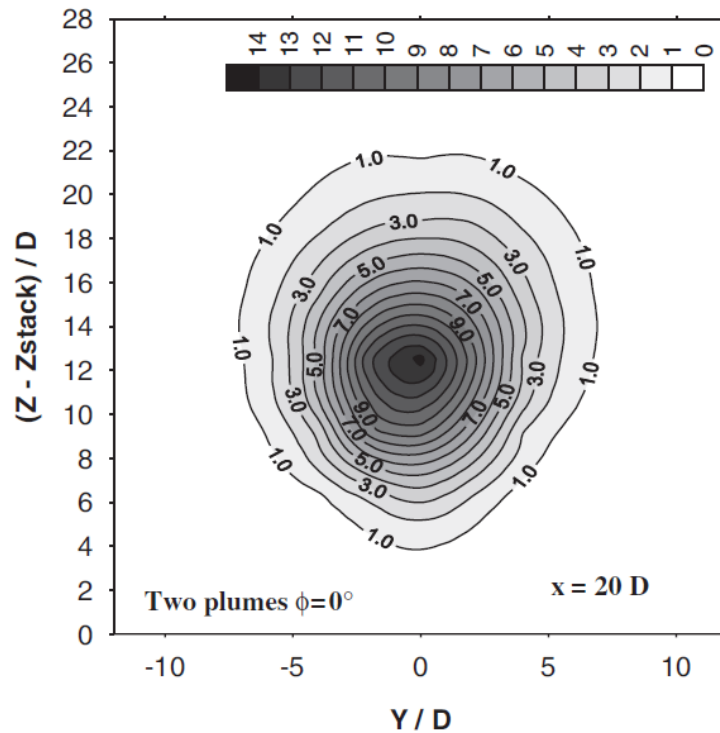


Figuur 36: De gemiddelde concentratie op afstand X van de bron
Bron: Contini en Robins (2004, p. 3582)

Cheung en Melbourne kwamen in hun studie uit 1995, besproken in het vorige hoofdstuk, tot een heel ander resultaat. In Figuur 18, Figuur 19 en Figuur 20 worden hun testopstellingen en de verschillende concentratiemetingen afgebeeld. Hoewel hun keuze om de opstelling met twee schoorstenen '1' te noemen, en die met één schoorsteen '2' verwarring in de hand werkt, kunnen we wel zien dat bij twee schoorstenen in lijn, dus bij $\varphi = 0^\circ$, de concentratie op de grond tot 40% lager ligt dan bij de opstelling met een enkele schoorsteen. Dat komt door de extra pluimstijging die ervoor zorgt dat de rookpluim hoger gaat en dus de concentratie op de grond verlaagt. Dus hoewel de concentratie in de pluim tot 2 keer zo hoog kan zijn door interactie van twee bronnen in lijn, is de concentratie op grondniveau verlaagd. Het is dus aangewezen goed op te letten welke concentratie men bedoelt voordat daar conclusies aan verbonden worden.

Bij Contini en Robins ging het verder om de gemiddelde waarden in de pluim. Het meetgebied in dit geval was de dwarsdoorsnede van de pluim, en alles met een concentratie van 5% tot en met 100% van de maximumconcentratie in die dwarsdoorsnede werd meegerekend.

Het gaat ons echter niet om het gemiddelde van concentraties over een groter gebied, maar om de concentraties zelf op verschillende punten. In het onderzoek uit 2006 van Contini et al. lag de nadruk meer op de concentratie van de verschillende punten. Heel duidelijk kwam naar voren dat bij $\phi = 0^\circ$ (Figuur 39) de puntconcentratie in de pluim hoger was dan bij $\phi = 45^\circ$ en $\phi = 90^\circ$.

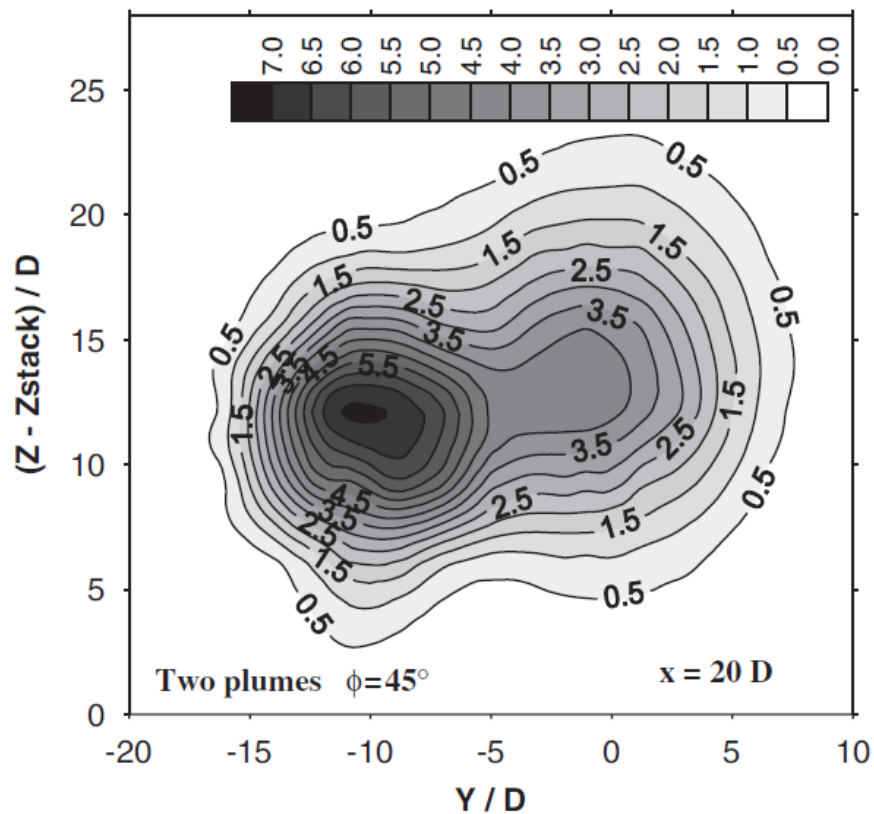


Figuur 37: Concentratieverdeling bij $\phi = 0^\circ$ op een afstand $X=20D$

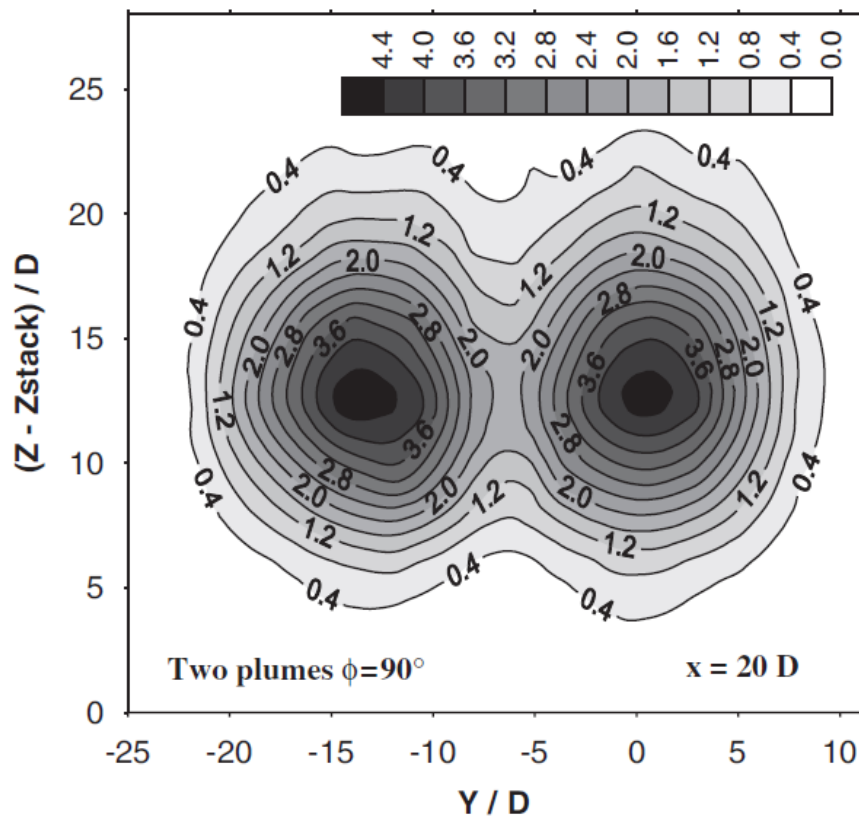
Bron: Contini et al. (2006, p. 7848)

De maximale relatieve concentratie is bij $\phi = 0^\circ$ gelijk aan 14 en vermindert tot 7 en 4,4 voor $\phi = 45^\circ$ (Figuur 40) en $\phi = 90^\circ$ (Figuur 41). Bij twee bronnen in lijn mengen de twee pluimen namelijk eerder dan bij een schuine opstelling of één dwars op de windrichting vanwege de aanwezigheid van vortices in de rookpluimen die de menging bespoedigen of juist tegenwerken (Kolář en Savory, 2007, pp. 1211 en 1213). Op Figuur 39 is goed te zien dat bij de opstelling in lijn met de windrichting de menging tussen de twee rookpluimen dusdanig goed is, dat er bijna sprake is van één rookpluim, toch wat de concentratie betreft.

De verdeling van de pluimdeeltjes is hier symmetrisch ten opzichte van de middellijn van de testopstelling. Bij een schuine opstelling vergeleken met de windrichting (weergegeven in Figuur 40) is de menging iets minder goed en is de symmetrie in de concentratieverdeling minder. Dat komt door de langzame en complexe menging van de twee pluimen bij een schuine opstelling. Bij beide opstellingen is er één plaats van maximale concentratie.



Figuur 38: Concentratieverdeling bij $\phi = 45^\circ$ op een afstand $X=20D$
Bron: Contini et al. (2006, p. 7848)

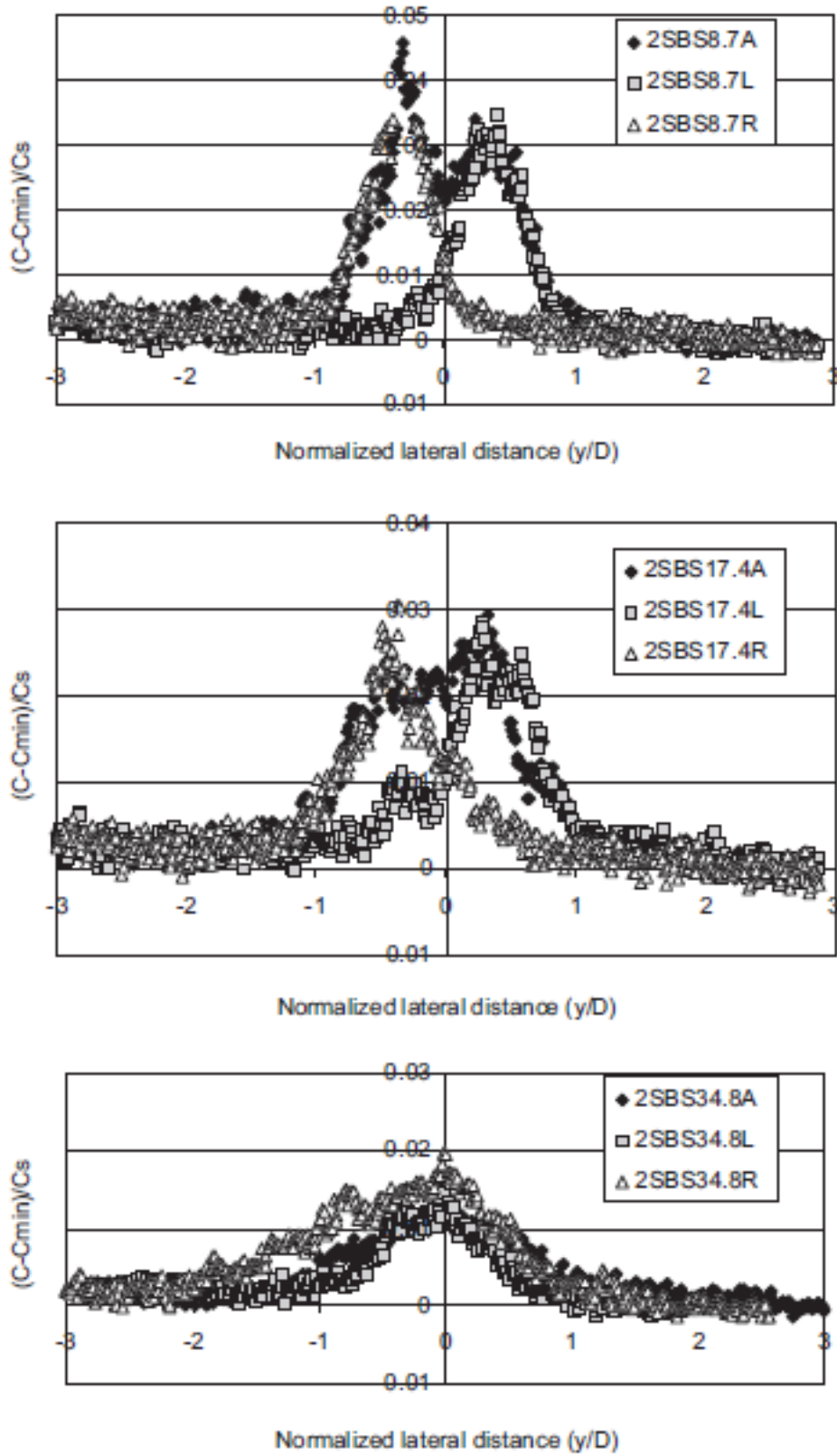


Figuur 39: Concentratieverdeling bij $\phi = 90^\circ$ op een afstand $X=20D$
 Bron: Contini et al. (2006, p. 7848)

Voor een opstelling dwars op de windrichting (Figuur 41) is de menging nog minder uitgesproken tot bijna onbestaande. Heel duidelijk zijn twee verschillende pluimen te zien, en dus ook twee plaatsen van maximale concentratie. De plaatsen van maximale concentratie bevinden zich symmetrisch links en rechts van de middellijn. Figuur 39, Figuur 40 en Figuur 41 zijn voor een relatieve afstand van $X = 20D$, maar op een afstand $X = 60D$ is een soortgelijk patroon zichtbaar, hoewel de verdunning dan natuurlijk groter is en de concentraties dus lager.

5.4 De menging van twee bronnen in een watertank (b)

In de studie uit 2007 gedaan in een watertank door Kolář en Savory worden vergelijkbare resultaten behaald. Om een stijgende pluim te krijgen werd gebruik gemaakt van verwarmd water in de uitstroom, waardoor de dichtheid lager werd. Om te kunnen zien welke bron wat bijdraagt tot de concentratie op elk punt, zijn de testen drie keer uitgevoerd, één keer met fluorescerende kleurstof in de linker (L), één keer met de kleurstof in de rechter (R) en één keer met de kleurstof in beide pluimen (A). We bespreken hier hun SBS-opstelling (de bronnen staan Side by Side opgesteld, dus $\varphi = 90^\circ$). Duidelijk zichtbaar op Figuur 42 is dat er twee piekconcentraties zijn, links en rechts van de middellijn van de testopstelling. Dit komt overeen met de resultaten uit de studie gedaan door Contini et al. uit 2006, zie Figuur 41. De piekconcentraties worden wel minder naarmate de afstand tot de bronnen toeneemt, tot op een afstand van $34,8D$ de pluimen (bijna) volledig gemengd zijn en de maximale concentratie zich wel op de middellijn bevindt.



Figuur 40: Bijdrage aan de concentratie van de verschillende bronnen
 Bron: Kolář en Savory (2007, p. 1212)

5.5 Conclusie en aanbevelingen

Bij het combineren van twee bronnen zorgt de interactie van de twee (rook)pluimen voor een ander traject van de twee pluimen gezamenlijk dan het traject dat elk van deze pluimen apart zou hebben. Bij een lage waarde van φ , tot $\varphi = 30^\circ$, loopt het pluimtraject hoger voor twee bronnen gezamenlijk. De twee pluimen mengen zeer goed bij een lage waarde van φ , waardoor de concentratie in de pluim hoger wordt. Een lage waarde van φ leidt dus weliswaar tot hogere concentraties, maar de pluimen bevinden zich ook hoger. Dit leidt tot lagere concentraties op de grond.

Bij een hogere waarde van φ is de menging van de twee pluimen minder, waardoor de concentratie van de pluimdeeltjes ook lager wordt. Het traject dat de pluimen doorlopen ligt nu echter wel lager dan bij een enkele bron.

In onze situatie zou dat dus kunnen betekenen dat bij het ventileren van twee tanks tegelijk, met $\varphi = 0^\circ$, de concentratie bij de lager gelegen meetpunten lager wordt. Ook zou de concentratie bij hoger gelegen meetpunten hoger kunnen worden als de gecombineerde rookpluim niet voldoende extra stijging heeft om over deze meetpunten heen te gaan. Het kan echter ook zijn dat de extra stijging die de rookpluim ondervindt voldoende is om ook bij deze meetpunten te zorgen voor een lagere concentratie.

Bij hogere waarden van φ ondervindt de rookpluim een negatieve stijging ten opzichte van één enkele bron, zeg maar een daling. Waarschijnlijk leidt dit tot een hogere concentratie voor de lager gelegen meetpunten.

We kunnen deze hypothesen echter niet toetsen. Zoals reeds vermeld hebben we enkele testen gedaan met meerdere bronnen, maar slechts één testsessie komt overeen met testen gedaan door Contini en Robins, Contini et al., of Kolář en Savory. Die testsessie is de 161705-reeks (zie Tabel 1). De testen van 16 september zijn echter niet bruikbaar om bruikbare data uit te halen, want de camera-positie verandert te veel van

de ene reeks tot de andere. Op zich is dat niet een heel groot probleem, maar er zijn tussen de verschillende reeksen geen foto's gemaakt met windsnelheid en uitstroomsnelheid gelijk aan 0. We hebben dus geen bronwaarden van de bijbehorende achtergrondfoto en kunnen formule 1 dan ook niet gebruiken. Verder zijn ook foto's genomen vanaf de stuurboordzijde, terwijl de meeste foto's van bakboord zijn genomen (zie paragraaf 9.1).

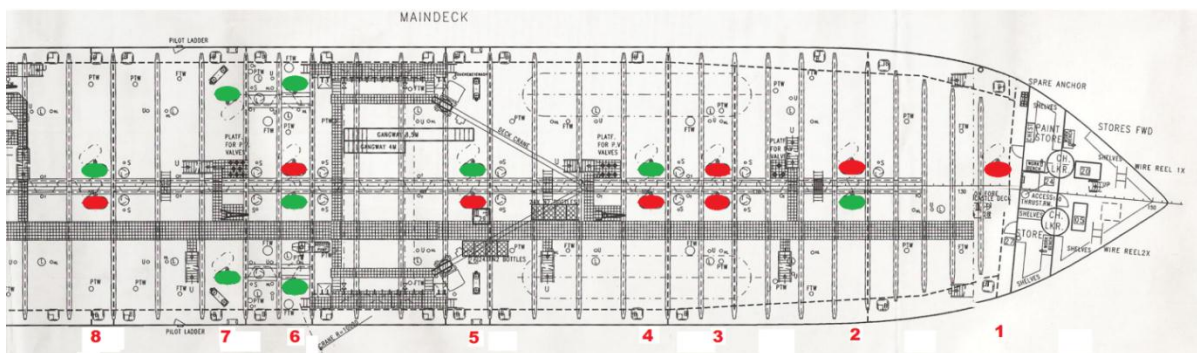
Tabel 1: De gebruikte bronnen per testreeks

Testreeks	Sources	Afstand tot kasteel (cm)	Hoogte kasteel (cm)	H + Wheelhouse	Afstand tot kasteel (X/H)		Afstand tot kasteel (X/(H+W))		φ (°)
151105	6SB	48	25	32	1,92		1,500		nvt
151224	8PS	24,6	25	32	0,984		0,769		nvt
151335	8PS	24,6	25	32	0,984		0,769		nvt
151457	5PS	69	25	32	2,76		2,156		nvt
151540	4PS	90	25	32	3,6		2,813		nvt
161126	6SB	48	25	32	1,92		1,500		nvt
161221	8PS	24,6	25	32	0,984		0,769		nvt
161427	8PS + 6SB	24,6 + 48	25	32	0,984	1,92	0,769	1,500	9°
161452	8PS + 6SB + 5PS	24,6 + 48 + 69	25	32	nvt		nvt		te veel
161550	8PS + 6SB + 5PS + 4PS	24,6 + 48 + 69 + 90	25	32	nvt		nvt		te veel
161637	8PS	24,6	25	32	0,984		0,769		nvt
161705	6Centraal + 6SB	48	25	32	1,92		1,500		90°
170926	engine	nvt	25	32	nvt		nvt		nvt
171459	8PS	24,6	25	32	0,984		0,769		nvt
171703	8PS	24,6	25	32	0,984		0,769		nvt
180923	8PS	24,6	25	32	0,984		0,769		nvt
181315	8PS	24,6	25	32	0,984		0,769		nvt
181448	8PS	24,6	25	32	0,984		0,769		nvt
181725	8PS	24,6	25	32	0,984		0,769		nvt
191000	8PS	24,6	25	32	0,984		0,769		nvt

Bron: Eigen bewerking

Als we bij een volgende testperiode in de windtunnel onderzoek doen naar het effect van meerdere bronnen, kunnen we dat als volgt aanpakken. In plaats van per testreeks de windsnelheden aan te passen, houden we die constant, maar veranderen we de bronnen. We nemen eerst beelden op van bron 1, dan bron 2 en dan van beide tegelijk.

Voor het onderzoek naar twee bronnen achter elkaar ($\varphi = 0^\circ$) nemen we bijvoorbeeld eerst 6PS-Centre, dan 8PS, en tenslotte 6PS-Centre + 8PS. Voor twee bronnen schuin achter elkaar ($\varphi = 50^\circ$) testen we eerst 6PS-Centre, dan 7PS, en dan 6PS-Centre + 7PS. En als laatste twee bronnen naast elkaar ($\varphi = 90^\circ$, zie ook Tabel 2 voor de hoeken φ op ons model). Daarvoor nemen we eerst 7PS, daarna 7SB en als laatste 7PS + 7SB. Als we deze drie verschillende testopstellingen voor één windsnelheid gebruikt hebben, herhalen we dit voor andere windsnelheden. Eén probleem is hier wel dat op ons model de ventilatie-uitlaat 6PS-Centre nog niet bestaat (zie Figuur 43, met in het rood aangegeven welke uitlaten er nog niet zijn, en in het groen degene die er wel zijn).



Figuur 41: De gebruikte ventilatie-uitlaten in ons model
Bron: Eigen bewerking naar De Kerf (2009)

Omdat de rubberslangen en koperen aansluitingen aan de onderkant van het model veel ruimte innemen, zijn bij de constructie van het model niet alle ventilatie-uitlaten nagebootst. Maar dat is niet onoverkomelijk aangezien we de ventilatie-uitlaten toch moeten vergroten om overeenstemming met de werkelijkheid te verkrijgen, dus kunnen we tegelijkertijd ook de extra ventilatie-uitlaten installeren.

Tabel 2: De ventilatie-uitlaten dicht bij het kasteel en hun hoeken φ

	5PS	6PS	6PS-Centre	6SB-Centre	6SB	7PS	7SB	8PS	8SB
5PS	x								
6PS	25°	x							
6PS-Centre	0°	90°	x						
6SB-Centre	10°	90°	90°	x					
6SB	35°	90°	90°	90°	x				
7PS	15°	10°	50°	60°	75°	x			
7SB	25°	75°	60°	50°	10°	90°	x		
8PS	0°	25°	0°	10°	35°	30°	40°	x	
8SB	5°	35°	10°	0°	25°	40°	30°	90°	x

Bron: Eigen bewerking

Hoofdstuk 6 Logboek

De vorige twee hoofdstukken behandelden literatuuronderzoek over twee aspecten die de stroming van fluïda beïnvloeden. Hoofdstukken 7 en 8 geven een beschrijving van de methode die gebruikt is om de ruwe data verzameld tijdens de windtunnelproeven gedaan door Cédric Brichart, Laurent De Kerf en Kapitein Werner Jacobs te kunnen verwerken en beoordelen. In hoofdstuk 9 worden die meetgegevens geanalyseerd, en in hoofdstuk 10 en 11 worden verbeteringen en aanpassingen aan de testmethodes en testopstellingen aangedragen. Dit hoofdstuk is het begin van de beschrijving van de dataverwerking en behandelt de inhoud van het logboek dat bijgehouden werd tijdens de windtunnelproeven.

De windtunnelproeven werden genomen van 15 tot en met 19 september 2008. Maandag 15 september werd gebruikt om verschillende dingen uit te testen en vertrouwd te raken met de proefopstelling. Vanaf dinsdag 16 september ging alles vlotter en werden er ook meer testen gedaan. Tijdens de testen werd getracht verschillende omstandigheden na te bootsen. De windsnelheid varieerde van 0 ms^{-1} tot 10 ms^{-1} , de uitstroomsnelheden van de gasdeeltjes van 0 ms^{-1} tot 4 ms^{-1} . Omdat het gebruikte scheepsmodel te groot is om in zijn geheel duidelijk in beeld te krijgen, zijn er verschillende camerastandpunten gebruikt. Als gevolg hiervan zijn de fotoreeksen onder te verdelen in twee delen: één waar voornamelijk het dek van het schip in beeld komt, en één waar voornamelijk het accommodatiegedeelte op staat. We maken dus onderscheid in een deel 'Dek', en een deel 'Accommodatie'. Verder werd bij enkele reeksen gebruik gemaakt van plastic koffiebekertjes. Deze bekertjes werden ondersteboven op de grond geplaatst om golven te simuleren. Bij de windtunneltesten hield men een logboek bij waarin per testreeks onder andere de volgende punten werden opgenomen:

- De naam van de run, gebaseerd op de datum en het tijdstip waarop die run gedaan is. Bijvoorbeeld 151105 wil zeggen dat de run gedaan is op de 15e september 2008, om 11.05 uur.

- Bij welk deel behoren de foto's van deze reeks? Deel 1 wil zeggen foto's van het 'Dek' en deel 2 foto's van de 'Accommodatie'.
- De windsnelheid in ms^{-1} van de windtunnel, V_{wind} . Dat is veranderd in u_{wind} .
- De uitstroomsnelheid in ms^{-1} van de rook uit de uitlaatopeningen, V_{outlet} . Dat is later aangepast naar w_{outlet} .
- De gebruikte uitlaatopeningen of bronnen, Sources.
- Het gebruik van de koffiebekertjes staat niet meer in de laatste versie van het logboek. In de oude versie is dit nog wel beschikbaar.

Wij hebben na analyse van de beelden aan het logboek een aantal nieuwe elementen toegevoegd:

- In het lichtblauw wordt aangegeven welke de achtergrondfoto is van de testreeks.
- Data bepaald met Sourcelocater (zie paragraaf 7.2):
 - de kleinste submatrix waarin de maximale bronwaarde gevonden is;
 - de y-waarde en de x-waarde van de maximale bronwaarde;
 - de maximale bronwaarde I_s ;
 - de bijbehorende achtergrondwaarde I_{bs} ;
 - de gecorrigeerde bronwaarde $I_s - I_{bs}$;
- De verhouding w/u . Als de verhouding groter is dan 1,5 kan er geen 'downwash' optreden (zie paragraaf 4.5.1 en verder). Is w/u groter dan 1,5 dan wordt het aangegeven in het groen, is deze kleiner dan 1,5 wordt het in het rood aangeduid.

Hoofdstuk 7 Beeldverwerking

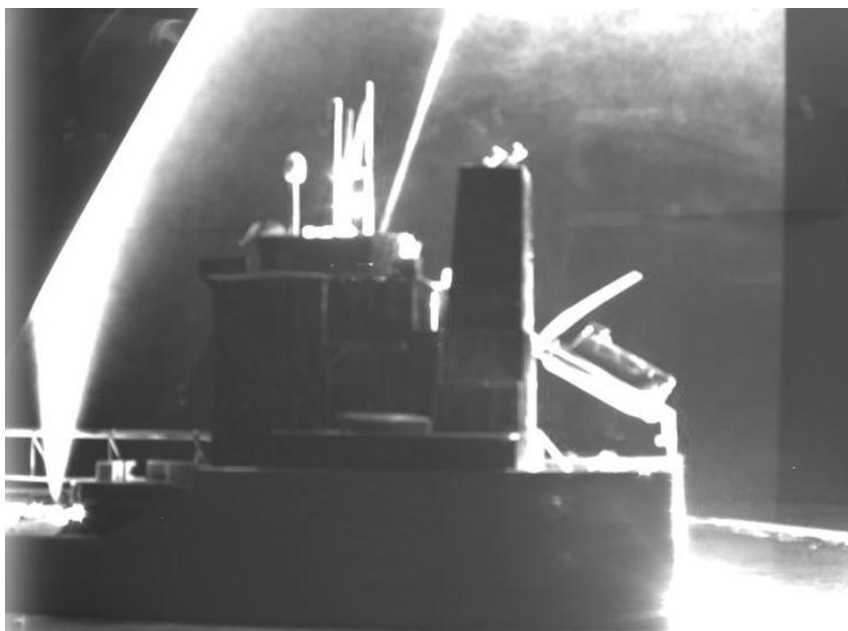
7.1 Algemene beeldverwerking

7.1.1 Eerste beeldverwerking

Per testrun werden 369 foto's in het bestandsformaat *.b16 genomen met een y-resolutie van 512 pixels en een x-resolutie van 696 pixels. Als je deze foto's toont met het softwarepakket CamWare met een verversingsfrequentie van 10 Hz vormen ze een filmpje van 36,9 seconden waarin de rookontwikkeling duidelijk zichtbaar is. Nadeel is wel dat met dit pakket geen verandering en/of verbetering van de beelden mogelijk is. Hiervoor is een ander programma nodig. Op het Von Karman Instituut gebruikt men Matlab, onze voorkeur ging echter uit naar Scilab, vanwege het open source karakter van het programma (Scilab, 2010).

7.1.2 Gemiddelde foto

Scilab slaat de foto's op in de vorm van matrices die verder behandeld en veranderd kunnen worden en er kan mee gerekend worden.



Figuur 42: De 'gemiddelde' foto van sessie 171709
Bron: Eigen bewerking

Van elke testrun wordt een 'gemiddelde' foto (zie Figuur 44) gemaakt, op volgende wijze. Elke pixel van één van de 369 foto's krijgt een waarde mee gaande van 0 voor helemaal zwart en 4095 voor helemaal wit. Deze 369 gevonden waarden worden dan per pixel opgeteld en een gemiddelde wordt berekend. Deze gemiddelde waarden voor alle pixels geven samen één nieuwe, gemiddelde matrix. Op deze nieuwe matrix baseren wij onze berekeningen.

7.1.3 Gecorrigeerde intensiteit

Elke pixelwaarde van een foto staat voor de lichtintensiteit in dat punt. De lichtintensiteit is dan weer een maat voor de hoeveelheid rook op dat punt. Immers, hoe meer rook, hoe meer licht van de laserstraal er weerkaatst wordt. Niet alleen is de lichtintensiteit op één punt een optelling van de lichtintensiteit veroorzaakt door de reflectie van de laserstraal op de hoeveelheid rook op dat punt, maar ook van de lichtintensiteit veroorzaakt door de reflectie op het scheepsmodel en de windtunnel zelf. Om dat probleem te ondervangen werd er voordat er testen werden gedaan met de rookmachines een reeks foto's genomen van de windtunnel met daarin alleen het scheepsmodel. Uit die 369 foto's werd één gemiddelde achtergrondfoto genomen. De pixelwaarden van deze achtergrondfoto werden vervolgens afgetrokken van de pixelwaarden van de gemiddelde foto van de testrun waardoor we alleen de lichtintensiteit overhouden veroorzaakt door de reflectie van de laserstraal op de rook en niet meer die veroorzaakt door de achtergrond.

7.1.4 De relatieve concentratie C/C_s

De hoeveelheid weerkaatst licht op één punt is een maatstaf voor de hoeveelheid rook op dat punt. De verhouding tussen de concentratie van toxische deeltjes op een bepaald punt en de concentratie van toxische deeltjes bij de ventilatieopening wordt gegeven door de verhouding tussen de lichtintensiteit op dat bepaalde punt en de lichtintensiteit bij de

ventilatieopening, beiden gecorrigeerd met de desbetreffende intensiteit op de achtergrondfoto. Het verkregen resultaat kan nog verder gecorrigeerd worden met de intensiteiten van de foto van de windtunnel aan het einde van de sessie, om het niet-uniform zijn van de verlichting te elimineren. De relatieve concentratie rookdeeltjes C/C_s op een willekeurig punt wordt dus gegeven door volgende formule (Nakiboğlu et al., 2009, p. 3399):

$$\frac{C}{C_s} = \frac{I - I_b}{I_s - I_{bs}} \frac{I_{0s}}{I_0} \quad (\text{Formule 25})$$

- C Concentratie op een willekeurig punt (y,x)
- C_s Concentratie bij ventilatie-uitlaten tijdens het ventileren van de cargotanks
- I Lichtintensiteit op het punt (y,x)
- I_s Lichtintensiteit bij de ventilatie-uitlaten
- I_b Achtergrondintensiteit op het punt (y,x) op de foto zonder rook
- I_{bs} Achtergrondintensiteit bij de ventilatie-uitlaten op de foto zonder rook
- I_0 Achtergrondintensiteit op het punt (y,x) op de foto verzadigd met rook
- I_{0s} Achtergrondintensiteit bij de ventilatie-uitlaten op de foto verzadigd met rook

Merk op dat deze formule verschilt van degene die ik heb gebruikt in mijn bachelorscriptie. Het laatste gedeelte, $\frac{I_{0s}}{I_0}$, is een factor om de non-uniformiteit van de lichtintensiteit te compenseren. Deze is later na verder literatuuronderzoek bijgevoegd. Deze formule is de basis van ons onderzoek, en is alleen geldig als de proeven in de windtunnel correct zijn uitgevoerd. Als er fouten in de meetopstelling of de meethandelingen geslopen zijn, zullen die effect hebben op de gemeten lichtintensiteiten,

en dus op de berekende concentraties. Opmerkingen en aanmerkingen over de werkelijkheid zullen bij verkeerde metingen niet gedaan kunnen worden. Doel is dan ook om alle handelingen en metingen zo nauwgezet mogelijk te doen. Om formule 25 te kunnen gebruiken, hebben we de drie verschillende intensiteiten bij de ventilatie-uitlaten nodig, de zogenaamde bron. Dat zijn de intensiteiten op de achtergrondfoto, die van de testrun en die op de achtergrondfoto verzadigd met rook. Dezelfde drie intensiteiten hebben we ook nodig van de verschillende locaties waarvan we de concentratie willen bepalen. Deze locaties worden gegeven door vaste pixelwaarden in de y- en x-richting (in deze volgorde) en zijn onze meetpunten. We beschikken alleen voor de testreeksen 181315b, 181448 en 191000 over een foto van een met rook verzadigde achtergrond, maar voor elk van deze drie testreeksen zijn er redenen waarom we die foto niet kunnen gebruiken (zie paragraaf 9.1, 9.2.3, 9.2.4 en 9.2.5). Omdat we deze formule niet kunnen gebruiken zullen we teruggrijpen naar formule 1. Bij toekomstige testen dienen er zeker bij elke testreeks verzadigde achtergrondfoto's gemaakt te worden.

7.2 Bronbepaling

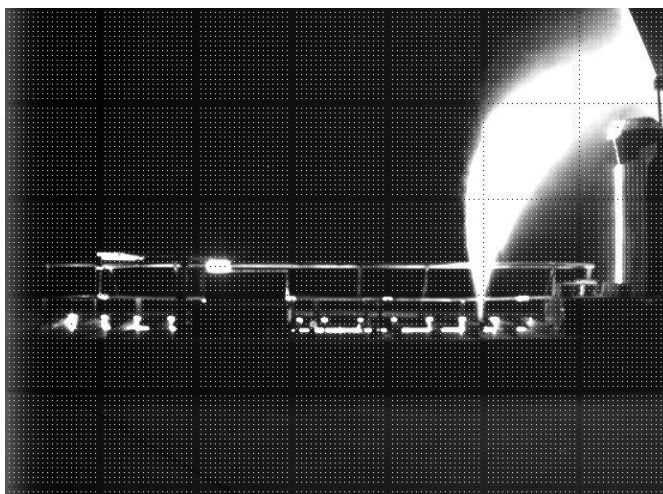
7.2.1 Het bepalen van de bron

Voor het gebruiken van formule 1 zullen we eerst de bronlocatie bepalen, de meetpunten komen later aan bod. In deze paragraaf wordt stap voor stap uitgelegd hoe we te werk gaan en hoe we aan de waarden I_s en I_{bs} komen. Bron is niet de juiste benaming, we weten al wat de bron van de toxische deeltjes is, namelijk de ventilatie-uitlaat. We zijn op zoek naar de locatie met de hoogste lichtintensiteit. Om deze te vinden werd het programma 'Sourcelocater' ontwikkeld. Dat programma helpt ons om visueel een submatrix te bepalen waarin de bron zich bevindt. Zijn we tevreden met de bepaalde submatrix dan geeft Sourcelocater ons de hoogste intensiteitswaarde bij de ventilatieopening I_s en de y- en x-waarde van de locatie van die waarde. De bijbehorende intensiteit I_{bs} op

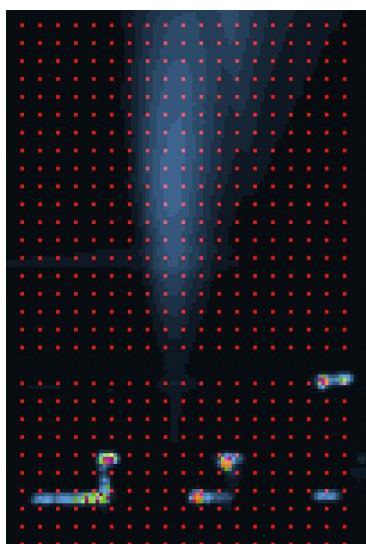
de overeenkomstige y - en x -waarde in de achtergrondfoto wordt opgezocht en deze waarden worden van elkaar afgetrokken om de gecorrigeerde bronwaarde $C_s = I_s - I_{bs}$ te krijgen.

7.2.2 Werking van het programma Sourcelocater

SourceLocater geeft ons van één run foto's (in dit geval 161637) een gemiddelde foto en plaatst er een raster overheen, zoals in Figuur 45. Dat stelt ons in staat de locatie van de rookpluim globaal vast te stellen.



Figuur 43: Gemiddelde foto van reeks 161637, inclusief raster.
Bron: Eigen bewerking

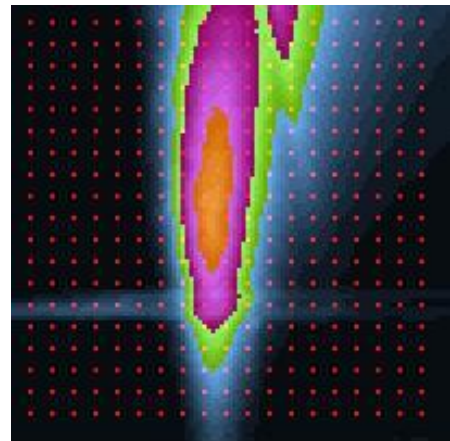


Figuur 44: 161637, met submatrix $y:(200:350)$ en $x:(450:550)$
Bron: Eigen bewerking

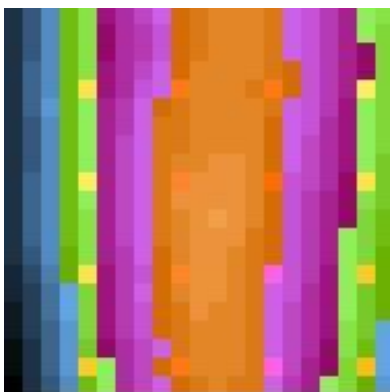
Sourcelocater vraagt ons om de rijen en kolommen van de submatrix waar de rookpluim zich bevindt op te geven. Voor de rijen nemen we (200:350) en voor de kolommen (450:550). We krijgen een afbeelding van de submatrix die ingekleurd is om de verschillen in lichtintensiteit beter te kunnen zien (zie Figuur 46). Zwart is de laagste intensiteit, dan blauw en roze en tenslotte oranje, de hoogste intensiteit. Sourcelocater vraagt ons nu of we tevreden zijn met het resultaat.

Indien dat niet het geval is, wordt ons gevraagd de rijen en kolommen op te geven van een kleinere submatrix. We nemen (200:300) en (450:550).

Deze submatrix wordt ook ingekleurd om de verschillende lichtintensiteiten beter te kunnen onderscheiden. Dat proces wordt net zolang herhaald totdat we aangekomen zijn tot de kern van de rookpluim waar de maximale intensiteit en dus maximale concentratie zich bevindt. Deze submatrix is (235:255) en (485:505).



Figuur 45: 161637, met submatrix y:(200:300) en x:(450:550)
Bron: Eigen bewerking



Figuur 46: 161637, met submatrix y:(235:255) en x:(485:505)
Bron: Eigen bewerking

Aangekomen bij de laatste en kleinste submatrix kunnen we niet verder onderverdelen (zie Figuur 48). Zijn we tevreden met de verkregen submatrix, dan geeft Sourcelocater ons de intensiteitswaarden van de punten in die submatrix en de hoogste waarde I_s plus de locatie van I_s (rij- en kolomwaarde). Hiermee kan de waarde van I_{bs} gevonden worden in de bijbehorende achtergrondfoto. I_{bs} trekken we van I_s af om de gecorrigeerde bronwaarde C_s te krijgen.

7.2.3 Waarom werkt Sourcelocater niet in één stap?

Het zou voor ons eenvoudiger zijn als Sourcelocater voor de hele foto direct aangeeft waar de bron zit. Dat is niet mogelijk omdat de maximale waarde van de bron niet altijd (lees: meestal niet) de maximale waarde op de hele foto is. Sourcelocater kijkt alleen naar de absolute waarde van de pixels, niet naar de locatie en het verband met de omringende pixels en moet dus geholpen en gestuurd worden.

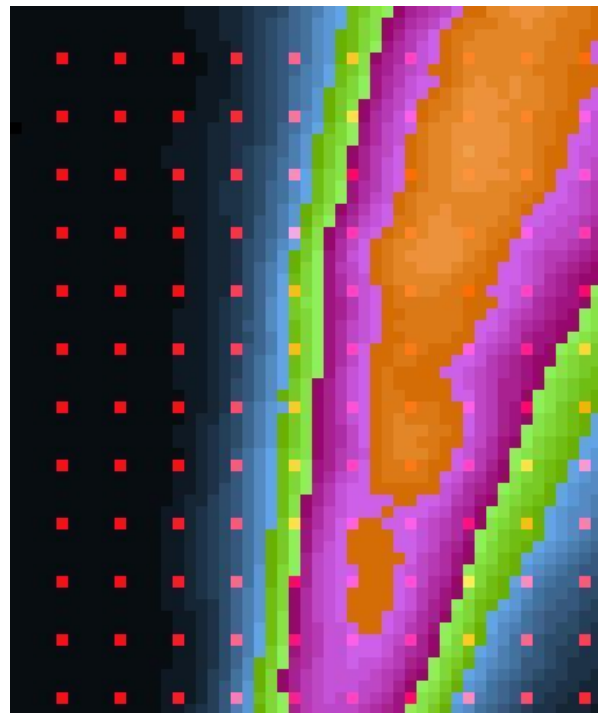
7.2.4 Problemen met Sourcelocater



Figuur 47:
Reflectie bij
bron 161445
SB6
Bron: Eigen
bewerking

Zoals uit Figuur 45 tot en met Figuur 48 blijkt, werkt het proces van Sourcelocater voor reeks 161637 vrij eenvoudig en goed. De locatie van de maximale intensiteit en dus de maximale concentratie is echter niet op elke fotoreeks even eenvoudig te vinden. Op sommige reeksen zit er vlak naast, voor of achter de bron een deel van de scheepsstructuur dat door reflectie het vinden van de maximale lichtintensiteit onmogelijk maakt. De grote oranje vlek in Figuur 49 is een combinatie van de uitstoot van de bron en reflectie op de Inert Gasleiding. Deze zijn niet van elkaar te onderscheiden en dat maakt het bepalen van de bron onmogelijk.

In andere reeksen zorgen meerdere bronnen voor interactie en is de locatie van I_s ook niet of nauwelijks te bepalen. Zie bijvoorbeeld Figuur 50, waarop meerdere zones met licht-oranje delen zijn, in plaats van één zoals op Figuur 48. In dit voorbeeld zitten de bronnen achter elkaar en is het wel duidelijk op welke plaats de bron zich ongeveer moet bevinden en vinden we met behulp van Sourcelocater de maximale waarde waargenomen in de laatste submatrix.



Figuur 48: Meerdere bronnen in reeks
161705
Bron: Eigen bewerking



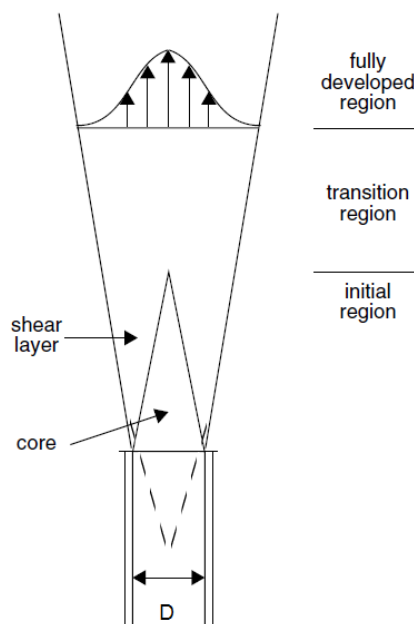
Figuur 49:
161156,
overbelicht
Bron:
Eigen
bewerking

Bij andere reeksen zijn de verschillende bronnen ver van elkaar verwijderd, waardoor de verschillende bronintensiteiten elk hun eigen invloed hebben en we formule 1 niet meer kunnen gebruiken. Nog andere reeksen (bijvoorbeeld reeks 161156, Figuur 51) zijn overbelicht en geven één of meerdere maximale intensiteitswaarden van 4095 in de buurt van de ventilatieopening. In het geval van reeks 161156 krijgen we een hele zone met waarde 4095. In tegenstelling tot andere plaatsen in de foto kunnen we deze waarde 4095 nu niet wegfilteren omdat deze de bronwaarde I_s vertegenwoordigt en we dus niets kunnen zeggen over de werkelijke waarde van I_s . Verder zijn er nog fotoreeksen waarbij de bron niet op de foto staat (de hele 1715xx-reeks) of verstopt zit achter de scheepstructuur. Deze reeksen zijn dus onbruikbaar en worden niet in de resultaten opgenomen. Kort samengevat komen we dus de volgende problemen tegen:

- Reflectie
- Interactie tussen meerdere bronnen
- Overbelichting
- Bron staat niet op de foto

7.2.5 De Potential Core

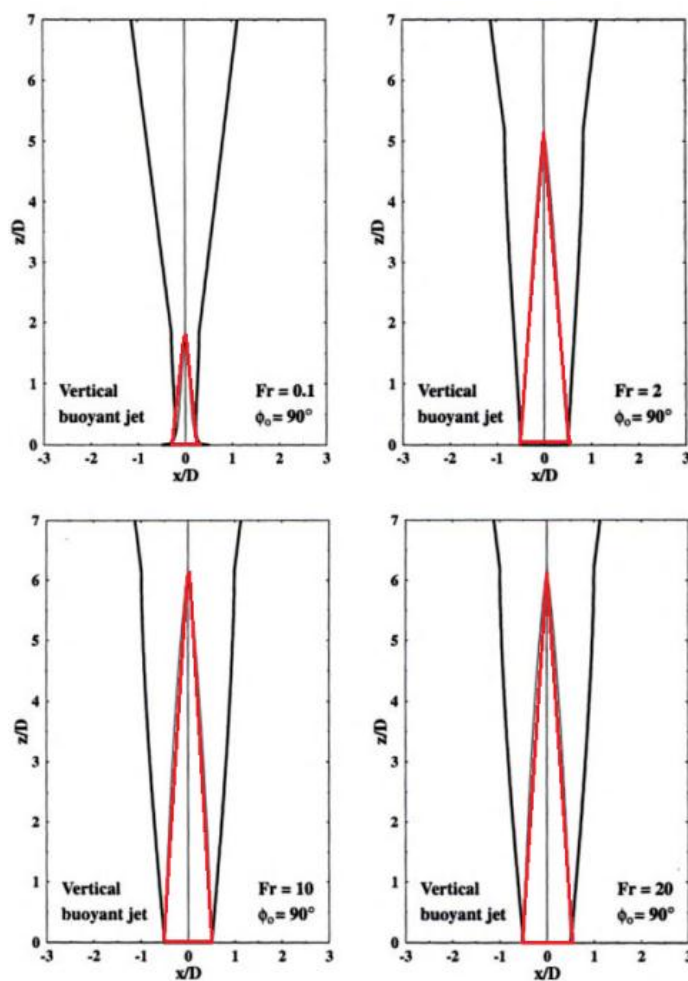
Een turbulente (rook)pluim bestaat uit drie verschillende gebieden of delen (zie Figuur 52): een initieel deel, een overgangsgebied en de volledig ontwikkelde pluim (Van den Bosch en Weterings, 2005, p. 365). In het initiële deel kunnen we de kernstroming en een menglaag onderscheiden. De kernstroming (Core of Potential Core in het Engels) is het ongestoorde, ongemengde deel van de uitstroom van pluimdeeltjes. De menglaag is de grens tussen de kernstroming en de omringende (lucht)stromingen. Hoe constanter de uitstroomsnelheid van de rookpluim is, hoe dunner de menglaag. In het overgangsgebied zorgen turbulente draaikolken in de menglaag ervoor dat er luchtdeeltjes in de pluim komen. Als de menging tussen de luchtdeeltjes en de rookpluimmaterie volledig is, spreken we van een volledig ontwikkelde pluim. In het gesprek op 6 mei 2010 vermeldde Jeroen van Beeck (Professor aan de afdeling 'Environmental and Applied Fluid Dynamics' van het Von Karman Instituut) dat de locatie van de maximale bronwaarde zich in de Potential Core moet bevinden.



Figuur 50: Potential Core

Bron: Van den Bosch en Weterings (2005, p. 365)

Dat gebied strekt zich uit van de uitlaat van de bron tot maximaal een afstand $d = 7D$, dus 7 keer de diameter D van de ventilatie-uitlaat. Een aantal van onze maximale concentraties bevinden zich buiten dat gebied, en de bronbepaling voor die testreeksen zal dus ook herbekeken moeten worden. Bijvoorbeeld in testreeks 161427 ligt de door ons gevonden bronlocatie ver buiten het gebied van de Potential Core en dient deze dus opnieuw opgezocht te worden. Zoals vermeld in paragraaf 2.2.2 is echter de door ons gebruikte diameter van de uitlaat $D = 0,8$ cm te klein. Die moet om overeenstemming met de werkelijkheid te verkrijgen 2,2 cm bedragen. De diameter wordt dus 2,75 keer zo groot, en dat betekent ook dat de Potential Core, dus het gebied waarin onze maximale bronwaarde ligt, zich tot 2,75 keer hoger uitstrekt dan nu het geval is.



Figuur 51: De grootte van de Potential Core bij diverse Froude-getallen

Bron: Lee en Chu (2003, p. 116)

Lee en Chu (2003, pp. 110 en 114) stellen dat de Potential Core zich maximaal uitstrekt tot op een afstand $d = 6,2D$ voor een hoger Froude-getal van de uitstroom, en dat d steeds kleiner wordt bij steeds lagere Froude-getallen (zie de in het rood gemarkeerde gebieden in Figuur 53). Het Froude-getal Fr wordt als volgt bepaald:

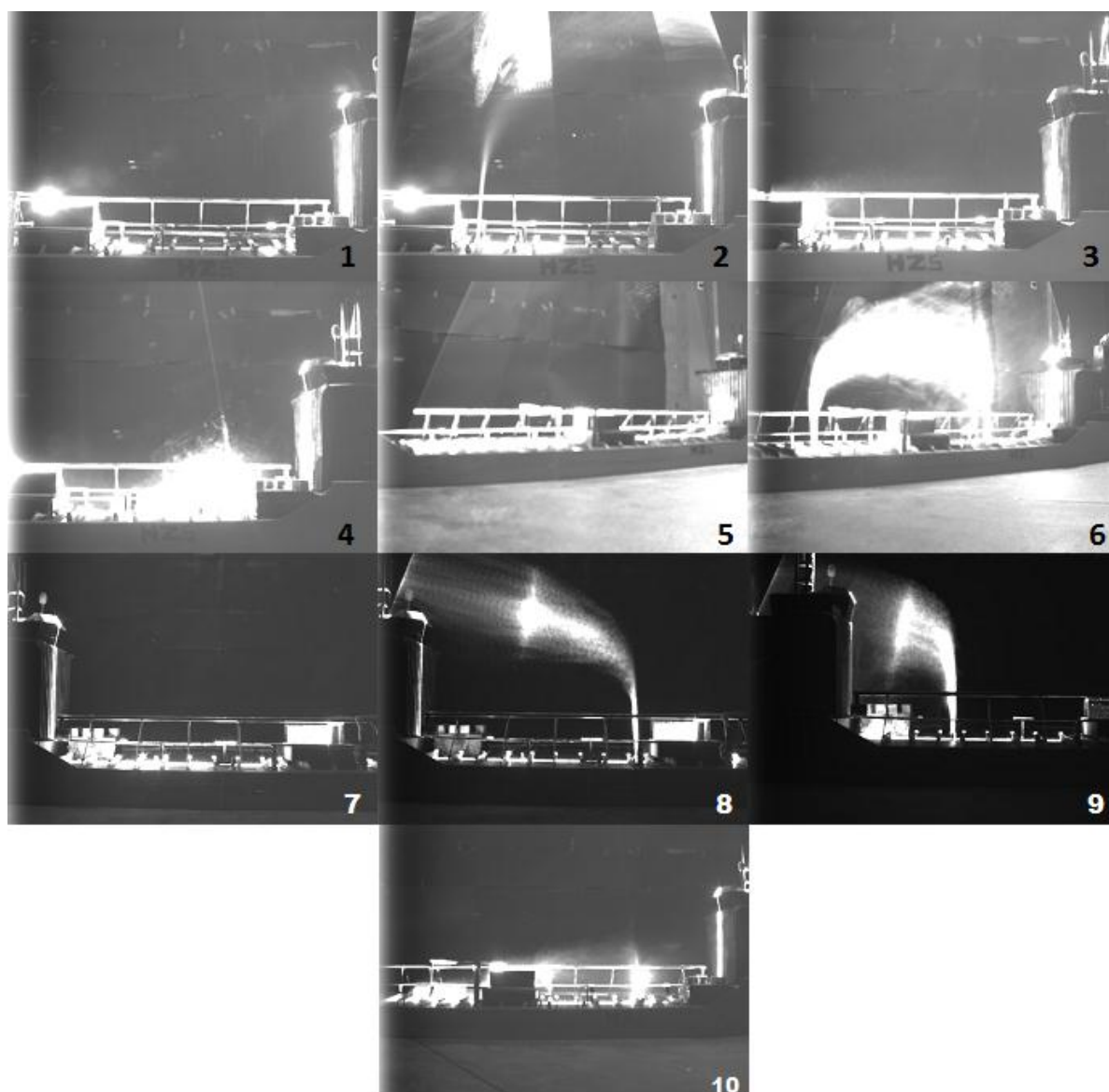
$$Fr = \sqrt{\frac{w^2}{gD}} \quad (\text{Formule 26})$$

Hierin is w de uitstroomsnelheid van de rookgassen, g is de valversnelling op aarde, en D is de diameter van de uitlaatopeningen. Het Froude-getal wordt verder niet gebruikt in de modellering van onze testopstelling omdat de door ons gebruikte windsnelheden ver onder Mach 0,3 liggen (zie ook paragraaf 2.2.5). Het is in dit geval alleen een maat voor de uitstroomsnelheid van de rookdeeltjes. De grootte van de Potential Core is dus hieraan gerelateerd. Hierbij speelt de impuls van de rookpluim een grote rol. Bij een hogere uitstroomsnelheid hebben de rookdeeltjes een grotere impuls, en hebben de luchtdeeltjes dus bij gelijkblijvende eigen snelheid meer tijd nodig om de rookdeeltjes dusdanig te beïnvloeden dat er menging optreedt. De Potential Core strekt zich dus uit over een groter gebied. Van de twee vermelde waarden voor d , $d = 6,2D$ of $d = 7D$, kiezen we $d = 7D$ omdat de vermelding van Jeroen van Beeck van zeven jaar later dateert dan de studie van Lee en Chu en dus meer de actuele wetenschappelijke opvatting betreffende dit fenomeen weerspiegelt.

7.3 Meetpunten bepalen

7.3.1 Verschillende camerastandpunten

Zoals eerder vermeld, is de camerapositie niet steeds dezelfde voor alle beelden. De afstand van de camera tot het schip, de plaats van de camera ten opzichte van de lengterichting van het schip en de hoek waaronder de foto's zijn genomen variëren. Dat heeft tot gevolg dat het perspectief per fotoreeks anders is. De fotoreeksen vallen zoals gezegd uiteen in twee grote delen, deel 1 (dek) en deel 2 (accommodatie).

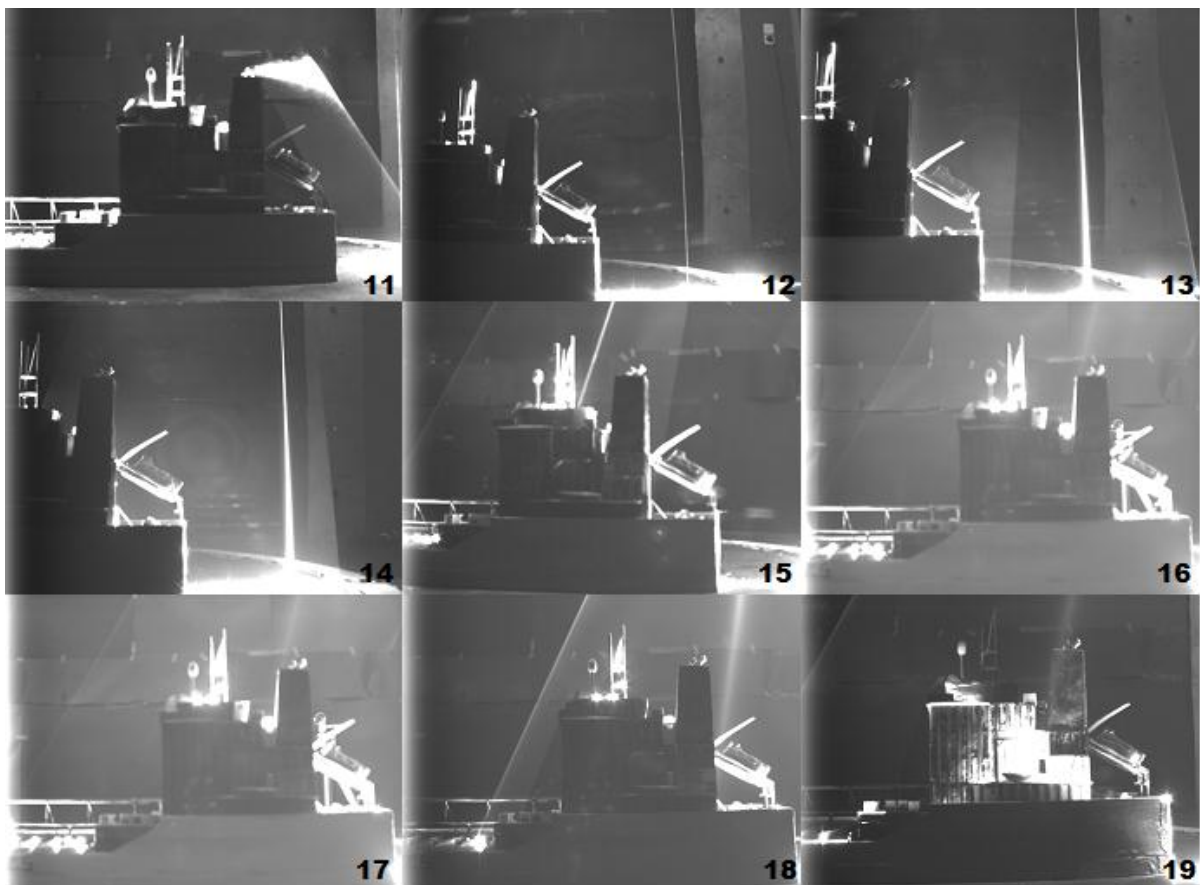


Figuur 52: Een collage van 10 foto's uit deel 1.

Bron: Eigen bewerking

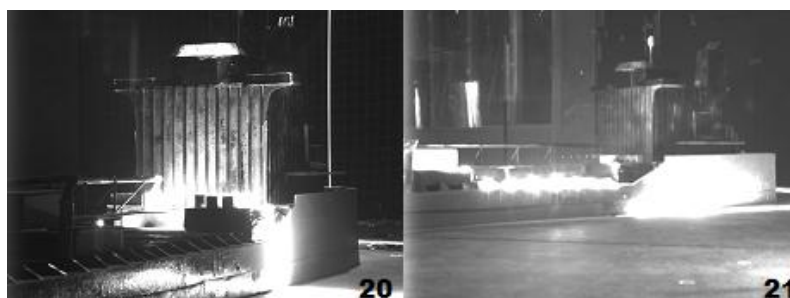
Binnen één deel zijn er nog grote verschillen tussen de fotoreeksen. Zie Figuur 54, waar we bij deel 1 duidelijk meerdere cameraposities opmerken. Op foto's 1 tot en met 4 en op foto 10 staat de camera aan de bakboordzijde van het schip geïmponeerd, loodrecht op de lengteas. Foto's 5 en 6 zijn ook van bakboord genomen, maar onder een schuine hoek in plaats van loodrecht. Foto's 7, 8 en 9 zijn dan weer van stuurboordzijde genomen, onder een rechte hoek.

Foto's 11 tot en met 19 in Figuur 55 zijn van de accommodatie, deel 2. Ze zijn vanaf bakboord genomen onder een rechte hoek.



Figuur 53: Een collage van 9 foto's uit deel 2.
Bron: Eigen bewerking

De laatste 2 foto's 20 en 21 uit Figuur 56 vallen in geen van beide categorieën of juist alle twee, omdat zowel de accommodatie als het dek op de foto staan en ze zijn genomen onder een schuine hoek.



Figuur 54: Twee foto's die niet in deel 1 of deel 2 vallen.

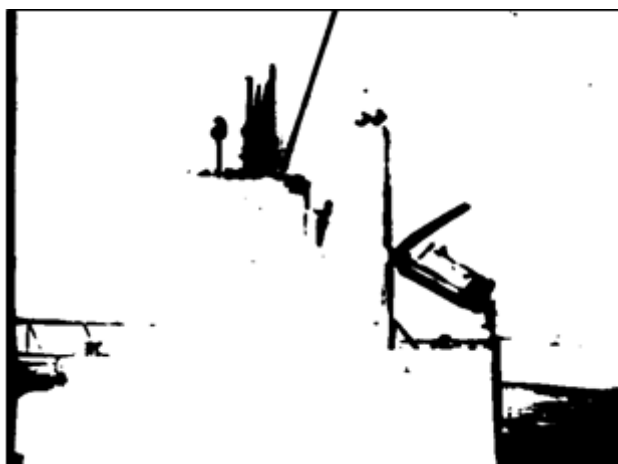
Bron: Eigen bewerking

7.3.2 Referentiepunten

We hebben dus verschillende camerastandpunten wat leidt tot verschillende perspectieven, en met verschillende perspectieven is het moeilijker om de locatie van de meetpunten vast te stellen. Als we bijvoorbeeld de concentratie van rookgassen op één punt, dat in werkelijkheid 1 meter van de voorkant van de opbouw verwijderd is, willen weten, ligt datzelfde punt op de ene foto op een andere plaats dan op de tweede foto. Bijvoorbeeld twintig pixels verwijderd van de opbouw op foto 1 wordt vijftien of vijfentwintig pixels op foto 2. Om toch in staat te zijn verschillende reeksen van foto's met elkaar te kunnen vergelijken, gaan we op zoek naar duidelijk onderscheidbare punten op het schip die op meerdere foto's voorkomen, de referentiepunten ofwel vaste punten. Aan de hand van die referentiepunten kunnen we bepalen of de foto's ten opzichte van elkaar verschoven zijn in de x- of y-richting, vergroot of verkleind zijn (camera dichterbij of verderaf, meer of minder zoom) of gerooteerd zijn rond de verticale as van het schip (vanwege een andere camerahoek). Deze transformatie zal worden besproken in het volgende hoofdstuk. De vaste punten zullen later gebruikt worden om het beeld van de ene testsessie af te beelden op de andere. Op die manier zullen de meetpunten van foto 1 overeen komen met die op foto 2, hoewel ze zich ogenschijnlijk op een andere plaats bevinden.

7.3.3 Variantie- en maximummaskers

Op de foto van de testrun passen we een maximummasker en een variantiemasker toe. Het maximummasker wordt gebruikt om pixels die op de achtergrondfoto een te hoge intensiteitswaarde hebben te elimineren, het variantiemasker om pixels die een te lage variantie tijdens de run hebben te elimineren. De pixels met een te hoge intensiteitswaarde op de achtergrondfoto laten we weg omdat deze het reflecterende deel van de scheepsstructuur voorstellen.



Figuur 55: Maximummasker toegepast op run 171712

Bron: Eigen bewerking

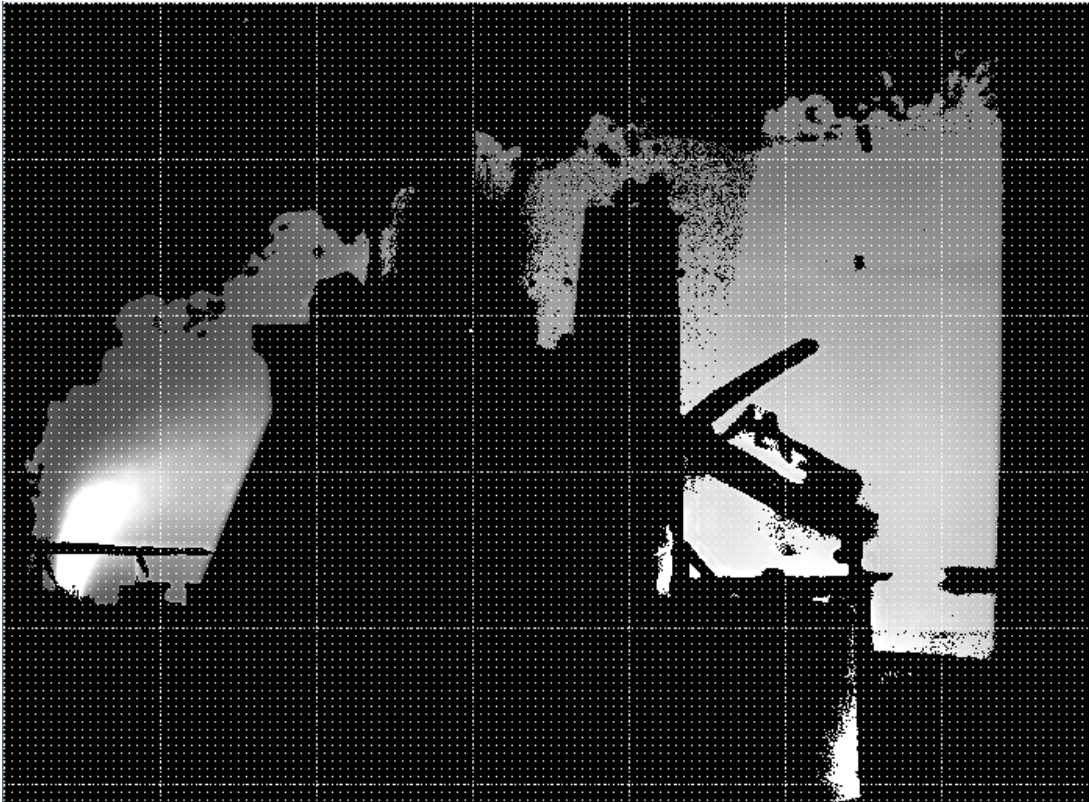
De pixels met een te lage variantie worden weggelaten omdat deze plaatsen weergeven waar geen of weinig beweging van rookdeeltjes is tijdens de run. Als er rook op die plekken zou zijn, zou de variantie er hoger zijn. Dat is niet het geval en dus zijn ze niet interessant voor ons.



Figuur 56: Variantiemasker toegepast op run 171712

Bron: Eigen bewerking

Zonder de scheepstructuur en met alleen de delen met een hoge variantie houden we de rookpluim over. De resulterende foto is een vrij donkere. Om hem beter interpreteerbaar te maken vermenigvuldigen we alle pixels met een bepaalde coëfficiënt waardoor de lichtintensiteit verhoogd wordt.



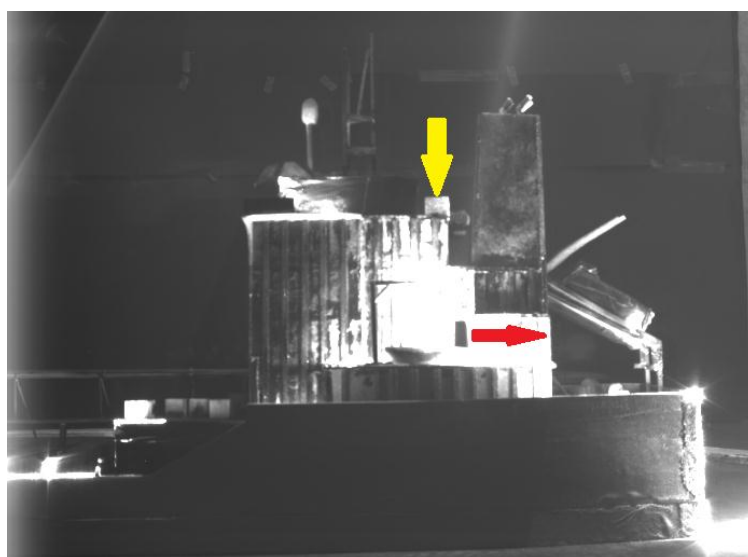
Figuur 57: Foto van run 171712 met maximum- en variantiemasker
Bron: Eigen bewerking

Op de resulterende foto hebben wij eerst de vaste punten bepaald. Bij het verhogen van de intensiteit gaat echter wel enige informatie verloren. Sommige pixels van het schip vallen weg achter de maskers, andere worden bijgevoegd. We kregen een wazige afbakening tussen het schip en de achtergrond die het bepalen van de referentiepunten niet eenvoudig maakte. Vanwege deze onnauwkeurigheden hebben we deze methode laten vallen en besloten de referentiepunten te bepalen aan de hand van de gemiddelde achtergrondfoto's omdat het schip beter zichtbaar is op de foto's zonder rook.

7.3.4 Eén grote foto

We gaan ervan uit dat de camerapositie niet verandert in de tijd tussen het nemen van de achtergrondfoto's en de foto's met rook. Om de verschillende punten per foto te kunnen bepalen was het soms nodig om bijvoorbeeld voor punt A een andere intensiteit te gebruiken dan voor punt B, terwijl het wel over dezelfde foto gaat. Het initiële idee was om één grote foto samen te stellen, waarbij we de foto's van het voorste gedeelte van het schip zouden 'vastplakken' aan die van het achterste gedeelte. Om dat te kunnen doen, dienen op beide delen overeenkomstige gemeenschappelijke punten gevonden te worden, welke dan over elkaar gelegd worden. Dit idee werd echter al gauw verlaten omdat er te weinig overeenstemmende punten werden gevonden en omdat er door het verschil in perspectief op de foto's van de verschillende delen een 'knik' ontstaat in de totale samengestelde foto.

Het werd duidelijk dat de foto's verdeeld dienen te worden in twee reeksen en dat we ons het beste concentreren op één daarvan: het gedeelte waarop de accommodatie zichtbaar is omdat dat het deel is waar de inlaat voor de airconditioning voor zowel de machinekamer (rood in Figuur 60) als het woongedeelte (geel) zich bevindt en omdat de bemanning zich hier voor het grootste deel van de dag ophoudt.

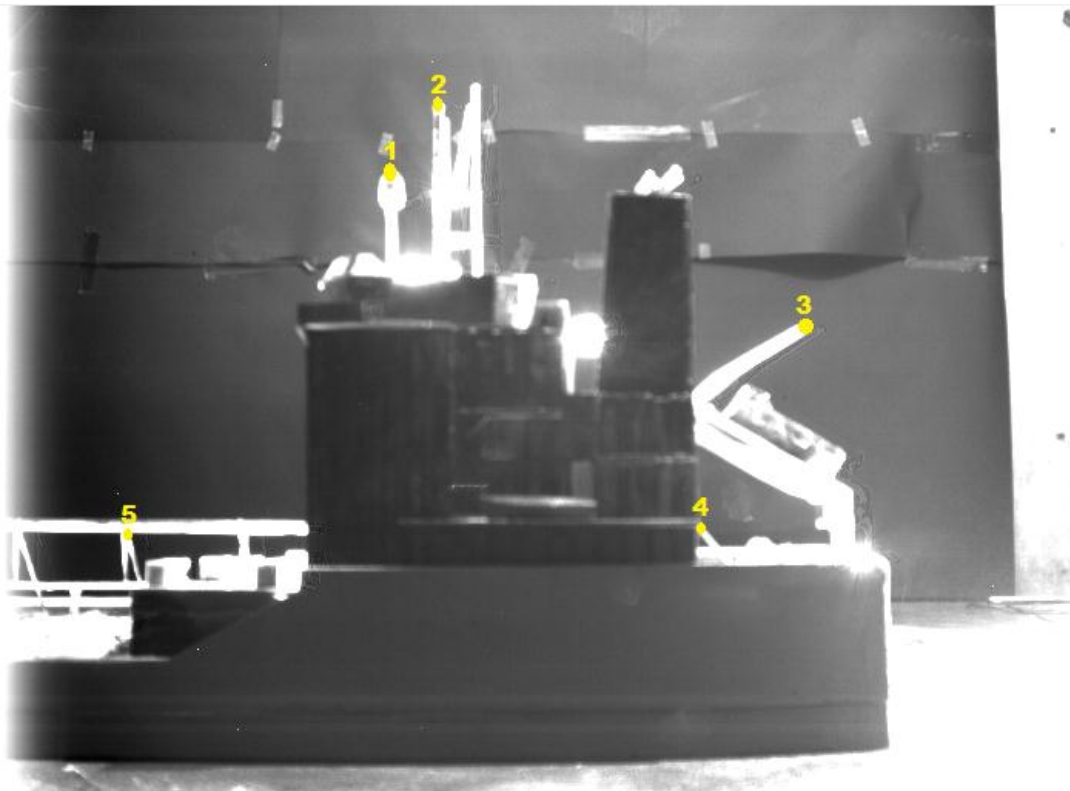


Figuur 58: Inlaat van machinekamer en accommodatie
Bron: Eigen bewerking

7.3.5 Vijf vaste punten

Voor het deel 'Accommodatie' werden vijf vaste punten gezocht om op elke foto toch minstens 3 daarvan over te houden. De vijf vaste punten die we voor de Accommodatie gebruiken zijn (zie Figuur 61):

1. de top van de satellietontvanger
2. de voorkant van de masttop
3. de top van de vrije val boot
4. de bovenkant van de ladder aan de achterzijde van het schip
5. de middelste steun van de Inert Gasleiding

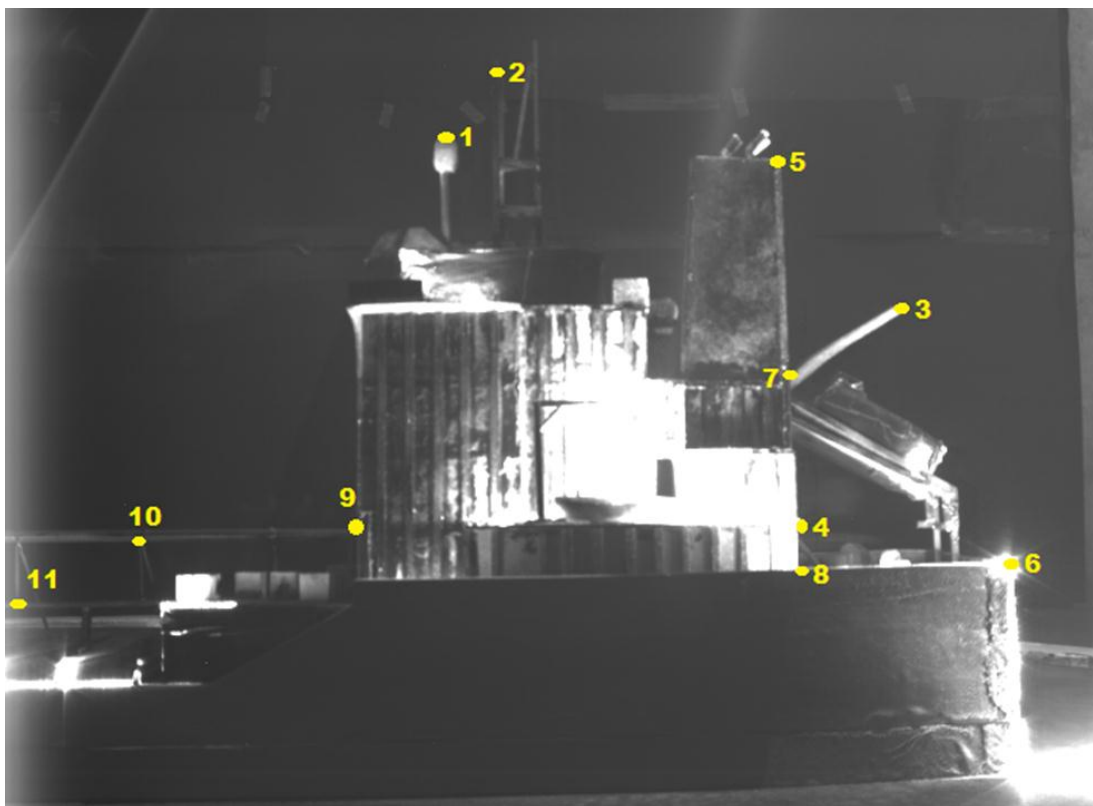


Figuur 59: 170926 met vaste punten
Bron: Eigen bewerking

7.3.6 Elf vaste punten

De vijf vaste punten bleken niet voldoende om een juiste berekening te kunnen uitvoeren, dus werd er gezocht naar meer punten. Dat zijn uiteindelijk de volgende elf geworden (zie Figuur 62 en Tabel 3)

1. de top van de satellietontvanger
2. de voorkant van de masttop
3. de top van de vrije val boot
4. de bovenkant van de ladder onder de vrije val boot
5. de stuurboord-achterkant van de schoorsteen
6. de achterkant van het 'poop'-dek
7. het punt waar de schoorsteen en de vrije val boot bijeenkomen
8. het punt waar de schoorsteen en het dek bijeenkomen
9. het punt waar de Inert Gasleiding tot aan de accommodatie komt
10. het midden van de Inert Gasleiding
11. de Inert Gasleiding, meer naar voren en omlaag



Figuur 60: Referentiefoto 181448 en de elf gebruikte vaste punten

Bron: Eigen bewerking

Tabel 3: De vaste punten per testreeks en hun locatie

	170926		171459		171703		180923		181315		181448		181633	
Vast Punt	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x
1.Topsat	107	254	178	69	118	236	100	285	117	30	81	281	87	282
2.Topmast	64	281	140	100	75	269	58	320	73	360	35	311	41	311
3.Freefal	207	519	267	309	215	512	200	567	218	608	189	571	192	567
4.Ladder	338	453	377	240	345	435	331	486	357	554	338	506	338	505
5.SBaftfnl	125	450	198	238	137	431	118	482	130	537	98	496	103	494
6.Poop	365	574	412	336	382	545	367	600	381	679	356	640	358	635
7.FnlFreef	250	450	311	239	276	434	251	483	261	540	235	502	239	498
8.Fnldeck	365	451	412	239	382	435	367	485	383	554	357	507	360	505
9.IG/Accom	334	200	0	0	350	170	332	216	366	278	332	224	333	226
10.Mid-IG	342	85	0	0	352	91	337	141	367	153	341	89	342	94
11.IG-Fore	374	8	0	0	383	20	366	73	399	74	379	7	378	12

Bron: Eigen bewerking

Hoofdstuk 8 Lineaire en affiene transformaties

8.1 Inleiding

Vanwege de verschillen in de gebruikte camerastandpunten komen de verkregen foto's niet goed genoeg overeen. Om toch de meetpunten uit verschillende testreeksen met elkaar te kunnen vergelijken, dienen we de meetpunten uit één reeks, reeks 181448, af te beelden op de foto uit een andere reeks. Om te weten op welke plaats op de foto de meetpunten moeten komen te staan, kijken we naar de vaste punten. De vaste (referentie-)punten, en bijgevolg alle punten op de foto's ondergaan een affiene transformatie. In dit hoofdstuk wordt besproken wat die transformaties inhouden. We hebben de coördinaten van de referentiepunten van de gemiddelde foto van reeks 181448, en de coördinaten van dezelfde punten op de gemiddelde foto van een andere reeks 1xxxxx. De coördinaten van de punten van referentiereeks 181448, het origineel, worden gegeven door (x_i, y_i) en de coördinaten van reeks 1xxxxx, het beeld, door (x'_i, y'_i) .

Veronderstel de volgende reeks fictieve referentiepunten: $(0,0)$, $(3,0)$ en $(3,4)$. Deze punten vormen samen een rechthoekige driehoek abc met punt a in de oorsprong, met zijde ab lengte 3, met zijde bc lengte 4 en met zijde ac lengte 5.

$$\text{driehoek abc: } \begin{pmatrix} 0 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

Hierbij worden de x-coördinaten van de referentiepunten in de bovenste rij van de matrices geplaatst, en de y-coördinaten in de tweede rij. De algemene transformatie van de reeks van referentiepunten wordt gegeven door:

$$\begin{pmatrix} a & b & e \\ c & d & f \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 4 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x1'_{b1} & x2'_{b1} & x3'_{b1} \\ y1'_{b1} & y2'_{b1} & y3'_{b1} \end{pmatrix}$$

$$T \cdot A = B$$

Wij zoeken de transformatiematrix T , om de meetpunten in referentiefoto 181448 te kunnen transformeren naar de juiste positie in de foto van de testreeks. In Scilab wordt T gegeven door het volgende in te voeren:

$$A=[x_1 \ x_2 \ x_3; y_1 \ y_2 \ y_3; 1 \ 1 \ 1]$$

$$B=[x_1' \ x_2' \ x_3'; y_1' \ y_2' \ y_3']$$

$$T=B/A$$

De transformatie kan bestaan uit een rotatie, een schaling, een afschuiving of een translatie, of een combinatie van meerdere of alle van deze. Een rotatie, schaling en afschuiving worden bepaald door de a , b , c en d in de transformatiematrix T , en een translatie wordt bepaald door de e en f in de transformatiematrix T . Een rotatie kan plaatsvinden als de camera niet elke keer precies waterpas staat. Een kleine oneffenheid in de vloer kan al zorgen voor een rotatie van het beeld. Een schaling wordt verkregen bij het in- of uitzoomen met de camera. De translatie tenslotte komt door het verplaatsen van de camera naar links of naar rechts om andere delen van het model te kunnen bekijken. We behandelen hier eerst de lineaire transformaties bepaald door a , b , c en d , de affine transformatie bepaald door e en f komt daarna.

8.2 Rotatie van driehoek $a_0b_0c_0$ tot driehoek $a_1b_1c_1$

De rotatie van een punt of punten houdt in dat het punt of de punten worden gedraaid over een hoek θ rond de oorsprong. De transformatiematrix van een rotatie is $T = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$. Gegeven het origineel, driehoek $a_0b_0c_0 = (0,0)$, $(3,0)$ en $(3,4)$ die een rotatie heeft ondergaan van 90° en het beeld, driehoek $a_1b_1c_1 = (0,0)$, $(0,3)$ en $(-4,3)$.

De bepaling van de transformatiematrix T1 in Scilab wordt als volgt gedaan:

$$A0=[0 \ 3 \ 3;0 \ 0 \ 4]$$

$$B1=[0 \ 0 \ -4;0 \ 3 \ 3]$$

$$T1=B1/A0$$

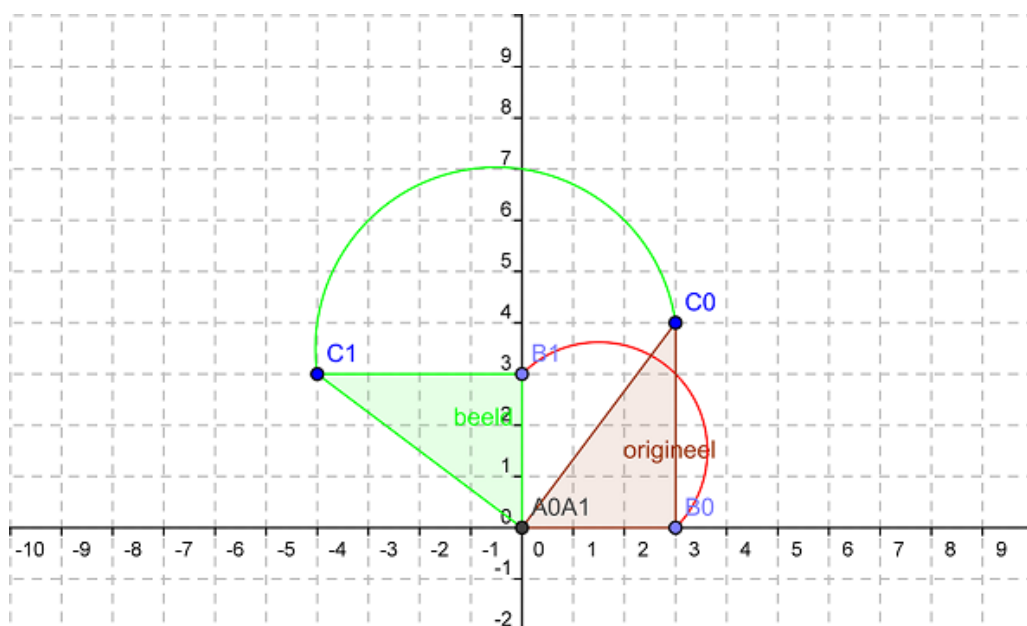
En als antwoord krijgen we: $T1 = \begin{pmatrix} \cos 90^\circ & -\sin 90^\circ \\ \sin 90^\circ & \cos 90^\circ \end{pmatrix}$

Scilab heeft de sinussen en cosinussen al voor ons uitgerekend en geeft het antwoord:

$$T1 = \begin{pmatrix} 1.047D - 16 & -1 \\ 1 & 3.486D - 32 \end{pmatrix}$$

Merk op dat we hier in Scilab een kleine afwijking krijgen die nagenoeg gelijk is aan 0. Dat komt omdat het floating point rekenmechanisme van computers soms kleine afrondingsfouten geeft bij het oplossen van lineaire stelsels. Deze worden genegeerd en T1 is dus:

$$T1 = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$



Figuur 61: Rotatie van driehoek $a_0b_0c_0$ tot driehoek $a_1b_1c_1$

Bron: eigen bewerking

8.3 Schaling van driehoek $a_1b_1c_1$ tot driehoek $a_2b_2c_2$

Schaling wil zeggen dat de lijnstukken die gegeven worden door de oorsprong $(0,0)$ en punt (x_i, y_i) worden vergroot of verkleind, de zogenoemde rek of krimp. De schaling in de x-richting wordt gegeven door a , en de schaling in de y-richting wordt gegeven door d in de transformatiematrix $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$.

Gegeven driehoek $a_1b_1c_1 = (0,0), (0,3)$ en $(-4,3)$ en driehoek $a_2b_2c_2 = (0,0), (0,9)$ en $(-8,9)$.

De transformatiematrix T2 bepalen in Scilab gaat als volgt:

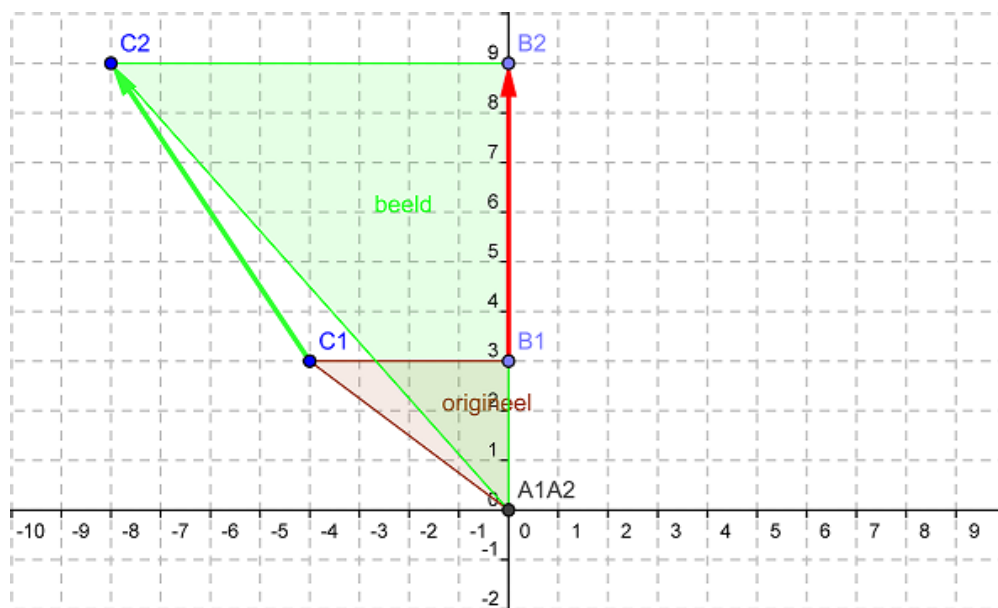
$$A1=[0 \ 0 \ -4; 0 \ 3 \ 3]$$

$$B2=[0 \ 0 \ -8; 0 \ 9 \ 9]$$

$$T2=B2/A1$$

$$T2 = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$$

Driehoek $a_1b_1c_1$ is dus in de x-richting vermenigvuldigd met factor 2, en in de y-richting met factor 3.



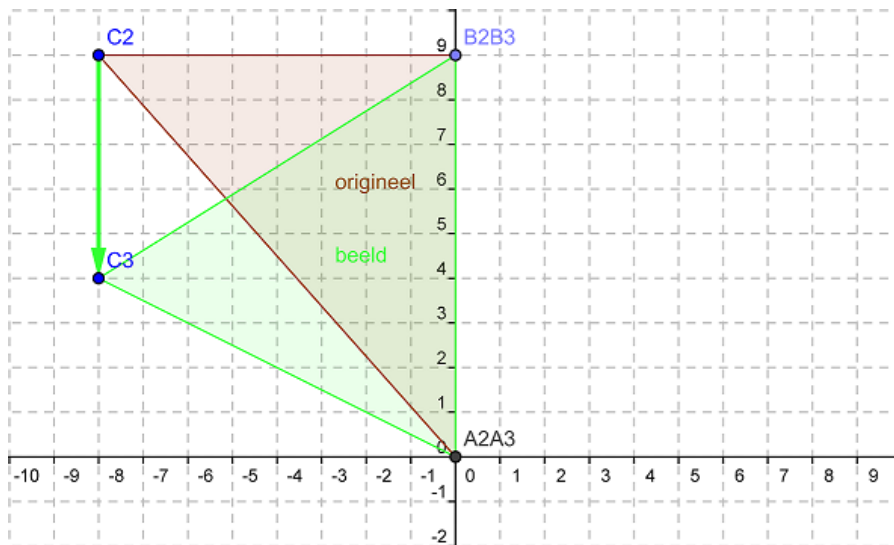
Figuur 62: Rek met factor 2 in de x-richting en factor 3 in de y-richting

Bron: eigen bewerking

8.4 Afschuiving van driehoek $a_2b_2c_2$ tot driehoek $a_3b_3c_3$

Bij afschuiving wordt een figuur scheefgetrokken in de x-richting of in de y-richting. Bijvoorbeeld een vierkant wordt een parallellogram, en een willekeurige driehoek kan worden scheefgetrokken tot een rechthoekige driehoek en vice versa.

Gegeven driehoek $a_2b_2c_2 = (0,0), (0,9)$ en $(-8,9)$ en driehoek $a_3b_3c_3 = (0,0), (0,9)$ en $(-8,4)$.



Figuur 63: Afschuiving in de y-richting met factor $5/8$

Bron: eigen bewerking

De transformatiematrix T_3 berekenen in Scilab geeft:

$$A2=[0 \ 0 \ -8;0 \ 9 \ 9]$$

$$B3=[0 \ 0 \ -8;0 \ 9 \ 4]$$

$$T3=B3/A2$$

$$T3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 5/8 & 1 \end{pmatrix}$$

De factor c is in dit geval $5/8$, en deze wordt als volgt bepaald: deel de afstand waarover een punt beweegt (5 naar beneden) door de loodrechte afstand van dat punt tot de as waarlangs er parallel wordt bewogen

(afstand tot y-as is 8) (Weisstein, 2011). Bij afschuiving parallel aan de x-as is b de bepalende factor.

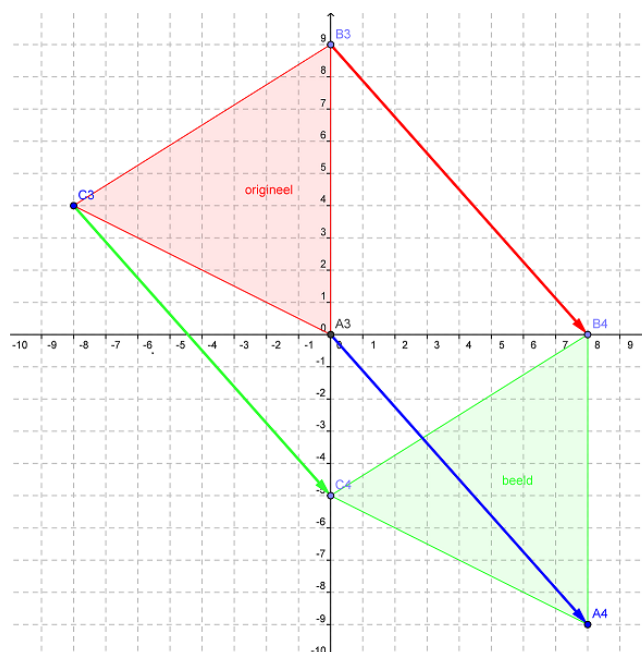
Rekenen we nu in Scilab het volgende uit: $T_3 * T_2 * T_1$, wat hetzelfde antwoord geeft als B_3/A_0 , dan krijgen we de transformatiematrix T_{123} voor origineel A_0 getransformeerd tot beeld B_3 .

$$T_{123} = \begin{pmatrix} 0 & -2 \\ 3 & -5/4 \end{pmatrix}$$

8.5 Translatie van driehoek $a_3b_3c_3$ tot driehoek $a_4b_4c_4$

Buiten de lineaire transformaties die in de vorige paragrafen zijn besproken, is er ook een affiene transformatie gebeurd, de translatie. De camera is verplaatst in horizontale en/of verticale richting. Om deze verplaatsing ook te kunnen bepalen, voegen we de kolomvector (e,f) toe aan de transformatiematrix T en een rijvector $(1,1,1)$ aan de matrix van ons origineel.

Gegeven driehoek $a_3b_3c_3 = (0,0)$, $(0,9)$ en $(-8,4)$ en driehoek $a_4b_4c_4 = (8,-9)$, $(8,0)$ en $(0,-5)$.



Figuur 64: De translatie van driehoek $a_3b_3c_3$ tot driehoek $a_4b_4c_4$

Bron: eigen bewerking

De transformatiematrix T4 in Scilab:

$$A3 = [0 \ 0 \ -8; 0 \ 9 \ 4; 1 \ 1 \ 1]$$

$$B4 = [8 \ 8 \ 0; -9 \ 0 \ -5]$$

$$T4 = B4/A3$$

$$T4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 8 \\ 0 & 1 & -9 \end{pmatrix}$$

Het origineel is 8 plaatsen opgeschoven in de x-richting, en -9 in de y-richting. Merk op dat de translatie dus wordt gegeven door e en f in de transformatiematrix $\begin{pmatrix} a & b & e \\ c & d & f \end{pmatrix}$ en dat met de elementen a, b, c en d niets gebeurt, dit is de 2x2 eenheidsmatrix.

8.6 Alle transformaties samengevoegd

Om nu van origineel A0 naar beeld B4 te gaan voegen we T123 samen met T4 en krijgen we transformatiematrix T1234.

$$T1234 = \begin{pmatrix} 0 & -2 & 8 \\ 3 & -5/4 & -9 \end{pmatrix}$$

Hetzelfde resultaat wordt bereikt als we in Scilab B4/A0' uitrekenen. A0' is dezelfde matrix als A0, maar met een extra rijvector (1,1,1) toegevoegd om de berekening te doen kloppen³.

De transformatiematrix T1234' in Scilab:

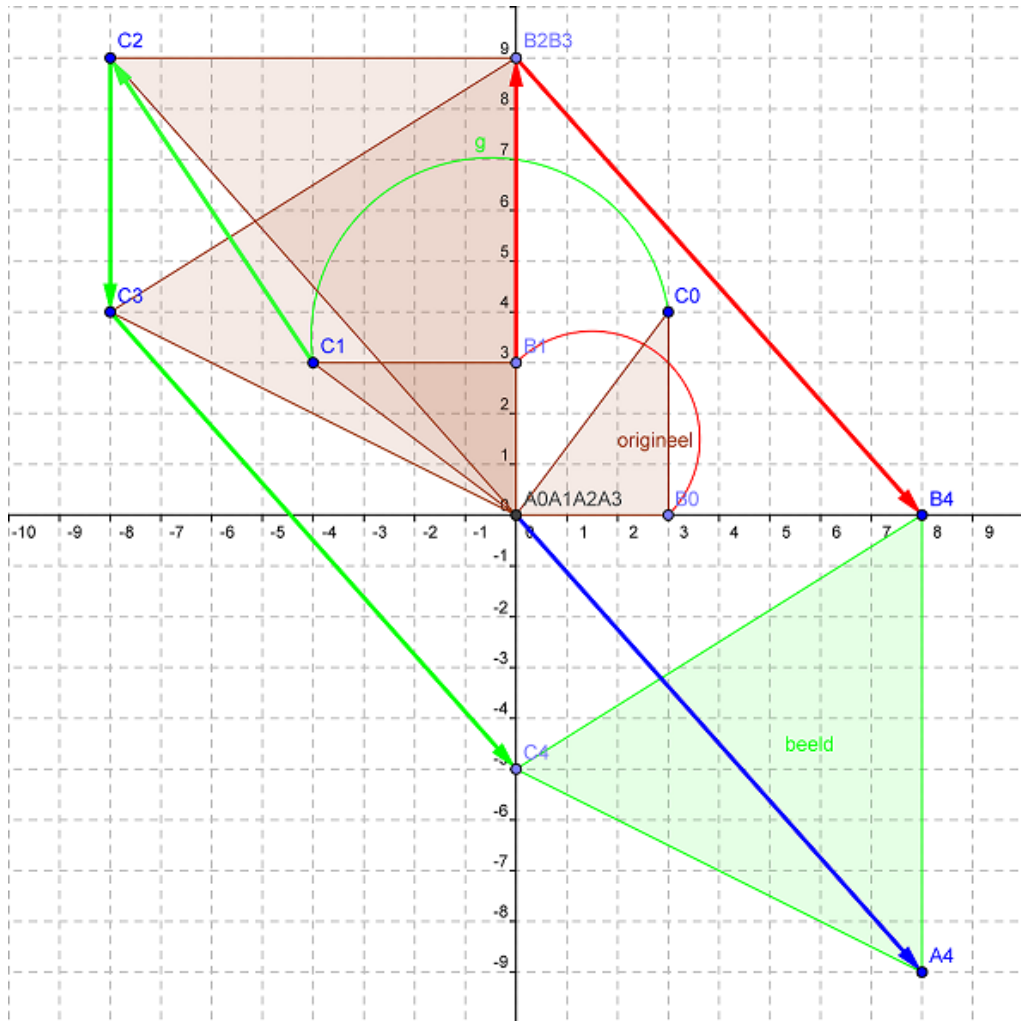
$$A0' = [0 \ 3 \ 3; 0 \ 0 \ 4; 1 \ 1 \ 1]$$

$$B4 = [8 \ 8 \ 0; -9 \ 0 \ -5]$$

$$T1234' = B4/A0'$$

$$T1234' = \begin{pmatrix} 0 & -2 & 8 \\ 3 & -5/4 & -9 \end{pmatrix}$$

³ In Scilab typen we A0accent in plaats van A0', om een foutmelding te vermijden.



Figuur 65: Alle transformaties samen
 Bron: eigen bewerking

8.7 Transformatie van meetpunten aan de hand van vaste punten

8.7.1 Foto's met verschillende camerastandpunten vergelijken

Vanwege de verschillen in de gebruikte camerastandpunten zijn er afwijkingen tussen de positie van de meetpunten in de verschillende testreeksen. Om de meetpunten toch met elkaar te kunnen vergelijken worden deze van hun positie op de referentiefoto naar een nieuwe positie op de foto's van verschillende runs getransformeerd aan de hand van de positie van vaste punten op de achtergrondfoto van de testreeks, het beeld, en diezelfde punten op een referentiefoto, het origineel. Dat gebeurt zowel voor de meetpunten in de runs als de meetpunten in de bijbehorende achtergrondfoto's, om Formule 1 te kunnen gebruiken. Als referentiefoto gebruiken we de foto van reeks 181448 voor de testruns 17xxxx en 18xxxx met elk 44 meetpunten. Voor de testruns 19xxxx met 45 meetpunten gebruiken we de foto van run 191000 als referentiefoto. Om eventuele afwijkingen in het bepalen van de meetpunten te ondervangen is besloten niet met enkele pixels als meetpunt te werken, maar met meetgebiedjes van 5 op 5 pixels. Van deze 25 pixels wordt de gemiddelde waarde bepaald, en dat is dan de intensiteitswaarde in ons meetpunt.

8.7.2 Eerste manier: de onderlinge afstand van vijf vaste punten

In het begin hebben we een zo eenvoudig mogelijke transformatie toegepast en gekeken of alleen een herschaling niet voldoende zou kunnen zijn. Per reeks werden de locaties van de vijf vaste punten (zie Figuur 61) bepaald. Van deze vijf punten werden er drie gebruikt, de MidIG, de Freefall en de TopSat (nummers 10, 3 en 1 in Tabel 3). De afstanden d_{ij} tussen deze drie punten werd als volgt bepaald:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (\text{Formule 27})$$

De afstanden d_{ij} voor de te bepalen testreeks werden vergeleken met de afstanden d_{ij} in de referentiefoto 181448, waardoor we een schaling

vonden. Die schaling werd toegepast op de andere twee vaste punten in de testreeks om ze te verplaatsen zodat er overeenstemming bereikt werd met de vaste punten in run 181448 (zie Figuur 68). In het ideale geval zouden nu de vaste punten in de testreeks samen moeten vallen met de vaste punten in run 181448, maar dat was niet het geval. Er werden afwijkingen van vijf of meer pixels waargenomen.



Figuur 66: De positie van de meetpunten in referentiefoto 181448
Bron: Eigen bewerking

Om de schaling te verbeteren werden later de afstanden horizontaal en verticaal apart bekeken, en werden aldus aparte schalingen voor de rijen en kolommen verkregen. De nauwkeurigheid ging er op deze manier op vooruit, voor sommige testreeksen was er slechts een afwijking van een of twee pixels. Voor andere reeksen echter was de afwijking vijf pixels of groter. Deze afwijking was dusdanig groot dat het duidelijk was dat deze manier niet voldeed om de transformatie van de meetpunten te bepalen.

8.7.3 Tweede manier: de gemiddelde affine transformatie

Het was duidelijk dat alleen een schaling niet zorgde voor de vereiste nauwkeurigheid en er werd besloten gebruik te maken van affine transformaties om de meetpunten te kunnen verplaatsen. Dus in plaats van alleen de schaling, werden ook de translatie en rotatie bepaald. Ook werd het aantal vaste punten verhoogd van vijf naar elf. Van de elf vaste punten uit Tabel 3 werden voor de referentiefoto 181448 de locatie bepaald. Van deze elf vaste punten nemen we er telkens drie. Van die drie worden de rijwaarden en kolomwaarden weergegeven in de matrix A.

$$A = [r_0, r_1, r_2; k_0, k_1, k_2; 1, 1, 1]$$

Datzelfde doen we voor de foto van de testreeks die we willen meten en we krijgen matrix B.

$$B = [r_{0\text{new}}, r_{1\text{new}}, r_{2\text{new}}; k_{0\text{new}}, k_{1\text{new}}, k_{2\text{new}}]$$

Het bepalen van transformatiematrix T gebeurt als volgt:

$$T = B/A$$

Uit 11 vaste punten er telkens 3 uitnemen kan op honderdvijfenzestig verschillende manieren, want:

$$\frac{11!}{(11-3)! \cdot 3!} = 165 \quad (\text{Formule 28})$$

We krijgen dus 165 verschillende transformatiematrices T. Deze worden bij elkaar opgeteld en de gemiddelde transformatiematrix T (mean transformation) wordt bepaald. Aan de hand van die T worden de meetpunten uit de referentiefoto 181448 getransformeerd naar hun plaats in de foto van de te onderzoeken testreeks. Zie Figuur 69 voor het resultaat bij testreeks 171703.



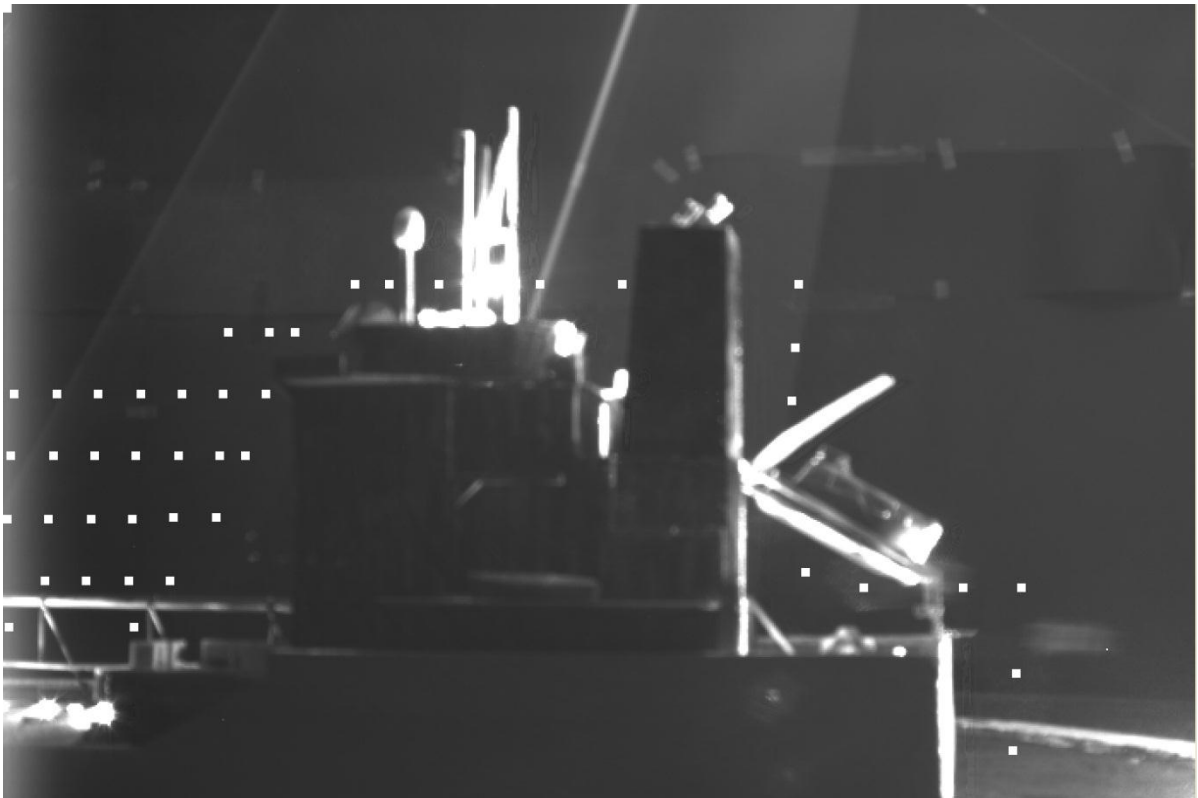
Figuur 67: De Mean Transformation van de meetpunten, 171703
Bron: Eigen bewerking

De horizontale positie van de meetpunten is redelijk te noemen, hoewel er meetpunten nu op de IG-lijn zitten in plaats van erboven. De verticale positie is niet zoals gewenst. De meetpunten zitten nu niet meer boven elkaar maar zijn naarmate ze meer naar beneden in de foto staan steeds meer opgeschoven naar links.

Beschouw alle witte punten van de meetpunten als de vakjes van een schaakbord en het schaakbord heeft aan de onderkant een negatieve afschuiving in de x-richting en een translatie naar links ondergaan, of een rotatie. Zie bijvoorbeeld de meetpunten rechts naast de schoorsteen: die staan nu schuin onder elkaar, en die achter de 'poop' zitten nu op het schip in plaats van er naast.

8.7.4 Derde manier: de mediaan van de hondervijfenzestig transformaties

Bij deze wijze van bepalen van meetpunten gebruiken we niet de gemiddelde waarde van de transformatiematrices T , maar alleen de middelste, de Median Transformation. Dat geeft een resultaat dat vergelijkbaar is met de gemiddelde transformatie, zie Figuur 70. De meetpunten staan weer niet recht onder elkaar. In de transformatiematrix T zien we kleine waarden voor b en c .



Figuur 68: De Median Transformation van de meetpunten, 171703

Bron: Eigen bewerking

8.7.5 Vierde manier: Median Transformation rond het middelpunt van de foto

In Scilab is de oorsprong van de rotatie het punt $(0,0)$, dus in de linkerbovenhoek van de foto. Als er in het echt een rotatie plaats zou hebben gevonden is de oorsprong van die rotatie echter niet de linkerbovenhoek maar het midden van de foto. We hebben hier in Scilab de oorsprong van de rotatie aangepast en krijgen als resultaat de afbeelding in Figuur 71.



Figuur 69: Median Transformation, rotatie rond middelpunt, 171703

Bron: Eigen bewerking

8.7.6 Vijfde manier: rotatie op 0 zetten

Bij de tweede, derde en vierde manier om de transformatiematrix T te bepalen is er een rotatie opgetreden. Deze is echter onbestaande in de werkelijkheid. De camera was vastgeschroefd op een stuk hout en kon dus alleen bewogen worden in horizontale richting. Bij de vijfde manier hebben we dan ook de waarden voor b en c in de transformatiematrix T op 0 gezet en kregen als resultaat de afbeelding in Figuur 72.



Figuur 70: Median Transformation met translatie = 0, 171703

Bron: Eigen bewerking

Dit is het beste resultaat wat we hebben verkregen en deze methode zullen we dan ook gebruiken voor het transformeren van de meetpunten van alle testreeksen. We moeten wel opletten wat er precies gebeurt met de meetpunten. Het meetpunt achter de radarmast en dat net onder de voorkant van de vrije val boot worden beïnvloed door reflectie van de radarmast en de stelling van de vrije val boot en kunnen dus niet gebruikt worden.

Hoofdstuk 9 Bespreking van de meetresultaten

9.1 Uitwerken van formule 1 of 25

Om formule 1 of 25 te kunnen gebruiken hebben we vier of zes waarden nodig:

1. de intensiteitswaarden op de meetpunten I
2. de intensiteit van de bron I_s
3. de intensiteitswaarden op de meetpunten in de achtergrondfoto I_b
4. de intensiteit op de bronlocatie in de achtergrondfoto I_{bs}
5. de intensiteit op de meetpunten in de met rook verzadigde foto I_0
6. de intensiteit op de bronlocatie in de met rook verzadigde foto I_{0s}

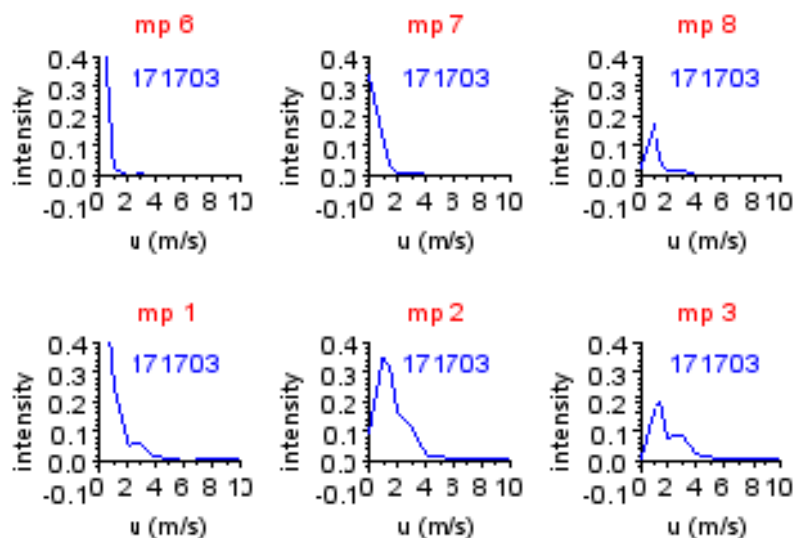
We hebben drie met rook verzadigde achtergrondfoto's, van de reeksen 181315b, 181448 en 191000, maar deze kunnen we niet gebruiken. Bij de reeksen 181448 en 191000 is namelijk niet alle data van deze reeksen bruikbaar voor analyse, en bij reeks 181315b is de met rook verzadigde run 181425 net als de twee runs daarvoor (181419 en 181422) verkeerd belicht. Meer uitleg hierover in de paragrafen 9.2.3, 9.2.4 en 9.2.5. Formule 25 is dus niet bruikbaar en daarom vallen we terug op formule 1.

I en I_b worden gevonden met het subprogramma 'CorrectedIntensities' in de Scilab programma's 'measuringxxxxx'. Hierbij wordt echter geen gebruik gemaakt van de intensiteiten op één punt. Om eventuele fouten in het bepalen van de locatie van de meetpunten te ondervangen is ervoor gekozen om gebieden van vijf op vijf pixels te gebruiken als meetpunt. Van elk van deze vijftwintig pixels wordt de intensiteit bepaald, deze worden bij elkaar opgeteld en het gemiddelde wordt uitgerekend. Deze gemiddelde waarde is de waarde die we gebruiken voor I en I_b . I_s en de locatie van I_s hebben we gevonden met 'SourceLocater'. De waarde van I_{bs} werd opgezocht in de achtergrondfoto en afgetrokken van I_s . Dat verschil wordt gebruikt in 'measuringxxxxx' als 'IntensityAtSource'.

Formule 1:

$$\frac{C}{C_s} = \frac{I - I_b}{I_s - I_{bs}}$$

Met deze waarden wordt dan formule 1 ingevuld in 'measuringxxxxxx' en dat programma schrijft voor elk meetpunt en voor elke gebruikte windsnelheid de gevonden verhouding C/C_s weg in een bestand 'metingenxxxxxx'. Deze bestanden kunnen dan weer uitgelezen worden met het programma 'plotterxxxxxx' dat er een plot van maakt. Voor elk meetpunt wordt er een grafiekje gegeven, met op de x-as de gebruikte windsnelheden en op de y-as de gevonden verhoudingen C/C_s . Langs de y-as geven we dat weer als 'intensity'. Deze plots zitten in de bijlagen en staan ook op de CD die bij dit werk hoort. In Figuur 73 zien we de grafiekjes voor zes meetpunten in de testreeks 171703.



Figuur 71: De verhouding C/C_s bij diverse windsnelheden, 171703

Bron: eigen bewerking

Merk op dat we dus alleen een verhouding krijgen tussen de concentratie op het meetpunt en de concentratie bij de bron. Aangezien we de concentratie bij de bron niet weten, kunnen we ook niets zeggen over de waarde van de concentratie op de meetpunten. Eventuele overschrijdingen van drempelwaarden van concentraties kunnen dus ook niet worden vastgesteld.

We kunnen niet voor elke testreeks formule 1 gebruiken, vanwege verschillende redenen. Hier volgt een overzicht van de testreeksen en de reden waarom ze wel of niet voldoen.

De testreeksen gedaan op 15 september hebben per testreeks/achtergrondfoto verschillende bronnen. Ze zouden eigenlijk bij het veranderen van bron een nieuwe achtergrondfoto moeten hebben. Verder zijn de testreeksen gedaan op deze dag allemaal onderdeel van deel 1, het dek-gedeelte, en we hebben besloten ons te concentreren op deel 2, het accommodatie-gedeelte.

De testreeksen gedaan op 16 september hebben slechts één achtergrondfoto. Deze ene achtergrondfoto moet dienst doen voor verscheidene cameraposities, waarbij er tussen de runs 161230 en 161427 zelfs veranderd wordt van een camerapositie aan de stuurboordzijde van het schip naar één aan de bakboordzijde. Deze testreeksen zijn ook onderdeel van deel 1 en worden ook om die reden niet beoordeeld.

Op 17 september zijn er 3 verschillende testreeksen gedaan, de reeksen 170926, 171459 en 171703. Reeks 170926 is niet bruikbaar omdat daarbij de uitlaat van de schoorsteen is getest in plaats van de ventilatieuitlaten. Reeks 171459 kunnen we niet gebruiken omdat hier de bron niet in beeld is, waardoor we de waarden van de bronintensiteit niet vinden en formule 1 niet kunnen gebruiken. Alleen reeks 171703 is bruikbaar.

Op 18 september is de 180923/181000-reeks niet bruikbaar omdat er twee verschillende camerastandpunten gebruikt worden voor één achtergrondfoto. Verder is de bron op fotoreeks 181000 en de daaropvolgende niet in beeld. De 181315-reeks maakt gebruik van één achtergrondfoto, waarbij voor twee verschillende uitstroomsnelheden $w = 0,7 \text{ ms}^{-1}$ en $w = 4 \text{ ms}^{-1}$ de windtunnelsnelheden worden gevarieerd van $u = 0 \text{ ms}^{-1}$ tot $u = 3 \text{ ms}^{-1}$ en van $u = 0 \text{ ms}^{-1}$ tot $u = 10 \text{ ms}^{-1}$.

Hier had eigenlijk voor de uitstroomsnelheid $w = 4 \text{ ms}^{-1}$ een nieuwe achtergrondfoto genomen moeten worden. Het programma 'measuring181315' slaat alle data op in één bestand. De data voor de twee verschillende uitstroomsnelheden worden van elkaar gesplitst door twee aparte delen van het plotprogramma, 'plotter181315a' en 'plotter181315b'. Voor deel b moeten we wel in ons achterhoofd houden dat we te maken hebben met een intensiteit waarvan de verkeerde achtergrondintensiteit is afgetrokken waardoor de bepaalde waarden waarschijnlijk niet juist zijn. Wel is deze testreeks geschikt om patronen in de reeks zelf te ontdekken. Reeks 181448 is onze referentiefoto waardoor deze testreeks de enige is waarbij de meetpunten voor de volle honderd procent op de juiste plaats staan. De 181725-reeks is niet bruikbaar omdat hier het vlak dat beschenen wordt door de laserstraal overdwars staat in plaats van in de lengterichting van het schip.

Op 19 september is er één testreeks gedaan, reeks 191000. Deze maakt net als de 181315-reeks gebruik van één achtergrondfoto voor twee verschillende uitstroomsnelheden $w = 0,8 \text{ ms}^{-1}$ en $w = 4 \text{ ms}^{-1}$. We zouden dus in dat geval ook beter spreken van 191000a en 191000b. De 191000a-reeks is niet bruikbaar voor analyse omdat de gecorrigeerde bronwaarden hier al negatief zijn. 191000b zullen we omdat het de enige overgebleven testreeks van deze dag is 191000 blijven noemen. Net als bij de 181315b-reeks wordt hier echter een verkeerde achtergrondfoto gebruikt om de gecorrigeerde bronwaarde te bepalen. Ook hier krijgen we dus niet de juiste waarden voor de concentraties, maar kunnen we wel patronen onderscheiden. Wel is reeks 191000 de enige testreeks waarbij de camera schuin staat opgesteld ten opzichte van het scheepsmodel in plaats van loodrecht. We krijgen nu een 2-dimensionele afbeelding van een 3-dimensionele werkelijkheid waardoor een aanzienlijk deel van de meetpunten geprojecteerd worden op het kasteel in plaats van ervoor. Ook worden deze meetpunten nu beïnvloed door de weerkaatsing op het kasteel in plaats van de verduisterde achtergrond.

Aangezien het scheepsmodel een ander albedo⁴ heeft dan de achtergrond, zullen de meetwaarden bij deze meetpunten een vertekend beeld geven.

We hebben dus de volgende bruikbare meetreeksen: 171703, 181315a en 181315b (onder voorbehoud), 181448 en 191000 (onder voorbehoud).

De verkregen resultaten van deze meetreeksen zullen besproken worden in de volgende paragraaf.

9.2 *Bespreking van de verkregen meetresultaten*

De testreeksen verschillen ten opzichte van elkaar wat betreft de locatie van de berekende meetpunten. Hierdoor kunnen ze moeilijk of niet met elkaar vergeleken worden en kunnen alleen per reeks de resultaten bekeken worden. Hoewel de grafiekjes van de plots er op het eerste gezicht hetzelfde uitzien, is er een groot verschil in de schaalverdeling langs de y-as. Deze werd aangepast naargelang de maximale meetwaarden. Zo ligt bij de 181315a-reeks de maximale waarde langs de y-as van de grafiek een factor 10 lager dan bij de 171703-reeks. Het is dus aangewezen goed deze waarde in het oog te houden om conclusies te kunnen trekken.

9.2.1 De 171703-reeks

Bij de 171703-reeks zijn een paar meetpunten dusdanig verschoven dat ze op of te dicht bij delen van het schip komen en dus last ondervinden van reflectie. Hoewel de transformatie die de meetpunten hebben ondergaan de meest geschikte is, is deze niet perfect. Voor sommige meetpunten is de transformatie beter uitgevallen dan voor andere.

⁴ Albedo: het weerkaatsingsvermogen van een object, uitgedrukt als verhouding tussen de hoeveelheid opvallende en gereflecteerde elektromagnetische straling, in dit geval licht.

Meetpunt 34 zit nu net achter de radarmast in plaats van er een stukje van verwijderd. Meetpunt 41 zat oorspronkelijk achter de stelling van de vrije val boot, maar zit er nu op. De gemeten concentratie is hier ook aanzienlijk hoger dan bij de vlakbij gelegen meetpunten. Meetpunt 25 tenslotte is nu verplaatst tot op de monkeybridge. Deze drie meetpunten zullen niet worden gebruikt in de analyse.

Op de bijgevoegde CD met bijlagen staat een Excel-bestand 'Alle Testresultaten' met daarin voor alle testreeksen de waarden van C/C_s op alle meetpunten bij de verschillende windsnelheden. Hier kunnen we zien dat in de 171703-reeks er bij sommige meetpunten negatieve waarden voor de intensiteit zijn verkregen. De negatieve waarden zijn echter zeer miniem en kunnen verklaard worden door kleine afwijkingen in de meetmethode. Omdat ze zo klein zijn, zijn ze niet duidelijk zichtbaar in de grafieken. We zullen het feit dat er negatieve waarden voor de intensiteit voorkomen negeren in onze beoordeling en de verkregen data alsnog analyseren.

We zien dat de concentratie voor de meeste meetpunten laag tot 0 is bij een windsnelheid van 0 ms^{-1} en zijn hoogste of bijna hoogste waarde bereikt bij een windsnelheid van 1 ms^{-1} waarna de concentratie geleidelijk aan afneemt. De afname van de concentratie kunnen we verklaren door de extra dispersie veroorzaakt door de toegenomen windsnelheid. Dat geldt niet voor de meetpunten 1, 2, 6, 7, 12, 13, 14, 19, 20, 21 en 26. Bij deze elf meetpunten wordt al bij een windsnelheid van 0 ms^{-1} de maximale concentratie bereikt. Dat komt omdat zij al in de initiële rookpluim zitten, welke nog niet verdund is door de wind. Voor de overige meetpunten geldt juist dat de wind de rookdeeltjes naar daar moet toevoeren, waardoor bij windsnelheid $u = 1 \text{ ms}^{-1}$ de maximale concentratie bereikt wordt. Let op dat bij meetpunt 19 de concentratie bij $u = 0 \text{ ms}^{-1}$ zelfs 1,28 keer zo hoog is als de bronconcentratie. Dat is moeilijk te verklaren en de oorzaak hiervan ligt waarschijnlijk bij meetfouten.

We kunnen de meetpunten in vijf delen onderverdelen en zullen deze ook apart behandelen:

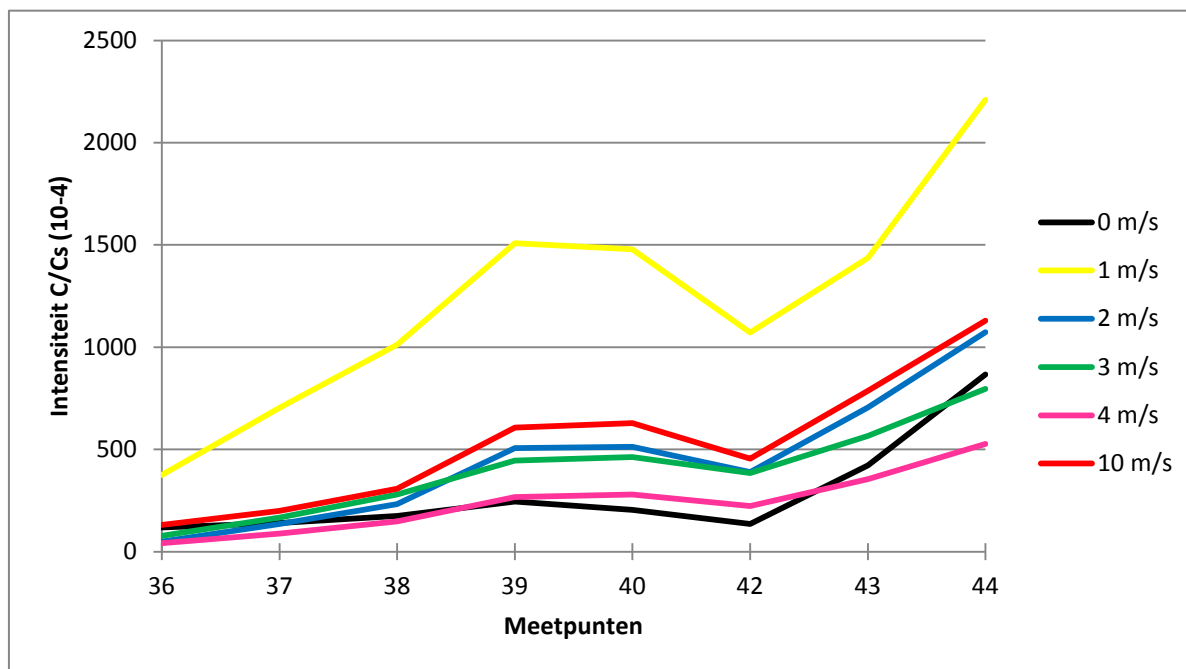
1. voor het kasteel, meetpunten 1 tot en met 27
2. boven het kasteel, meetpunten 28 tot en met 35
3. achter de schoorsteen, meetpunten 36 tot en met 39
4. op het achterdek, meetpunten 39 tot en met 42
5. achter de achtersteven, meetpunten 42, 43 en 44

De delen 3 en 4 + 4 en 5 overlappen elkaar gedeeltelijk waardoor meetpunt 39 zowel bij deel 3 als deel 4 hoort, en meetpunt 42 zowel bij deel 4 als bij deel 5.

De inlaat van de airconditioning van de accommodatie ligt in deel 2, het dichtst bij meetpunten 34 en 35. De inlaat van de airconditioning van de machinekamer ligt het dichtst bij meetpunten 39 en 40, dus op de grens van delen 3 en 4.

In het eerste gedeelte zien we dat de gemeten intensiteiten afnemen naarmate de meetpunten hoger liggen, tot ze bijna nul zijn voor meetpunten 23 en 24. Dat geldt ook voor meetpunt 25, maar daar hadden we voor besloten dat we het niet mee zouden nemen in de beoordeling. De concentraties nemen ook af bij toenemende windsnelheid, om bij $u = 10 \text{ ms}^{-1}$ weer toe te nemen. Voor de meetpunten in de delen 3, 4 en 5 is dat zichtbaar op de plots, voor de overige meetpunten zien we dat in het bestand 'Alle Testresultaten'. Als we kijken naar de foto's die horen bij de windsnelheden $u = 6 \text{ ms}^{-1}$ en $u = 10 \text{ ms}^{-1}$, de foto's van de runs 171732 en 171734, dan zien we inderdaad dat de lichtintensiteit toeneemt op de laatste foto. De gevonden meetwaarden bevestigen dat dat geldt voor alle meetpunten, met uitzondering van meetpunten 26 en 33. Het stijgen van de intensiteit laat zich niet verklaren door resultaten behaald in gelijkaardige studies in de literatuur.

In gedeelte 2 liggen de concentraties weer lager. Dat komt vanwege de hogere positie van deze meetpunten. De rookpluim is dus niet tot over het kasteel geraakt zodat zich daar minder rookdeeltjes bevinden. Ook hier neemt de concentratie af bij hogere windsnelheden, om dan weer toe te nemen bij $u = 6 \text{ ms}^{-1}$ en $u = 10 \text{ ms}^{-1}$.



Figuur 72: Intensiteiten voor meetpunten gelegen achter het kasteel

Bron: Eigen bewerking

Bij de meetpunten in deel 3 is de intensiteit hoger dan bij meetpunten gelegen op dezelfde hoogte, maar dan voor het kasteel. Dat kan veroorzaakt worden door de aanwezigheid van een zone van lagere druk achter het kasteel. Maar zoals reeds vermeld in paragraaf 4.5.2 zijn in deze testreeksen geen drukmetingen gedaan, dus kunnen we hier geen uitspraken over doen. De concentratie neemt toe bij de lager gelegen meetpunten (zie Figuur 74).

Bij deel 4, dat lager ligt dan deel 3, is de intensiteit hoger. Net als in deel 1 neemt dus de intensiteit af naarmate de meetpunten hoger komen te liggen. De intensiteit in deel 4 neemt ook af naarmate de meetpunten verder van het kasteel verwijderd zijn.

In de grafiek weergegeven in Figuur 74 merken we op dat bij de meetpunten 39 en 40, dichtbij de inlaat van de airconditioning van de machinekamer, een hogere intensiteit is dan bij de omringende meetpunten. De intensiteit bij de meetpunten gelegen achter de achtersteven (deel 5) neemt ook toe naarmate ze lager liggen.

Zoals we in deel 1 zagen is de intensiteit in alle meetpunten laag bij $u = 0 \text{ ms}^{-1}$, wordt de hoogste intensiteitswaarde bereikt bij $u = 1 \text{ ms}^{-1}$, om dan bij toenemende windsnelheden steeds meer af te nemen. Alleen bij $u = 10 \text{ ms}^{-1}$ neemt de intensiteit weer toe. Hier worden waarden behaald die tot drie maal zo hoog liggen als bij $u = 4 \text{ ms}^{-1}$. Zoals eerder aangehaald is deze stijging niet in overeenstemming met testresultaten behaald in andere studies. Over de oorzaak hiervan kunnen we hier echter niet veel zeggen, maar deze kan liggen aan een verandering in de testomstandigheden.

9.2.2 De 181315a-reeks

Op de foto's van runs 181315 (zie Figuur 75) en 181327 staat achter het kasteel een camerastatief opgesteld. Dat statief beïnvloedt de intensiteit op de achtergrondfoto voor de meetpunten 37 tot en met 40.



Figuur 73: Foto van run 181315 met statief achter het kasteel

Bron: Eigen bewerking

Door de reflectie van licht op het statief wordt de waarde van I_b bij de meetpunten 37 tot en met 40 hoger. Als deze waarden van I_b nu afgetrokken worden van de waarden van I , krijgen we negatieve waarden voor de gecorrigeerde intensiteit $C = I - I_b$. Deze vier meetpunten zullen in de beoordeling dan ook niet meegenomen worden. Op foto 181335 staat het statief meer naar voren, maar hier worden geen meetpunten beïnvloed. In de overige foto's is het statief niet aanwezig.

Net als bij de 171703-reeks is bij de meeste meetpunten de intensiteit laag bij een windsnelheid van 0 ms^{-1} waarna hij bij 1 ms^{-1} toeneemt. In tegenstelling tot de 171703-reeks nemen de concentraties bij nog hogere windsnelheden echter niet af, maar juist toe. Dat is in tegenspraak met het gegeven dat bij hogere windsnelheid de dispersie toeneemt en dus de concentratie vermindert (Hanna et al., 1982, p. 17).

Bekijken we echter de bijbehorende gemiddelde foto's (zie Figuur 76 en Figuur 77 of de foto's in de bijlagen op de CD), dan valt ons op dat tussen de runs 181340 en 181343 er met het blote oog al een duidelijk verschil zichtbaar is, vooral op de satellietontvanger. Er is meer reflectie en dus meer licht op de foto van run 181343 dan op de foto van run 181340.



Figuur 74: De gemiddelde foto van run 181340
Bron: Eigen bewerking



Figuur 75: De gemiddelde foto van run 181343
Bron: Eigen bewerking

De foto's met de meetpunten erop die hier aangehaald en besproken worden komen allemaal uit de verschillende programma's 'measuringxxxxx'. Tijdens het doorlopen van dat programma wordt telkens een foto getoond van de run die op dat moment door het programma berekend wordt. Elk van deze foto's wordt op dezelfde manier gegenereerd, met telkens dezelfde vermenigvuldigingsfactor om de lichtintensiteit te vergroten. Deze vermenigvuldigingsfactor dient alleen om de foto's visueel te kunnen beoordelen, voor SciLab maakt het niet uit hoe donker het is op de foto's. De reden van de toegenomen intensiteit op de foto van run 181343 ten opzichte van de foto van run 181340 ligt dus niet aan andere parameters in het programma 'measuringxxxxx' en moet ergens anders gezocht worden. De verhoging van de lichtintensiteit is de reden waarom de concentratiewaarden toenemen bij hogere windsnelheden en wordt veroorzaakt door veranderde testomstandigheden. De runs 181343 en 181346 zijn intenser belicht dan de overige runs en kunnen dus niet beoordeeld worden. Hierdoor houden we te weinig data over in deze testreeks om een conclusie te kunnen trekken. De 181315a-reeks is dus niet bruikbaar voor analyse.

9.2.3 De 181315b-reeks

Net als bij de 181315a-reeks worden de meetpunten 37 tot en met 40 in de 181315b-reeks beïnvloed door de aanwezigheid van het statief in de achtergrondfoto. Deze vier meetpunten worden ook hier niet meegenomen in de beoordeling van de meetgegevens.



Figuur 76: De gemiddelde foto van run 181416
Bron: Eigen bewerking

Bij de 181315b-reeks zien we voor alle gedeeltes dat er een intensiteitsmaximum wordt bereikt voor $u = 1 \text{ ms}^{-1}$ of $u = 1,5 \text{ ms}^{-1}$. Bij een windsnelheid van 2 ms^{-1} tot en met 5 ms^{-1} neemt de intensiteit af om dan weer te stijgen bij $u = 7 \text{ ms}^{-1}$ en $u = 10 \text{ ms}^{-1}$. Ook hier is de stijging van de waargenomen concentratie te verklaren in verschillen in de meetomstandigheden.



Figuur 77: De gemiddelde foto van run 181419
Bron: Eigen bewerking

Kijken we namelijk naar de gemiddelde foto's van de 18135b-reeks dan zien we dat bij de foto's van run 181419 (hier is de windsnelheid $u = 7 \text{ ms}^{-1}$) en run 181422 ($u = 10 \text{ ms}^{-1}$) het gebied dat wordt bestreken door de laserstraal naar rechts is opgeschoven ten opzichte van de foto's van de eerdere runs. In Figuur 78 en Figuur 79 is duidelijk de verschoven laserstraal zichtbaar. Het verschoven laservlak belicht nu de bron niet meer. Hierdoor wordt de intensiteit I_s van de bron in de runs 181419, 181422 en 181425 een factor 10 tot 15 keer lager dan in de runs daarvoor en wordt de waarde van C/C_s in de meetpunten van deze drie runs hoger. De meetwaarden voor de windsnelheden $u = 7 \text{ ms}^{-1}$ en $u = 10 \text{ ms}^{-1}$ (181419 en 181422) kunnen dus niet meegenomen worden in de beoordeling. Tevens zijn de meetwaarden in de achtergrondfoto verzadigd met rook (181425) onbruikbaar geworden. In tegenstelling tot de 181315a-reeks houden we nu wel voldoende gegevens over om een beoordeling te kunnen doen.

Net als bij de voorgaande reeksen stijgt de concentratie bij de meetpunten bij een stijgende windsnelheid van $u = 0 \text{ ms}^{-1}$ tot $u = 1 \text{ ms}^{-1}$.

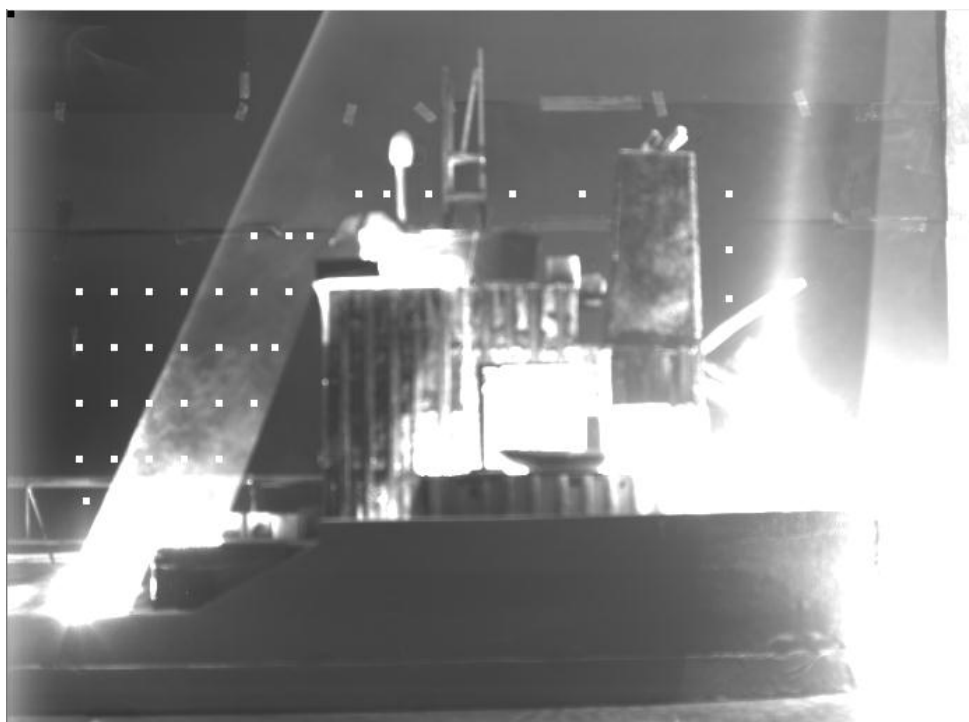
De meetpunten 1, 2, 6, 7, 12, 13, 14, 19, 20, 21 en 26 bevinden zich in de initiële rookpluim en hebben dus relatief hoge concentraties bij windsnelheid $u = 0 \text{ ms}^{-1}$. We zien voor alle meetpunten dat het maximum van de concentratie bereikt wordt bij een windsnelheid van 1 ms^{-1} , waarna hij afneemt, net als bij de 171703-reeks. Aangezien de helft van de meetpunten achter het kasteel (in de delen 3 tot en met 5) beïnvloed worden door de aanwezigheid van het camerastatief, kunnen we de meetpunten daar niet vergelijken met de meetpunten voor het kasteel.

In deel 1 zien we dat voor hoger gelegen meetpunten de concentratie afneemt, en de concentratiewaarden in deel 2 liggen dan weer lager dan die in deel 1. Deze meetpunten liggen hoger, en dus verder van de bron verwijderd. Hierdoor neemt de dispersie toe. Dat fenomeen zien we ook bij meetpunten die op dezelfde hoogte liggen, maar die steeds een beetje verder van de bron verwijderd zijn, zie bijvoorbeeld de steeds verder afnemende concentraties in de op dezelfde hoogte gelegen meetpunten 3, 4, 5 of 8, 9, 10 en 11.

Testreeks 181315b maakt gebruik van dezelfde achtergrondfoto als reeks 181315a. Omdat tussen de testreeksen 181315a en 181315b de windtunnel niet leeggeblazen is, zijn de intensiteiten I_b die afgetrokken worden van I om de gecorrigeerde intensiteitswaarden te krijgen niet de juiste. In de 181315b-reeks is er meer rook aanwezig dan bij de 181315a-reeks. De intensiteiten op de achtergrondfoto zijn dus te laag, wat als gevolg heeft dat de gecorrigeerde intensiteiten te hoog worden. Dat is de oorzaak van de hogere waarden langs de y-as van de plots van reeks 181315b ten opzichte van die van reeks 181315a. Hierdoor kunnen we niets zeggen over de hoogte van de concentratie, alleen over de patronen die we waarnemen binnen deze reeks.

9.2.4 De 181448-reeks

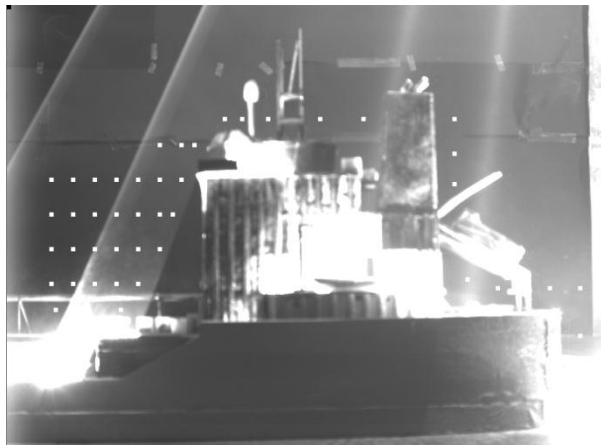
Voor deze reeks geldt hetzelfde als voor de reeksen 181315a en 181315b. De 181448-reeks bestaat eigenlijk ook uit twee aparte delen met twee verschillende uitstroomsnelheden $w = 0,7 \text{ ms}^{-1}$ en $w = 4 \text{ ms}^{-1}$ die beiden van dezelfde achtergrondfoto gebruik maken. De beelden voor $w = 0,7 \text{ ms}^{-1}$ hebben wij echter nooit beoordeeld omdat de rookpluim hier niet zichtbaar was en we dus de maximale bronintensiteit en de locatie daarvan niet konden bepalen. Dat zou dan de 181448a-reeks moeten zijn. Tussen de twee reeksen is de windtunnel niet schoon geblazen. Bij de testsessies met $w = 4 \text{ ms}^{-1}$ die dan de 181448b-reeks vormen maken we dus gebruik van de achtergrondfoto van reeks 181448a waar de rookconcentratie lager is. De gecorrigeerde intensiteiten in reeks 181448b zijn dus te hoog. Als we hier rekening mee houden, en niets zeggen over de hoogte van de concentratie maar alleen over de concentratieveranderingen bij verschillende windsnelheden en plaatsen van de meetpunten, zou de 181448b-reeks bruikbaar zijn voor beoordeling.



Figuur 78: De gemiddelde foto van run 181616

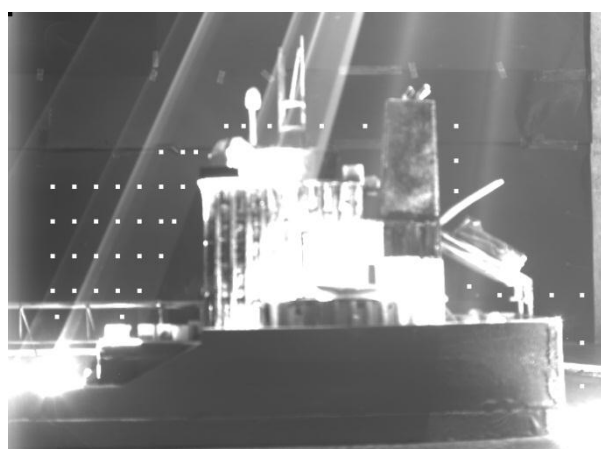
Bron: Eigen bewerking

Ook hier is echter de laserstraal te veel verschoven binnen de testreeks. Bij de 181315b-reeks waren er slechts twee verschillende gebieden die door de laserstraal worden bestreken, nu zijn het er vier (zie Figuur 80 voor de foto van run 181616 en Figuur 81 voor de foto van run 181625).



Figuur 79: De gemiddelde foto van run 181625
Bron: Eigen bewerking

Bij run 181630 (zie Figuur 82) lijkt het zelfs alsof de laserstraal in één run verschillende gebieden bestrijkt. Het veranderen van de positie van het laservlak heeft tot gevolg dat bij sommige meetpunten de maximale intensiteiten meer dan vijf maal zo hoog waren als de intensiteit bij de bron. Dat is absoluut onmogelijk en de data van de 181448(b)-reeks zijn dus niet geschikt voor analyse. Datzelfde geldt dus ook voor de achtergrondfoto verzadigd met rook: de foto van run 181633.



Figuur 80: De gemiddelde foto van run 181630
Bron: Eigen bewerking

9.2.5 De 191000-reeks

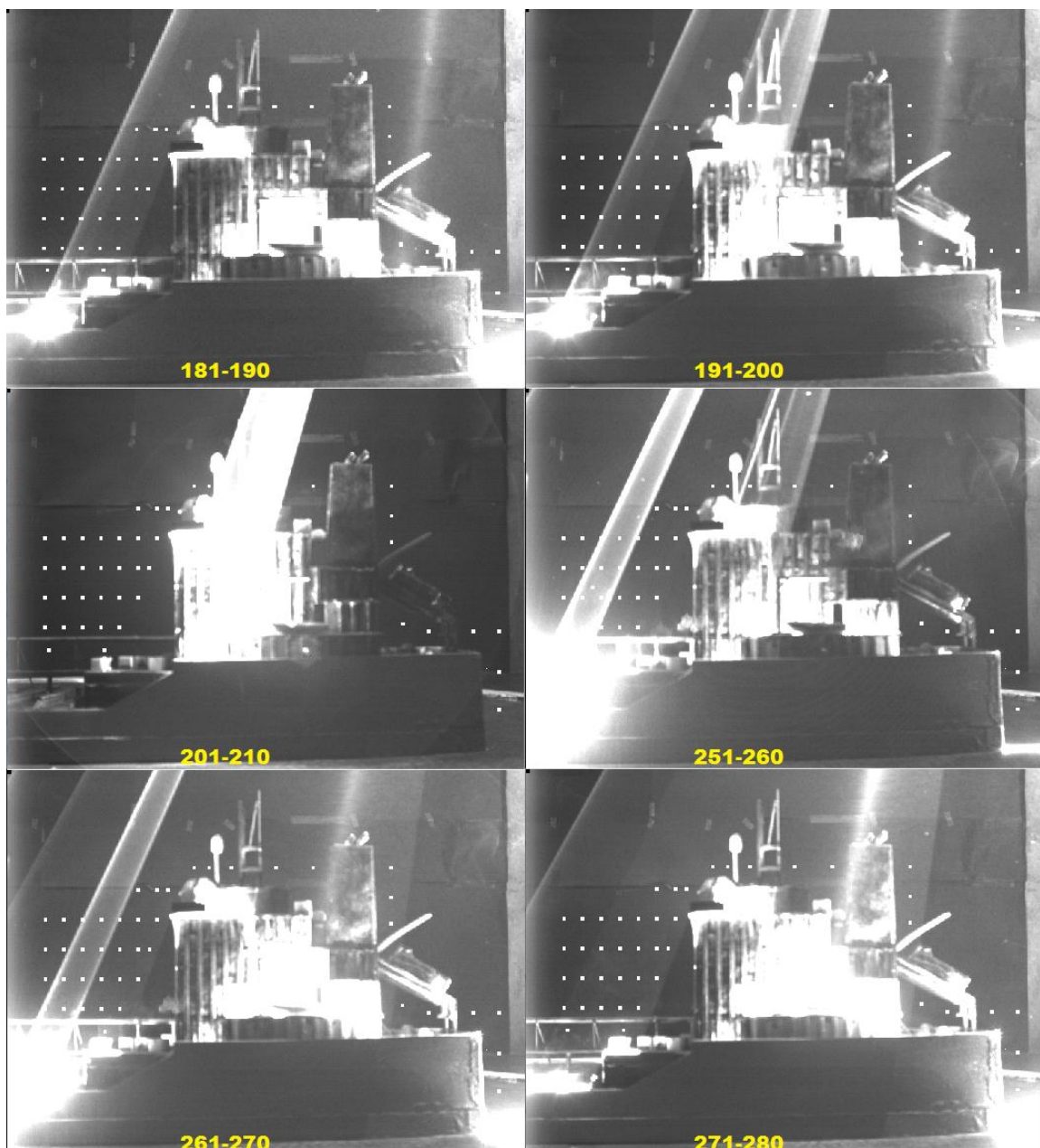
Deze reeks valt ook te splitsen in twee aparte delen 191000a en 191000b. Reeks 191000a met $w = 0,7 \text{ ms}^{-1}$ hebben we nooit beoordeeld omdat hier al bij de gecorrigeerde bronintensiteiten negatieve waarden werden bereikt. 191000b met $w = 4 \text{ ms}^{-1}$ maakt gebruik van de achtergrondfoto van de 191000a-reeks. De gevonden intensiteitswaarden zullen dus waarschijnlijk te hoog zijn, maar wel geschikt om een patroon te kunnen ontdekken.

De 191000-reeks verschilt ten opzichte van de andere reeksen in het feit dat het scheepsmodel nu schuin op de camerarichting staat opgesteld in plaats van loodrecht.

Ook zijn de locaties van de meetpunten nu anders en worden de meetpunten anders verdeeld (zie bijlage 5 en bijlage 10). Kijken we naar de plots, dan zien we dat bij een windsnelheid $u = 3 \text{ ms}^{-1}$ een extreme waarde voor de concentratie wordt bereikt die veel hoger is dan de waarde bij de andere windsnelheden. Deze extreme waarde kan zowel positief als negatief zijn. Bij de meetwaarden valt op dat bij veel meetpunten negatieve waarden gemeten worden. Op de foto's van de runs is te zien dat ook in deze reeks het vlak van de laserstraal verspringt, maar dat is pas tussen run 191124 en run 191128, dus bij windsnelheden van $u = 5 \text{ ms}^{-1}$ en $u = 10 \text{ ms}^{-1}$. Dat verklaart niet dat er bij de lagere windsnelheden negatieve intensiteiten behaald worden. Als we de foto's van run 191122 vergelijken met de achtergrondfoto 191000, zien we dat de meetpunten achter het kasteel in run 191122 meer licht hebben dan in run 191000, en de meetpunten voor het kasteel juist minder. Hierdoor ontstaan de positieve en negatieve extremen op de plots van reeks 191000. Het verschil in belichting is hier niet te verklaren. Verder heeft de schuine opstelling van de camera wellicht een negatieve invloed op de metingen of zijn er andere factoren die de metingen bij deze reeks beïnvloeden. De 191000-reeks inclusief run 191133, de achtergrondfoto verzadigd met rook, is dus niet geschikt voor analyse.

9.2.6 Waardoor ontstaat het verschil in belichting?

Op de gemiddelde foto van run 181630 (Figuur 82) lijkt het alsof het laservlak verschillende posities inneemt, terwijl het stil zou moeten staan. Als het laservlak inderdaad verschillende posities inneemt, moet het veranderen van die positie zichtbaar zijn op de individuele foto's waaruit die run is samengesteld. Om dat te kunnen beoordelen werd het programma 'measuring181448' zo aangepast dat het alleen nog maar de runs 181448 en 181630 beoordeelde, in plaats van run 181448 en de overige vijf runs die bij de 181448-reeks horen.



Figuur 81: De zes verschillende belichtingen in run 181630

Bron: Eigen bewerking

Run 181448 moet hier blijven omdat het de achtergrondfoto is van deze testreeks. Als we deze weglaten werkt het programma 'measuring181448' niet meer. De foto van deze run wordt echter niet bekeken nu, het gaat ons om de run 181630. Er werd in het script van het programma de optie verwerkt om te kunnen kiezen welke van de 369 foto's van de run er beoordeeld worden. De 369 foto's worden verdeeld in zevenendertig delen van elk tien of negen foto's: foto 1 tot en met 10, foto 11 tot en met 20, enzovoort tot foto 351 tot en met 360 en als laatste foto 361 tot en met 369. Het programma maakt nu van de tien foto's in het gekozen deel één gemiddelde foto. De 37 foto's van run 181630 staan op de CD met bijlagen, samen met 19 foto's van run 171732. Deze laatste foto's staan er ook bij om te kunnen vergelijken met een run waarbij de belichting onveranderd blijft.

Als we nu deze zevenendertig gemiddelde foto's bekijken, zien we het vlak dat door de laserstraal beschenen wordt vijf keer verspringen waardoor we dus zes verschillende belichtingsomstandigheden hebben in run 181630 (zie Figuur 83). Het veranderen van de positie van het laservlak op de foto's kan verschillende oorzaken hebben. De eerste oorzaak is dat de synchronisatie tussen de sluitertijd van de camera en de oscillerende spiegel die de beweging van de laserstraal bepaalt (Brichart, 2009, pp. 53 en 54 en De Kerf, 2009, pp. 90-93) niet meer correct verliep. Als de sluitertijd van de camera bijvoorbeeld te kort was, zorgt dat ervoor dat de laserstraal niet zijn hele traject van beginpositie tot eindpositie heeft doorlopen op het moment dat de sluiters dicht is. Op de foto is dan slechts een gedeelte van het laservlak zichtbaar. De tweede oorzaak kan zijn dat de spiegel die de richting van de laserstraal bepaalt niet bewoog zoals zou moeten. Het is nu niet meer te achterhalen of dat dat komt door een fout in de binnenkomende puls, of door een fout in de aansturing van de spiegel zelf. Welke van de twee oorzaken of eventueel een derde reden is van de verschillen in belichting kunnen we nu niet meer zeggen. We moeten die verschillen wel in onze beoordeling meenemen omdat ze de testresultaten aanzienlijk beïnvloeden.

9.3 Conclusie

Er zijn verscheidene fouten gebeurd tijdens de metingen, waaronder testopstellingen die veranderden gedurende een testreeks waardoor runs binnen die testreeks niet in aanmerking kwamen om beoordeeld te worden. De omstandigheden bij de verschillende testreeksen waren ook steeds iets anders. Hierdoor kunnen de verschillende reeksen niet met elkaar vergeleken worden. Er blijven twee testreeksen over die geschikt zijn voor analyse: de reeksen 171703 en 181315b.

Uit de gegevens verkregen in die twee reeksen valt op te maken dat hoe hoger de meetpunten liggen, of hoe verder de meetpunten van de bron af liggen, hoe groter de dispersie is. De concentratie neemt dus af. Bij de hoger gelegen meetpunten geldt verder dat de concentratie eerst toeneemt bij hogere windsnelheden, omdat de rookdeeltjes naar die meetpunten gevoerd moeten worden. Bij nog hogere windsnelheden daalt de concentratie weer. De inlaat van de airconditioning voor de accommodatie lijkt zich dus op een gunstige positie te bevinden.

Verder zijn er aanwijzingen dat bij de meetpunten achter het kasteel de concentratie hoger is dan bij meetpunten op dezelfde hoogte gelegen voor het kasteel. De hypothese dat dat veroorzaakt wordt door een gebied van lagere druk achter het kasteel dient in volgende testen onderzocht te worden.

Achter het kasteel neemt de concentratie ook toe bij de lager gelegen meetpunten, en ze neemt af naarmate de meetpunten verder van het kasteel verwijderd zijn. De concentratie is het hoogst voor de meetpunten 39 en 40, die liggen in de hoek gevormd door het achterdek en de schoorsteen. Maar omdat we slechts twee testreeksen hebben beoordeeld, en we bij reeks 181315b de helft van de meetpunten achter het kasteel niet hebben kunnen gebruiken, hebben we niet genoeg data om hier harde conclusies aan te verbinden. Bij volgende metingen dienen we zeker aandacht te besteden aan de meetpunten achter en boven het kasteel, omdat hier de inlaatopeningen van de airconditioning zitten.

Hoofdstuk 10 Aanpassingen bij toekomstig onderzoek

10.1 Inleiding

Uit de analyse van de testresultaten behaald bij de vorige testen blijkt dat er fouten bij de metingen en testopstelling zijn gemaakt. Op het moment van schrijven van dit eindwerk is er sprake van volgende testen te doen in de windtunnel van de Universiteit van Luik. Om dezelfde fouten bij deze windtunnelproeven te voorkomen, dienen we aanpassingen te doen om de testopstelling meer in overeenstemming te laten zijn met de werkelijkheid, de testresultaten niet te laten beïnvloeden door eigenschappen van het scheepsmodel enzovoorts. Deze aanpassingen zullen in dit hoofdstuk besproken worden.

10.2 Grotere ventilatie-uitlaten en meer ventilatie-uitlaten

Zoals vermeld in paragraaf 2.2.2 is de gebruikte diameter van de uitlaatopeningen te klein. Ze dient 2,22 centimeter te zijn in plaats van de huidige 0,8 centimeter. In de doe-het-zelf-handel zijn koperen buizen verkrijgbaar met een uitwendige diameter van 22 millimeter en een wanddikte van 1,1 millimeter. De inwendige diameter wordt dan 1,98 centimeter. Dat is niet precies juist, maar deze waarde voldoet veel beter aan de gelijkvormigheidseisen dan 0,8 centimeter.

Om de testen met verschillende onderlinge hoeken ϕ van de uitlaatopeningen te kunnen doen (zie paragraaf 5.5) moeten we nog een aantal ventilatie-uitlaten dat wel voorkomt op de 'Crystal Emerald' maar niet gebruikt wordt in ons model aanbrengen. Vooral 1PS en 6PS-Centre dienen aangebracht te worden.

10.3 Minder reflectie

Om minder last te hebben van reflectie bij het zoeken naar de maximale bronwaarden en geen overbelichte delen van foto's te krijgen, is het beter om het scheepsmodel in een donkere kleur te verven, liefst zwart. Onze voorkeur gaat uit naar een matte, zo min mogelijk reflecterende verf.

De koperen buisjes die gebruikt worden voor de ventilatie-uitlaten moeten zeker ook mee geverfd worden, want deze zijn hoogst reflecterend en beïnvloeden de metingen sterk.

10.4 Vaste camerapositie

Het veranderen van de camerapositie en de mate van zoom brengt veel problemen met zich mee bij het analyseren van de testdata en dient zo veel mogelijk vermeden te worden. In volgende testen plaatsen we de camera dusdanig dat de gebruikte ventilatieopening(en) in beeld komen, samen met het kasteel en het achterdek van het schip. Staat de camera eenmaal juist opgesteld, dan blijven we er verder af. Ter controle van de positie kunnen we op ons zwart geschilderde schip lichtgekleurde markeringen aanbrengen op de vaste punten die we gebruikt hebben om de transformatie te bepalen in Hoofdstuk 8. Eventueel kunnen ook nieuwe vaste punten aangebracht worden, met een zo groot mogelijke spreiding ten opzichte van elkaar. Als dan drie van die vaste punten zich op dezelfde positie in de foto bevinden, kunnen we ervan uitgaan dat de camerapositie onveranderd is.

10.5 Het modelleren van de grenslaag

De grenslaag van de windtunnel dient goed gemodelleerd te worden. De 'Crystal Emerald' bevindt zich tijdens het ventileren van de tanks op zee, dus de roughness length z_0 van de testopstelling die we dienen te gebruiken is zeer gering, namelijk slechts 0,0002 meter, of 0,2 millimeter (Wieringa et al., 2001, p. 8).

Door het meten van de windsnelheden op twee verschillende hoogtes z_1 en z_2 kunnen we met behulp van formule 15 de roughness length z_0 bepalen. Met z_0 , z_1 en $u_{(z_1)}$ kunnen we vervolgens met behulp van formule 12 de frictie-snelheid u^* bepalen. Tenslotte bepalen we aan de hand van formule 16 het ruwheids-Reynoldsgetal Re^* dat een minimale waarde van 5 moet hebben om de grenslaag voldoende turbulent te laten zijn (zie paragraaf 2.4). Op de bijgevoegde CD staat een programma 'Grenslaag modelleren' waarin alle benodigde formules staan. De gegevens die in het groen zijn aangeduid dienen per testreeks bepaald te worden en ingevuld in het programma.

10.6 Een veranderbaar kasteel en meer dan één bron

Bij volgende metingen zullen er testen gedaan worden met een veranderbaar kasteel. Hoewel het scheepsmodel dan natuurlijk niet meer overeenkomt met het werkelijke schip, kunnen we op die manier goed onderzoeken welke invloed het kasteel heeft op de dispersie van de ladingdeeltjes.

Net als bij de studies besproken in hoofdstuk 5 zal er onderzoek gedaan worden naar de invloed die het ventileren van meerdere bronnen tegelijk heeft op de verspreiding van de ladingsdeeltjes. Tijdens het ventileren kiest men natuurlijk het beste om alle tanks tegelijk te ventileren, om zo snel mogelijk klaar te zijn. Maar als dat niet mogelijk is en er een keuze gemaakt moet worden welke tanks eerst en welke samen te ventileren, welke tanks kunnen er dan het beste tegelijk geventileerd worden?

10.7 Een actief model in plaats van een passief en drukmetingen

In werkelijkheid zuigt de airconditioninginlaat tijdens het ventileren van de tanks lucht naar binnen met een debiet $Q = 70.000 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Als de oppervlakte van die inlaat 2 m^2 bedraagt, komt dat neer op 35.000 mh^{-1} , dat is bijna 10 ms^{-1} . In ons scheepsmodel zullen we dan ook een voorziening moeten treffen om dat na te bootsen, want dat kan een groot effect hebben op de testresultaten. Bij het ontwikkelen van de McLaren F1 straatauto hebben de ontwerpers gebruik gemaakt van een propeller aangedreven door een motor uit een modelvliegtuigje om de instroom van koellucht in het motorcompartiment te verhogen. Het installeren van dit motortje had grote gevolgen: de drukverdeling op het model en de luchtstromingen rond het model waren aanzienlijk anders dan zonder het motortje (Nye et al., 1999, p. 79). Aangezien het debiet van de ventilator in het motorcompartiment van de auto veel lager ligt dan het debiet van de inlaat van de airconditioning bij de 'Crystal Emerald' is er een grote kans dat dit in ons geval ook zo is.

In de oorspronkelijke testen is er nooit onderzoek gedaan naar de druk en de drukverdeling op het model. De testresultaten uit de vorige metingen geven aanleiding te denken dat de inlaat van de airconditioning nu op een plaats van lage druk zit, met verhoogde concentratiewaarden tot gevolg. Het is echter aangewezen om de inlaat van de airconditioning op plaatsen van hoge(re) druk te positioneren, en de uitlaat op plaatsen van lage(re) druk. Op deze manier bevordert de natuurlijke stroming van de lucht de efficiëntie van de airconditioning. In de windtunnel van Luik kunnen we afhankelijk van de gebruikte meetmethode tot 18 of 64 drukmetingen verspreid over het scheepsmodel tegelijk uitvoeren. In samenspraak met de mensen van de Universiteit Luik moet bepaald worden welke meetmethode voor ons het beste is, omdat we niet willen dat de drukmetingen de testresultaten (te veel) beïnvloeden.

10.8 Maximale bronwaarde

In alle metingen die worden uitgevoerd moet de locatie van de maximale bronwaarde goed in het oog gehouden worden. Deze moet zich binnen de Potential Core bevinden en kan niet daarbuiten gevonden worden. Door vooraf een gebied met een hoogte van 7 maal de diameter van de ventilatie-uitlaten aan te duiden waarin we met SourceLocater de maximale bronwaarde zoeken en daarbuiten niet, kunnen we aan deze voorwaarde voldoen.

10.9 Constante belichting

De basis van dit onderzoek is de lichtintensiteit bij de meetpunten en bij de bron. Deze intensiteiten komen overeen met de concentratie van de rookdeeltjes waarover we een uitspraak willen doen en moeten dus zeker altijd hetzelfde blijven. De lichtintensiteit was bij dit onderzoek helaas niet constant tussen twee reeksen in. Er waren ook runs binnen één reeks waartussen de belichting veranderde, en zelfs één run waarin we zes verschillende belichtingsomstandigheden waarnamen. Door deze veranderende belichting is er veel data uit de testen niet bruikbaar voor analyse. Bij volgende proeven moeten we zeker in de gaten houden dat de belichting bij elke run in één reeks hetzelfde blijft om alle runs in die reeks te kunnen beoordelen. Het liefst houden we de belichting tussen twee reeksen ook hetzelfde, maar het is van iets minder groot belang mocht dat niet realiseerbaar zijn.

Hoofdstuk 11 Testschema voor volgende onderzoeken

11.1 Dag 1: Opstellen en proefdraaien

Als we bij een volgend onderzoek gebruik gaan maken van de windtunnel van de Universiteit Luik is de testomgeving voor iedereen nieuw. We moeten ons dan eerst familiariseren met de windtunnel, de rookgeneratoren, de meetapparatuur enzovoort. Hiervoor zullen we dag 1 gebruiken. Hoe variëren we de windsnelheid u , de uitstroomsnelheid w , hoe gebruiken we de camera's en de anemometers, de concentratiemeters en de computer? Een hele dag is een lange tijd, dus waarschijnlijk houden we tijd over om na het installeren van de testopstelling en nadat we ons ermee vertrouwd gemaakt hebben al een begin te maken met de testen.

11.2 Dag 2: Testen met één bron

Dit zijn in grote lijnen gelijkaardige testen zoals die gedaan in het Von Karman Instituut. We zullen hier telkens gebruik maken van één bron, en dan bij gelijkblijvende uitstroomsnelheid w de windsnelheid u veranderen. Deze testen worden dan herhaald voor verschillende bronnen, steeds dichterbij het kasteel. De testen worden op deze manier gedaan om de invloed van de windsnelheid op de concentratie te meten, en de invloed van de verschillende bronnen op de concentratie. Bij de testen gedaan in het Von Karman Instituut is het grootste aantal proeven dat uitgevoerd is op één dag meer dan vijftig. Rekening houdend met eventuele vertraging gaan we ervan uit dat we op één dag minder proeven kunnen doen. Eén testreeks bestaat uit acht runs, dus zullen we op één dag zes of zeven testreeksen kunnen doen, dus achtenveertig of zesenvijftig runs. Dag 2 en 3 hebben nu meer runs, maar op dag 1 wordt er waarschijnlijk eerder gestart met de testen, dus worden die runs verspreid over drie dagen in plaats van twee.

Run	Bron	w (ms ⁻¹)	u (ms ⁻¹)	Opm.
1	1PS	0	0	Achtergrondfoto
2	1PS	0,55	1	
3	1PS	0,55	2	
4	1PS	0,55	3	
5	1PS	0,55	4	
6	1PS	0,55	6	
7	1PS	0,55	10	
8	1PS	0	0	Restrookfoto
9	1PS	0	0	Achtergrondfoto
10	1PS	4	1	
11	1PS	4	2	
12	1PS	4	3	
13	1PS	4	4	
14	1PS	4	6	
15	1PS	4	10	
16	1PS	0	0	Restrookfoto
17	4PS	0	0	Achtergrondfoto
18	4PS	0,55	1	
19	4PS	0,55	2	
20	4PS	0,55	3	
21	4PS	0,55	4	
22	4PS	0,55	6	
23	4PS	0,55	10	
24	4PS	0	0	Restrookfoto
25	4PS	0	0	Achtergrondfoto
26	4PS	4	1	
27	4PS	4	2	
28	4PS	4	3	
29	4PS	4	4	
30	4PS	4	6	
31	4PS	4	10	
32	4PS	0	0	Restrookfoto
33	5PS	0	0	Achtergrondfoto
34	5PS	0,55	1	
35	5PS	0,55	2	
36	5PS	0,55	3	
37	5PS	0,55	4	
38	5PS	0,55	6	
39	5PS	0,55	10	
40	5PS	0	0	Restrookfoto
41	5PS	0	0	Achtergrondfoto
42	5PS	4	1	
43	5PS	4	2	
44	5PS	4	3	
45	5PS	4	4	
46	5PS	4	6	

Run	Bron	w (ms ⁻¹)	u (ms ⁻¹)	Opm.
47	5PS	4	10	
48	5PS	0	0	Restrookfoto
49	6PS-Centre	0	0	Achtergrondfoto
50	6PS-Centre	0,55	1	
51	6PS-Centre	0,55	2	
52	6PS-Centre	0,55	3	
53	6PS-Centre	0,55	4	
54	6PS-Centre	0,55	6	
55	6PS-Centre	0,55	10	
56	6PS-Centre	0	0	Restrookfoto

11.3 Dag 3: Vervolg dag 2 + twee bronnen met diverse hoeken φ

Run	Bron	w (ms ⁻¹)	u (ms ⁻¹)	Opm.
57	6PS-Centre	0	0	Achtergrondfoto
58	6PS-Centre	4	1	
59	6PS-Centre	4	2	
60	6PS-Centre	4	3	
61	6PS-Centre	4	4	
62	6PS-Centre	4	6	
63	6PS-Centre	4	10	
64	6PS-Centre	0	0	Restrookfoto
65	8PS	0	0	Achtergrondfoto
66	8PS	0,55	1	
67	8PS	0,55	2	
68	8PS	0,55	3	
69	8PS	0,55	4	
70	8PS	0,55	6	
71	8PS	0,55	10	
72	8PS	0	0	Restrookfoto
73	8PS	0	0	Achtergrondfoto
74	8PS	4	1	
75	8PS	4	2	
76	8PS	4	3	
77	8PS	4	4	
78	8PS	4	6	
79	8PS	4	10	
80	8PS	0	0	Restrookfoto

Nadat we de testen met één bron afgerond hebben, doen we proeven met twee bronnen waarbij we de hoek φ van die bronnen ten opzichte van de windrichting aanpassen. Om goed te kunnen uitmaken welke bron nu wat bijdraagt aan de concentratie, doen we eerst elke bron apart, en dan de twee bronnen samen.

Run	Bron	w (ms ⁻¹)	u (ms ⁻¹)	Opm.
81	geen	0	0	Achtergrondfoto
82	6PS-Centre	0,55	1	$\varphi=0^\circ$
83	8PS	0,55	1	$\varphi=0^\circ$
84	6PS-C + 8PS	0,55	1	$\varphi=0^\circ$
85	geen	0	0	Restrookfoto
86	geen	0	0	Achtergrondfoto
87	6PS-Centre	0,55	4	$\varphi=0^\circ$
88	8PS	0,55	4	$\varphi=0^\circ$
89	6PS-C + 8PS	0,55	4	$\varphi=0^\circ$
90	Geen	0	0	Restrookfoto
91	geen	0	0	Achtergrondfoto
92	6PS-Centre	0,55	10	$\varphi=0^\circ$
93	8PS	0,55	10	$\varphi=0^\circ$
94	6PS-C + 8PS	0,55	10	$\varphi=0^\circ$
95	geen	0	0	Restrookfoto
96	geen	0	0	Achtergrondfoto
97	6PS-Centre	0,55	1	$\varphi=50^\circ$
98	7PS	0,55	1	$\varphi=50^\circ$
99	6PS-C + 7PS	0,55	1	$\varphi=50^\circ$
100	geen	0	0	Restrookfoto
101	geen	0	0	Achtergrondfoto
102	6PS-Centre	0,55	4	$\varphi=50^\circ$
103	7PS	0,55	4	$\varphi=50^\circ$
104	6PS-C + 7PS	0,55	4	$\varphi=50^\circ$
105	geen	0	0	Restrookfoto
106	geen	0	0	Achtergrondfoto
107	6PS-Centre	0,55	10	$\varphi=50^\circ$
108	7PS	0,55	10	$\varphi=50^\circ$
109	6PS-C + 7PS	0,55	10	$\varphi=50^\circ$
110	geen	0	0	Restrookfoto
111	geen	0	0	Achtergrondfoto
112	7PS	0,55	1	$\varphi=90^\circ$
113	7SB	0,55	1	$\varphi=90^\circ$
114	7PS + 7SB	0,55	1	$\varphi=90^\circ$
115	geen	0	0	Restrookfoto
116	geen	0	0	Achtergrondfoto
117	7PS	0,55	4	$\varphi=90^\circ$
118	7SB	0,55	4	$\varphi=90^\circ$

Run	Bron	w (ms ⁻¹)	u (ms ⁻¹)	Opm.
119	7PS + 7SB	0,55	4	φ=90°
120	geen	0	0	Restrookfoto
121	geen	0	0	Achtergrondfoto
122	7PS	0,55	10	φ=90°
123	7SB	0,55	10	φ=90°
124	7PS + 7SB	0,55	10	φ=90°
125	geen	0	0	Restrookfoto

11.4 Dag 4: Testen met verschillende configuraties van het kasteel

Omdat bij deze testen tussendoor het scheepsmodel aangepast dient te worden, kunnen we deze dag minder proeven uitvoeren.

Run	Bron	w (ms ⁻¹)	u (ms ⁻¹)	Opm.
126	6PS-Centre	0	0	Achtergrondfoto
127	6PS-Centre	0,55	1	Huidig Kasteel
128	6PS-Centre	0,55	2	Huidig Kasteel
129	6PS-Centre	0,55	3	Huidig Kasteel
130	6PS-Centre	0,55	4	Huidig Kasteel
131	6PS-Centre	0,55	6	Huidig Kasteel
132	6PS-Centre	0,55	10	Huidig Kasteel
133	6PS-Centre	0	0	Restrookfoto
134	6PS-Centre	0	0	Achtergrondfoto
135	6PS-Centre	0,55	1	Geen kasteel
136	6PS-Centre	0,55	2	Geen kasteel
137	6PS-Centre	0,55	3	Geen kasteel
138	6PS-Centre	0,55	4	Geen kasteel
139	6PS-Centre	0,55	6	Geen kasteel
140	6PS-Centre	0,55	10	Geen kasteel
141	6PS-Centre	0	0	Restrookfoto
142	6PS-Centre	0	0	Achtergrondfoto
143	6PS-Centre	0,55	1	H/B=2
144	6PS-Centre	0,55	2	H/B=2
145	6PS-Centre	0,55	3	H/B=2
146	6PS-Centre	0,55	4	H/B=2
147	6PS-Centre	0,55	6	H/B=2
148	6PS-Centre	0,55	10	H/B=2

11.5 Dag 5: Vervolg dag 4 + reserve

Deze dag vervolledigen we de testen met de verschillende kasteelopstellingen en hebben we tijd om eventueel enkele testen opnieuw te doen.

Run	Bron	w (ms ⁻¹)	u (ms ⁻¹)	Opm.
149	geen	0	0	Achtergrondfoto
150	6PS-Centre	0,55	1	H/B=0,5
151	6PS-Centre	0,55	2	H/B=0,5
152	6PS-Centre	0,55	3	H/B=0,5
153	6PS-Centre	0,55	4	H/B=0,5
154	6PS-Centre	0,55	6	H/B=0,5
155	6PS-Centre	0,55	10	H/B=0,5
156	6PS-Centre	0	0	Restrookfoto
157	geen	0	0	Achtergrondfoto
158	6PS-Centre	0,55	1	0,5L
159	6PS-Centre	0,55	2	0,5L
160	6PS-Centre	0,55	3	0,5L
161	6PS-Centre	0,55	4	0,5L
162	6PS-Centre	0,55	6	0,5L
163	6PS-Centre	0,55	10	0,5L
164	6PS-Centre	0	0	Restrookfoto
165 e.v.				Reserve

Besluit

De hoofdaspecten van deze studie zijn de analyse van de eerder verzamelde gegevens, aanbevelingen doen met betrekking tot volgende windtunnelproeven, en beschrijven wat de meest gunstige locatie is van de inlaten van de airconditioning van de accommodatie en machinekamer. Bij de analyse in deel I van deze studie komt naar voren dat de gebruikte ventilatie-uitlaten te klein zijn, zij dienen vergroot te worden. De uitstroomsnelheid van de rookdeeltjes moet veranderd worden naar $0,55 \text{ ms}^{-1}$ en de grenslaag dient goed gemodelleerd te worden. Snelheidsmetingen zijn daarbij het meest belangrijk.

Uit de literatuurstudie in deel II blijkt dat de concentratie van verontreinigende deeltjes bovenop een obstakel geplaatst in een (lucht)stroming relatief laag is. Deze neemt wel toe als de bron verder verwijderd is. De concentratie voor het obstakel is het hoogst, en afhankelijk van de bronlocatie is de concentratie naast het object hoger dan erachter (de bron bevindt zich dicht bij het obstakel) of is de concentratie naast het object lager dan erachter (de bron bevindt zich ver van het obstakel af). Achter het kasteel van een schip, dus ook in ons geval, kan een gebied van lagere druk gevormd worden dat verontreinigende deeltjes kan aanzuigen. Deze hypothese hebben wij niet getest. In volgende windtunnelonderzoeken moet dat absoluut gedaan worden, vooral omdat de airconditioninginlaat zich hier bevindt.

Verder merken we op dat bij het gebruik van twee bronnen tegelijk de rookpluimen een stijging ondervinden ten opzichte van de rookpluim uit één enkele bron, wanneer die twee bronnen achter elkaar staan opgesteld in de (lucht)stroming. De menging van de twee pluimen is ook zeer goed. Hierdoor neemt de concentratie op hoger gelegen punten toe, tot twee keer de waarde die bij één bron werd bereikt. Bij lager gelegen punten neemt ze af. Wanneer de bronnen schuin achter elkaar of naast elkaar dwars op de stromingsrichting worden opgesteld is de menging tussen de pluimen minder en zien we een negatieve pluimstijging (=daling). Dit leidt tot hogere concentraties bij de lager gelegen meetpunten.

Bij de analyse van de meetgegevens gebruiken we het programma 'Sourcelocater', dat goed en eenvoudig werkt. We moeten het wel leiden om het juiste resultaat te krijgen. Vanwege verschillende camerastandpunten is het lastig om testreeksen met elkaar te vergelijken. Om dat toch te kunnen doen zoeken we referentiepunten die in alle foto's voorkomen. Eerst waren dat er vijf, later werden elf punten gebruikt om tot een beter resultaat te komen.

Om meetpunten van de referentiefoto 181448 te kunnen transformeren naar de juiste positie op de foto's van de testreeksen, werd transformatiematrix T bepaald. Van de vijf gebruikte methodes om T te bepalen bleek de mediane transformatie waarbij de rotatie op nul werd gezet het beste te voldoen. Deze methode wordt gebruikt bij ons verdere onderzoek.

Er zijn verscheidene redenen waarom de data van bepaalde testreeksen niet geschikt zijn voor analyse. Die reeksen vallen af en we houden vijf reeksen over die we beoordelen. Na verder onderzoek blijkt dat er in drie van die vijf reeksen fouten zijn gebeurd in de belichting. Deze fouten beïnvloeden de metingen negatief waardoor deze drie reeksen niet voldoen.

Uit analyse van de data van de overgebleven twee reeksen blijkt dat de concentratie op de meetpunten toeneemt wanneer de windsnelheid u verhoogd wordt van 0 ms^{-1} tot 1 ms^{-1} . Bij verdere verhoging neemt de concentratie af. De concentratie is het laagst voor de hoger gelegen meetpunten. De inlaat van de airconditioning van de accommodatie lijkt dus gunstig geplaatst te zijn. De concentratie bij de meetpunten achter het kasteel is relatief hoog, vergeleken met meetpunten op dezelfde hoogte voor het kasteel. Ook valt op dat bij de meetpunten in de hoek gevormd door het dek en de schoorsteen de concentratie het hoogst is van de meetpunten achter het kasteel. De inlaat van de airconditioning van de machinekamer lijkt dus naar verhouding ongunstig geplaatst te zijn.

Het verdient aanbeveling bij volgend windtunnelonderzoek aanpassingen door te voeren. De belangrijkste zijn dat het scheepsmodel minder reflecterend moet worden door gebruik van matzwarte verf, de camerapositie moet bij alle testreeksen hetzelfde blijven, we gebruiken beter een actief scheepsmodel in plaats van een passief, en vooral: de belichting dient altijd hetzelfde te blijven.

Dit is een onderzoek waarbij de resultaten gebaseerd zijn op de lichtintensiteit. De belangrijkste voorwaarde om goede resultaten te behalen is dus ervoor zorgen dat die lichtintensiteit niet verandert van de ene proef tot de andere, of zelfs binnen een proef. De fout die is opgetreden in de belichting heeft waarschijnlijk een technische oorzaak. Het valt nooit voor 100% te vermijden dat dit euvel nog een keer optreedt. Wel moet er goed in de gaten gehouden worden dat als het nog een keer voorvalt, het probleem direct verholpen wordt om later verlies van meetgegevens te vermijden.

We houden door de gebeurde fouten weinig data over om een harde conclusie uit te trekken. We dienen dus in ons achterhoofd te houden dat meer onderzoek gewenst is. De conclusie die we evenwel trekken uit de twee testreeksen die overblijven is dat de inlaat voor de airconditioning van de accommodatie op een gunstige plek geplaatst is. Die van de machinekamer bevindt zich echter op een minder gunstige plaats, waar de concentratie relatief hoog is. We kunnen in het licht van deze studie niet zeggen of de concentratiewaarden ook absoluut te hoog zijn. Met het met redenen steeds strenger worden van de bepalingen betreffende de werk- en leefomstandigheden aan boord is het mogelijk dat een betere locatie van deze inlaat gezocht dient te worden.

Bibliografie

Geschreven bronnen

Arya, S.P.S., en Lape Jr., J.F. (1990). A Comparative Study of the Different Criteria for the Physical Modeling of Buoyant Plume Rise in a Neutral Atmosphere. *Atmospheric Environment*, Vol. 24A, pp. 289-295.

Barlow, J.B., Rae, W.H. en Pope, A. (1999). *Low-speed wind tunnel testing*. John Wiley & Sons, New York, 3e druk.

Brichart, C. (2009). *Tests en soufflerie sur la maquette d'un chimiquier pour l'étude de la dispersion de polluants*. Antwerpen, Hogere Zeevaartschool. Mémoire Master.

Cheung, J.C.K., en Melbourne, W.H. (1995). Building downwash of plumes and plume interactions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 54/55, pp. 543-548.

Contini, D., Hayden, P., en Robins, R. (2006). Concentration field and turbulent fluxes during the mixing of two buoyant plumes. *Atmospheric Environment*, Vol. 40, pp. 7842-7857.

Contini, D. en Robins, R. (2004). Experiments on the rise and mixing in neutral crossflow of plumes from two identical sources for different wind directions. *Atmospheric Environment*, Vol. 38, pp. 3573-3583.

De Kerf, L. (2009). *Onderzoek naar toxische dampen aan boord van chemicaliëntankers - Windtunneltesten met eigen gemaakt schaalmodel*. Antwerpen, Hogere Zeevaartschool. Masterscriptie.

Dimitriadis, G. (2011). *Experimental Aerodynamics – Lecture 4: Testing Procedures*. Université de Liège, Liège. Niet-gepubliceerde cursus. Download via: <http://www.ltas-aea.ulg.ac.be/cms/>

Hanna, S.R., Briggs, G.A. en Hosker Jr., R.P. (1982). *Handbook on Atmospheric Diffusion*. US Department of Energy Report DOE/TIC – 11223. Download via <http://www.osti.gov>

Higson, H.L. et al. (1994). Concentration measurements around an isolated building: a comparison between wind tunnel and field data. *Atmospheric Environment*, Vol. 28, pp. 1827-1836.

Hoult, D.P. en Weil, J.C. (1972). Turbulent Plume in a Laminar Crossflow. *Atmospheric Environment*, Vol. 6, pp. 513-531.

Kolář, V. en Savory, E. (2007). Dominant flow features of twin jets and plumes in crossflow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95, pp. 1199-1215.

Kulkarni, P.R., Singh, S.N. en Seshadri, V. (2005). Flow Visualization Studies of Exhaust Smoke-Superstructure Interaction on Naval Ships. *Naval Engineers Journal*, Vol. 117, No. 1, pp. 41-56.

Lee, J.H.W. en Chu, V.H. (2003). *Turbulent Jets and Plumes: a Lagrangian Approach*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Lee, J.T. et al. (1991). A video image analysis system for concentration measurements and flow visualization in building wakes. *Atmospheric Environment*, Vol. 25A, No. 7, pp. 1211-1225.

Leutheusser, H.J. en Motycka, J. (1978). Wind Tunnel Testing of Flue Gas Dispersion. *Atmospheric Environment*, Vol. 12, pp. 1313-1318.

Leuzzi, G., en Monti, P. (1997). Particle trajectory simulation of dispersion around a building. *Atmospheric Environment*, Vol. 32, pp. 203-214.

Mavroidis, I., Griffiths, R.F. en Hall, D.L. (2003). Field and wind tunnel investigations of plume dispersion around single surfaces obstacles. *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 2903-2918.

Mott, R.L. (2006). *Applied Fluid Mechanics*. Pearson Education, Upper Saddle River, 6e editie.

Nakiboğlu, G. et al. (2009). Stack Gas Dispersion Measurements with Large Scale-PIV. Aspiration Probes and Light Scattering Techniques and Comparison with CFD. *Atmospheric Environment*, Vol. 43, pp. 3396-3406.

Nye, D., Dennis, R. en Murray, G. (1999). *Driving Ambition – The Official Inside Story of the McLaren F1*. Virgin Books, London.

Plate, E.J. (1982). *Engineering Meteorology*. Elsevier, Amsterdam.

Robins, A. et al. (2001). A wind tunnel study of dense gas dispersion in a stable boundary layer over a rough surface. *Atmospheric Environment*, Vol. 35, pp. 2243-2252.

s.n. (2002). Het Nieuwe Nationaal Model. TNO Rapport nr. R 98/306. Download via <http://www.infomil.nl>

Snyder, W.H. (1972). Similarity Criteria for the Application of Fluid Models to the Study of Air Pollution Meteorology. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 3, Issue 1, pp. 113-134.

Snyder, W.H. (1981). *Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion*. US Environmental Protection Agency Report EPA-600/8-81-009. Download via <http://www.epa.gov>

Snyder, W.H. en Castro, I.P. (1998). The Yaw-response of hot-wire probes at ultra-low wind speeds. *Measurement Science and Technology*, Vol. 9, pp. 1531-1536.

Snyder, W.H. en Lawson Jr., R.E. (1991). Fluid modeling simulation of stack-tip downwash for neutrally buoyant plumes. *Atmospheric Environment*, Vol. 25A, No. 12, pp. 2837-2850.

Sutton, O.G. (1949). *Atmospheric Turbulence*. Methuen & Co. Ltd., London.

Townsend, A.A. (1956). *The structure of turbulent shear flow*. Cambridge University Press, Cambridge.

Van den Bosch, C.J.H. en Weterings, R.A.P.M. (2005). *Methods for the Calculation of Physical Effects due to the release of hazardous materials (liquids and gases)*. Third edition, Second revised print. Download via <http://www.publicatiereeksgevaarlijkkestoffen.nl>

Wieringa, J. et al. (2001). *New Revision of Davenport Roughness Classification*. Paper presented at the 3rd European and African Conference on Wind Engineering, Eindhoven, July 2001.

Wu, T.Y. (1972). Cavity and Wake Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 4, pp. 243-284.

Mondelinge bronnen

Van Beeck, J. (6 mei 2010). Vergadering op de Hogere Zeevaartschool, Antwerpen.

Elektronische bronnen

Concept Engineering Ltd. (2011). Geraadpleegd op http://www.concept-smoke.co.uk/colt_4_turbo.aspx. Laatste raadpleging: 20 juli 2011.

Dantec Dynamics A/S. (2011). Geraadpleegd op http://www.dantecdynamics.com/Admin/Public/DWSDownload.aspx?File=files%2Ffiler%2Fsupport_and_download%2Fresearch_and_education%2Fprobepost.pdf. Laatste raadpleging: 31 juli 2011.

Devenport, W.J. en Hartwell, W.L. (2006). *Experiment 1 – FLOW VISUALIZATION*. Geraadpleegd op <http://www.aoe.vt.edu/~devenpor/aoe3054/manual/expt1/text.html>
Laatste raadpleging: 20 juli 2011.

Benson, T. (2009). *Boundary Layer*. Geraadpleegd op <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/boundlay.html>.
Laatste raadpleging: 20 juli 2011.

GeoGebra v3.2.46.0 (2011). Geraadpleegd op <http://www.geogebra.org>. Laatste raadpleging: 6 april 2011.

Scheer, J. (2009). *Rotameters: Simplicity = Utility*. Geraadpleegd op <http://www.globalspec.com/reference/9771/349867/rotameters-simplicity-utility>. Laatste raadpleging: 20 juli 2011.

Scilab v5.3.0 (2011). Geraadpleegd op <http://www.scilab.org>. Laatste raadpleging: 10 februari 2011.

Von Karman Instituut (2009). *2x3 Meter Wind Engineering Facility L-1B*. Geraadpleegd op http://www.vki.ac.be/images/facilities/l1b_schema.jpg. Laatste raadpleging: 20 juli 2011.

Watson-Marlow (2011). *The perfect pumps*. Geraadpleegd op <http://www.watson-marlow.com/images/s-b16anim.gif>. Laatste raadpleging: 20 juli 2011.

Weisstein, E.W. (2011). *Shear Factor*. Geraadpleegd op <http://mathworld.wolfram.com/ShearFactor.html>. Laatste raadpleging: 20 juli 2011.

Wikipedia (2011). *Manometer*. Geraadpleegd op <http://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:Manometer.PNG>. Laatste raadpleging: 20 juli 2011.

Wikisage (2011). *Goniometrie*. Geraadpleegd op <http://www.nl.wikisage.org/wiki/Goniometrie>. Laatste raadpleging: 20 juli 2011.

Lijst van Bijlagen

Bijlage 1: Bepaling van de verhouding ρ_s/ρ_a

Bijlage 2: De meetpunten op referentiefoto 181448

Bijlage 3: De meetpunten van testreeks 171703

Bijlage 4: De meetpunten van testreeksen 181315a en 181315b

Bijlage 5: De meetpunten van testreeks 191000

Bijlage 6: De plots van testreeks 171703

Bijlage 7: De plots van testreeks 181315a

Bijlage 8: De plots van testreeks 181315b

Bijlage 9: De plots van testreeks 181448

Bijlage 10: De plots van testreeks 191000

Bijlage 11: CD met scriptie en bijlagen - Inhoud

Bijlage 12: CD met scriptie en bijlagen - de CD

Bijlage 1: Bepaling van de verhouding ρ_s/ρ_a

Bepaling van de verhouding ρ_s/ρ_a bij Contini en Robins (2004, p. 3574):

$$g' = \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \cdot g$$

$$0,95 = \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \cdot 9,81$$

$$0,0968 = \frac{\rho_s}{\rho_a} - \frac{\rho_a}{\rho_a}$$

$$\frac{\rho_s}{\rho_a} = 1,0968$$

Bepaling van de verhouding ρ_s/ρ_a bij Contini et al. (2006, p. 7844):

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_a} = 0,21$$

$$\frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_a} = 0,21$$

$$\frac{\rho_a}{\rho_a} - \frac{\rho_s}{\rho_a} = 0,21$$

$$\frac{\rho_s}{\rho_a} = 0,79$$

Bijlage 2: De meetpunten op referentiefoto 181448



Bijlage 3: De meetpunten van testreeks 171703



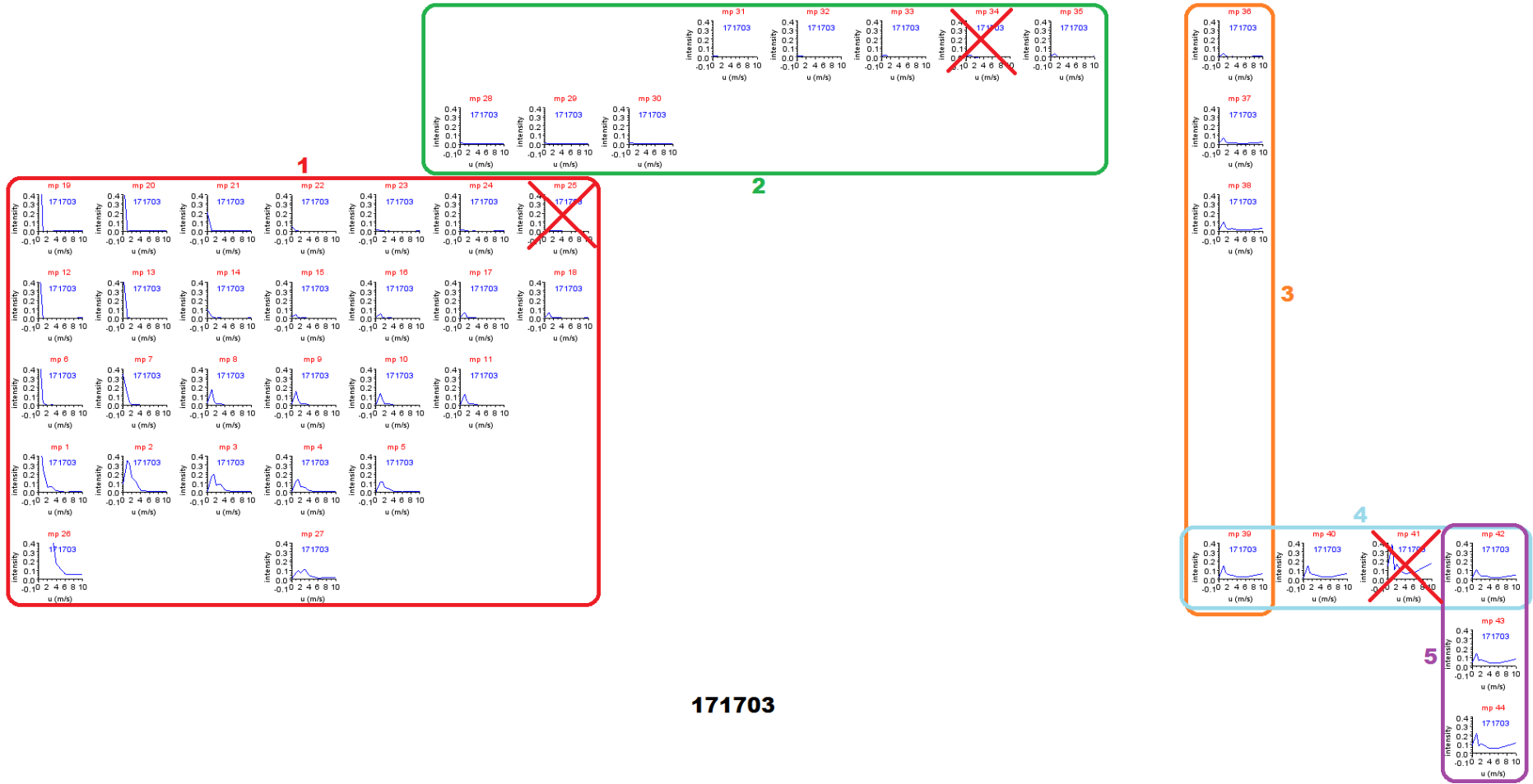
Bijlage 4: De meetpunten van testreeksen 181315a en 181315b



Bijlage 5: De meetpunten van testreeks 191000

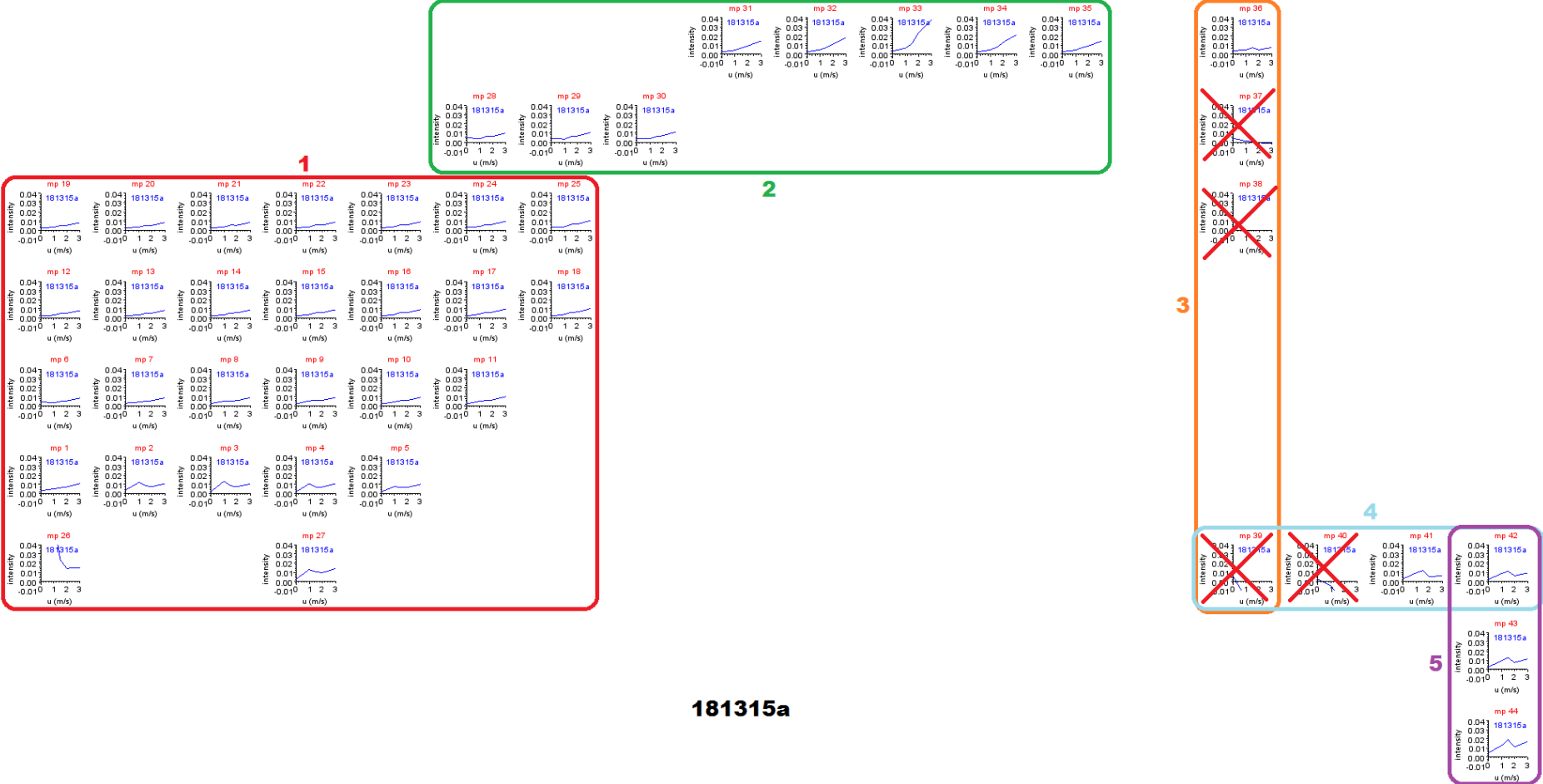


Bijlage 6: De plots van testreeks 171703



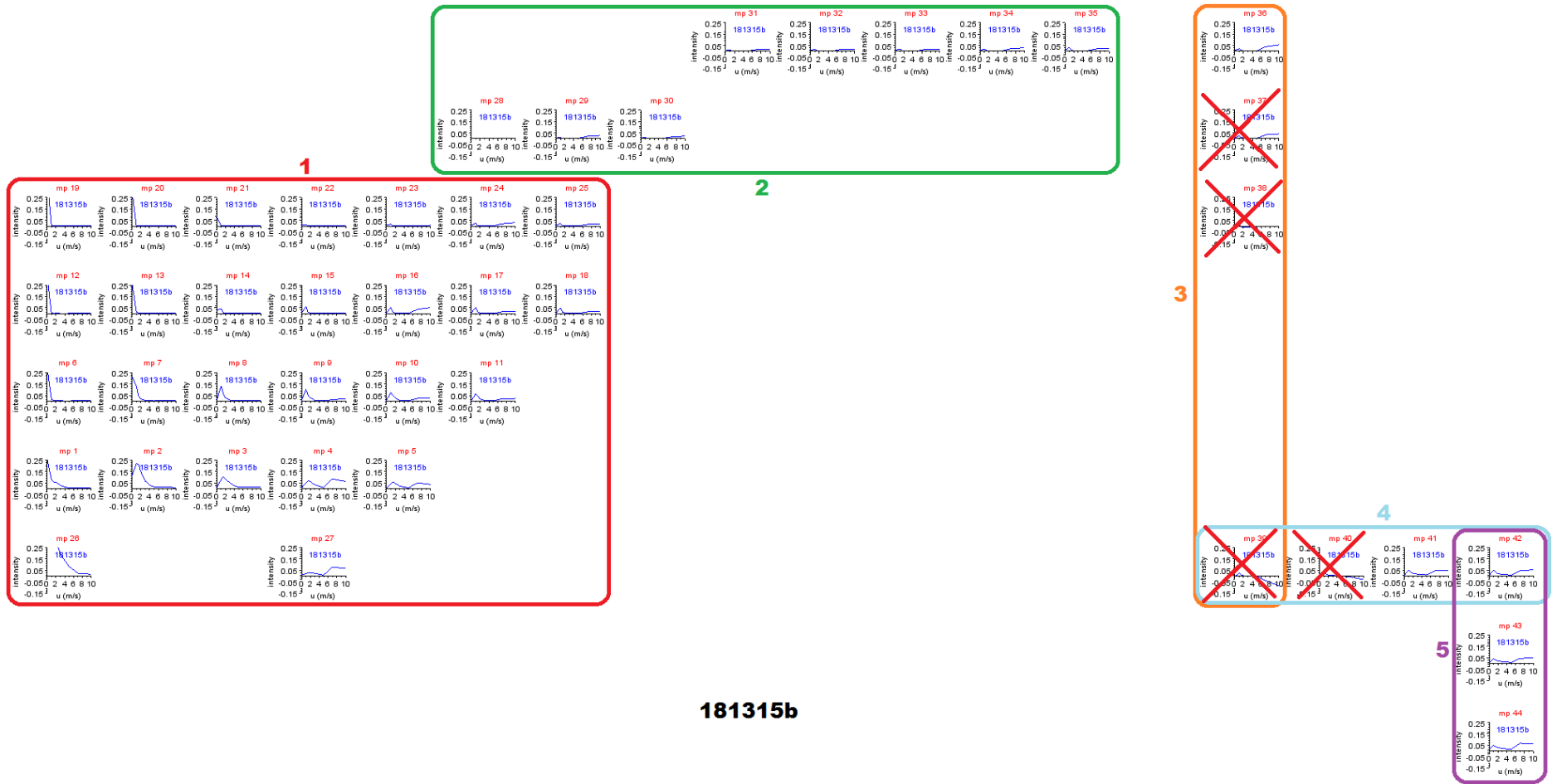
171703

Bijlage 7: De plots van testreeks 181315a



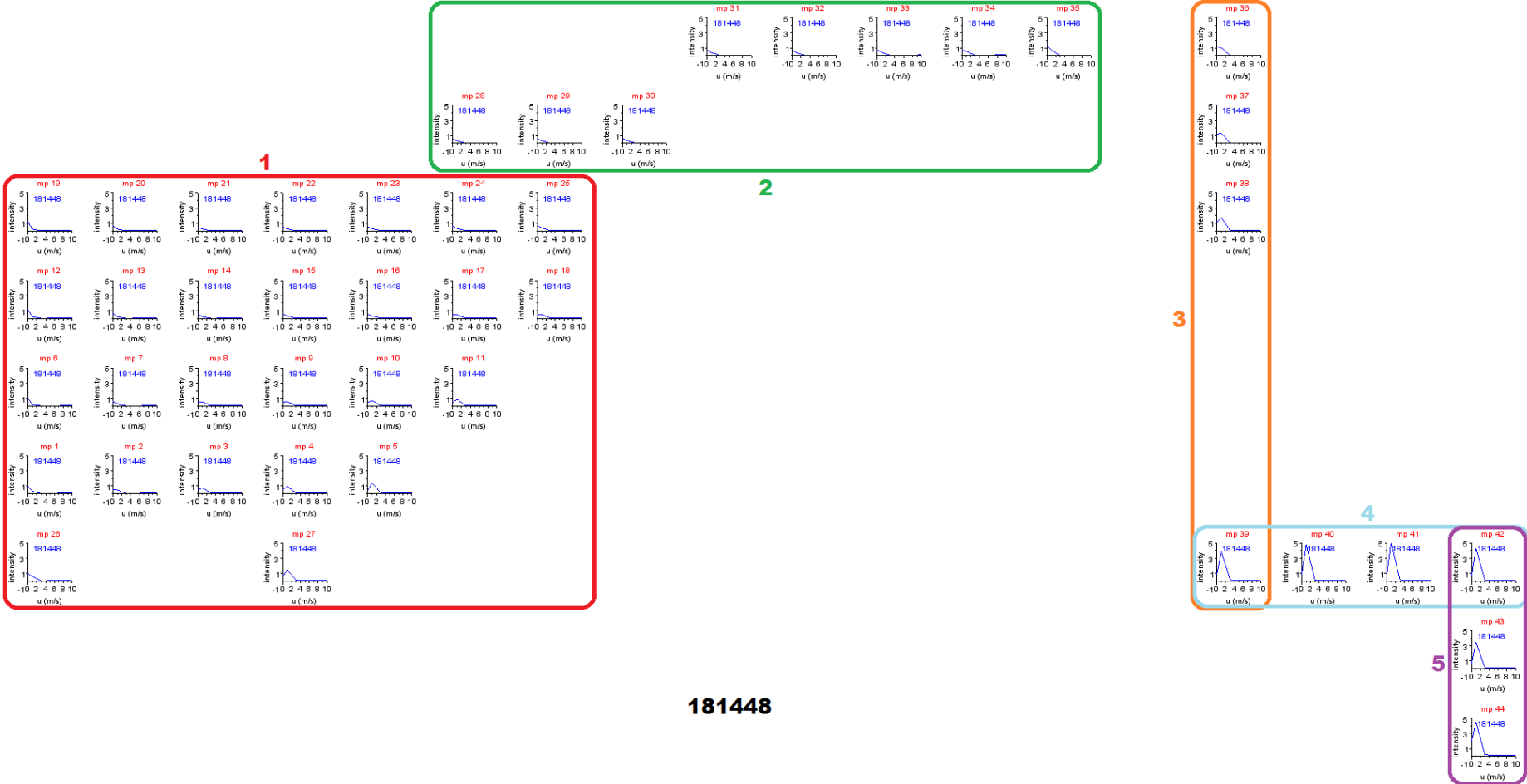
181315a

Bijlage 8: De plots van testreeks 181315b



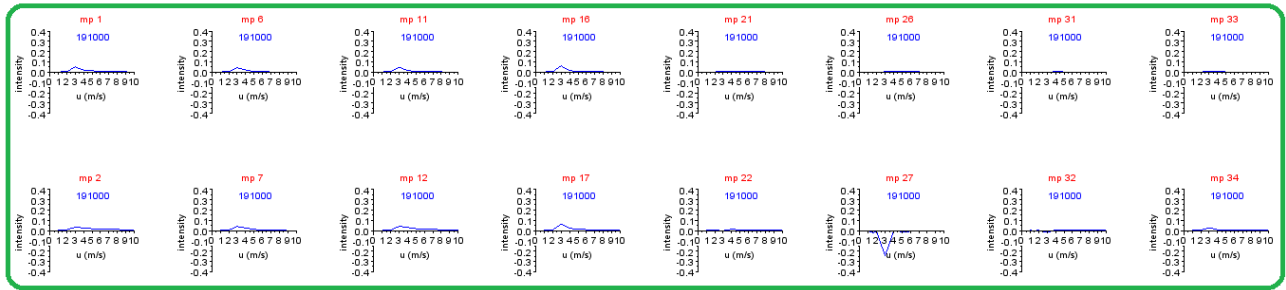
181315b

Bijlage 9: De plots van testreeks 181448

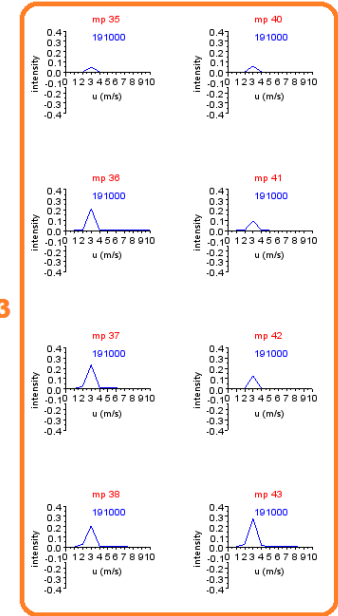


181448

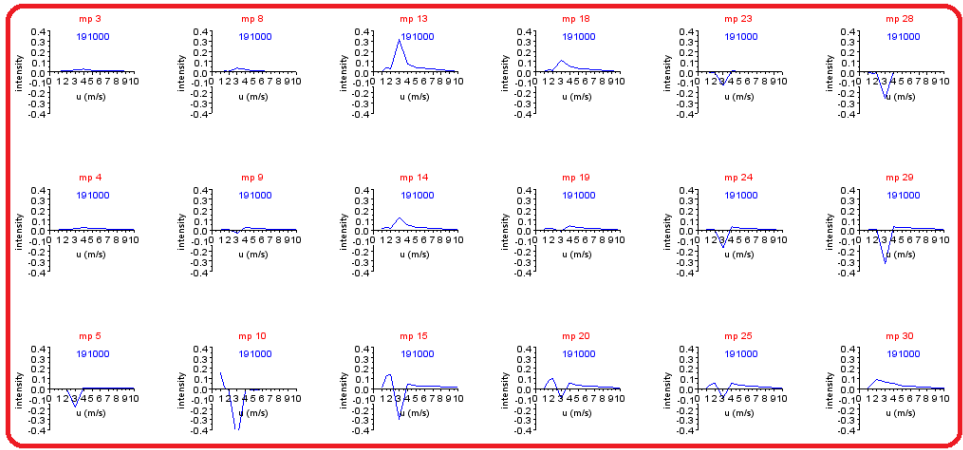
Bijlage 10: De plots van testreeks 191000



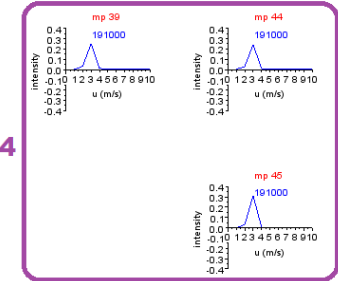
2



3



1



4

191000

Bijlage 11: CD met scriptie en bijlagen - Inhoud

- Run 171732 onderverdeeld per 20 foto's
- Run 181630 onderverdeeld per 10 foto's
- 171703-reeks, foto's van alle runs met meetpunten
- 181315a-reeks, foto's van alle runs met meetpunten
- 181315b-reeks, foto's van alle runs met meetpunten
- 181448-reeks, foto's van alle runs met meetpunten
- 191000-reeks, foto's van alle runs met meetpunten
- De gebruikte Scilab-programma's
- Sourcolater – afbeeldingen van alle runs inclusief submatrices
- Excel file met alle testresultaten
- Het programma 'Grenslaag modelleren'
- Logboek
- Plot 171703
- Plot 181315a
- Plot 181315b
- Plot 181448
- Plot 191000
- Scriptie in PDF-formaat

Bijlage 12: CD met scriptie en bijlagen - De CD