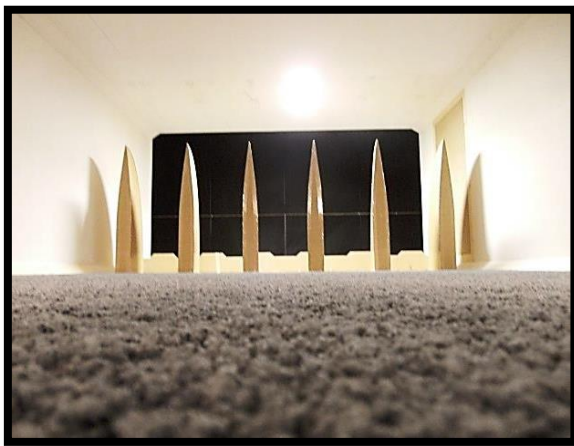




HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

ONDERWIJSEENHEID 3 – TOEGEPASTE WETENSCHAPPEN



Onderzoek naar de mariene grenslaag in een lagesnelheidswindtunnel

Kathleen Vaneeckhaute

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
master in de nautische wetenschappen
academiejaar: 2012 – 2013

Promotor: Werner Jacobs

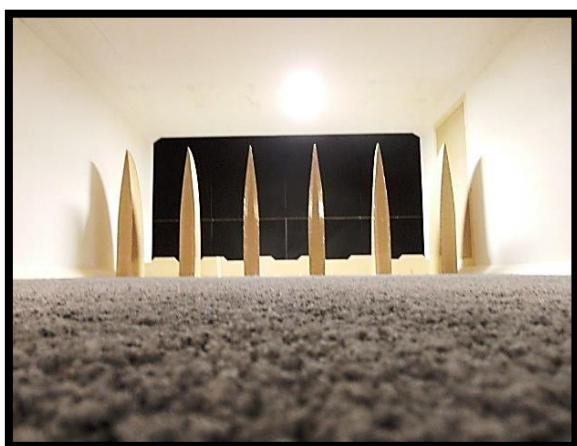
Co-promotoren:

Stephan van den Akker en Niels Moonen



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

ONDERWIJSEENHEID 3 – TOEGEPASTE WETENSCHAPPEN



Onderzoek naar de mariene grenslaag in een lagesnelheidswindtunnel

Kathleen Vaneeckhaute

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
master in de nautische wetenschappen
academiejaar: 2012 – 2013

Promotor: Werner Jacobs

Co-promotoren:

Stephan van den Akker en Niels Moonen

Woord vooraf

In dit onderzoeksproject werd een nieuwe configuratie van het voorland van de lagesnelheidswindtunnel van Peutz in Mook gerealiseerd om een grenslaag te creëren bij lage windsnelheden boven zee met het oog op verspreidingsmetingen. Zo kunnen in de toekomst ook maritieme onderzoeken worden uitgevoerd met lagere windsnelheden, wat op termijn allicht zal leiden tot veiligere schepen.

Ik ben aan dit onderzoeksproject begonnen samen met medestudenten Steven Daemen en Nicolas Podolski. Het einddoel van dit gezamenlijke onderzoeksproject was de concentratie te bepalen van cargodampen die vrijkomen langs de ventilatie-openingen aan boord van een chemicaliëntanker tijdens laadoperaties en om mogelijkerwijs de gevolgen voor de gezondheid te kunnen inschatten. Dit werd tot stand gebracht door een maquette van een chemicaliëntanker in een windtunnel te plaatsen en concentratiemetingen uit te voeren. Bij de taakverdeling werd beslist dat ik de nieuwe configuratie van het voorland in de windtunnel voor mijn rekening zou nemen.

Ter afsluiting zou ik verschillende mensen willen bedanken. In eerste instantie mijn promotor, Kapitein Werner Jacobs, voor de inzichten en motivatie tijdens de metingen en daarbuiten, voor het voorstellen van het onderwerp, voor het advies dat hij heeft geleverd om deze thesis tot een goed einde te brengen en voor het maken van de grafieken in Scilab. Vervolgens wil ik ook Carine Reynaerts bedanken voor haar aanwezigheid tijdens de metingen en de combinatie van denk - en werkkracht bij de proeven en bij het maken van de onderdelen van het voorland. Ook Steven en Nicolas wil ik bedanken voor de samenwerking.

Ook de medewerking van Peutz in Mook wordt hard geapprecieerd. We hebben gedurende twee weken dankbaar gebruik gemaakt van de windtunnel en we hebben hier alle ondersteuning gevonden die we nodig hadden. Ik zou met name dhr. Stephan van den Akker, dhr. Niels Moonen en dhr. Christopher Loermans willen bedanken.

INHOUDSTAFEL

Woord vooraf.....	i
Inhoudstafel.....	ii
Lijst met figuren, grafieken en metingen.....	vi
Figuren.....	vi
Grafieken.....	viii
Metingen.....	viii
Lijst met gebruikte afkortingen.....	x
Inleiding.....	1
Hoofdstuk 1 – De grenslaag.....	2
1.1. Wat is de grenslaag.....	2
1.2. De wind ontleed.....	5
1.2.1. Het windsnelheidsprofiel met de machtswet.....	5
1.2.1.1. Exponentiële coëfficiënt.....	6
1.2.2. Logaritmisch windsnelheidsprofiel.....	7
1.2.2.1. Factor ‘d’ voor een hoger nulniveau.....	9
1.2.2.2. Stabiliteit van de atmosfeer.....	9
1.2.3. Charnock-formule.....	11
1.2.4. Invloed van het Corioliseffect.....	11
1.2.5. Turbulentie.....	13
1.2.6. Kansdichtheid (Probability density).....	16
1.2.7. Integrale lengteschaal (Integral lengthscale).....	17
1.2.8. Spectrale vermogensdichtheid (Power spectral density).....	19

Hoofdstuk 2 – De windtunnel.....	23
2.1. Meetinstrumenten.....	23
2.1.1. Pitotbuis.....	23
2.1.2. Snelheidsmeter ‘Velocicalc 8345’ van TSI®.....	25
2.1.3. Hotwire probes.....	26
2.1.4. Temperatuursensor.....	29
2.2. Lagesnelheidswindtunnel.....	30
2.2.1. Soorten windtunnels.....	30
2.2.1.1. Indeling.....	30
2.2.1.2. Open en gesloten windtunnels.....	31
2.2.2. Onderdelen in de lagesnelheidswindtunnel.....	32
2.2.2.1. Ventilatoren.....	32
2.2.2.2. Hoekschoepen.....	33
2.2.2.3. Contractie.....	33
2.2.2.4. Honingraat.....	33
2.2.2.5. Gaas.....	33
2.3. Onderdelen voorland.....	34
2.3.1. Counihan-opstelling.....	34
2.3.1.1. Trimboard.....	35
2.3.1.2. Tapijt.....	36
2.3.1.3. Spires.....	36
2.3.2. Full depth en part depth.....	37

Hoofdstuk 3 – De proeven.....	39
3.1. Inleiding voor de proeven	39
3.2. Overzicht van alle proeven.....	40
3.3. Proeven.....	41
Proef 1: Pitotbuis vergelijken met TSI.....	41
Proef 2: Hotwire probes vergelijken met pitotbuis.....	42
Proef 3: Counihan-opstelling zonder te hoog tapijt Peutz.....	43
Proef 4: Standaard opstelling marien voorland Peutz.....	46
Vergelijking proef 4 vs proef 3.....	49
Proef 5: Standaard opstelling met eigen spires en trimboard.....	50
Proef 6: Geen trimboard in plaats van een te hoog trimboard.....	52
Proef 7: Goede compromis in de hoogte van het trimboard.....	54
Vergelijking proef 7 vs proef 5.....	57
Proef 8: ruwer tapijt HZS in plaats van te hoog tapijt Peutz.....	58
Vergelijking proef 8 vs proef 5.....	61
Proeven 9 en 10: Ongelijk verdeeld trimboard.....	62
Proef 11: Vergelijking probes en TSI met pitotbuis.....	65
Proef 12: Symmetrie meten.....	68
Proef 13: Invloed van slechts één spire.....	71
Proef 14: Invloed van het trimboard alleen.....	74
Proef 15: Combinatie trimboard en tapijt.....	77
Vergelijking proef 15 vs proef 14.....	78
Proef 16: Van 6 naar 5 spires; een verbetering?.....	80
Vergelijking proef 16 vs proef 15.....	83
Proef 17: De invloed van 5 spires in het voorland.....	84
Vergelijking proef 17 vs proef 16.....	85
Proef 18: Verlagen van het trimboard naar 10 cm.....	87

Proef 19: Invloed van een 6 ^e spire.....	89
Proef 20: Afstand tussen de spires onderling.....	92
Vergelijking proef 20 vs proef 18.....	93
Proef 21: Terug hoger trimboard, minder effect van de spires?.....	95
Vergelijking proef 21 vs proef 20.....	96
Proef 22: Resultaat marien voorland met ruwer tapijt.....	98
Vergelijking proef 22 vs proef 20.....	100
Proef 23: Lateraal resultaat van het marien voorland.....	102
3.4. Besluit van de proeven m.b.t. de onderdelen van het voorland.....	103
3.4.1. Invloed van het trimboard.....	103
3.4.2. Invloed van het tapijt.....	103
3.4.3. Invloed van de spires.....	104
Besluit.....	105
Bibliografie.....	107

LIJST MET FIGUREN, GRAFIEKEN EN METINGEN

Figuren

Fig. 01. Verschil in ruwheid en hoogte van de grenslaag. Figuur op basis van (Chen, 1997).....	3
Fig. 02. Uitreksels uit de schaal van Beaufort (Australian Maritime Safety Authority, s.d.).....	3
Fig. 03. (links) Variaties van de longitudinale component van een turbulente wind in de tijd (Chen, 1997)	13
Fig. 04. (rechts) Turbulentie achter een scherm (Khusnutdinova, 2009).....	13
Fig.05. Componenten van turbulentie (Holmes, s.d.).....	14
Fig. 06. Manometer met rode en de gele intake: de 2 uitgangen van de pitotbuis, resp. de totale druk en de statische druk [eigen foto].....	24
Fig. 07. Pitotbuis, [eigen figuur].....	24
Fig. 08. Velocicalc 8345 van TSI (links) [eigen foto].....	25
Fig. 09. detail meetprobe (rechts) [eigen foto].....	25
Fig. 10. TSI's [eigen foto]	25
Fig. 11. Detail probes [eigen foto].....	26
Fig. 12. De drie probes, probehouders in lusterklemmen en staander [eigen foto]	28
Fig. 13. Open wind tunnel (Benson, 2009b).....	31
Fig. 14. Gesloten wind tunnel, gebaseerd op (A.O.L. Inc, 2013).....	32
Fig. 15. Onderdelen tussen de ventilatoren en de meetschijf [eigen figuur].....	32
Fig. 16 Detail honingraat [eigen foto].....	33
Fig. 17. Voorland met ruwheidselementen [eigen foto].....	35
Fig. 18. Tekening trimboard. [eigen tekening].....	35
Fig. 19. Tekeningen van één spire en spire met trimboard. [eigen tekening].....	36
Fig. 20.Vergelijking standaard Counihan vortex generator (links) en de afgeknotte Counihan vortex generator (rechts) (Kozmar, 2011b).....	37
Fig. 21. Proefopstelling proef 1 (voormeting) [eigen foto]	41
Fig. 22. Proefopstelling proef 2 [eigen foto]	42

Fig.23. Detail probes, temperatuursensor en probehouders [eigen foto]	42
Fig. 24. Proefopstelling proef 3 [eigen foto]	43
Fig. 25. Proefopstelling proef 4 [eigen foto].....	46
Fig. 26. Proefopstelling proef 5 [eigen foto]	50
Fig. 27. Detail hoogte trimboard (23cm) [eigen foto]	50
Fig. 28. Proefopstelling proef 7 [eigen foto]	54
Fig. 29. Detail hoogte trimboard (18cm aan hoge kant) [eigen foto]	54
Fig. 30. Proefopstelling proef 8 [eigen foto]	58
Fig.31. Detail onderkant tapijt HZS [eigen foto]	58
Fig. 32. Proefopstelling proef 11 [eigen foto]	65
Fig. 33. Detail van de meetinstrumenten opgesteld in proef 11 [eigen foto]	65
Fig. 34. Proefopstelling proef 12 [eigen foto]	69
Fig. 35. Detail laterale meetopstelling [eigen foto]	69
Fig. 36. Proefopstelling proef 13 [eigen foto]	71
Fig. 37. Proefopstelling proef 14 [eigen foto]	74
Fig. 38. Detail van het trimboard (18cm) proef 14 [eigen foto]	74
Fig. 39. Proefopstelling proef 15 [eigen foto]	77
Fig. 40. Proefopstelling proef 16 [eigen foto]	81
Fig. 41. Proefopstelling proef 17 [eigen foto]	84
Fig. 42. Proefopstelling proef 18 [eigen foto]	87
Fig. 43. Proefopstelling proef 19 [eigen foto]	89
Fig. 44. Proefopstelling proef 20 [eigen foto]	92
Fig. 45. Proefopstelling proef 21 [eigen foto]	95
Fig. 46. Proefopstelling proef 22 [eigen foto]	98
Fig. 47. Tapijt 'HZS onderkant naar boven' [eigen foto]	99
Fig. 48. 'Tapijt HZS bovenkant naar boven' [eigen foto]	99

Grafieken

Grafiek 01: Voorbeeld van een windsnelheidsprofiel met de machtswet van een mariene grenslaag met $\alpha=0,11$ (Hsu, 1993); [eigen grafiek].....	5
Grafiek 02: Ruwheidslengte z_0 varieert in functie van de windsnelheid (Argyriadis, s.d.).....	11
Grafiek 03. Voorstelling van een normaalverdeling gebaseerd op de resultaten van proef 22 en formule (22), [eigen grafiek].....	16
Grafiek 04: Fluctuatiefrequentie van de windstroom, gemeten in volt (links) en de bijpassende spectrale vermogensdichtheid (rechts) van de wind achter een cilinder. (Jørgensen, 2002).....	19
Grafiek 05: Nyquist-Shannon criterium waarbij de bemonsteringsfrequentie (SR) minstens twee keer zo groot moet zijn als de maximale signaalfrequentie ($f_{\max}$). (Jørgensen, 2002)....	21
Grafiek 06. Voorbeeld van een voorstelling van spectrale vermogensdichtheid in een landelijk gebied. (Kozmar, 2011a).....	22

Metingen

Om verwarring bij de nummering te vermijden hebben de grafieken van de proeven niet de naam 'grafiek' maar de naam 'meting' gekregen.

Meting 3 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek].....	45
Meting 4 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	47
Meting 5 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	51
Meting 6 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	53
Meting 7 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	56
Meting 8 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	60
Meting 9 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]	63
Meting 10 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]	63
Meting 9 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]	64
Meting 10 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]	64

Meting 12 en 13 – <i>Snelheidsprofiel: Vergelijking van het laterale snelheidsprofiel mét en zonder spire (resp. proef 13 en 12) op hoogte=0,8m. [eigen grafiek]</i>	73
Meting 12 en 13 – <i>Meting 12 en 13 – Turbulentieprofiel: Vergelijking van de turbulentie mét en zonder spire (resp. proef 13 en 12) in laterale metingen op hoogte=0,8m. [eigen grafiek]</i>	73
Meting 14 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	76
Meting 15 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	79
Meting 16 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	81
Meting 17 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	86
Meting 18 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	88
Meting 19 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	91
Meting 20 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	94
Meting 21 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	97
Meting 22 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]	101
Meting 23 – Snelheidsprofiel lateraal [eigen grafiek]	102

LIJST VAN GEBRUIKTE AFKORTINGEN

c	Constante van Charnock
d	Hoogte van het nulniveau
f	Corioliskracht
g	Graviteitsconstante
I_u	Longitudinale turbulentie-intensiteit
κ	Von Kármán constante
lat	Breedtegraad
M	Machgetal
n	Aantal samples
p_s	Statische druk
p_t	Totale druk
r	Frequentie
r_m	Verlaagde frequentie
R	Gasconstante
S_u	Spectrale vermogensdichtheid
T	Absolute temperatuur
u^*	Wrijvingssnelheid
u	Fluctuatie in windsnelheid in de longitudinale richting
$\bar{U}$	Gemiddelde windsnelheid
$\bar{U}_r$	Gemiddelde windsnelheid op referentiehoogte
U_g	Geostrofische windsnelheid
U_i	Ogenblikkelijke windsnelheid
v	Fluctuatie in windsnelheid in de laterale richting
v_s	Snelheid van het geluid
w	Fluctuatie in windsnelheid in de verticale richting
x_{L_u}	Integrale lengteschaal
z_0	Oppervlakte ruwheidslengte
Z	Hoogte
Z_r	Referentiehoogte
Z_{max}	Maximale hoogte van de grenslaag
α	Exponentiële coëfficiënt machtswet
γ	Specifieke warmteverhouding voor lucht
ρ_a	Dichtheid lucht
σ_u	standaarddeviatie van de longitudinale component
τ_0	Dichtheid lucht
ψ	Stabiliteitsparameter atmosfeer
Ω	Hoeksnelheid aarde

INLEIDING

De opbouw van een mariene grenslaag verschilt enigzins met deze van een grenslaag boven land. In de windtunnel van Peutz voert men nochtans hoofdzakelijk metingen uit voor situaties op land, zoals bijvoorbeeld concentratiemetingen die gebeuren voor de aanleg van een nieuwe tunnel. Om verspreiding van ladingsdampen aan boord van een chemicaliëntanker bij lage windsnelheden boven zee te kunnen bestuderen werd ervoor gekozen om een nieuw voorland te ontwikkelen in de windtunnel.

Om beter te kunnen begrijpen hoe de grenslaag is opgebouwd wordt dit in hoofdstuk 1 eerst theoretisch benaderd. De verschillende aspecten die wind met zich meebrengt, zoals o.a. snelheid en turbulentie, worden beschreven volgens gestandariseerde normen en formules.

Aansluitend worden in hoofdstuk 2 de onderdelen van een windtunnel besproken alsook de meetinstrumenten die gebruikt worden om profielmetingen te doen en de verschillende types windtunnels. Om de motivatie van de proeven beter te begrijpen is het nodig om te begrijpen hoe de windtunnel is opgebouwd en uit welke onderdelen die bestaat.

In hoofdstuk 3 worden de proeven die uiteindelijk leiden tot aanvaardbare snelheids- en turbulentieprofielen uitgebreid besproken. Zowel de motivatie als het resultaat van de nieuwe profielen worden behandeld. Bepaalde proeven worden ook onderling vergeleken, zodat de invloed van een verandering aan trimboard, spires of tapijt in kaart kan worden gebracht. Op het einde van dit hoofdstuk is te lezen wat nu juist de invloed is van deze ruwheidselementen.

HOOFDSTUK 1 – DE GRENSLAAG

1.1. WAT IS DE GRENSLAAG?

De atmosferische grenslaag is de onderste laag van de atmosfeer en wordt beïnvloed door de ruwheid van de oppervlakte van de aarde. Deze ruwheden zijn o.a. bomen, huizen, grote gebouwen, duinen, zeegolven,...

Deze grenslaag bestaat uit verschillende luchtlagen. Hiertussen treedt onderlinge wrijving op, omdat de luchtlagen met een verschillende snelheid langs elkaar heen bewegen. Dit verschil in snelheid wordt veroorzaakt door de wrijving van het aardoppervlak, die een zekere ruwheid heeft. Daarom beweegt de luchtlaag vlakbij de aarde aan een lagere snelheid dan een luchtlaag op een grotere hoogte.

De grenslaag reikt tot een hoogte waar de luchtlagen geen invloed meer ondervinden van het aardoppervlak en waar de snelheid dus bijna onveranderlijk is met de hoogte. De totale hoogte van de grenslaag wordt Z_{max} genoemd. In theorie is de waarde van Z_{max} oneindig, maar in de praktijk wordt een hoogte genomen waarbij de snelheid 99% bedraagt van de constante snelheid in de volledig ontwikkelde grenslaag. (Dunn, s.d.)

Vanaf de maximale hoogte van de grenslaag, Z_{max} , spreekt men over een volledig ontwikkelde grenslaag. De heersende wind bij Z_{max} is de geostrofische wind U_g . (Wei & Desmond, s.d.)

De hoogte van de grenslaag is afhankelijk van de windsnelheidsgradiënt en van de ruwheid van de aardoppervlakte. Des te ruwer de oppervlakte wordt, bijvoorbeeld in een stedelijk milieu, des te hoger ook de grenslaag wordt. Zo is de grenslaag voor open zee volledig ontwikkeld op ongeveer 213m en voor een grote stad ongeveer 457m. Nochtans is de windsnelheid boven de volledig ontwikkelde grenslaag overal ongeveer dezelfde, ongeacht de onderliggende oppervlakte. (Chen, 1997)

De ruwheid van een zeeoppervlak is niet altijd gelijk, in tegenstelling tot de meeste situaties op land. Zo hangt de ruwheid van steden of grasland enkel af van de ondergrond. De ruwheid op zee wordt immers veroorzaakt door de hoogte van de golven en dit is afhankelijk van de windsnelheid. Hoe sneller de wind waait, hoe groter de golfhoogte zal zijn.

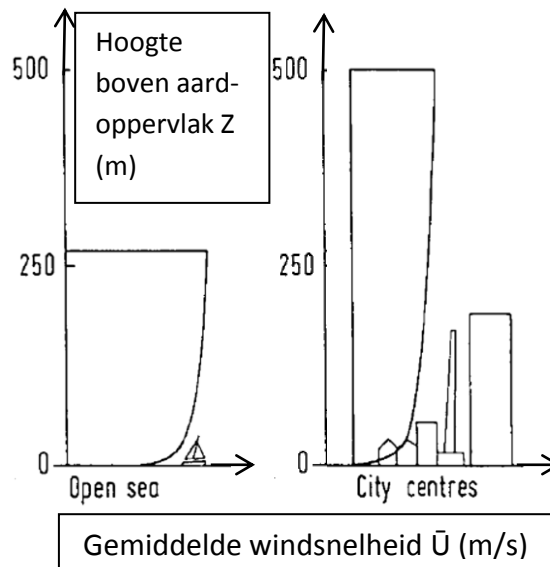


Fig.01. Verschil in ruwheid en hoogte van de grenslaag. Figuur op basis van (Chen, 1997)

De ruwheid van het zeeoppervlak wordt duidelijk met de schaal van Beaufort, waarin de staat van de zee wordt beschreven afhankelijk van de windsnelheid.

Beaufort	Wind km/u	Wind	Staat van de zee	Waarschijnlijke golfhoogte
0	0	Kalm	Spiegelglad	0,1m
4	20-28	Krachtige bries	Kleine golven	3m - 4m
6	39-49	Storm	Grote golven	7m- 10m
10	89-102	Zware storm	Zeer hoge golven	9m - 12,5m

Fig. 02. Uitsneden uit de schaal van Beaufort ([Australian Maritime Safety Authority, s.d.](#))

Een luchtslaag die zich over een stad beweegt zal een andere vorm hebben dan over zee, gezien de verschillende ondergronden. Om een grenslaag te 'visualiseren' en te beschrijven wordt er een snelheidsprofiel van opgesteld. De grenslaag in de windtunnel zou dezelfde snelheid-en turbulentieprofielen moeten hebben als de atmosferische grenslaag. (Wang et al, 1996)

Het opstellen van een windsnelheidsprofiel van een grenslaag is relatief eenvoudig. Het volstaat om op verschillende hoogten Z de gemiddelde windsnelheid $\bar{U}$ te bepalen en dit in een grafiek uit te zetten. De vorm van de grafiek, gemeten in de reële atmosfeer, moet dezelfde zijn als de grafiek bekomen door metingen in de windtunnel. Door het simuleren van de grenslaag in een windtunnel kan de complexe aard van zowel de wind als de

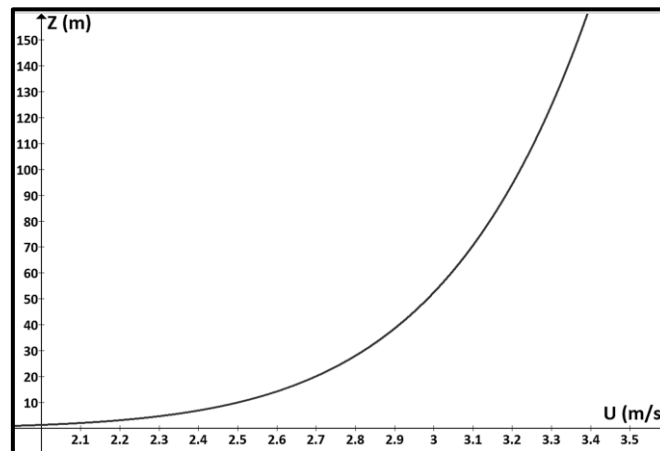
interactie tussen de wind en een model bestudeerd worden. (Wang et al, 1996), (Varshney & Poddar, 2011)

Voordat men kan gaan meten in een windtunnel moet men eerst bepalen in wat voor gebied men wil meten. Dit kan bijvoorbeeld stedelijk gebied zijn, of in ons geval een marien milieu. In beide gevallen zijn de snelheids-en turbulentieprofielen immers verschillend. Op basis van onderzoek zijn algemeen aanvaardde normen bepaald. Een voorbeeld van een uitgever van deze normen is 'Engineering Sciences Data Unit' (ESDU). ESDU publiceert design data voor ingenieurs en geeft ook publicaties uit over de grenslaag. In ESDU 85020, 'Characteristics of atmospheric turbulence near the ground', zijn verschillende eigenschappen beschreven, zoals turbulentie-intensiteit en waarden voor terreinparameters, al dan niet met formules. (ESDU 85020, s.d.) De data van ESDU worden gebruikt als referentiewaarden voor o.a. snelheid en turbulentie in een bepaald milieu. Als men metingen in de windtunnel wil doen moet men er voor zorgen dat de snelheids-en turbulentieprofielen in de tunnel overeenstemmen met de referentiewaarden voor het bepaalde terrein.

Deze metingen zijn profielmetingen en deze worden opgesteld door het meten van de windsnelheden bij verschillende hoogtes. Het uitvoeren van profielmetingen in de windtunnel wordt in principe enkel gedaan als er onderzoek moet worden gedaan naar de opbouw van de grenslaag in een nieuw milieu. In dit onderzoek wordt een profiel nagestreeft van een marien milieu. Door het veranderen van de configuratie van ruwheidselementen (trimboard, spires en ruwheid) in de windtunnel wordt een nieuw profiel gecreëerd. Het nieuwe profiel moet overeenkomen met de vooraf bepaalde referentiewaarden. Van zodra een gesimuleerde grenslaag goed overeenkomt met de referentiecurven worden de afmetingen en positie van de ruwheidselementen in het voorland vastgelegd. Het voorland in de windtunnel is een bepaalde oppervlakte voor de meetschijf waar, door middel van ruwheidselementen, de grenslaag zich kan vormen. Met dit bepaalde voorland worden dan metingen gedaan zoals concentratiemetingen of drukmetingen. Zolang het metingen zijn in eenzelfde milieu, bijvoorbeeld een stedelijk gebied, blijft de opstelling van het voorland onveranderd.

1.2. DE WIND ONTLEED

1.2.1. Het windsnelheidsprofiel met de machtswet



Grafiek 01: Voorbeeld van een windsnelheidsprofiel met de machtswet van een mariene grenslaag met $\alpha=0,11$ (Hsu, 1993); [eigen grafiek]

Het gemiddelde windsnelheidsprofiel stelt de windsnelheid ($\bar{U}$) voor in functie van de hoogte boven het zeeoppervlak (Z). De oorzaak van deze vorm is de wrijving die plaatsvindt tussen de oppervlakte (in ons geval het zeeoppervlak) waar de hoogte nul is, en de luchtlaag erboven. Ook tussen de verschillende luchtlaagjes die zich boven het zeeoppervlak bevinden treden schuifspanningen op, omdat ze elk met andere snelheid langs elkaar bewegen.

Het machtswet-profiel wordt weergegeven door de 'vergelijking van Hellman':

(1)

$$\frac{\bar{U}}{\bar{U}_r} = \left(\frac{Z}{Z_r} \right)^\alpha$$

$\bar{U}$ = gemiddelde windsnelheid op hoogte Z

$\bar{U}_r$ = Windsnelheid op referentiehoogte Z_r .

Als Z_r wordt in onze proeven 60m genomen.

α = exponentiële coëfficiënt.

Voor kalme zee wordt $\alpha=0,11$ genomen.

(Hsu, 1993)

Om de windsnelheid op een zekere hoogte te kennen, wordt deze formule afgeleid naar:

(2)

$$\bar{U}_{(Z)} = \bar{U}_r \cdot \left(\frac{Z}{Z_r} \right)^\alpha$$

Hoewel voor de referentiehoogte bij het modelleren van windprofielen doorgaans $Z_r = 10\text{m}$ wordt genomen, wordt bij onze proeven in hoofdstuk 3 een referentiehoogte van $Z_r = 60\text{m}$ gebruikt. (Det Norske Veritas, 2010)

1.2.1.1. Exponentiële coëfficiënt

De exponentiële coëfficiënt, α , is afhankelijk van de oppervlakteruwheid. Deze exponent wordt bepaald door windsnelheidsmetingen op verschillende hoogten te doen. De exponent α moet gelijk zijn in het windsnelheidsprofiel gemeten in de windtunnel alsook buiten de windtunnel op ware grootte. (Wang et al, 1996)

Algemeen wordt aangenomen dat voor een graslandschap $\alpha = \frac{1}{7} \approx 0,143$, ook gekend onder de naam 'the one seventh power law'. (Gipe, 2004), (Varshney & Poddar, 2011) Deze coëfficiënt vergroot naarmate er meer weerstand is, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van gebouwen, en verkleint bij minder ruwheid, zoals een zeeoppervlak. Meestal kan op zee de waarde voor α worden aangenomen van $\alpha = 0,11$. Voor kalme zee wordt aangenomen dat

$\alpha = 0,106 \pm 0,029$. (Hsu, 1993)

(3)

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{\bar{U}}{\bar{U}_r}\right)}{\ln\left(\frac{Z}{Z_r}\right)}$$

Hoe wordt de exponentiële coëfficiënt (α) bepaald voor situaties op zee? Voor hoogtes van 5m tot 10m kan de informatie over windsnelheid komen van anemometers op zeeboeien. Toch is deze hoogte vaak onvoldoende. Daarom worden er ook anemometers geplaatst op verschillende hoogtes op platformen van de olie-en gasindustrie. Samen met de anemometers die constant meten worden er ook temperatuursensoren en barometers geplaatst. Bij de plaatsing ervan moet men ervoor zorgen dat de te meten luchtstroom niet verstoord wordt door de aanwezigheid van het platform zelf. Als zowel de windsnelheden gekend zijn en de hoogten van de anemometers kan er met de bovenstaande formule (3) de exponentiële coëfficiënt bepaald worden. (Hsu, 1993)

1.2.2. Logaritmisch windsnelheidsprofiel

In de hypothetische grenslaag gaan we ervan uit dat de afschuifspanning $\left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial Z}\right)$ van de wind enkel afhankelijk is van de hoogte (Z) in de grenslaag boven het wateroppervlak, de schuifspanning van het oppervlak (τ_0) en de dichtheid van de lucht (ρ_a). Andere parameters zoals corioliskracht worden verwaarloosd in het logaritmisch snelheidsprofiel.

(4)

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial Z} = f(Z, \tau_0, \rho_a)$$

Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de oppervlakteruwheid (z_0), de horizontale drukgradiënt en de hoogte van de atmosferische grenslaag is ingerekend in de schuifspanningscoëfficiënt van het oppervlak (τ_0). De enige factor die iets meer zegt over de snelheid is de zogeheten wrijvingssnelheid (u_*). (Holmes, s.d.) Bij wrijvingssnelheid wordt de schuifspanning voorgesteld als een maat van snelheid. Een vuistregel is dat de wrijvingssnelheid ongeveer één tiende bedraagt van de gemiddelde windsnelheid op referentiehoogte. (American Institute of Chemical Engineers, s.d.)

(5)

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_a}}$$

u_* = wrijvingssnelheid (m/s)
 τ_0 = schuifspanningscoëfficiënt van het oppervlak (N/m²),
 ρ_a = de dichtheid van de lucht (kg/m³)

Door het combineren van de twee bovenstaande formules volgt:

(6)

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial Z} = cte. \frac{u_*}{Z}$$

Uit dimensieanalyse volgt een dimensieloze waarde, de zogeheten 'Von Karman's constante' (κ), die de afschuifspanning van de wind uitdrukt. (Holmes, s.d.)

(7)

$$\left(\frac{Z}{u_*}\right) \cdot \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial Z}\right) = \frac{1}{\kappa} = constante$$

Het logaritmisch windsnelheidsprofiel is een betrouwbaarder profiel dan de machtswet. Vooral in de onderste 50m, omdat er in het logaritmisch windsnelheidsprofiel ook rekening gehouden wordt met de wrijvingsnelheid (u_*) en de Von Karman's constante (κ). Deze universele constante is door metingen in windtunnels bepaald met behulp van bovenstaande formule (7). Algemeen wordt aangenomen dat deze waarde $\kappa = 0,41$ bedraagt. Tevens vermelden verschillende bronnen een waarde die ligt tussen $\kappa = 0,40 \pm 5\%$. (Trinh, s.d.), (Zhang et al, 2008)

De integratie van $\left(\frac{Z}{u_*}\right) \cdot \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial Z}\right) = \frac{1}{\kappa}$ naar Z geeft het logaritmisch windsnelheidsprofiel: (McDonough, s.d.)

(8)

$$\bar{U}_{(Z)} = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln \frac{Z}{z_0}$$

$\bar{U}$ = gemiddelde windsnelheid op hoogte Z

u_* = wrijvingsnelheid

κ = Von Karman's constante = 0,41

Z = hoogte ten opzichte van het zeeoppervlak

z_0 = oppervlakteruwheidslengte in de windtunnel, integratieconstante. Voor kalme zee wordt aangenomen dat $z_0 = 0,001$ m. (ESDU 85020, s.d.)

De oppervlakteruwheidslengte, z_0 , is een parameter voor de ruwheid van het terrein. Er zijn waarden toegekend aan z_0 , afhankelijk van de ondergrond en van de ruwheid. Voor ruwe zee wordt door ESDU normen aangenomen dat $z_0 = 0,001$ m. Een andere bron (Det Norske Veritas, 2010) beschrijft de ruwheidslengte voor een zee zonder golven als $z_0 = 0,0001$ m en voor een zee met golven varieert $z_0 = 0,01$ m tot $0,0001$ m. Voor de voorstelling van de referentiecurven in onze proeven zal gekozen worden voor 3 curven waarbij $z_0 = 0,01$ m ; $0,001$ m ; $0,0001$ m bedragen. (American Meteorological Society, 2012)

In de onderste zone van 50 meter van de grenslaag gebruikt men beter het logaritmisch snelheidsprofiel dan het machtswetprofiel. Het machtswetprofiel is onnauwkeuriger in deze onderste zone, maar is daarentegen wel representatief voor de weergave van de bovenste zone van de grenslaag, die zich bevindt op een hoogte vanaf 50 meter. (Varshney & Poddar, 2011)

1.2.2.1. Factor 'd' voor een hoger nulniveau

Voor heel ruwe oppervlakten met veel beplanting, bomen of hoge gebouwen wordt dit logaritmisch snelheidsprofiel aangepast met een extra factor, 'd'. Deze factor 'd' is de hoogte boven het aardoppervlak waar de windsnelheid nul bedraagt. Er wordt aangenomen dat dit nulniveau ongeveer 1 tot 2m lager is dan de gemiddelde hoogte van de bomen en gebouwen. Voor open zee en open grasland bedraagt deze extra factor nul, waardoor deze wegvalt. Voor stedelijk gebied en buitenwijken ligt 'd' in de grootorde van 5 tot 25m. (Chen, 1997) Het logaritmisch snelheidsprofiel wordt dan bepaald door de aangepaste formule:

(9)

$$U_{(Z)} = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{Z - d}{z_0}\right)$$

1.2.2.2. Stabiliteit van de atmosfeer

De windsnelheid in de grenslaag is afhankelijk van verschillende factoren. De ruwheid van het aardoppervlak, de hoogte, maar ook van de temperatuur in de lucht. Er wordt dan gesproken over de stabiliteit van de atmosfeer. De temperatuur heeft namelijk ook invloed op de bewegingen van de lucht. Zelfs in een tijdsspanne van 24 uur zal het windprofiel veranderen door het verschil in temperatuur tussen dag en nacht. De stabiliteit van de atmosfeer kan worden omschreven als de hoeveelheid weerstand tegen verticale luchtbewegingen. (Wei & Desmond, s.d.), (Det Norske Veritas, 2010)

De thermische effecten kunnen worden ingedeeld in drie categorieën: een stabiele, een onstabiele atmosfeer en een neutrale laagvorming. Meestal worden situaties bij een neutrale atmosfeer bekeken.

Als het aardoppervlak hard wordt opgewarmd door de zon, dan zal de warme lucht nabij het oppervlak beginnen stijgen. Naarmate de lucht verder stijgt zal de luchtdruk verminderen waardoor de lucht zal uitzetten en adiabatisch zal afkoelen.

Neutrale atmosfeer:

Het adiabatisch koelen van de stijgende lucht gebeurt in evenwicht met de omgevingslucht. Dit is vaak het geval bij sterke winden die de lucht mengen. Turbulentie wordt dan minder veroorzaakt door de thermische effecten, maar eerder door wrijving met het aardoppervlak.

Stabiele atmosfeer:

Als door het adiabatisch koelen de verticaal stijgende lucht harder afkoelt dan de lucht uit zijn omgeving, dan zal het stijgen worden onderdrukt. Dit gebeurt vaak bij koude nachten als de ondergrond ook koud is. Bij een stabiele atmosfeer zal turbulentie hoofdzakelijk veroorzaakt worden door wrijving met de aarde en in mindere mate door het mengen van stijgende lucht.

Onstabiele atmosfeer:

Als er geen thermisch evenwicht wordt bereikt met de omgevingslucht door de adiabatische afkoeling dan zal de lucht verder stijgen en turbulentie veroorzaken. De lucht zal verticaal gemengd worden, waardoor er een relatief klein verschil in windsnelheid zal zijn met de hoogte.

In het logaritmischnelheidsprofiel aangevuld met een extra parameter (ψ) om de stabiliteit van de lucht uit te drukken. Het logaritmischnelheidsprofiel wordt dan de volgende:
(10)

$$U_{(Z)} = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \left(\ln \frac{Z}{Z_0} \right) + \psi$$

Voor een onstabiele atmosfeer zal ψ kleiner zijn dan 0, voor een stabiele atmosfeer is ψ groter dan 0. Voor een neutrale atmosfeer heeft ESDU een formule bepaald voor ψ . De waarde voor ψ is redelijk klein in vergelijking met $\ln \frac{Z}{Z_0}$. (Det Norske Veritas, 2010), (Burton et al, 2001)

(11)

$$\psi = \frac{34,5 f \cdot Z}{u_*}$$

1.2.3. Charnock –formule

Om de ruwheidslengte z_0 voor een zeeoppervlak te bepalen kan gebruik gemaakt worden van de 'Charnock-formule', die enkel geldig is voor volledig ontwikkelde zeeën. (Argyriadis, s.d.)

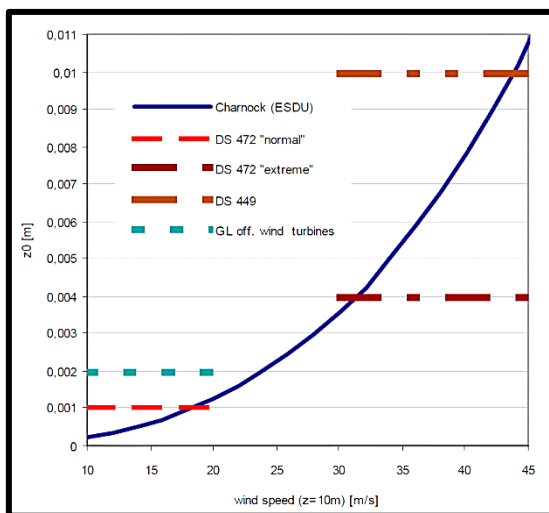
$$(12) \quad z_0 = \frac{u_*^2}{cg}$$

z_0 = ruwheidslengte (m)

g = gravitatie'constante' (m/s^2)

u_* = wrijvingssnelheid (m/s)

c = empirische constante met c die varieert tussen 90 voor volle zee tot 30 nabij de kust.



De ruwheidslengte z_0 (in m) kan uitgezet worden in een functie van de gemiddelde windsnelheid (in m/s), (grafiek 02).

Voor offshore locaties is de ruwheidsparameter z_0 niet constant, maar afhankelijk van de windsnelheid, de afstand tot het land, de waterdiepte en de golfhoogte. (Det Norske Veritas, 2002)

Grafiek 02: Ruwheidslengte z_0 varieert in functie van de windsnelheid (Argyriadis, s.d.)

1.2.4. Invloed van het Corioliseffect

De corioliskracht is het gevolg van het ronddraaien van de aarde. Hierdoor wijken luchtstromen af rond de drukgebieden.

De invloed van het corioliseffect wordt over het algemeen verwaarloosd in een het logaritmische snelheidsprofiel. In de turbulentieprofielen daarentegen wordt het corioliseffect wel mee in rekening gebracht.

In de regio van de atmosferische grenslaag zal de wind van richting veranderen door het corioliseffect, behalve in de onderste (centi)meters. Daar zal de luchtstroom van richting veranderen door de ruwheid van het aardoppervlak, maar niet door de corioliskracht.

De parameter voor het corioliseffect (f) wordt bepaald door de hoeksnelheid van de rotatie van de aarde (Ω) en door de geografische breedte, (latitude; lat).

(13)

$$f = 2\Omega \cdot \sin |lat|$$

Voor de metingen die plaatsvonden in Peutz in Mook (Nederland) bedraagt de factor van het corioliseffect $f = 1,145 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

Uit deze formule (13) wordt ook duidelijk dat er ter hoogte van de evenaar geen corioliseffect optreedt. De latitude is hier immers 0° .

De hoeksnelheid van de aarde (Ω) kan eenvoudig worden berekend. De aarde heeft bij benadering 23 uur, 56 minuten en 4 seconden nodig om één omwenteling te maken.

$$2\pi \text{ radialen} / (23 \cdot 3600 + 56 \cdot 60 + 4) \text{ seconden} = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s} = \Omega.$$

ESDU geeft een verband tussen de parameter voor het corioliseffect (f) en de hoogte van de atmosferische grenslaag ($Z_{\max}$) voor gematigde latitudes (30° - 60° N of Z). (ESDU 85020, s.d.)

(14)

$$Z_{\max} = \frac{u_*}{6f}$$

Door de formules (10) en (14), te combineren kan de snelheid van de geostrofische wind (U_g) op de maximale hoogte van de grenslaag ($Z_{\max}$) berekend worden.

(15)

$$U_g = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \sqrt{\left(\ln\left(\frac{u_*}{f \cdot Z_0}\right) - A\right)^2 + B^2}$$

Met volgende parameters in neutrale atmosferische condities; $A = \ln 6$ en $B = 4,5$. (Burton et al, 2001)

1.2.5. Turbulentie

Turbulentie-intensiteit is een dimensieloos getal en is afhankelijk van de sterkte van de fluctuaties in de windsnelheid en van de uurlijkse gemiddelde windsnelheid bij eenzelfde hoogte. (ESDU 85020, s.d.)

De fluctuaties in windsnelheid worden veroorzaakt door wervelingen in de luchtstroom, die op hun beurt in de eerste plaats worden veroorzaakt door de ruwheid van het aardoppervlak. Verder heeft ook de stabiliteit van de atmosfeer een effect.

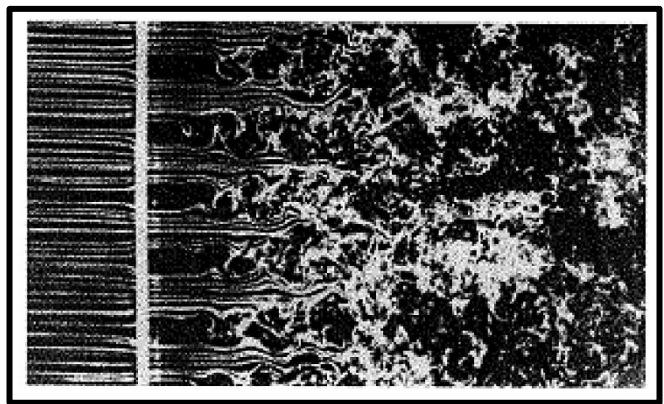
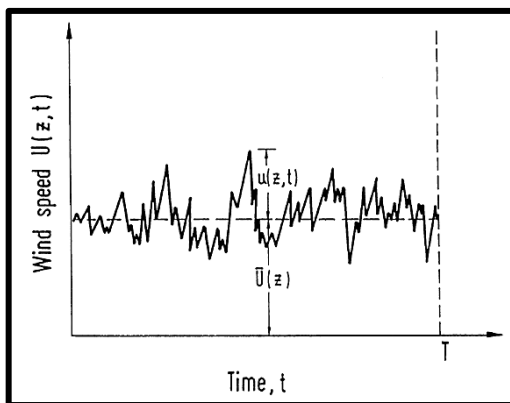


Fig. 03. (links) Variaties van de longitudinale component van een turbulente wind in de tijd.
(Chen, 1997)

Fig. 04. (rechts) Turbulentie achter een scherm (Khusnutdinova, 2009)

De gemiddelde windsnelheid is het gemiddelde van alle ogenblikkelijke windsnelheden, zoals ook zichtbaar op fig. 03.

(16)

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i$$

U_i = de windsnelheid op een bepaald ogenblik

$\bar{U}(z)$ = de gemiddelde windsnelheid over een bepaalde tijd

$u(t)$ = Het verschil tussen U_i en $\bar{U}(z)$; fluctuatie

n = aantal samples

Met de hotwire probes wordt er gemeten aan 1000Hz, elke meting duurt twee minuten wat 120 000 samples (n) oplevert per meting op één hoogte of op één breedte. (Jørgensen, 2002)

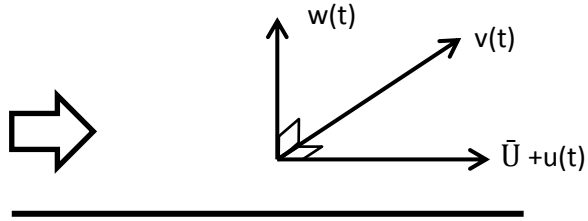


Fig.05. Componenten van turbulentie (Holmes, s.d.)

De turbulentie kan worden opgedeeld in drie verschillende componenten, zoals te zien in fig. 05. De fluctuerende snelheid kan in principe gemeten worden in de drie onderstaande dimensies:

$u(t)$ = longitudinaal; parallel met de gemiddelde windrichting en parallel met de grond

$v(t)$ = lateraal; parallel met de grond maar loodrecht tegenover $u(t)$

$w(t)$ = verticaal; loodrecht op de grond.

In dit onderzoek wordt enkel de longitudinale richting $\bar{U} + u(t)$, parallel met de gemiddelde windrichting bekeken omdat onze hotwireprobes slechts in één richting (dimensie) kunnen meten.

De longitudinale turbulentie-intensiteit, I_u , is de verhouding van de standaarddeviatie σ_u , die is afgeleid van de variantie van de longitudinale windsnelheden σ_u^2 , en van de gemiddelde windsnelheid $\bar{U}$.

(17)

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}}$$

I_u = Turbulentie intensiteit

σ_u = standaarddeviatie longitudinale windsnelheid

$\bar{U}$ = gemiddelde windsnelheid

De standaarddeviatie, σ_u , is de vierkantswortel van de variantie (σ_u^2) van de windsnelheden, en wordt bepaald door (Jørgensen, 2002):

(18)

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}$$

De standaarddeviatie is redelijk constant met de hoogte. Bij gevolg zal de turbulentie-intensiteit afnemen bij toenemende hoogten. Voor turbulentie nabij de grond wordt aangenomen dat $\sigma_u \approx 2,5 u_*$. (Burton et al, 2001)

Bijgevolg wordt de formule voor turbulentie, in combinatie met formule (8) en $\kappa = 0,4-0,41$:
(19)

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} = \frac{2,5 \cdot u_*}{\frac{u_*}{\kappa} \cdot \left(\ln \frac{Z}{Z_0} + \psi \right)} = \frac{1}{\left(\ln \frac{Z}{Z_0} \right) + \psi}$$

Voor situaties met een uniform terrein van minstens 30 km windopwaarts, wat bijna altijd het geval is voor een situatie op zee, geeft ESDU een meer specifieke formule: (ESDU 85020, s.d.)

(20)

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} = \frac{\sigma_u}{u_*} \cdot \frac{u_*}{\bar{U}}$$

Waarbij

$$(21) \quad \frac{\sigma_u}{u_*} = \frac{7,5 \eta (0,538 + 0,09 \ln(\frac{Z}{Z_0}))^p}{1 + 0,156 \ln(\frac{u_*}{f Z_0})} \text{ met } \eta = 1 - \frac{6fZ}{u_*} \text{ en } p = \eta^{16}$$

$$(22) \quad \frac{u_*}{\bar{U}} = \frac{1}{2,5 \left(\ln(\frac{Z}{Z_0}) + 34,5 \frac{fZ}{u_*} \right)} \text{ voor een neutrale atmosfeer.}$$

$1/2,5$ komt van $\kappa = 0,4-0,41$ (Von Kármán constante),
 $34,5 \cdot f/u_*$ komt van de stabiliteitsfactor ψ (zie formule 11)

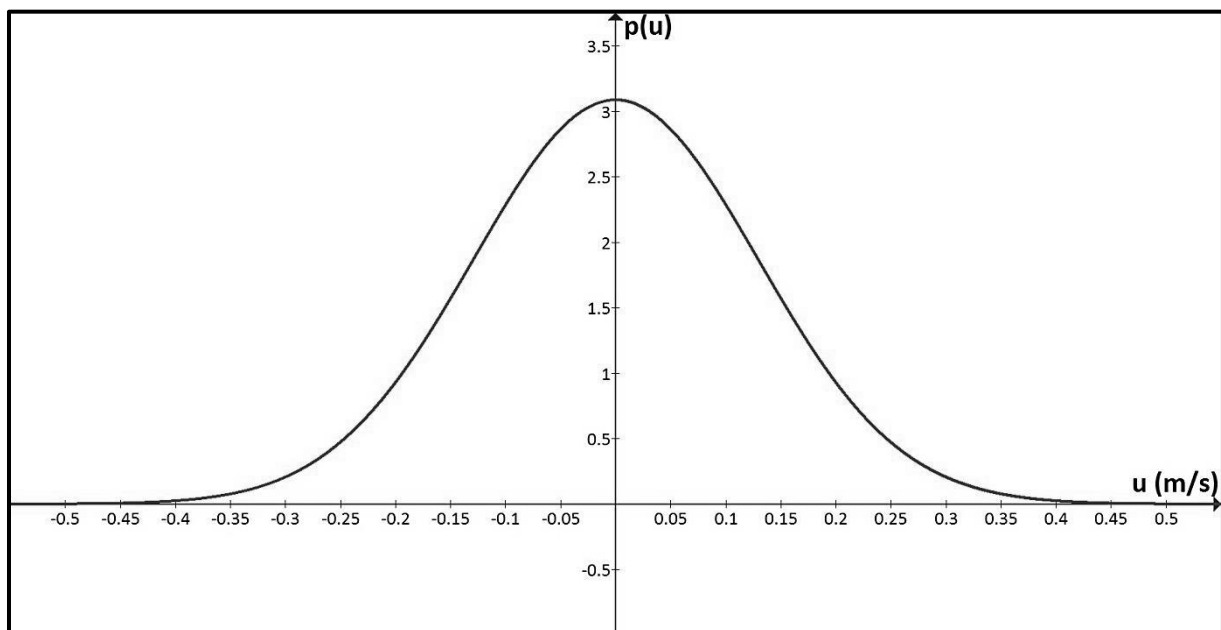
De experimentele data die gebruikt werd om formule (21) af te leiden heeft een foutenmarge van ongeveer 10% voor uniform terrein van minstens 30 km windopwaarts voor de longitudinale component. (ESDU 85020, s.d.)

1.2.6. Kansdichtheid (*Probability density*)

De kansdichtheid $p(u)$ beschrijft de verdeling van de fluctuerende longitudinale snelheidscomponent en heeft als eenheid s/m. In veel gevallen kan men veronderstellen dat de atmosferische turbulentie verdeeld is volgens de normaalverdeling of Gausscurve met functie: (ESDU 85020, s.d.)

(22)

$$p(u) = \frac{1}{\sigma_u \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u}{\sigma_u}\right)^2\right)}$$



Grafiek 03. Voorstelling van een normaalverdeling gebaseerd op de resultaten van proef 22 en formule (22), [eigen grafiek]

In de praktijk zullen er ook regio's zijn die zich niet volgens de normaalverdeling gedragen. Vooral in de onderste 30 m van de atmosferische grenslaag zullen de windsnelheden dichter bij de gemiddelde windsnelheid liggen. Toch volstaat het voor de meeste toepassingen om te veronderstellen dat de kansdichtheid zich volgens de normaalverdeling gedraagt. (ESDU 85020, s.d.)

1.2.7. Integrale lengteschaal (*Integral lengthscale*)

In een turbulente windstroom bevinden zich zowel wervelingen op grote als op kleine schaal, zoals te zien in fig. 04. De grote wervelingen zorgen voor de energieoverdracht terwijl in de kleine wervelingen de kinetische energie wordt omzet in hitte. De grote wervelingen worden enkel beperkt in hun grootte door fysische grenzen zoals het aardoppervlak. De grootte van deze grote wervelingen wordt uitgedrukt met de integrale lengteschaal. (P. McMurtry, 2000)

Om beter de verspreiding van energie in een stroom te begrijpen kan het interessant zijn om de integrale lengteschaal te kennen. De integrale lengteschaal wordt bepaald door de grootste afstand tussen twee punten, in ons geval de hoogte, in een stroom. In een pijp bijvoorbeeld zal de integrale lengteschaal de diameter van die pijp bedragen. In de atmosferische grenslaag is er niet zo'n beperkende factor die de grootte van de wervelingen zo strikt beperkt. (P. L. O'Neill et al, 2004)

De grootte van de wervelingen en bijgevolg ook de integrale lengteschaal zijn afhankelijk van de hoogte boven het aardoppervlak (Z), de windsnelheid ($\bar{U}$) en van de terreinruwheid uitgedrukt met ruwheidslengte z_0 .

Zo zal de grootte van de werveling, in de laag vlakbij het aardoppervlak, bijna onveranderlijk zijn met de windsnelheid en de wervelingen zullen kleiner zijn over een ruwere oppervlakte (een oppervlakte met een grotere ruwheidslengte z_0). De grootte van de wervelingen varieert vlakbij de grond vooral in functie van de maat van oppervlakteruwheid (z_0).

Op grotere hoogten boven het nulniveau zullen de grootte van de wervelingen zich uitstrekken in proportie met de hoogte van de atmosferische grenslaag en groter worden bij een ruwere ondergrond en als de windsnelheid op referentiehoogte ($\bar{U}_r$) stijgt. (ESDU 85020, s.d.)

Het nut van de integrale lengteschaal wordt duidelijk in onderstaand citaat:

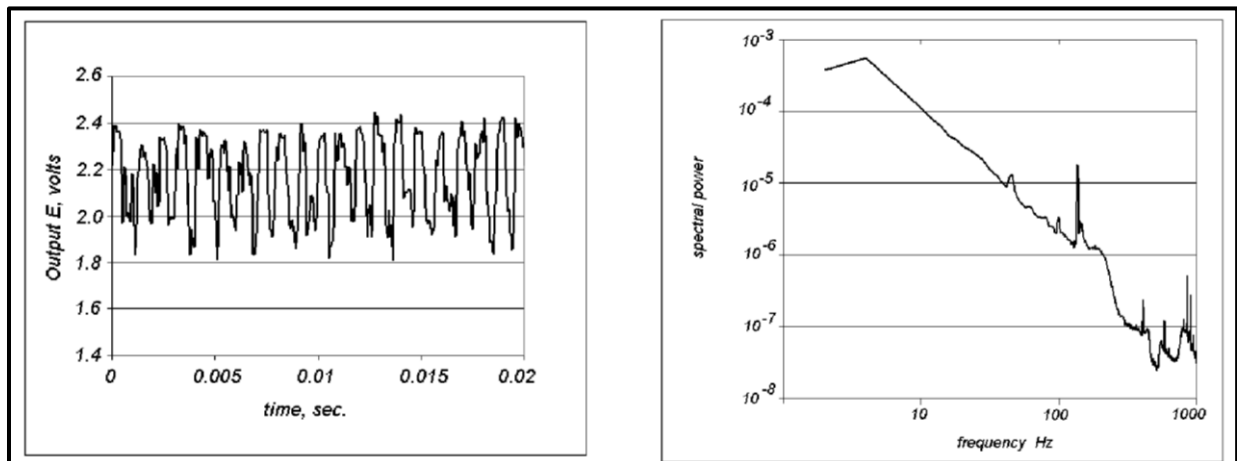
“In order to obtain the integral length scale, the random behavior of a fluctuating velocity at a particular point in space has been a point of discussion. For example, for small objects, it would be reasonable to assume that the wind force acting due to gustiness on a point could be approximated as the force acting over the whole object. However, for large constructions such as low-rise buildings, bridges, or towers, this can no longer be the case. Therefore, there can be no direct relationship between the random behavior of the wind from place to place along the structure. It is nonetheless necessary to obtain the measure of distribution of gust, say, along a building; thus, statistical method must be employed. Integral length scales of turbulence are measures of average size of turbulent eddy in the flow.” (Varshney & Poddar, 2011a)

De waarde van de integrale lengteschaal xL_u zal voor wind in de regio van 20m tot 60m boven het wateroppervlak variëren tussen 100m en 240m. (Det Norske Veritas, 2010)

Volgens ESDU (ESDU 85020, s.d.) zal de integrale lengteschaal voor een ruwheidslengte van $z_0 = 0,001\text{m}$ en een hoogte $Z = 60\text{m}$ een waarde aannemen van 260m bij een windsnelheid van 20m/s op referentiehoogte 10m.

1.2.8. Spectrale vermogensdichtheid (*Power spectral density*)

De spectrale vermogensdichtheid wordt aangeduid als S_u en duidt aan hoe de energie van de windsnelheid in een bepaald punt in de ruimte verdeeld is tenopzichte van de frequentie van de fluctuaties. (Det Norske Veritas, 2010) De fluctuaties ontstaan door wervelingen in een turbulente windstroom.



Grafiek 04: Fluctuatiefrequentie van de windstroom, gemeten in volt (links) en de bijpassende spectrale vermogensdichtheid (rechts) van de wind achter een cilinder. (Jørgensen, 2002)

Spectrale vermogensdichtheid van de longitudinale snelheidsfluctuaties: (Kozmar, 2011a)

(23)

$$\sigma_u^2 = \int S_u(r) dr$$

σ_u^2 = variantie

$S_u(r)$ = Spectrale vermogensdichtheid van de fluctuatiefrequentie

De variantie, σ_u^2 , zegt iets over de fluctuatie in de windsnelheid. De spectrale vermogensdichtheid beschrijft de verdeling van de fluctuatiefrequenties en dit is belangrijk om de dynamische effecten van wind te beoordelen. (ESDU 85020, s.d.) Als de frequentie van de windfluctuaties dicht bij de natuurlijke frequentie van een constructie ligt kan de constructie of structuur in resonantie gaan. De dynamische effecten van de wind kan constructies beschadigen.

In de hoog-frequente band ($\frac{r \cdot Z}{U} > 0,1$) worden de turbulentie-eigenschappen voorgesteld volgens de volgende vergelijking, ook het ESDU-model genoemd.

(24)

$$\frac{r \cdot S_u}{\sigma_u^2} = A \cdot \left(\frac{x_{Lu} \cdot r}{\bar{U}} \right)^{-2/3}.$$

$$\text{Met } A = B \left(1 + 0,3151 \left(1 - z/z_{max} \right)^6 \right)^{2/3}.$$

De waarde 'B' bedraagt 0,115 voor grote hoogtes en stijgt tot een waarde van 0,142 vlakbij de grond. (ESDU 85020, s.d.), (Argyriadis, s.d.)

Deze vergelijking (24) voor de hoog-frequente band is gebaseerd op de 'Von Kármán spectraal vergelijking': (ESDU 85020, s.d.)

(25)

$$\frac{r \cdot S_u}{\sigma_u^2} = \frac{4r_u}{(1 + 70,8r_u^2)^{5/6}} \text{ met } r_u = \frac{x_{Lu} \cdot r}{\bar{U}}$$

Naast Von Kármán hebben ook o.a. Kaimal en Kolmogorov een model voor spectrale vermogensdichtheid gemaakt, die representatief zijn voor metingen op land. Deze worden hier niet verder besproken.

Een spectrummodel dat werd ontwikkeld voor onderzoeken van windsnelheden boven zee is het spectrummodel van Ochi and Shin, dat ook wordt toegepast voor het ontwerpen van offshore constructies. Het heeft, in vergelijking met modellen voor metingen op land, meer energiehoeveelheid in de lagere frequentie band ($r < 0,01\text{Hz}$), maar voor heel laag-frequente banden ($r < 0,001\text{Hz}$) is het Frøya model dan weer aanbevolen. Het Frøya model is gebaseerd op metingen op zee in een neutrale atmosfeer, en is boven alle voorgaand besproken modellen beter voor onderzoek in de laag-frequente banden op zee. (Det Norske Veritas, 2010)

Ochi and Sin model:

$$(26) \quad \frac{r.S(r)}{\sigma_u^2} = \begin{cases} 583 r_* & \text{voor } r_* = 0 \text{ t.e.m. } 0,003 \\ \frac{420 r_*^{0.7}}{(1+r_*^{0.35})^{11.5}} & \text{voor } r_* = 0,003 \text{ t.e.m. } 0,01 \\ \frac{838 r_*}{(1+r_*^{0.35})^{11.5}} & \text{voor } r_* < 0,1 \end{cases} \quad \text{met } r_* = \frac{r.Z}{U_{10}(Z)}$$

Frøya model:

$$(27) \quad S_u(r) = 320 \cdot \frac{\left(\frac{U_{10}}{10}\right)^2 \cdot \left(\frac{Z}{10}\right)^{0.45}}{(1+\tilde{r}^b)^{5/3b}} \quad \text{met } \tilde{r} = 172 \cdot r \cdot \left(\frac{Z}{10}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{U_{10}}{10}\right)^{-0.75} \quad \text{en } b = 0,468$$

Voor de analyse van de spectrale vermogensdichtheid moet de bemonsteringsfrequentie voldoen aan het Nyquist-Shannon criterium. Dit criterium houdt in dat de bemonsteringsfrequentie minstens twee keer zo veel moet zijn als de maximale frequentie in de luchtstroom, zie grafiek 05. (Jørgensen, 2002)

Grafiek 05. Nyquist-Shannon criterium waarbij de bemonsteringsfrequentie (SR) minstens twee keer zo groot moet zijn als de maximale signaalfrequentie (f_{max}). (Jørgensen, 2002)

De onzekerheid van de spectrale vermogensdichtheid voor de longitudinale richting bedraagt ongeveer 20% voor uniform landschap van minstens 30 km windopwaarts en in de hoog-frevente band. (ESDU 85020, s.d.)

De spectrale vermogensdichtheid werd op onze proeven met een configuratie van een marien voorland en lage windsnelheden niet toegepast. In grafiek 06 vindt u een voorbeeld van de spectrale vermogensdichtheid in een landelijk gebied.

Grafiek 06. Voorbeeld van een voorstelling van spectrale vermogensdichtheid in een landelijk gebied. (Kozmar, 2011a)

Ook de integrale lengteschaal hangt samen met de spectrale vermogensdichtheid.

Voor ongeveer de onderste 10% van de atmosferische grenslaag, de atmosferische oppervlaktelaag genoemd, wordt de integrale lengteschaal gegeven door volgende vergelijking:

(28)

$$^xL_u = \frac{Z}{2\pi \cdot r_m}$$

Een andere benadering voor het bepalen van de integrale lengteschaal, maakt gebruik van de spectrale vermogensdichtheid gebaseerd op het model van Von Kármán. (Agrawal et al, 2012)

(29)

$$^xL_u(Z) = \frac{U(Z) \cdot S_u(Z, 0)}{\sigma_u^2(Z)}$$

HOOFDSTUK 2. - DE WINDTUNNEL

2.1. MEETINSTRUMENTEN

2.1.1. Pitotbuis

De pitotbuis meet een drukverschil dat kan worden omgerekend naar de aanwezige windsnelheid. Er bevinden zich 2 pitotbuizen in de tunnel: één vlak voor de meetschijf in het laterale midden van de tunnel en één aan de kant van de wand, vlak voor de meetschijf. De pitotbuis in het midden is daar geplaatst omdat men eventuele fluctuaties in windsnelheid wil kennen op deze locatie. De pitotbuis aan de kant van de wand wordt van belang bij drukmetingen als een relatief groot schaalmodel een deel van de windstroom blokkeert. Het verschil tussen de twee pitotbuizen is dan een maat voor de blokkering in de tunnel. Elke pitotbuis heeft twee uitgangen die verbonden zijn met een manometer die buiten de tunnel hangt.

De pitotbuis moet parallel met de luchtstroom worden geplaatst. Een misalignement van 3° kan een fout drukverschil veroorzaken van +/-1%. (ACIN Instruments bv, s.d.)

Werkingsprincipe van de pitotbuis (zie *fig. 07.*):

De pitotbuis bestaat uit twee holle buizen in elkaar en meet eenerzijds de statische druk (geel) en anderzijds de totale druk (rood). Het heeft bijgevolg ook twee uitgangen.

De statische druk wordt bepaald door de lucht die binnenkomt door de kleine gaatjes vlakbij de kop. Deze statische druk wordt niet beïnvloed door de windsnelheid maar wel door de atmosferische druk, die samenhangt met de hoogte. Aangezien een schip op zeeniveau vaart is deze druk minder variabel dan in toepassingen uit de vliegindustrie. De statische druk zal immers dalen naarmate men zich hoger in de atmosfeer bevindt.

De totale druk (rood) die binnenkomt langs de 'grote' opening in de kop is de som van de statische druk en de dynamische (stuw)druk: $p_t = p_s + \frac{\rho \cdot v^2}{2}$.

De dynamische druk daarentegen is de druk veroorzaakt door de windsnelheid. Als de windsnelheid stijgt zal de dynamische druk toenemen. De eenheid van dynamische druk is kg/m^2 . Dynamische druk is het verschil van de totale druk en de statische druk.

Dit drukverschil kan in principe direct worden afgelezen op de manometer, maar de manometer kan dit drukverschil ook omzetten naar een windsnelheid met het volgende

verband: $p_t = p_s + \frac{\rho \cdot v^2}{2}$ en bijgevolg is $v = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_t - p_s)}$.

p_t = totale druk

p_s = statische druk

$\frac{\rho \cdot v^2}{2}$ = dynamische druk

ρ_a = dichtheid lucht

$v = U_i$ = ogenblikkelijke
windsnelheid

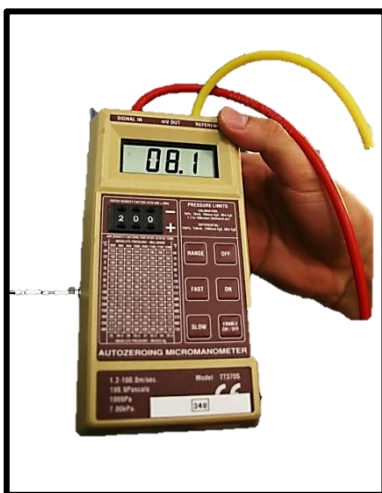


Fig. 06. Manometer met rode en de gele intake: de 2 uitgangen van de pitotbuis, resp. de totale druk en de statische druk [eigen foto].

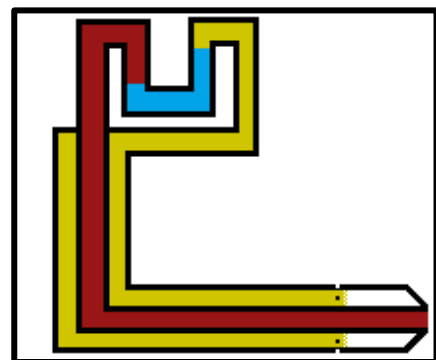


Fig. 07. Pitotbuis, [eigen figuur]

2.1.2. Snelheidsmeter 'Velocicalc 8345' van TSI®:

De snelheidsmeter (TSI) is een meetinstrument dat o.a. de windsnelheid aangeeft. De meetsensor kan windsnelheden meten van 0 tot 30 m/s met een nauwkeurigheid van $\pm 3\%$ of 0,015 m/s, welke het grootst is. (TSI incorporated, 2005) Het werkingsprincipe is gelijklopend aan die van een thermische anemometer, waarbij de windsnelheid bepaald wordt door de hoeveelheid stroom die nodig is om een temperatuursverschil te behouden. Dit is hetzelfde principe als dat van de hotwire probes in paragraaf 2.1.3.

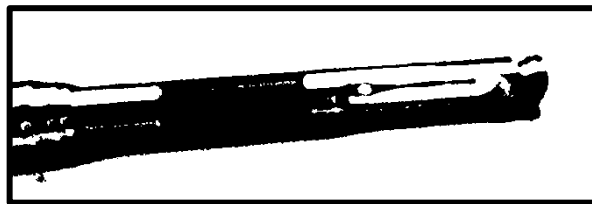
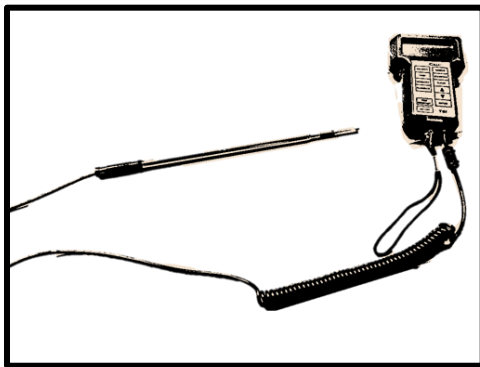


Fig.08 en 09. Velocicalc 8345 van TSI (links) en detail meetprobe (rechts) [eigen foto's].

De druk die gemeten wordt door de pitotbuis wordt omgerekend naar een snelheid. Tijdens de voor-en nameting worden de probes gecontroleerd door de verkregen windsnelheden te vergelijken met snelheden die de pitotbuis en de TSI aangeven. De TSI wordt enkel gebruikt tijdens de voor-en nacontrole.

Nabij de sensor staat een oriëntatiekuiltje (●). Dit kuiltje moet naar de wind toe worden gericht voor de correcte stand van de TSI ten opzichte van de windrichting te garanderen.

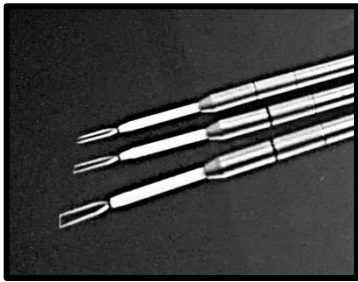
Regelsnelheid

Halverwege de lengte van het voorland zijn twee TSI's aan het plafond bevestigd. De windsnelheid die hierdoor gemeten wordt, wordt gebruikt om de regelsnelheid van de tunnel constant te houden.

Fig.10. TSI's [eigen foto].



2.1.3. Hotwire probes (Jørgensen, 2002)



Er worden één-dimensionale hotwire-probes gebruikt voor het meten van de windsnelheid.

Fig. 11. Detail probes [eigen foto]

Het werkingsprincipe van de hotwire probe is het principe van thermische anemometrie.

Als er een elektrische stroom door een metalen draad gaat dan wordt er warmte opgewekt. De weerstand van het draadje zal veranderen als de temperatuur van de draad stijgt of daalt. Als de warmte die wordt opgewekt door de stroom in balans is met de warmte die het draadje afgeeft aan zijn omgeving dan spreekt men van een evenwicht. Als de windsnelheid toeneemt zal de warmte die de draad afgeeft aan zijn omgeving veranderen, zijn temperatuur zal veranderen en bijgevolg dus ook zijn weerstand. Om het evenwicht te behouden zal de hoeveelheid elektrische spanning op het draadje worden aangepast. Een bepaalde windsnelheid komt dus overeen met een bepaald voltage. Wat geregistreerd wordt is dus in principe een bepaald voltage, die later via de kalibratiekromme wordt omgezet in windsnelheden.

Het draadje van de hotwire probe is in beperkte mate onderhevig aan thermische inertie. De variaties in de weerstand van het draadje, veroorzaakt door veranderlijke windsnelheden, zullen gedempt worden door de thermische inertie, maar door een 'Constant Temperature Anemometer' (CTA) te gebruiken wordt het effect van thermische inertie geminimaliseerd omdat de weerstand onafhankelijk van de windsnelheid blijft omdat er constant wordt bijgeregeld. Hierdoor zijn er minder temperatuurschommelingen.

De probes worden in een probehouder geplaatst. Via bekabeling gaan de weerstandsveranderingen naar de CTA die bestaat uit een brug van Wheatstone en een versterker. Deze twee moeten er onder meer voor zorgen dat het thermisch evenwicht bewaard blijft, zo goed als ongeacht de snelheidsfluctuaties van de wind. Vervolgens gaan de voltageresultaten naar een 'signal conditioner' waar het CTA signaal met laag- en hoogdoorlaatfilters en een versterker worden bewerkt, alvorens de gegevens naar een A/D- (analoog-digitaal)converter worden gestuurd en tenslotte naar de computer.

Men zal een hoogdoorlaatfilter gebruiken als men de laag-frequente fluctuaties wil wegfilteren en als men enkel de hoog-frequente fluctuaties wil gebruiken voor spectrale vermogensdichtheid analyse. De laag frequente fluctuaties gedragen zich immers niet volgens een asymptotische limiet.

Het type van de probe die wordt gebruikt is een 'single sensor wire', geschikt voor metingen in een gas. De diameter is 5 μm en de lengte van de sensor wire bedraagt 3mm. Het draadje is dus zo'n 10 keer dunner dan een menselijk haar.

Het spreekt dus voor zich dat de probe relatief fragiel is, en met uiterste zorg moet behandeld worden. De grootste kans dat de probe beschadigd wordt, is tijdens het plaatsen van de probe in de probehouder. Verder moet de tunnel proper zijn. Hiervoor wordt er regelmatig gestofzuigd in de tunnel zodat de hoeveelheid vuil- en stofdeeltjes beperkt worden. De impact van vuil- en stofdeeltjes met het dunne draadje zou de probe kunnen beschadigen. Ook contaminatie van de meetprobe door kleine particels in de lucht kan de hittestroom van de probe verstoren op langere termijn. Sensors met een diameter van 5 μm kunnen in de normale luchtomstandigheden van een labo zonder problemen werken, op voorwaarde dat de probes regelmatig gekalibreerd worden.

De probe moet loodrecht staan op de windrichting en de probehouder moet parallel zijn met de windrichting. De richting van de probe tenopzichte van de windrichting moet dezelfde zijn tijdens de kalibratie als tijdens de meting. Op de probehouder staat een oriëntatiekuiltje (●). Als dit kuiltje naar boven is gericht zal de draad van de probe precies horizontaal zijn.

Probes en probehouders zijn elektrisch geïsoleerd en kunnen dus zonder te isoleren worden vastgezet aan de staander. Wij hebben lusterklemmen op de staander gezet en daarin de probehouders geplaatst. Zo kon de probehouder goed horizontaal worden gehouden en kon de probehouder toch snel los worden gemaakt als de opstelling veranderd moest worden.

De BNC-connector (Bayonet-Neill-Concelman-connector of bajonetsluiting) aan de datakabel daarentegen moet wel geïsoleerd worden. Dit gebeurde door de sluiting te overplakken met tape. (Jørgensen, 2002)

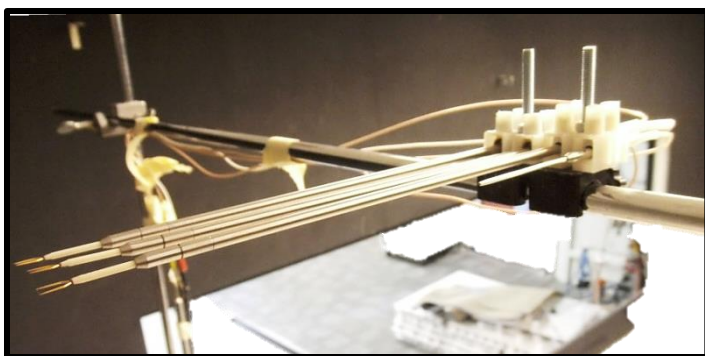


Fig. 12. De drie probes, probehouders in lusterklemmen en staander [eigen foto]

De kalibratie van de probes.

Bij de productie van de probes treden er verschillen op die leiden tot verschillende resultaten bij dezelfde regelsnelheid. Hiervoor wordt een eerste correctiefactor bepaald die uniek is voor elke probe en blijft gelden gedurende de levensduur van de probe. Daarenboven wordt de snelheid een tweede maal gecorrigeerd. Deze tweede correctie gebeurt aan de hand van een kalibratiecurve.

Deze kalibratiecurve wordt opgesteld de probes bloot te stellen aan gekende windsnelheden en de verkregen voltages te noteren. Het is hierbij ook belangrijk om de omgevingstemperatuur te noteren. Als er een verschil blijkt te zijn tussen de temperatuur tijdens de kalibratie en tijdens de meting dan moet hiervoor een temperatuurscorrectie worden toegepast. (Jørgensen, 2002)

Fouten of onzekerheden in het meetresultaat van een snelheidsproef met een CTA met een single sensor probe kunnen verschillende oorzaken hebben. Deze zijn o.a. fouten in de kalibratie, linearisatie door fouten in de kalibratiecurve, foutenmarge in de conversie van analoog naar digitaal, een onnauwkeurige positionering van de probe in de probehouder, onnauwkeurigheden van de temperatuur van de draad, verschil in omgevingstemperatuur en omgevingsdruk en verschillen in luchtvochtigheid en concentratieverschillen van de lucht.

In het resultaat van de meting door een hotwire probe worden de noemenswaardige onnauwkeurigheden veroorzaakt door het kalibreren (zo'n 1%), door variaties in de temperatuur (zo'n 1%) en door linearisatie (zo'n 0,5%). Variaties van atmosferische druk en concentratieverschillen tellen slechts in zeer geringe mate mee. De combinatie van deze fouten zou neerkomen op ongeveer 3% van de gemeten windsnelheid. (Jørgensen, 2002)

Hiernaast is er nog een bijkomende, grotere, foutenmarge door meetonnauwkeurigheden zoals onnauwkeurige instelling van de hoogte, een probehouder die niet exact 100% horizontaal is geplaatst,...

Alle metingen in dit onderzoek gebeuren aan 1000Hz en duurt 120s. Men neemt dus 120.000 samples per hoogte. De regelsnelheid van alle proeven (uitgezonderd de voor-en nametingen) bedraagt 4m/s.

2.1.4. Temperatuursensor:

De temperatuursensor meet constant de temperatuur in de windtunnel. Zo kan een temperatuurscorrectie worden toegepast op de meetresultaten van de probes. Deze temperatuurscorrectie wordt door de meetsoftware automatisch in de meetresultaten verwerkt. De temperatuursensor wordt tijdens de metingen geplaatst nabij één van de probes.

2.2. LAGESNELHEIDSWINDTUNNEL

2.2.1. Soorten windtunnels

2.2.1.1. Indeling

Er bestaan verschillende soorten windtunnels die ingedeeld worden naargelang de windsnelheden die ze kunnen genereren. Door de talrijke doeleinden in verschillende industriën en onderzoeksdomeinen zoals o.a. vlieg-en ruimtevaart, is de variatie in windsnelheden groot. (Benson, 2009a)

De indeling wordt met name bepaald door de verhouding van de gegenereerde lichtsnelheid in de tunnel tegenover de snelheid van het geluid. Deze verhouding wordt het Machgetal (M) genoemd. De snelheid van het geluid in een ideaal gas wordt bepaald door de formule:

$$v_s = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}$$

Voor lucht zal de snelheid van het geluid bij 20°C ongeveer 343m/s bedragen.

Waarbij

v_s = snelheid van het geluid [m/s]

γ = specifieke warmteverhouding,
voor lucht $\gamma = 1,4$ [dimensieloos]

R = gasconstante, voor lucht R =
 $286 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$

T = absolute temperatuur [K]

De benaming van de windtunnels gebeurt als volgt: (Benson, 2009a)

Lage snelheidswindtunnel (subsonisch)	<0,4 M
Hogesnelheidswindtunnel (subsonisch)	0,4 < M < 0,8
Transonisch	0,8 < M < 1,2
Supersonisch	1,2 < M < 5
Hypersonisch	M > 5

De windtunnel die werd gebruikt voor het onderzoek naar de profielmetingen van een mariene grenslaag is een lage snelheidswindtunnel.

2.2.1.2. Open en gesloten windtunnels

Verder kunnen windtunnels nog verder worden opgesplitst in twee groepen: de open en de gesloten windtunnel (resp. fig 13 en 14). Bij de open windtunnel zal er steeds verse lucht worden aangezogen en doorheen de windtunnel worden geblazen. In de duurdere, gesloten windtunnel zal de lucht circuleren en eventueel passeren langs een luchtbehandelingskamer waar bijvoorbeeld de temperatuur van de lucht kan worden bijgesteld. Een voordeel van een gesloten windtunnel is dat een deel van het moment van de circulerende lucht behouden blijft. Een ander voordeel van een gesloten windtunnel is dat er bij concentratiemetingen geen tracergassen in de ruimte buiten de tunnel kunnen komen. Als er in een gesloten windtunnel niet gedeeltelijk verse lucht van buitenaf wordt aangevoerd kan het zijn dat bij het uitvoeren van concentratiemetingen de concentratie van het tracergas in de tunnel zal opstapelen, wat zal leiden tot vertekende meetresultaten.

De lagesnelheidswindtunnel in het windlaboratorium van Peutz in Mook (Nederland), waar we gedurende 2 weken proeven hebben uitgevoerd, is een gesloten windtunnel waar er toch aanvoer van lucht van buiten mogelijk is. Bij het uitvoeren van profielmetingen wordt er geen gebruik gemaakt van een tracergas.

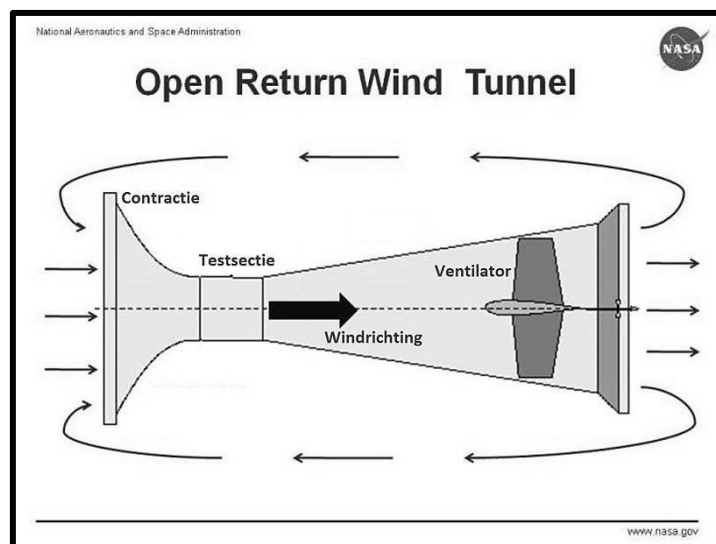


Fig.13. Open wind tunnel ([Benson, 2009b](#))

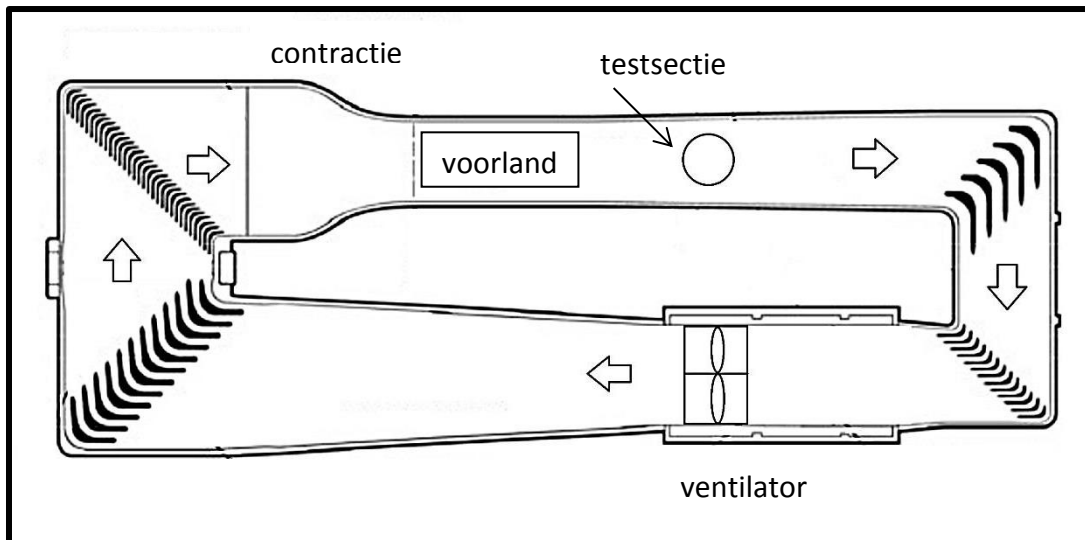


Fig.14. Gesloten wind tunnel, gebaseerd op (A.O.L. Inc, 2013)

2.2.2. Onderdelen in de lagesnelheidswindtunnel (Bradshaw & Mehta, 2003)

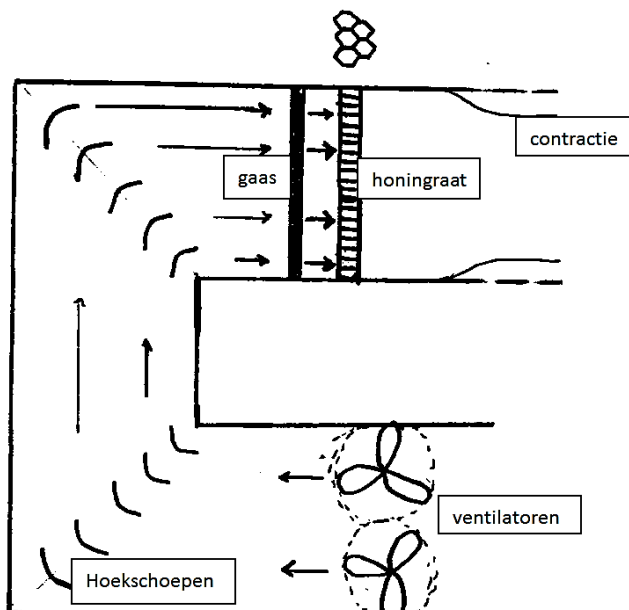


Fig. 15. Onderdelen tussen de ventilatoren en de meetschijf [eigen figuur]

2.2.2.1. Ventilatoren

De vier ventilatoren zorgen voor een verhoging van statische druk om te compenseren voor het totaal verlies aan druk in de rest van de tunnel.

2.2.2.2. Hoekschoepen

Hoekschoepen zorgen ervoor dat de stroom een hoek maakt van 90° terwijl de luchtstroom uniform blijft.

2.2.2.3. Contractie

De contractie, die zich bevindt tussen het honingraat en de trimplaat, zorgt voor een stijging van de gemiddelde snelheid. Het gaas en honingraat staan windopwaarts ten opzichte van de contractie zodat ze nog in de regio staan met een lagere snelheid. Dit is zo om drukverlies te voorkomen.

2.2.2.4. Honingraat

De honingraat dient om de lucht evenwijdig met de wand te laten stromen en om de turbulentie te verminderen. De lucht wordt gedwongen om door de fijne honingraatstructuur van enkele centimeters dikte te gaan. Aangezien de zeshoekige structuren evenwijdig met elkaar staan is de luchtstroom evenwijdig met de wanden van de windtunnel, zelfs ondanks de hoek van 90° die de luchtstroom even daarvoor heeft gemaakt. De cellengte zou minstens 6 tot 8 keer groter moeten zijn dan de celdiameter. (Bradshaw & Mehta, 2003)



Het honingraat draagt in geringere mate bij aan de symmetrische drukopbouw vóór de contractie dan het gaas.

Fig.16. Detail honingraat [eigen foto]

2.2.2.5. Gaas

In de nieuwe configuratie voor een marien landschap, waar uitzonderlijk bij lage windsnelheden en lage turbulentie werd gewerkt, werd vanaf de tweede meetweek in januari 2013 een gaas toegevoegd, uitsluitend voor deze configuratie. Dit verbeterde de symmetrie voor deze nieuwe configuratie waardoor ook bij lage windsnelheden en lage turbulentie een goede drukopbouw voor het gaas kon worden gerealiseerd.

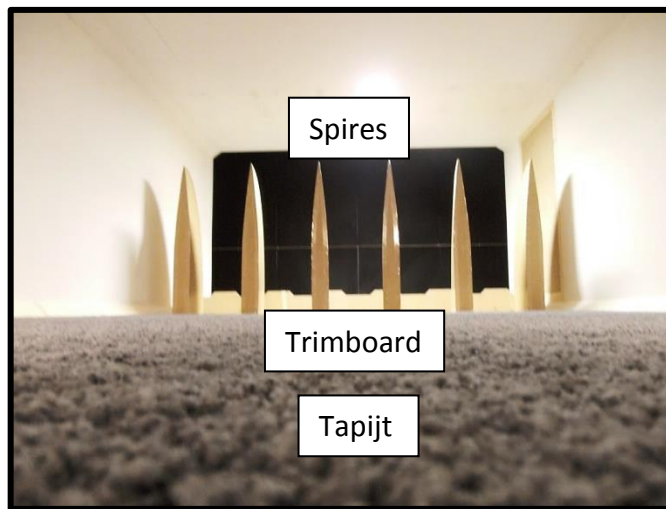
2.3. ONDERDELEN VOORLAND

2.3.1. Counihan-opstelling

De parameters zoals snelheid en turbulentie in de atmosferische grenslaag moeten zo goed mogelijk worden gesimuleerd in de windtunnel. Om in een windtunnel snelheids- en turbulentieprofielen met karakteristieken van natuurlijke winden te creëren baseert men zich meestal op de Counihan-methode, waarbij gebruik wordt gemaakt van passieve hulpstukken zoals spires, een trimboard en oppervlakteruwheidselementen zoals kubusjes voor stedelijk gebied. De zoektocht naar een goede opstelling is verruimd sinds de jaren '60 van vorige eeuw. Counihan publiceerde hierover in 1969 en tegenwoordig is de Counihan-methode regelmatig gebruikt en geaccepteerd. (Kozmar, 2011b)

Deze ruwheidselementen zoals het trimboard, spires en het tapijt worden in het voorland van de tunnel geplaatst. Het voorland van de tunnel is de oppervlakte tussen de contractie en de meetschijf. Terwijl de wind over het voorland met de ruwheidselementen stroomt, groeit de grenslaag geleidelijk. Op de plaats van de meetschijf zou het snelheids- en turbulentieprofiel van de grenslaag zó gevormd moeten zijn als in de 'standaardcurven'. De grenslaag ter hoogte van de meetschijf zou dan voor die begrippen hetzelfde moeten zijn als de grenslaag op ware grootte. Dit is de reden waarom de probes nét voor de meetschijf staan opgesteld.

Als deze ruwheidselementen niet zouden worden gebruikt dan zou het ook mogelijk zijn om een grenslaag te verkrijgen. Hiervoor zou dan wel een langer voorland nodig zijn om dezelfde snelheids- en turbulentieprofielen te krijgen. (Varshney & Poddar, 2011).



Windafwaarts van de honinggraat komt men achtereenvolgens een trimboard, spires en tapijt tegen in het voorland.

Fig.17. Voorland met ruwheidselementen [eigen foto]

Er zijn weinig publicaties te vinden over de opbouw van een marien voorland in windtunnels. Over voorlanden voor stedelijk gebied daarentegen zijn er redelijk veel bronnen. Voor de opbouw van het voorland vertrekken we dan ook van de gekende Counihan-methode. Toch wordt er direct voor een tapijt gekozen in plaats van kubusjes in het voorland.

2.3.1.1. Trimboard

Na het honinggraat en de contractie is het trimboard het eerste element dat voor ruwheid zorgt. Het is een plaat die loodrecht op de windstroom staat op de bodem van de windtunnel. De vorm van het trimboard staat hieronder in fig. 18.:

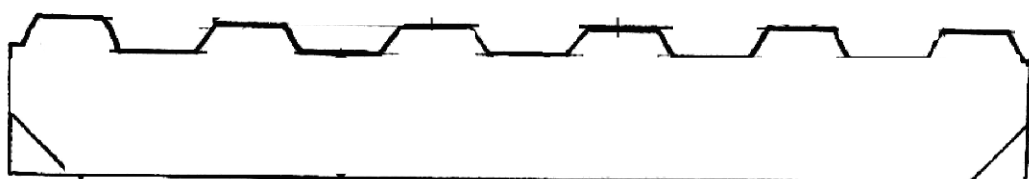


Fig. 18. Tekening trimboard. [eigen tekening]

Windafwaarts van het trimboard zal men, net achter het trimboard, een regio vinden waar de windsnelheid heel laag is. De luchtstroom zal immers niet vlak achter het trimboard terug naar de bodem gaan maar het zal er over vloeien en pas na een aantal decimeter terug de bodem bereiken. Deze 'bel' kan worden verminderd door het trimboard bovenaan te kartelen. (Varshney & Poddar, 2011)

2.3.1.2. Tapijt

Het tapijt wordt geplaatst tussen de spires en de meetschijf op de bodem van de windtunnel. Het beslaat de hele breedte van de windtunnel en heeft een lengte van zo'n 7m.

Het tapijt dient om de snelheid in de onderste centimeters te verlagen. Op grotere hoogten heeft het tapijt weinig effect.

In dit onderzoek worden drie verschillende tapijten vergeleken.

2.3.1.3. Spires

In dit onderzoek zijn metingen gedaan met zowel 0, 1, 5 en 6 spires.

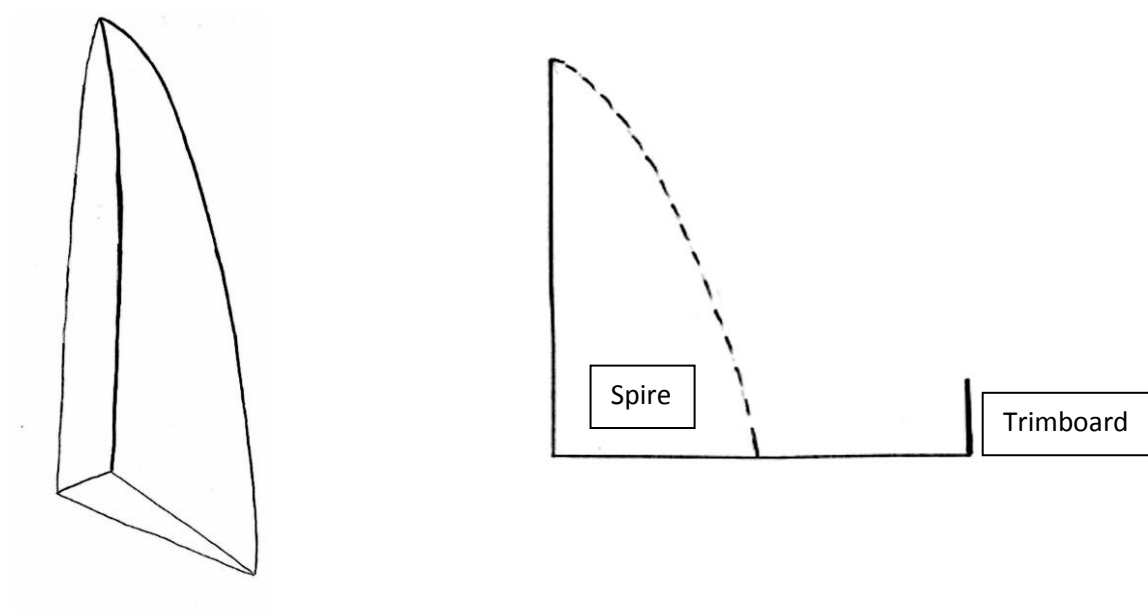


Fig. 19. Tekeningen van één spire en spire met trimboard.[eigen tekening]

2.3.2. Full depth en part depth

In een windtunnel kan een grenslaag ofwel over zijn volledige hoogte worden voorgesteld (full depth boundary layer), ofwel enkel de onderste zone van de grenslaag (part depth boundary layer).

Full depth simulaties worden gekozen als het meetobject zich tot op grote hoogte in de grenslaag bevindt. Dit is zo omdat de full depth simulatie de karakteristieken van de grenslaag over zijn gehele hoogte weergeeft. Het nadeel hierbij is dat details niet heel precies kunnen worden nagebootst omdat de schaal hiervoor te klein is. (Kozmar, 2011b)

Part depth simulaties daarentegen geven enkel de onderste tientallen meters van de grenslaag weer, wat meer gedetailleerdere karakteristieken weergeeft voor lagere meetobjecten. Door enkel de onderste laag van de grenslaag te simuleren kan de natuurlijke windstroom tot op grote schaal worden gereproduceerd. Part depth simulaties zijn dus ideaal om de wind ter hoogte van het dek in een windtunnel te bestuderen. (Kozmar, 2011b), (De Bortoli et al, 2002)

Een studie (Kozmar, 2011b) heeft aangetoond dat aangepaste Counihan spires goede resultaten geeft om een part depth grenslaag te simuleren. Een standaard Counihan spire met een hoogte van 2,0m werd bovenaan afgeknot tot op een hoogte van 1,7m, terwijl de lengte en breedte dezelfde blijven als een standaard Counihan spire van 2,0m. De afgeknotte Counihan spire genereert meer turbulentie dan een kleinere, niet afgeknotte standaard Counihan spire van 1,7m. (Kozmar, 2011b), (De Bortoli et al, 2002)

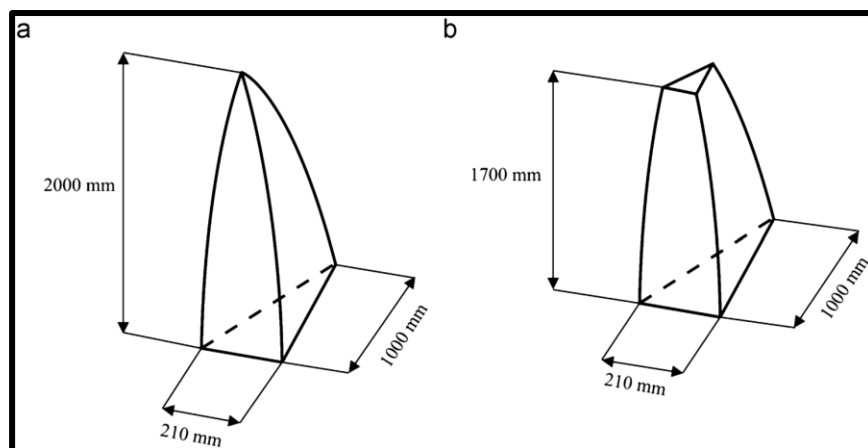


Fig. 20. Vergelijking standaard Counihan spire (links) en de afgeknotte Counihan spire (rechts) (Kozmar, 2011b)

Het kan interessant zijn om in de toekomst profielmetingen voor een mariene grenslaag ook part depth te meten. De grootste schepen komen nauwelijks 60 m boven het zeeoppervlakte uit en de hoogte van het dek, accommodatie of helikopterdek is nog lager. Door enkel deze onderste meters te simuleren kan de schaal worden vergroot en kan er nauwkeuriger worden gewerkt.

HOOFDSTUK 3. – METINGEN

3.1. INLEIDING VOOR DE PROEVEN

Met de komende proeven wordt gezocht naar een goede configuratie van het trimboard, spires en tapijt in het voorland, met als doel de verkregen snelheids-en turbulentieprofielen zo goed als mogelijk te laten aansluiten bij de referentiekrommen. Er wordt vertrokken van de Counihan-configuratie met windafwaarts het gekartelde trimboard, spires en een tapijt.

Aangezien de maquette van de chemicaliëntanker tijdig moest worden gemaakt voor de concentratiemetingen, moest er al een schaal worden vastgelegd. Er werd gekozen voor schaal $1/100$, wat toeliet om nog voldoende details op de maquette te kunnen overbrengen.

De windsnelheid werd vastgelegd op 4m/s. Dit is relatief laag, maar de meeste onderzoeken naar verdunning van dampen op schepen zijn het interessantst bij lage windsnelheden. Zo zullen de ontsnappende dampen of gassen niet onmiddellijk en niet te sterk verspreiden en wegwaaien bij hogere windsnelheden. Nochtans is het voor offshore installaties zoals boorplatformen of windturbines net interessanter om (ook) bij hogere windsnelheden te meten.

De ruwheidslengte z_0 die we nastreven is $z_0=0,001\text{m}$, zoals aangenomen door ESDU 858020 (s.d.). Ruwheidslengtes tussen $z_0=0,01\text{m}$ en $z_0=0,0001\text{m}$ worden aanvaard voor een marien landschap volgens Det Norske Veritas, (2010).

Gedurende twee weken hebben we profielmetingen uitgevoerd in de lagesnelheidswindtunnel in het windlaboratorium van Peutz in Mook (NL). Het voorland heeft een hoogte van zo'n 1,8m, een breedte van zo'n 3m en een lengte van ongeveer 8m. De eerste meetweek vond plaats in september 2012, waarin proeven 1 t.e.m. 10 tot stand kwamen. De tweede meetweek vond plaats in januari 2013, waarin proeven 11 t.e.m. 23 gemeten werden.

Gedurende de proeven 1 t.e.m. 10 probeerden we de goede opstelling te vinden door verschillende configuraties op te stellen met kleine aanpassingen en proeven onderling te vergelijken. Een asymmetrische drukopbouw werd zichtbaar in de resultaten, die zich voor het eerst voordeed bij onze configuratie gezien de lage windsnelheid en de lage turbulentie

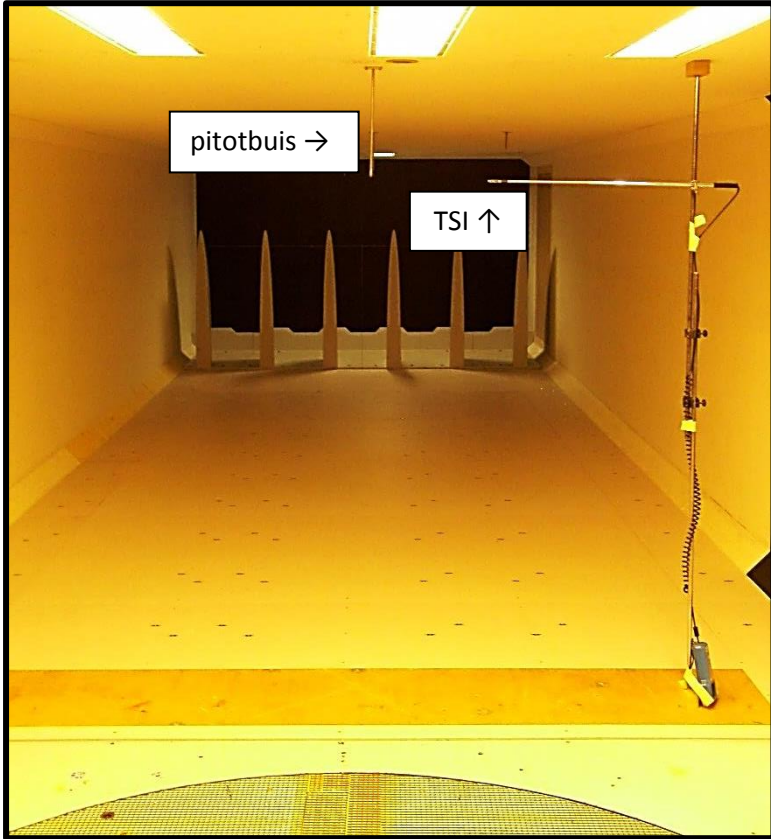
in onze configuratie. Dit heeft Peutz opgelost na de eerste meetweek door een fijn gaas te plaatsen windopwaarts van het honingraat.

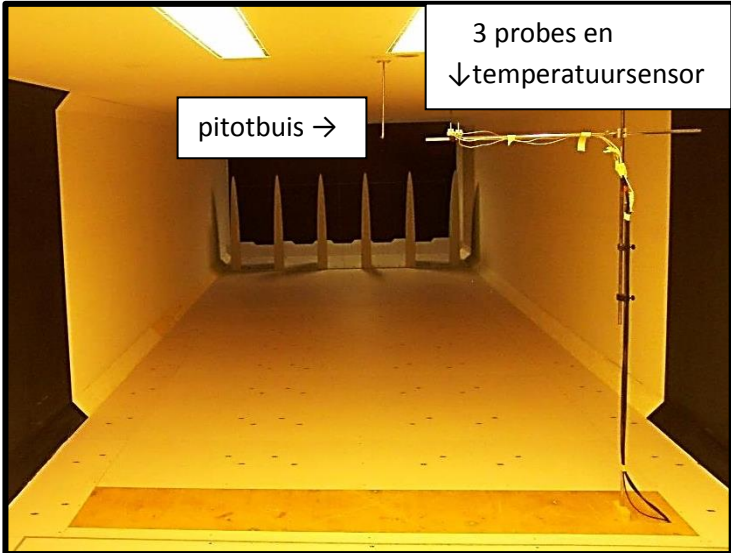
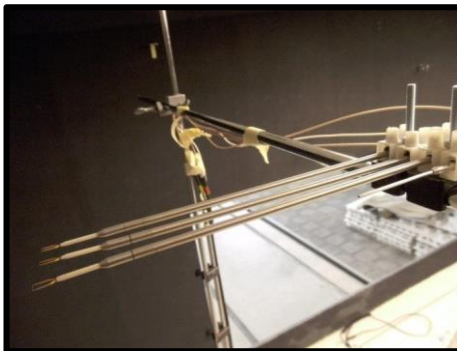
Tijdens de tweede meetweek werd duidelijk dat het gaas inderdaad een positieve invloed had voor onze configuratie op de symmetrie in de tunnel. Daarnaast zijn we eerst begonnen met de invloed van spires en trimboard onafhankelijk van elkaar te bekijken om beter te begrijpen hoe we tot een goed resultaat moesten komen.

3.2. OVERZICHT VAN ALLE PROEVEN

PROEF	Aantal SPIRES	Hoogte trimboard	Tapijt	pagina	Type meting
1	6 (orig Peutz)	23cm (orig Peutz)	GEEN	41	Voormeting
2	6 (orig Peutz)	23cm (orig Peutz)	GEEN	42	Voormeting
3	6 (orig Peutz)	23cm (orig Peutz)	GEEN	43	Verticaal
4	6 (orig Peutz)	23cm (orig Peutz)	Peutz	46	Verticaal
5	6 (HZS)	23cm (HZS)	Peutz	50	Verticaal
6	6 (HZS)	GEEN	Peutz	52	Verticaal
7	6 (HZS)	18cm	Peutz	54	Verticaal
8	6 (HZS)	23cm	HZS onderkant	58	Verticaal
9	6 (HZS)	19,5-18-19,5cm	HZS onderkant	62	Verticaal
10	6 (HZS)	18-15-18cm	HZS onderkant	62	Verticaal
11	6 (HZS)	23cm	GEEN	65	Voormeting
12	GEEN	GEEN	GEEN	68	Horizontaal
13	1 (HZS)	GEEN	GEEN	71	Horizontaal
14	GEEN	18cm	GEEN	74	Verticaal
15	GEEN	18cm	HZS onderkant	77	Verticaal
16	5 (17/66.5cm)	18cm	HZS onderkant	80	Verticaal
17	5 (17/66.5cm)	GEEN	HZS onderkant	84	Verticaal
18	5 (17/66.5cm)	10cm	HZS onderkant	87	Verticaal
19	6 (17.5/53cm)	10cm	HZS onderkant	89	Verticaal
20	5 (30/60cm)	10cm	HZS onderkant	92	Verticaal
21	5 (30/60cm)	18cm	HZS onderkant	95	Verticaal
22	5 (30/60cm)	10cm	HZS <u>bovenkant</u>	98	Verticaal
23	5 (30/60cm)	10cm	HZS <u>bovenkant</u>	102	Horizontaal

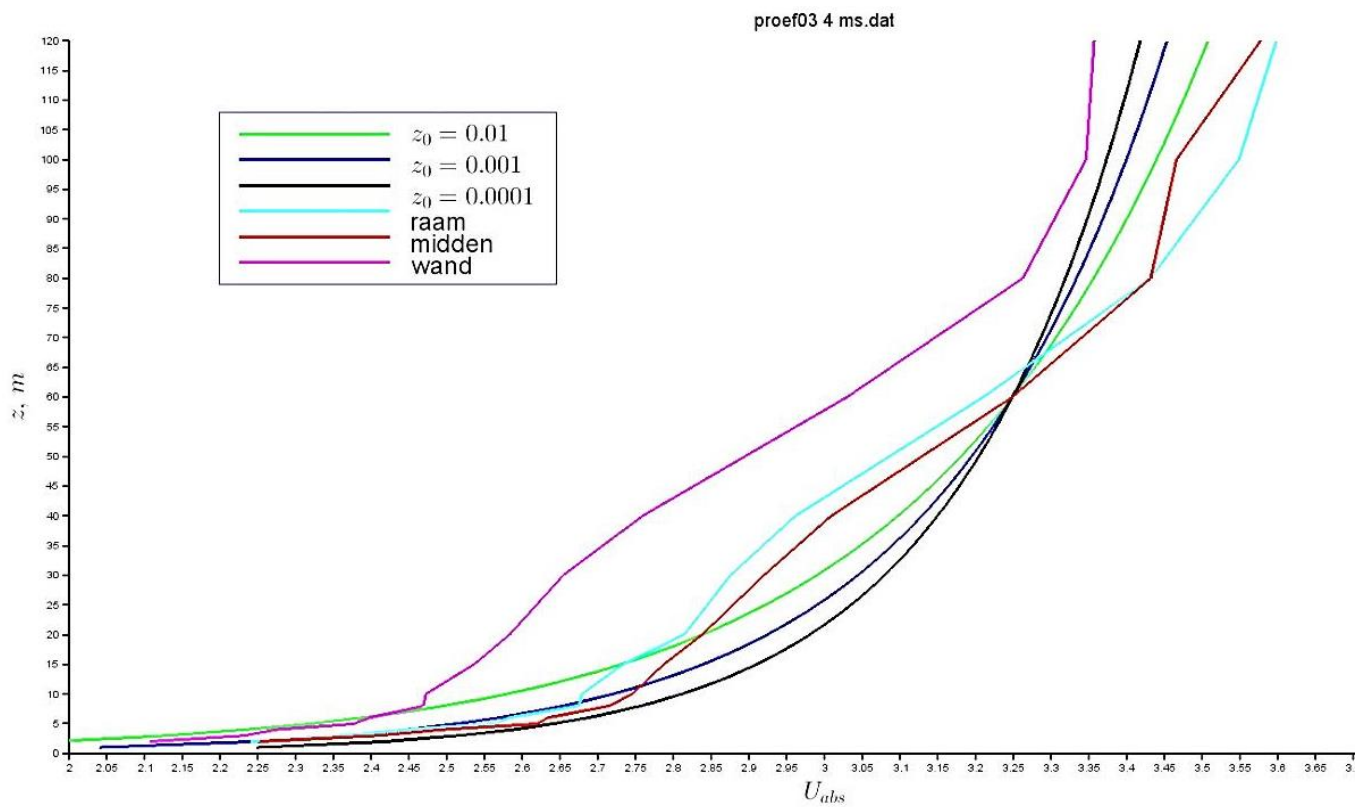
3.3. PROEVEN

Proef 1	Pitotbuis vergelijken met TSI			17 sept 2012
Voormeting	Aantal spires	Hoogte trimboard	Tapijt	
	6 (Peutz)	23cm, gekarteld (Peutz)	Geen voorland	
Motivatie	De TSI wordt op dezelfde hoogte als de pitotbuis in het dwarse midden van de tunnel gehangen, 30 cm onder het plafond. De regelsnelheid wordt vergeleken met de werkelijke snelheid aangegeven door de pitotbuis. Afwijkingen op de ware snelheid (gemeten door de pitotbuis) worden zichtbaar na vergelijking met de snelheden die de TSI meet. Er wordt gemeten bij snelheden van 2 t.e.m. 12m/s met stappen van 2m/s.			
				
Fig.21. Proefopstelling proef 1 (voormeting) [eigen foto]				
Resultaat	De pitotbuis geeft, omgerekend van druk naar snelheid, windsnelheden aan die overeenkomen met de TSI.			

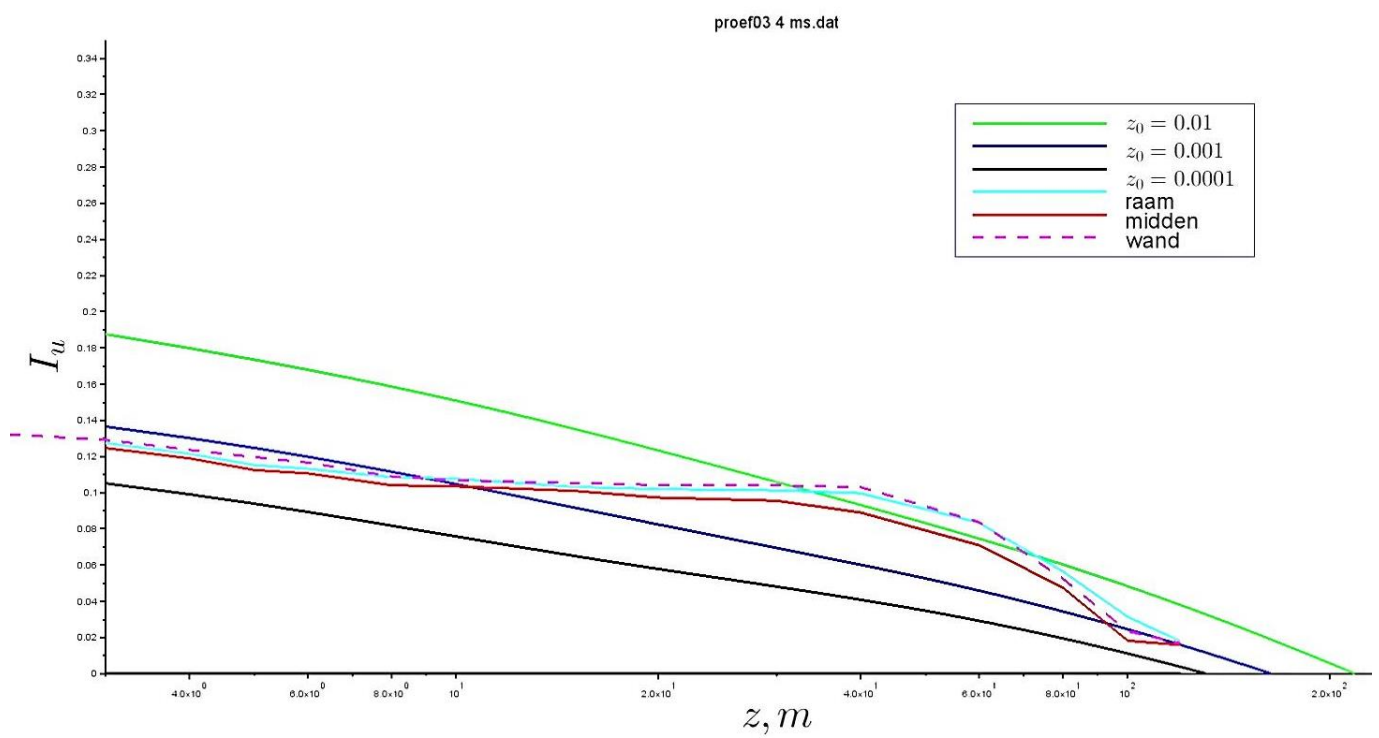
Proef 2	Hotwire probes vergelijken met pitotbuis		17 sept 2012
Voormeting	Aantal spires	Hoogte trimboard	Tapijt
	6 (Peutz)	23cm, gekarteld (Peutz)	geen
Motivatie	Drie hotwire probes worden op de plaats van de TSI uit proef 1 geplaatst, dus op dezelfde hoogte als de middelste pitotbuis, 30 cm onder het plafond. De snelheden die de probes nu meten worden vergeleken met de waarden die de pitot aangeeft. Deze proef is o.a. een controle van de kalibratie van de probes omdat de probes de snelheden zouden moeten aangeven die de pitotbuis ook meet.		
 Fig. 22. Proefopstelling proef 2 [eigen foto]  Fig.23. Detail probes, temperatuursensor en probehouders [eigen foto]			
Resultaat	Één probe geeft in vergelijking met de andere twee een windsnelheid die het dichtst ligt bij de snelheid aangegeven door de pitot. Deze probe zal bij de volgende proeven in het midden worden geplaatst.		

Proef 3	Counihan-opstelling zonder te hoog tapijt Peutz		18 en 19 sept 2012
Opbouw:	Aantal spires	Hoogte trimboard	Tapijt
Verticale meting	6	23cm	geen
Motivatie	In deze proef wordt het snelheidsprofiel en turbulentieprofiel bekeken van een tunnel zonder tapijt maar wel met de oorspronkelijke spires en trimboard. We baseerden ons op metingen die Peutz vóór dit onderzoek al had uitgevoerd met het tapijt ‘Peutz’ om vervolgens te kunnen besluiten dat dit tapijt ‘Peutz’ voor onze configuratie een te lage snelheid en een te hoge turbulentie aangaf in de onderste centimeters. Bijgevolg gingen we ervan uit dat de gewenste snelheids-en turbulentieprofielen dicht bij een opstelling zonder tapijt moesten liggen dan bij een opstelling met tapijt ‘Peutz’. Er wordt in deze proef gemeten met 3 snelheden: 4, 3 en 6m/s, maar voor de bespreking van de proef wordt er enkel gekeken naar het resultaat bij een snelheid van 4m/s.		
			
<i>Fig. 24. Proefopstelling proef 3 [eigen foto]</i>			
Resultaat	<i>Zie meting 3 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]</i>		
Snelheidsprofiel	In de onderste 10 cm is de snelheid laag tot aanvaardbaar, ondanks het gegeven dat er geen tapijt ligt. Het effect van het te hoge trimboard doet de verwachte versnelling door de afwezigheid van het tapijt teniet. Het tapijt (of de afwezigheid ervan) werd geacht een		

	overheersend effect te hebben in deze onderste regio maar dit wordt door het te hoge trimboard teniet gedaan. Er kan besloten worden dat het trimboard te hoog is, gezien de lage snelheden tot een hoogte van ongeveer 60 cm. In de regio van 10 cm tot 40 cm is de snelheidsgradiënt te klein en is er geen goed profiel. De snelheid stijgt niet genoeg naargelang de hoogte. Voor de hoogtes tussen 40 cm en 80 cm is de snelheidsgradiënt dan weer te groot. De variaties in windsnelheid zijn lateraal relatief groot.
Turbulentieprofiel	Tot een hoogte van 40 cm daalt de turbulentie onvoldoende naargelang de hoogte toeneemt, vooral tussen de 10 cm en 40 cm. Als er een tapijt zou worden toegevoegd aan deze opstelling zou de turbulentie moeten toenemen in de onderste 10 cm, waardoor het turbulentieprofiel wel parallel aan de referentiecurven verloopt. Tussen 20 cm en 60 cm is de turbulentie te hoog in vergelijking met de referentiecurven. Om de turbulentie te laten dalen in deze regio moet eerst onderzocht worden wat deze verhoogde turbulentie veroorzaakt. In proef 6, waar er geen trimboard staat opgesteld, is er geen verhoogde turbulentie aanwezig in de regio van 20 tot 60 cm. Boven 60 cm daalt de turbulentie te sterk.



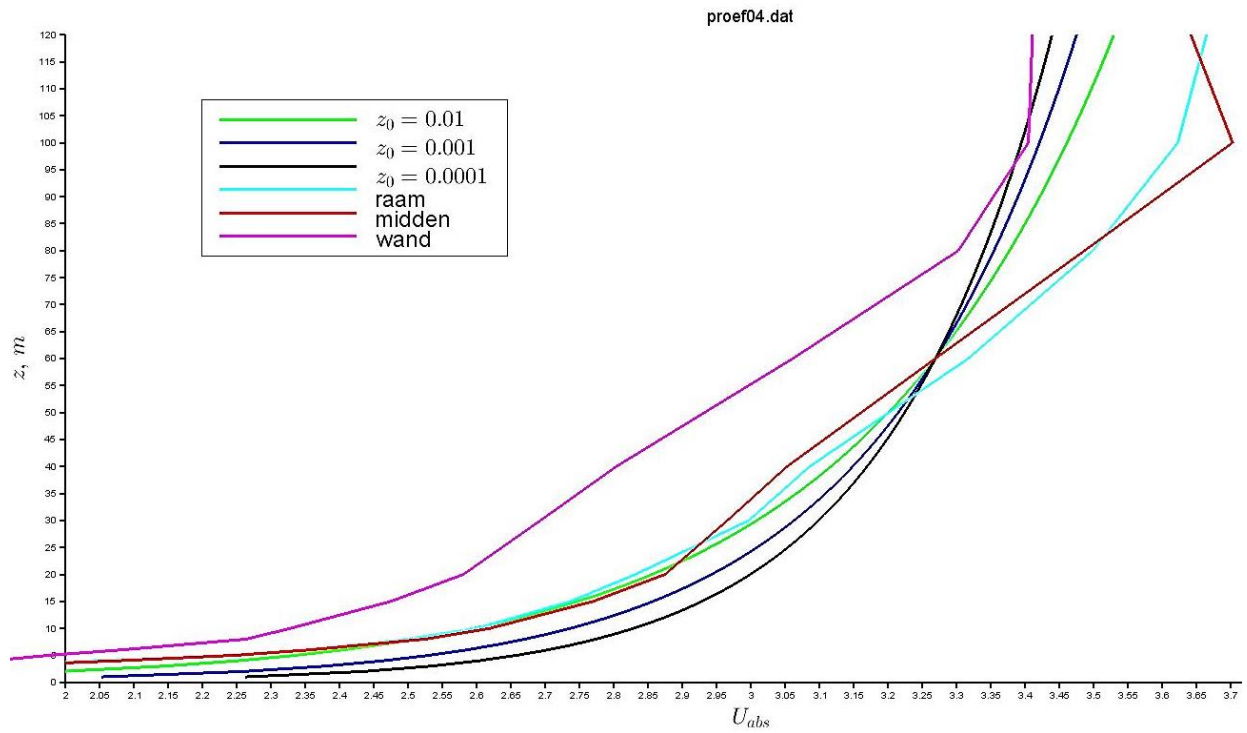
Meting 3 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



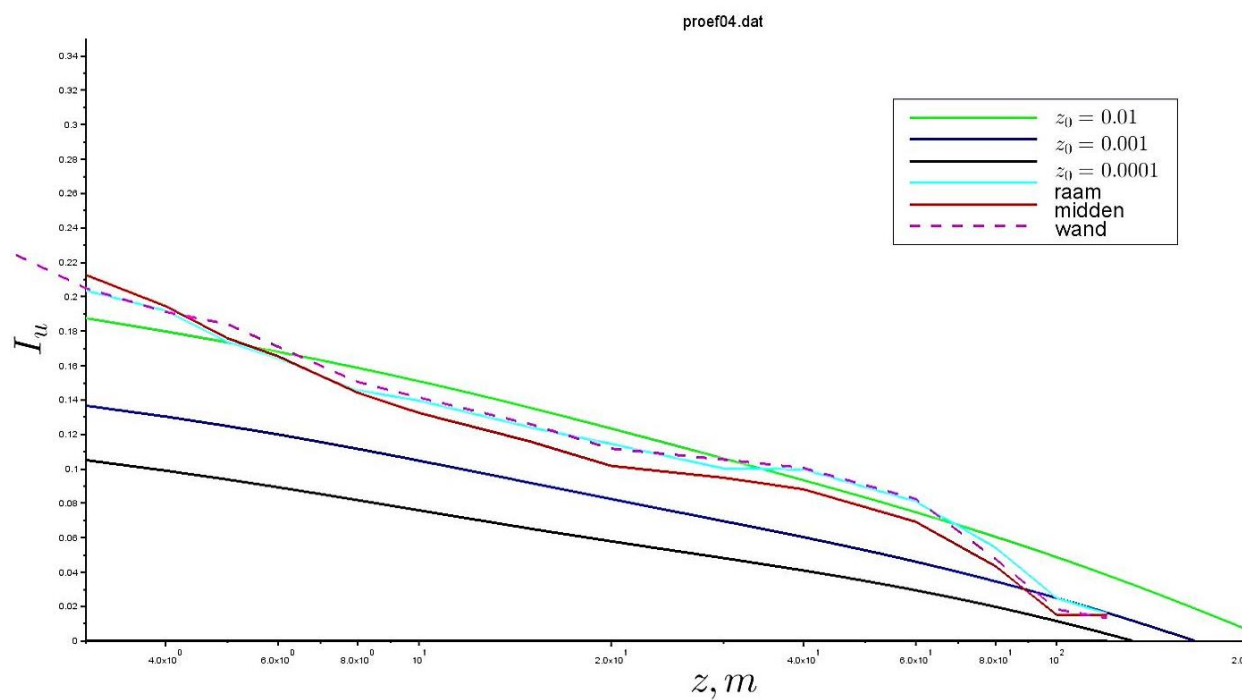
Meting 3 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Proef 4	Standaard opstelling marien voorland Peutz		19 sept 2012
Opbouw:	Aantal spires	Trimboard	Tapijt
Verticale meting	6	23cm	Peutz
Motivatie	Van deze opstelling is er in 2009 door Peutz zelf al een meting gedaan in het kader van onderzoek met een marien voorland, weliswaar met andere windsnelheden en condities. We zullen een verschil kunnen zien in de snelheids- en turbulentieprofielen in vergelijking met proef 3, waar er zonder tapijt werd gemeten.		
			
Fig. 25. Proefopstelling proef 4 [eigen foto]			
Resultaat	Zie meting 4 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]		
Snelheidsprofiel	Tot de hoogte van 50 cm is de windsnelheid te laag. Dit is enerzijds de oorzaak van het te hoge trimboard (23 cm), zoals in proef 3, maar anderzijds mogelijk ook door de aanwezigheid van het tapijt. Boven een hoogte van 50 cm is de windsnelheid te hoog in het midden van de tunnel en aan de kant van het raam. De windsnelheid in de onderste 5 cm is te laag omdat het tapijt te zacht en te hoog is. Ook de asymmetrie valt op bij deze configuratie: de windsnelheid aan de kant van de wand is trager dan in het laterale midden of aan de kant van het raam. Deze asymmetrie is grotendeels onafhankelijk van		

	het voorland en kan slechts gedeeltelijk worden weggewerkt door enkel de opstelling te veranderen. Nochtans is deze asymmetrie niet te verwaarlozen, maar voor de interpretatie en vergelijking van de volgende proeven wordt de windsnelheid aan de kant van de wand niet mee in rekening gebracht. Wellicht wordt deze veroorzaakt door een ongelijke drukopbouw vóór het voorland in combinatie met de uitzonderlijk lage windsnelheid en lage maat van turbulentie. Dit wordt vanaf proef 11 opgelost door de plaatsing van een fijn gaas vlak voor het honingraat.
Turbulentieprofiel	De turbulentie is te hoog in de onderste 7 cm. Dit wordt veroorzaakt door het tapijt dat te zacht en te hoog is, en mogelijks ook door een te hoog trimboard. Op een hoogte van 20 cm tot 40 cm daalt de turbulentie onvoldoende naarmate de hoogte toeneemt.



Meting 4 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



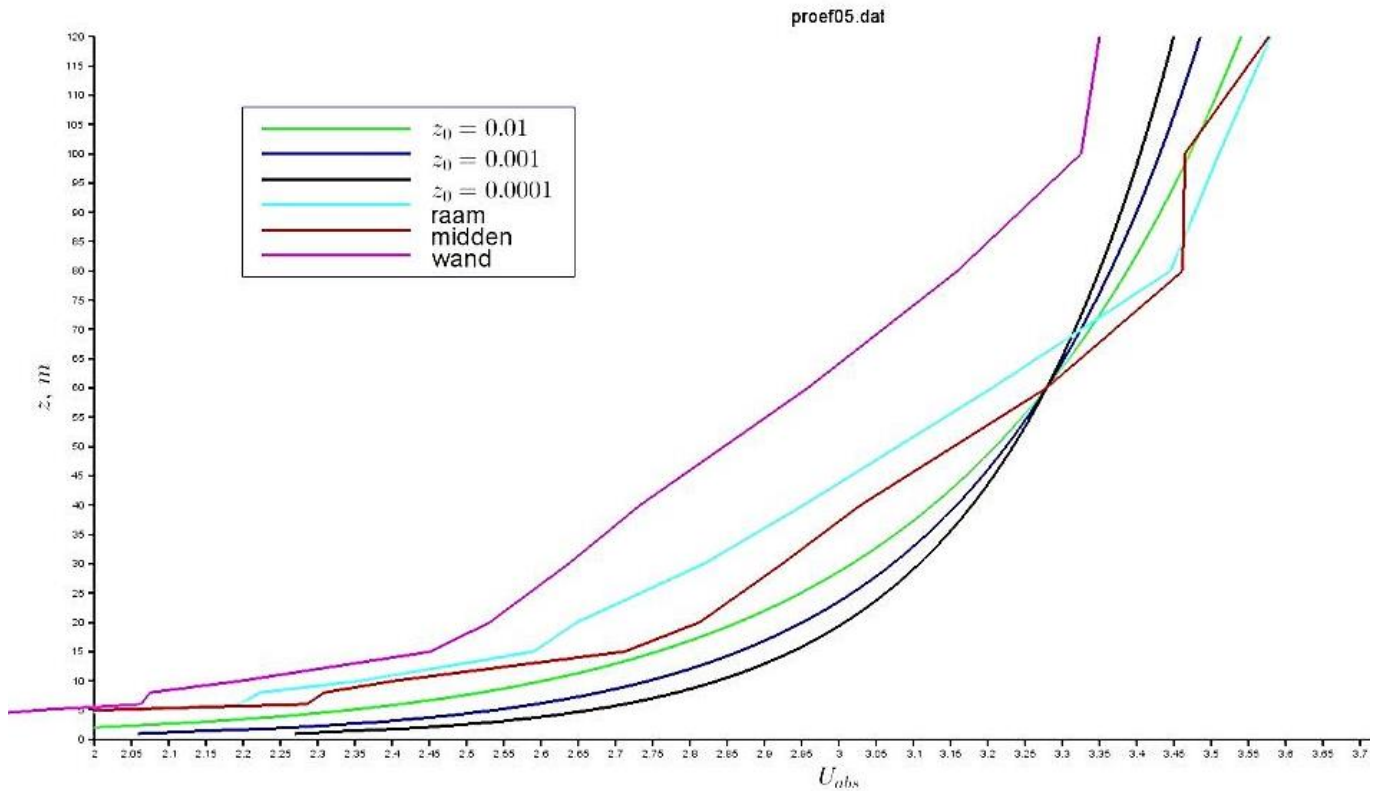
Meting 4 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Vergelijking proef 4 vs proef 3	Proef 4: 6 spires (Peutz), trimboard 23 cm (Peutz) en tapijt Peutz	Proef 3: 6 spires (Peutz), trimboard 23 cm (Peutz) en geen tapijt
1 verandering:	Van geen tapijt naar tapijt 'Peutz'	
Snelheidsprofiel:	Door de aanwezigheid van het tapijt 'Peutz' wordt de snelheid in de onderste 10 cm sterk afgeremd in proef 4. In vergelijking met proef 3 is de snelheid in de onderste 5 cm gemiddeld 0,4865m/s trager door de aanwezigheid van het tapijt. In de onderste 10 cm is proef 4 gemiddeld nog maar 0,2985m/s trager. De vertraging van de windsnelheid is van toepassing tot een hoogte van 15 cm. Boven 20 cm zijn er geen vertragingen meer merkbaar in de windtunnel.	
Turbulentieprofiel:	De turbulentie is sterk gestegen door de aanwezigheid van het tapijt. In de onderste 15 cm is de turbulentie gestegen met gemiddeld zo'n 5%. Boven de 30 cm is er geen stijging meer van de turbulentie in proef 4.	

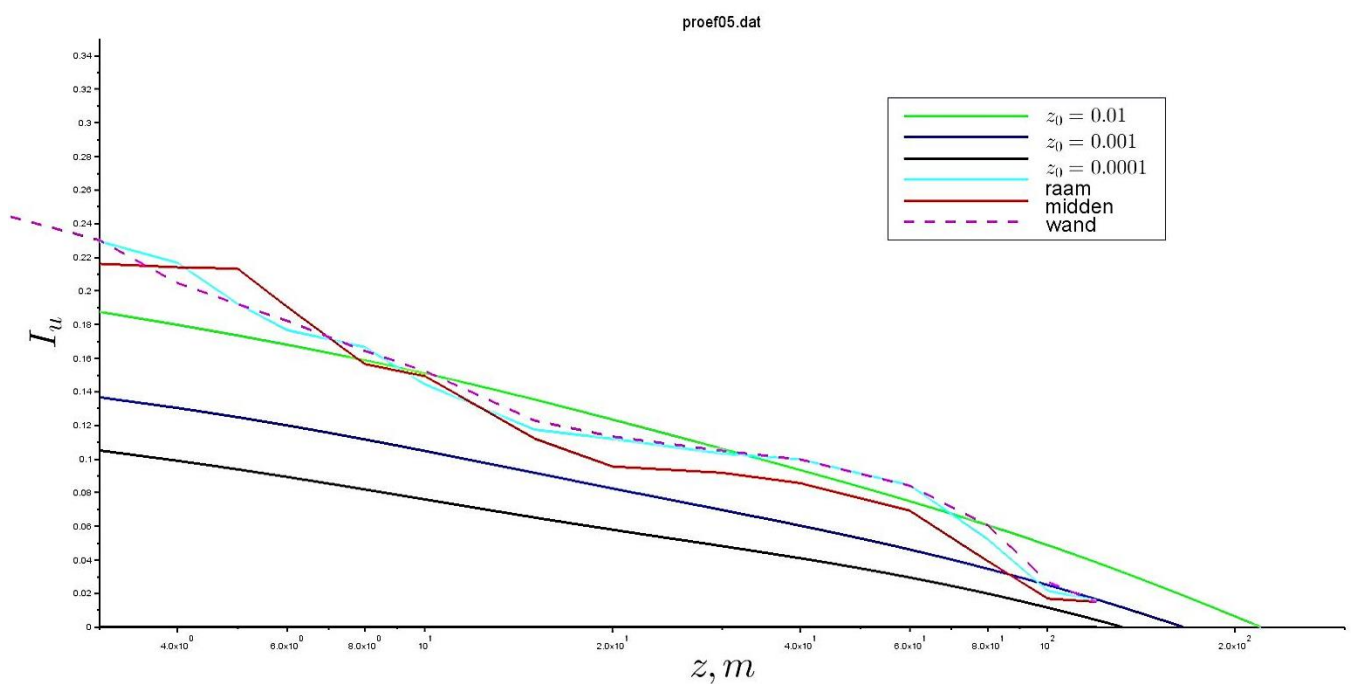
Proef 5	Standaard opstelling met eigen spires en trimboard		20 sept 2012
Opbouw:	Aantal spires	Trimboard	Tapijt
Verticale meting	6 (HZS)	23cm (HZS)	Peutz
Motivatie	Aangezien er in de komende metingen aanpassingen zullen worden gedaan aan het trimboard hebben we deze nagemaakt. Het originele trimboard en spires van Peutz hingen immers aan elkaar vast. In deze proef wordt gekeken hoeveel verschil ons zelfgemaakte voorland geeft tegenover het originele voorland van Peutz uit proef 4.		
 <i>Fig. 26. (links) Proefopstelling proef 5 [eigen foto]</i> <i>Fig. 27. (rechts) Detail hoogte trimboard (23cm) [eigen foto]</i>			
Resultaat	Zie meting 5 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]		
Snelheidsprofiel	De asymmetrie is toegenomen tegenover proef 4; de snelheidscurven liggen verder uit elkaar. Een aannemelijke verklaring hiervoor is dat de zelfgemaakte spires wellicht niet 100% hetzelfde zijn als de massieve spires van Peutz en mogelijk niet helemaal parallel staan met de windstroom. De snelheid is in de onderste 10 -15 cm weer te laag. Dit is het gevolg van een te hoog tapijt. Op grotere hoogtes, boven 60 cm, is de snelheid in de tunnel te groot. De verkregen curve heeft een andere snelheidsgradiënt dan de gewenste referentieprofielen en hierdoor kan deze grenslaag niet worden gebruikt voor mariene metingen, ongeacht de schaal.		

Turbulentieprofiel

De turbulentie daalt te hard in de onderste 20 cm. Op andere hoogten is de turbulentie redelijk goed. Ook hier is de asymmetrie toegenomen.

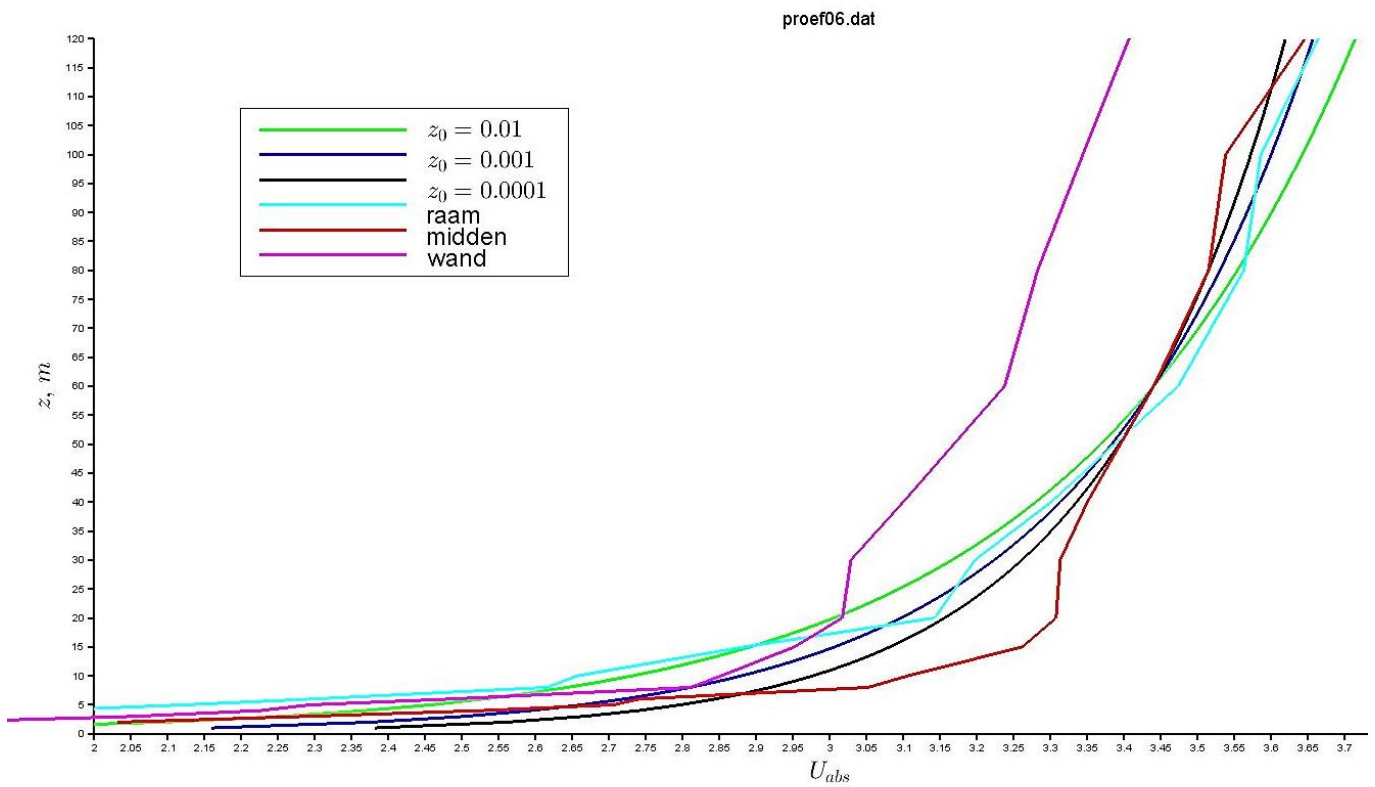


Meting 5 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]

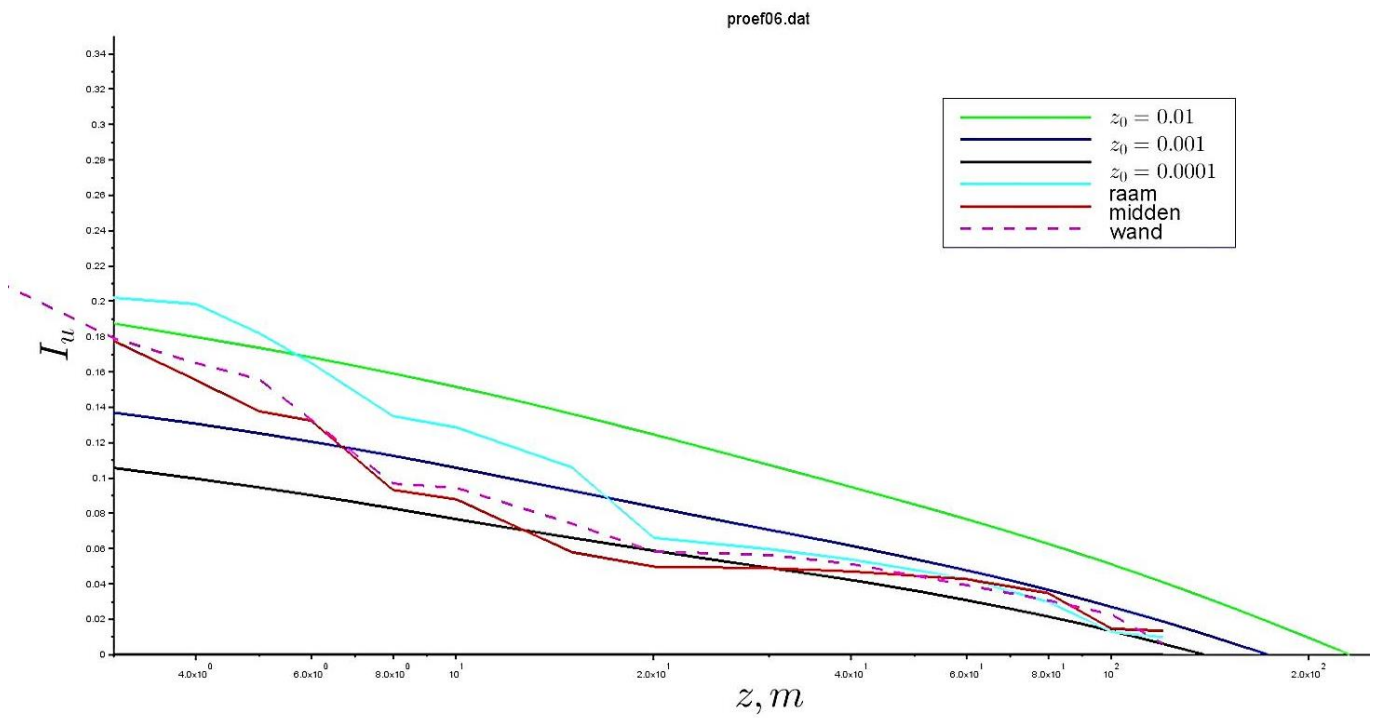


Meting 5 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Proef 6	Geen trimboard in plaats van een te hoog trimboard		20 sept 2012
Opbouw:	Aantal spires	Trimboard	Tapijt
Verticale meting	6 (HZS)	geen	Peutz
Motivatie	We spelen met het idee dat de originele hoogte van het trimboard (23 cm) te groot is en dat er in verdere proeven een lager trimboard gebruikt zal moeten worden. In deze proef wordt het extreme geval van géén trimboard bekeken. De uiteindelijke hoogte van het trimboard zal immers moeten liggen tussen 23cm en 0cm.		
Snelheidsprofiel	De snelheid zou moeten toenemen ten opzichte van proef 5.		
Turbulentieprofiel	Het turbulentieprofiel van proef 5 heeft nog marge om te dalen.		
Geen foto			
Resultaat	Zie meting 6 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]		
Snelheidsprofiel	Ondanks de asymmetrie in de tunnel is het snelheidsprofiel zeer goed in de regio boven 40 cm. In de onderste 20 cm daarentegen is de snelheidsgradiënt te groot. Aangezien er geen trimboard werd geplaatst in deze proef 6 wordt de wind niet meer tegengehouden in de onderste centimeters en het is duidelijk dat het trimboard zeker een invloed heeft op de onderste 20 cm. Tussen de 10 cm en de 40 cm is de snelheid in het laterale midden van de tunnel te groot in vergelijking met de referentiecurven. Het trimboard heeft dus niet enkel invloed in de onderste regio, maar ook op grotere hoogtes. Het staat vast dat in de uiteindelijke opstelling ook een trimboard zal staan.		
Turbulentieprofiel	Het turbulentieprofiel is over de gehele hoogte gedaald en vooral op hoogtes boven de 10 cm. Boven 20 cm is de turbulentie zeer goed maar wel aan de lage kant. Door het verlaagde trimboard is de verhoogde turbulentie in de regio van 20 tot 60 cm afwezig, terwijl deze wel aanwezig was in vorige proeven. Bovendien daalt de turbulentie veel te hard in de onderste 10 cm. Het is duidelijk dat er in de uiteindelijke opstelling een trimboard zal moeten staan.		



Meting 6 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



Meting 6 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Proef 7	Goede compromis in de hoogte van het trimboard		20 sept 2012
Opbouw:	Aantal spires	Trimboard	Tapijt
Verticale meting	6 (HZS)	18cm (23-5cm) (HZS)	Peutz
Motivatie	Zowel een trimboard van 23 cm (proef 5) als geen trimboard (proef6) waren te extreem voor zowel het snelheidsprofiel als het turbulentieprofiel. Voor deze proef wordt er gekozen voor een verlaging van het trimboard met 5 cm, waardoor de hoogte nog 18 cm is.		
Snelheidsprofiel	We verwachten dat het snelheidsprofiel zich tussen de snelheidsprofielen 5 en 6 zal bevinden, resp. een trimboard van 23 cm en 0 cm. Vooral voor de regio van 10 tot 40 cm zouden de snelheidscurven van proef 7 zich dan dichterbij de referentiecurven moeten bevinden.		
Turbulentieprofiel	Als ook het nieuwe turbulentieprofiel zich tussen dit van proef 5 en 6 zou bevinden zou dit beter zijn. Voor hoogten boven 10m is het turbulentieprofiel van proef 5 aan de hogere kant, terwijl dat bij proef 6 aan de lagere kant was.		



Fig. 28. (links) Proefopstelling proef 7 [eigen foto]

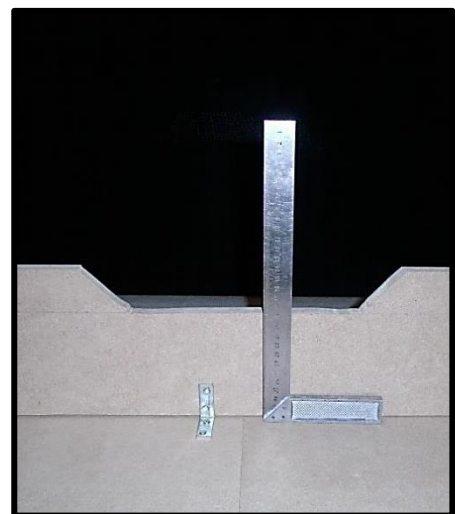
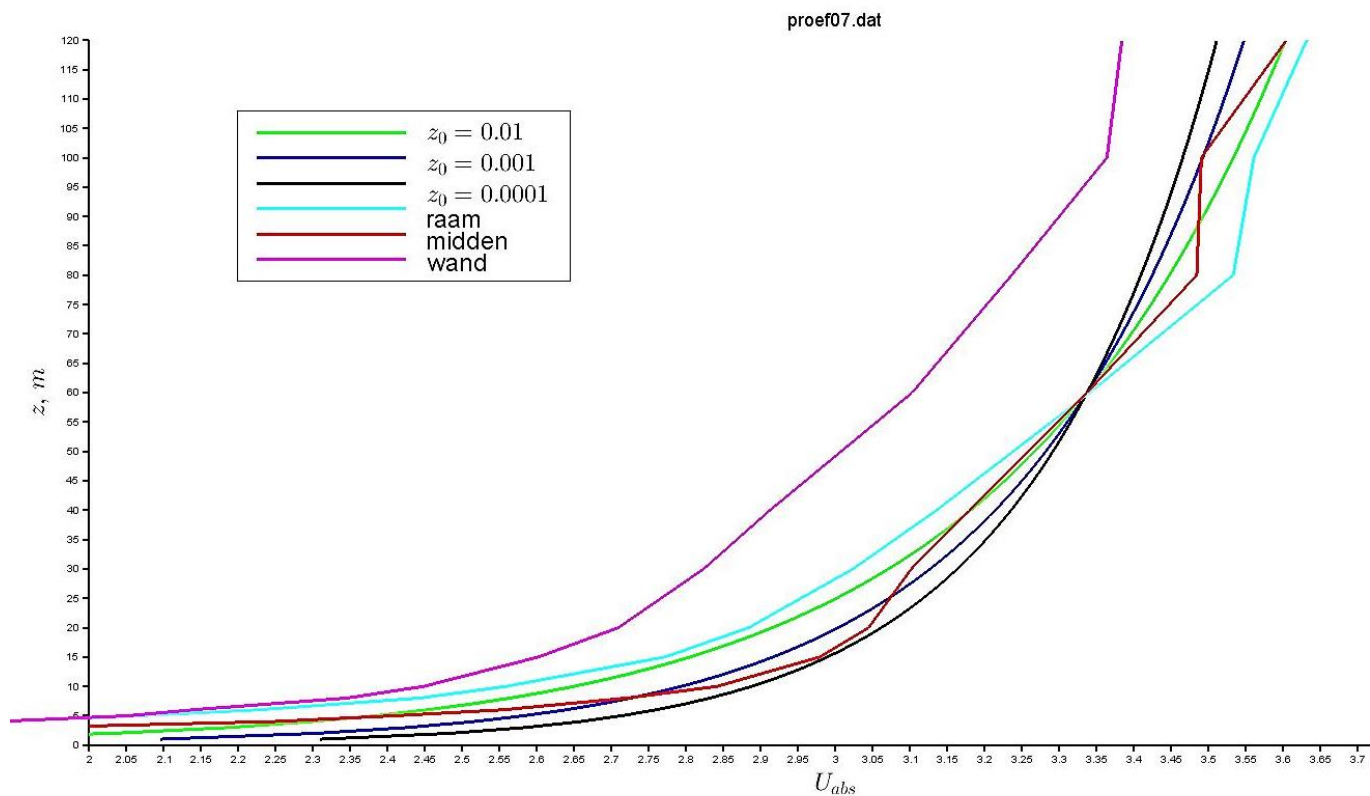
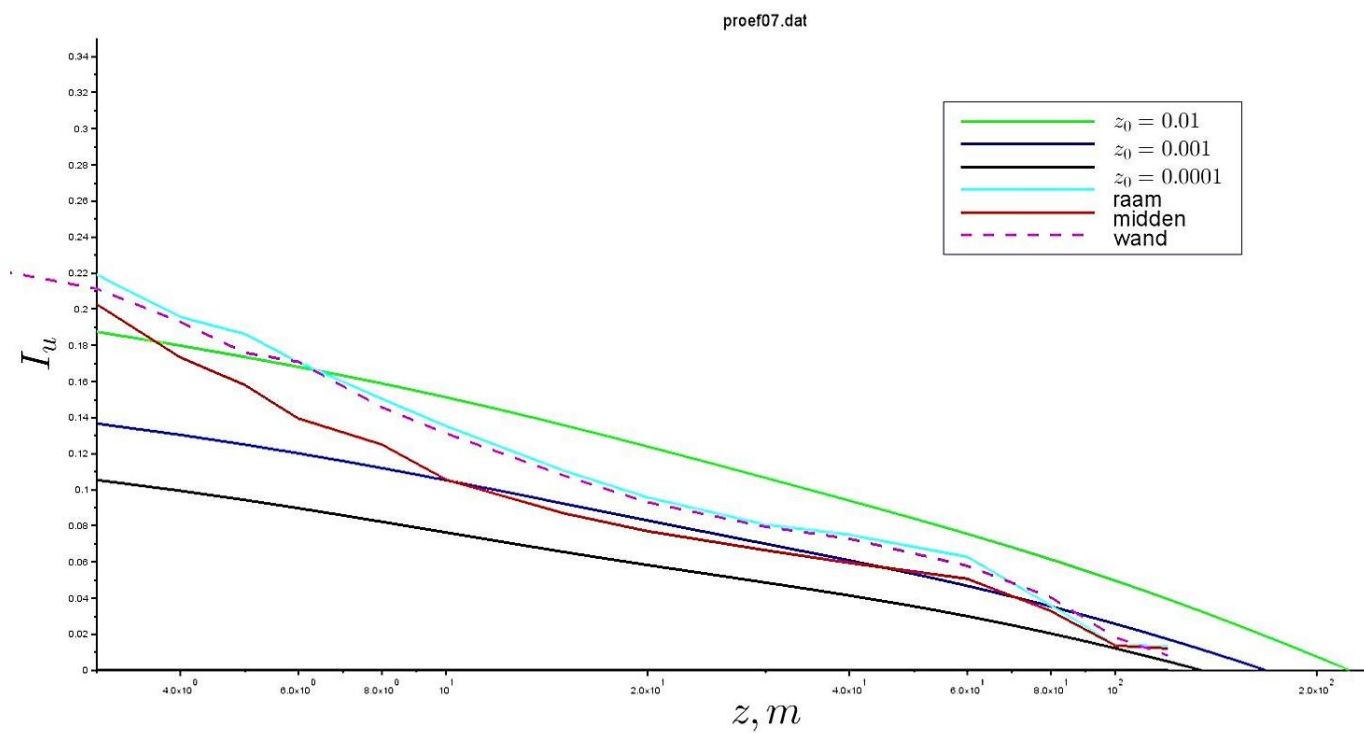


Fig. 29. (rechts) Detail hoogte trimboard (18cm aan hoge kant) [eigen foto]

Resultaat	<i>Zie meting 7 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]</i>
Snelheidsprofiel	Het resulterende snelheidsprofiel is qua vorm best goed al blijft de asymmetrie aanwezig, zoals beschreven in proef 4. Het snelheidsprofiel is gelegen tussen dit van proef 5 en 6. In de onderste 10 cm is de windsnelheid te laag maar als we het tapijt veranderen, waarvan we eerder al vermoedden dat het te hoog en te zacht was, zou dit kunnen verbeteren.
Turbulentieprofiel	Vanaf een hoogte van 10 cm heeft de curve een zeer goede vorm en is de turbulentie nagenoeg perfect. Onder deze hoogte is de turbulentie te hoog, maar met een ander tapijt zou dit verminderd kunnen worden.



Meting 7 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



Meting 7 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Vergelijking proef 7 vs proef 5:	Proef 7: 6 spires HZS, tapijt Peutz en trimboard 18cm	Proef 5: 6 spires HZS, tapijt Peutz en trimboard 23cm
1 verandering:	Verlaging van het trimboard -5cm van 23cm naar 18cm.	
Snelheidsprofiel	Snelheden op een hoogte boven 60 cm zijn groter bij proef 5 met een hoger trimboard. In het laterale midden van de tunnel volgt de snelheid in proef 7 veel beter de vorm van de referentieprofielen. In de onderste 15 cm neemt de snelheid toe ten opzichte van proef 5, wat positief is. Tussen de 15 cm en 60 cm daalt de snelheidsgradiënt van proef 7 tegenover proef 5, wat het snelheidsprofiel ten goede komt. Een te hoog trimboard, zoals bij proef 5 het geval is, lijkt de natuurlijke vorm van de grenslaag te blokkeren. Het is opvallend hoeveel effect de verlaging van het trimboard met 5 cm heeft op het snelheidsprofiel. De vorm van de snelheidscurve van proef 7 is opvallend beter; de snelheid neemt minder lineair toe met de hoogte en neemt meer de vorm aan van de referentiecurven.	
Turbulentieprofiel	Een verlaging van het trimboard van 23 cm naar 18 cm zal zorgen voor een daling van de turbulentie over de gehele hoogte. Een te hoog trimboard veroorzaakt een minder sterke daling van de turbulentie tussen 20 cm tot 60 cm hoogte. Bij proef 7 is de turbulentie tussen een hoogte van 10 tot 60 cm zeer goed.	

Proef 8	Ruwer tapijt HZS in plaats van te hoog tapijt Peutz		21 sept 2012
Opbouw:	Aantal spires	Trimboard	Tapijt
Verticale meting	6 (HZS)	23cm (HZS)	HZS onderkant
Motivatie	Een minder wollig en minder hoog tapijt zou zowel het snelheidsprofiel als het turbulentieprofiel ten goede kunnen komen. Verwacht wordt dat het nieuwe tapijt enkel in de onderste 10 cm een effect heeft en boven deze hoogte weinig of geen invloed. Voor proeven 8 t.e.m. 10 en proeven 15 t.e.m. 21 wordt het nieuwe tapijt gebruikt met de onderkant naar boven (zie detail tapijt HZS onderkant fig. 32). Dit veroorzaakt een ruwer voorland aangezien er geen zachte, lange draden meer gebruikt worden.		
Snelheidsprofiel	Door een minder hoog en ruwer tapijt te kiezen zou de snelheid moeten verhogen in de onderste 10 cm. Dit is nodig omdat het tapijt van Peutz te lage snelheden geeft op deze hoogten.		
Turbulentieprofiel	Bij proeven met het tapijt van Peutz was de turbulentie steeds te hoog in de onderste 8 cm. De turbulentie zou kunnen worden verlaagd door een lager tapijt te kiezen.		



Fig. 30. (links) Proefopstelling proef 8 [eigen foto]

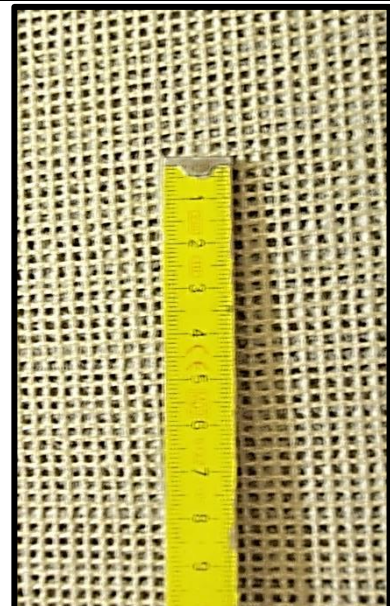
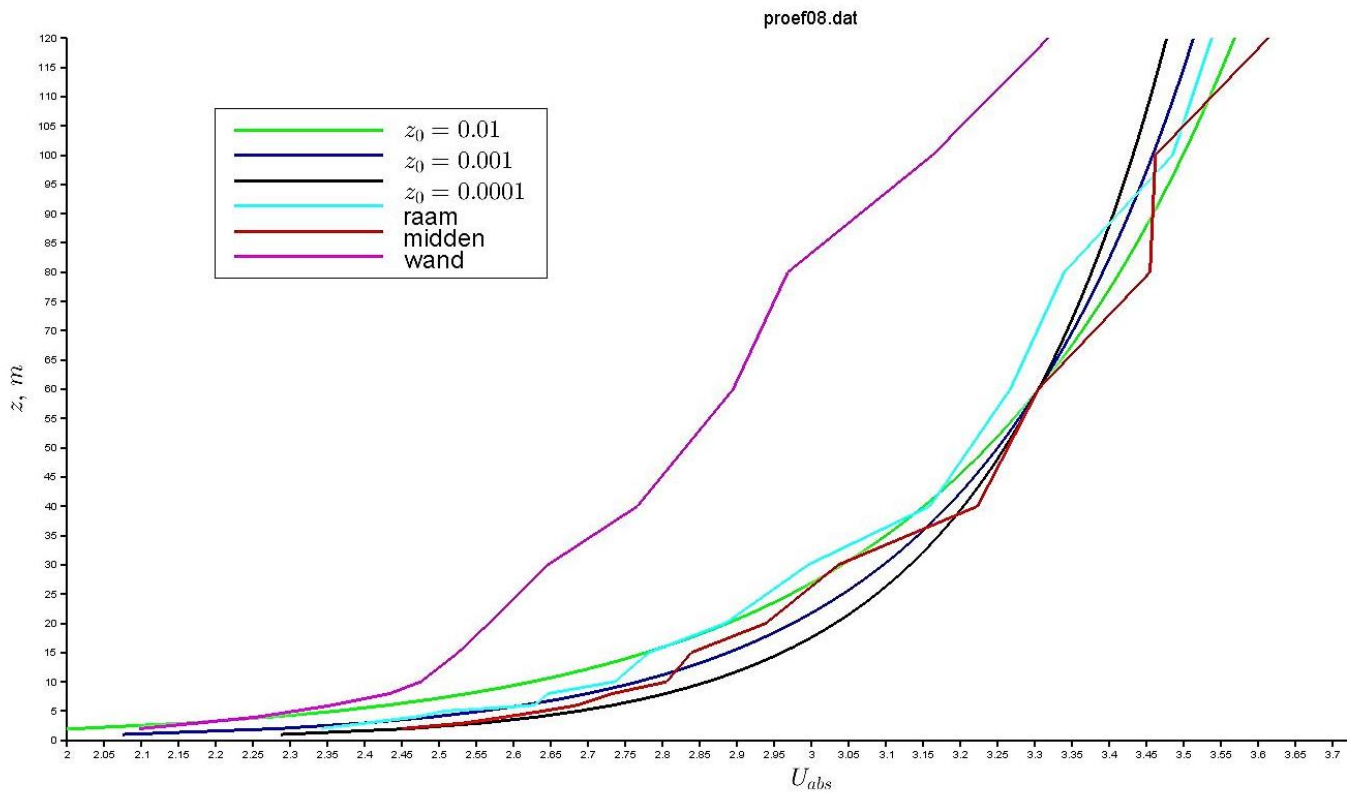
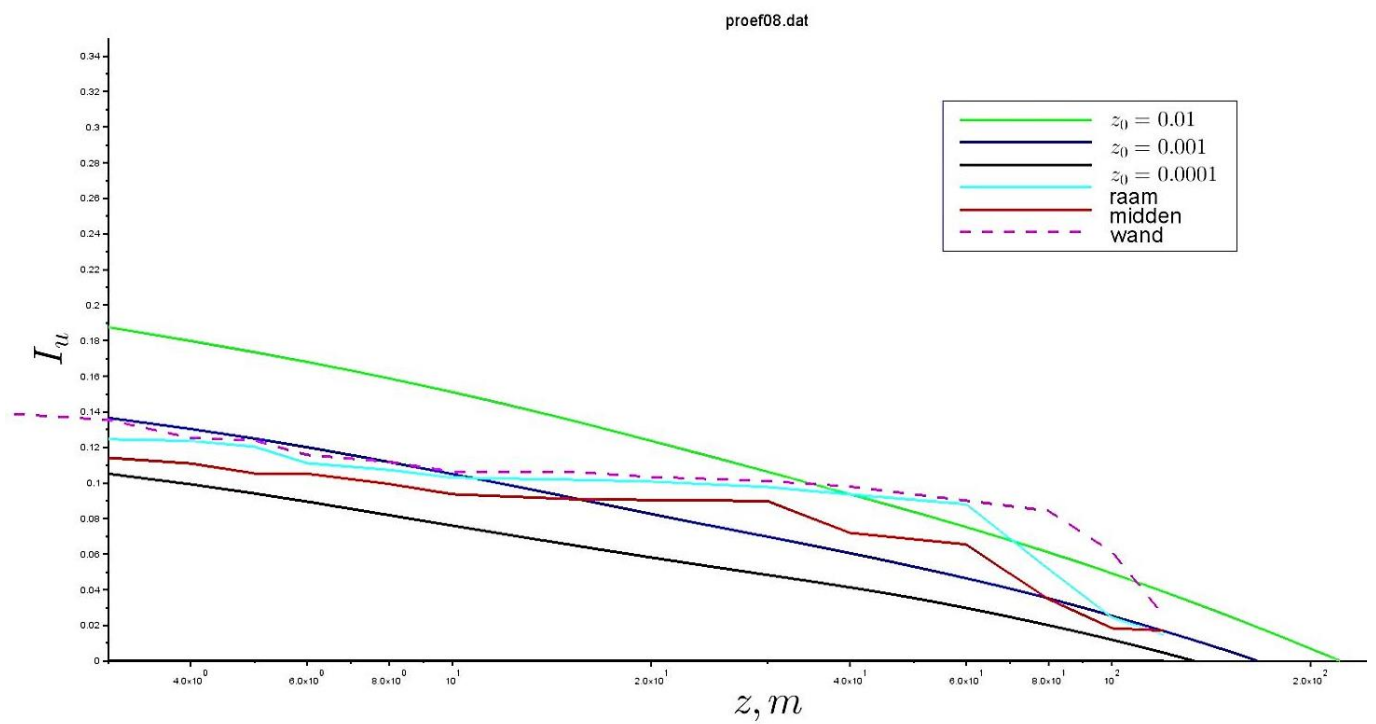


Fig.31. (rechts) Detail onderkant tapijt HZS [eigen foto]

Resultaat	<i>Zie meting 8 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]</i>
Snelheidsprofiel	Wat onmiddellijk opvalt is dat de snelheid aan de wand (paarse curve) veel trager is en hard afwijkt. Voor de bespreking van de resultaten wordt deze buiten beschouwing gelaten. Nochtans is deze afwijking niet te verwaarlozen, zoals beschreven in proef 4. De snelheid is, in vergelijking met de vorige proeven, groter geworden in de onderste 15 cm, wat positief is; de wind is hier versneld. Op een hoogte van 10 cm tot 30 cm is de snelheidsgradiënt slechts een beetje te klein in vergelijking met de standaardcurves. Op andere hoogten zijn de snelheden van 'midden' en 'links' goed. De zone van 10 cm tot 40 cm is interessant om metingen te doen aan boord van schepen. Bij een schaal van 1/100 bevinden zich op deze hoogten het dek en de accommodatie.
Turbulentieprofiel	In de onderste 10 cm is de turbulentie gedaald en zeer goed. Het omdraaien van het tapijt heeft het gewenste effect gehad: het dalen van de turbulentie in de onderste 10 cm.



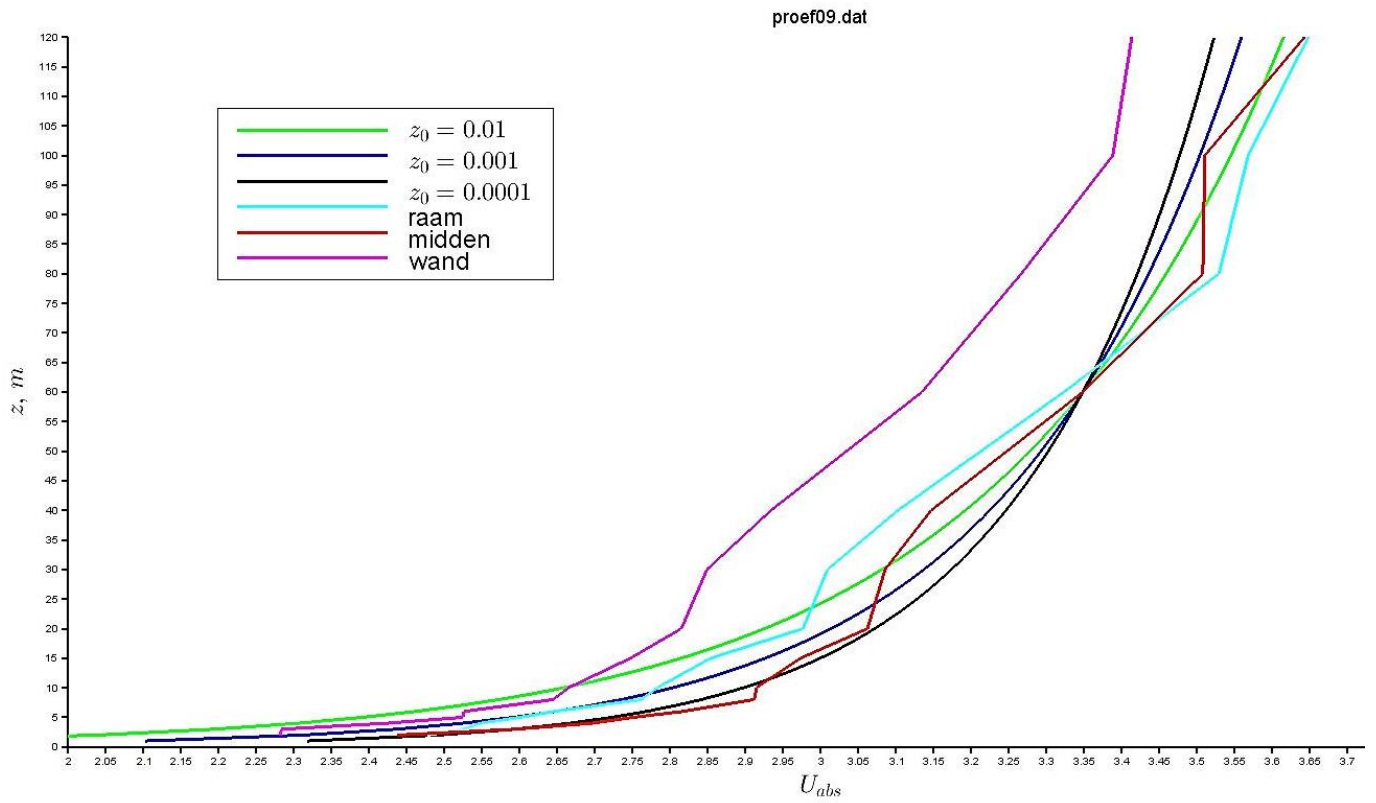
Meting 8 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



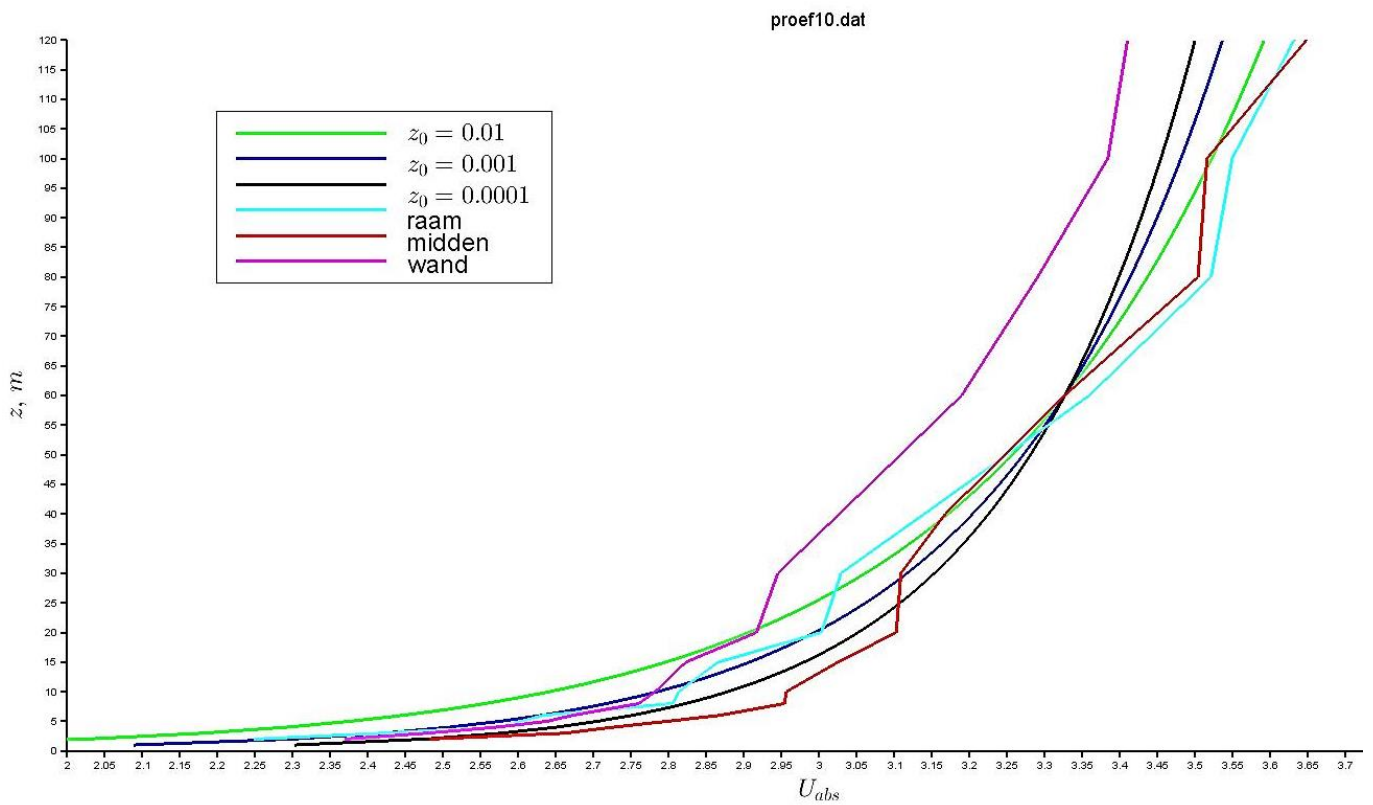
Meting 8 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Vergelijking proef 8 vs proef 5:	Proef 8: 6 spires HZS, tapijt 'HZS onderkant' en trimboard 23cm	Proef 5: 6 spires HZS, tapijt Peutz en trimboard 23cm
1 verandering:	Tapijt Peutz werd vervangen door het tapijt 'HZS met de onderkant naar boven'.	
Snelheidsprofiel	Met het nieuwe tapijt in proef 8 liggen de snelheden aan de kant van het raam en het midden dichterbij elkaar, wat positief is. Nochtans is de asymmetrie toegenomen in proef 8, aangezien de kant van de wand trager is. De snelheid in proef 8 is gestegen tot op een hoogte van zo'n 60 cm. Verder is er een groot verschil in de vorm van het snelheidsprofiel: waar de snelheidscurve in proef 5 eerder lineair is, geeft proef 8 een snelheidscurve die een goede vorm heeft en die goed bij de referentiekromme aansluit (uitgezonderd de kant van de wand).	
Turbulentieprofiel	Met het nieuwe tapijt is de turbulentie heel sterk gedaald in de onderste 25 cm. Met het nieuwe tapijt is de turbulentie nagenoeg perfect in de onderste 10 cm. Onderaan de grenslaag, op 2 cm boven het tapijt, is de turbulentie gedaald met 10% als gevolg van het nieuwe tapijt. Tussen 10 tot 30 cm is de turbulentie nagenoeg niet veranderd als we proef 5 en proef 8 vergelijken. De asymmetrie is wel toegenomen op hoogtes boven 30 cm met het nieuwe tapijt van proef 8.	

Proeven 9 en 10	Ongelijk verdeeld trimboard		21 sept 2012
Verticale metingen	Aantal spires	Trimboard	Tapijt
proef 9	6 (HZS)	19,5 – 18 – 19,5 cm	HZS onderkant
proef 10	6 (HZS)	18 – 15 – 18 cm	HZS onderkant
Motivatie	Proeven 9 en 10 werden uitgevoerd met als doel de symmetrie in de tunnel te verbeteren. Door een foutieve weergave van de resultaten bleek achteraf dat deze twee proeven weinig verbetering hadden opgeleverd. Het trimboard werd verdeeld in 3 delen van één meter lang met een verschillende hoogte. In proef 9 had het trimboard een hoogte van 19,5 cm aan de kant van de wand en aan de kant van het luik. De meter in het laterale midden van het trimboard had een hoogte van 18 cm. Dit bleek niet genoeg te zijn en in proef 10 werd het trimboard verder verlaagd naar een hoogte van 18 cm aan de kant van de wand en aan de kant van het raam. In de middelste meter had het trimboard een hoogte van 15cm.		
Resultaat	<i>Zie meting 9 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]</i> <i>Zie meting 10 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]</i>		
Snelheidsprofiel	Het resultaat van deze twee proeven was dat de curven dicht bij elkaar kwamen liggen, wat positief was, maar de vorm van de snelheidscurve was geen verbetering. Het werd ons na deze twee proeven ook duidelijk dat enkel door de opstelling van het voorland te veranderen de asymmetrie niet ging verdwijnen. Daarom heeft Peutz na deze metingen, vlak voor de tweede meetweek, een fijn gaas geplaatst windopwaarts van het honingraat, wat de druk gelijkmatiger moet verspreiden nog vóór het voorland. Deze aanpassing werd gedaan voor dit project omdat er in dit project wordt gemeten aan een lage windsnelheid en met weinig turbulentie.		
Turbulentieprofiel	De curven liggen dicht bij elkaar in het turbulentieprofiel, en de vorm van de turbulentiekrommen zijn beter. In proef 10 schommelen deze tussen de referentiekrommen van $z_0 = 0,001\text{m}$ en $z_0 = 0,0001\text{m}$, wat een rustige, kalme zee evenaart.		

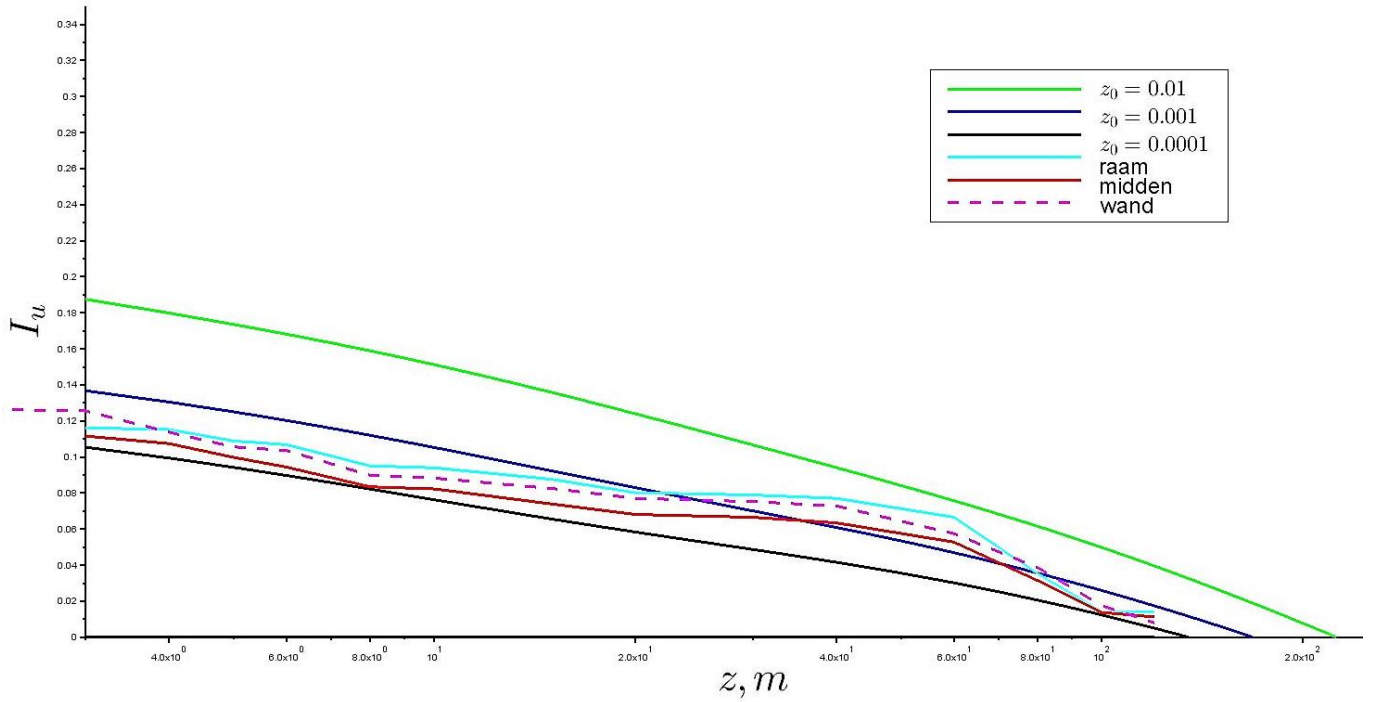


Meting 9 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



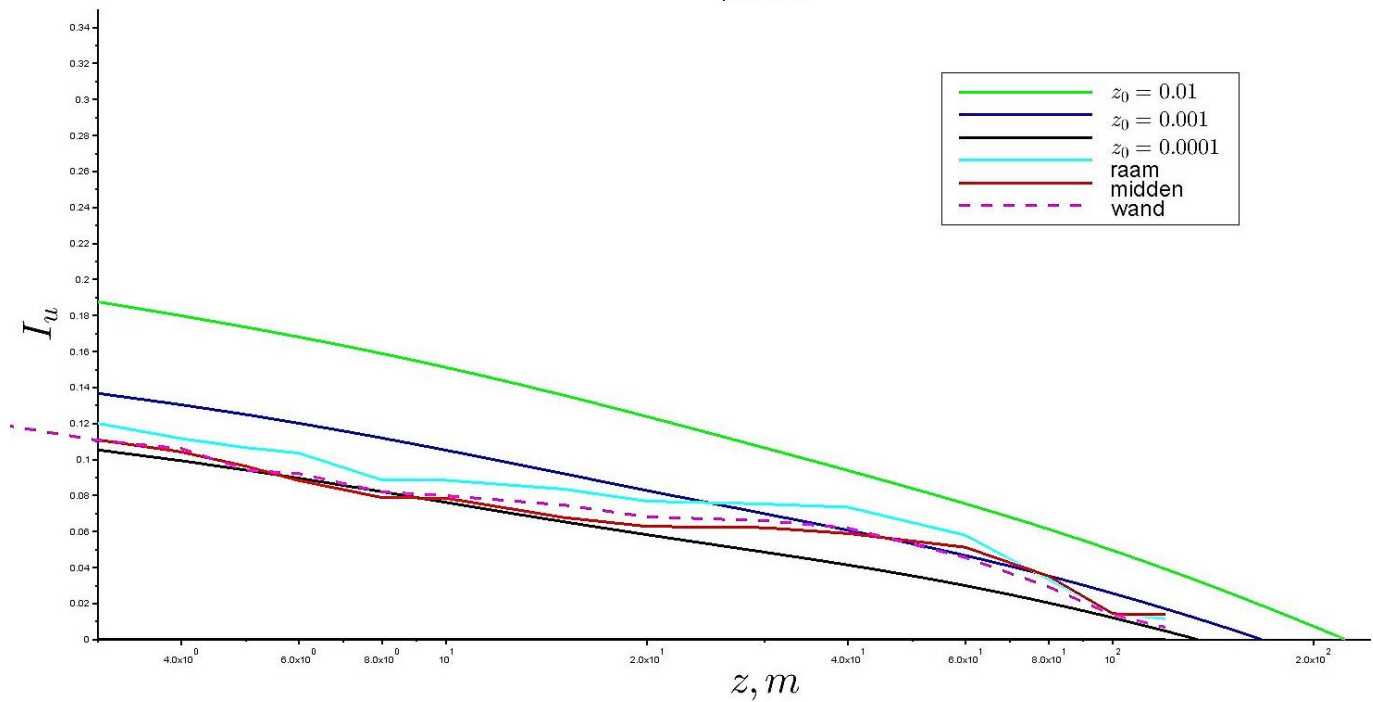
Meting 10 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]

proef09.dat



Meting 09 –Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

proef10.dat



Meting 10 –Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Proef 11	Vergelijking probes en TSI met pitotbuis		28 jan 2013
Opbouw:	Aantal spires	Hoogte trimboard	Tapijt
Voormeting	6	Origineel: 23cm	geen

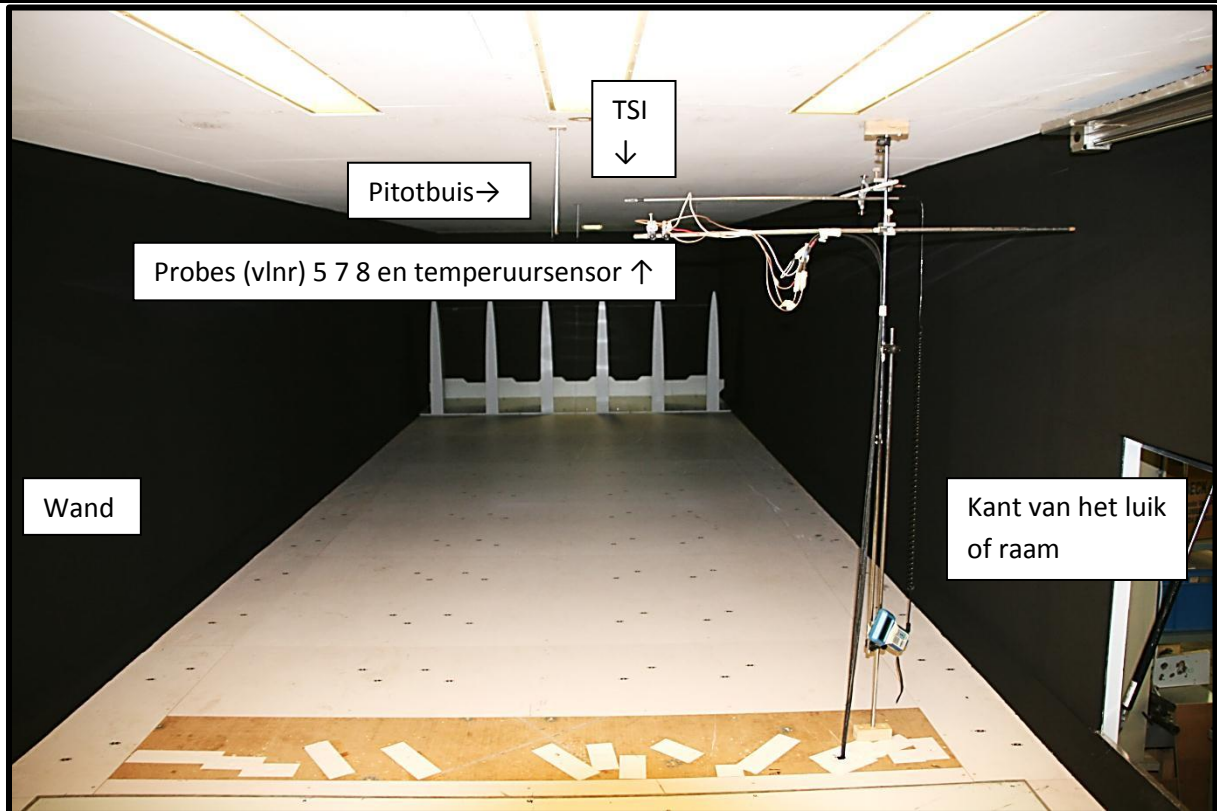


Fig. 32. Proefopstelling proef 11 [eigen foto]

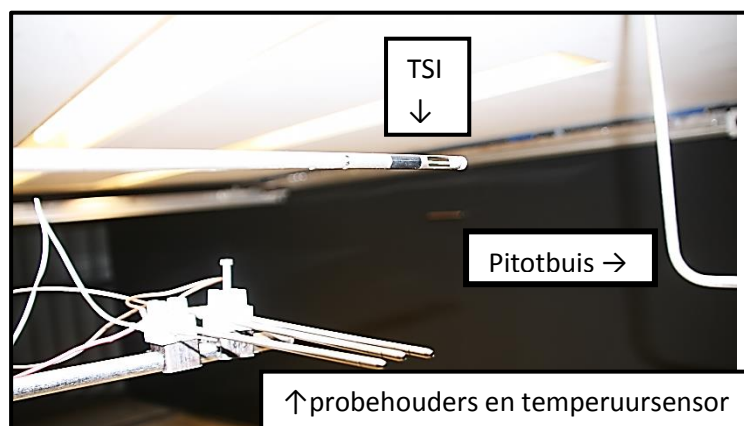


Fig. 33. Detail van de meetinstrumenten opgesteld in proef 11 [eigen foto]

Motivatie	Proef 11 is de voormeting die moet plaatsvinden voor elke reeks van proeven, om de omgerekende snelheid van de pitot te vergelijken met die van de TSI en met de windsnelheid die gemeten wordt door de hotwire probes. Er wordt niet op verschillende hoogtes noch breedtes gemeten. De windsnelheid		
-----------	---	--	--

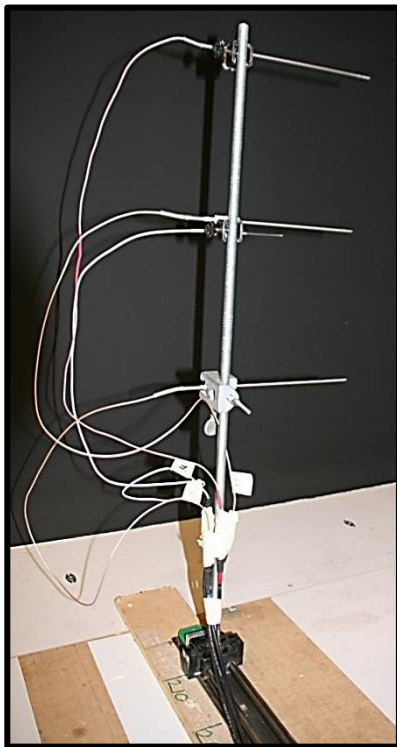
	wordt op verschillende, constante snelheden gebracht. Er wordt gemeten met zes verschillende windsnelheden: 2, 4, 6, 8, 12, 15 m/s. In de windtunnel hangen de 3 hotwire probes, de temperatuursensor en de TSI allemaal vlak naast de pitotbuis, op 30 cm onder het 'plafond' van de windtunnel. Er wordt op de pitotmeter afgelezen hoeveel de druk (en dus omgerekend de snelheid) in de windtunnel bedraagt. Kleine verschillen tussen de probes worden zichtbaar in de meetresultaten, en hiermee kan later rekening mee worden gehouden als de snelheden in grafieken worden voorgesteld. De opstelling van het voorland is niet zo belangrijk voor de voormeting, aangezien er vooral wordt gekeken naar verschillen in de resultaten van de probes onderling.
Resultaat	De gemeten snelheden door de probes zijn zoals verwacht lager dan de ingestelde regelsnelheden. Dit komt omdat er zich in de windtunnel een grenslaag gevormd heeft. Onderaan in de windtunnel zullen de gemeten snelheden trager zijn dan bovenaan in de windtunnel. Toch zullen de snelheden bovenaan in de tunnel, dus ook waar de probes hangen, zich nog steeds bevinden in de grenslaag en bij gevolg onderhevig zijn aan de wrijving door de bodem, plafond en wanden. De gemeten snelheden liggen dus net iets lager dan de regelsnelheden, en liggen niet ver van de windsnelheden die de TSI meette. Tussen de probes onderling is er slechts een klein verschil, maar genoeg om zichtbaar te zijn in de grafieken van komende proeven. Er wordt eerst gekeken naar een regelsnelheid van 4m/s, omdat bij deze windsnelheid alle proeven in dit onderzoek worden uitgevoerd. Bij deze regelsnelheid van 4m/s geeft probe '7' de grootste windsnelheid aan: zo'n 4,35% sneller tegenover probe '8' en slechts 0,34% sneller tegenover probe '5'. Het kleine verschil van 0,34% tussen probe '7' en '5' zal nagenoeg onzichtbaar zijn op de snelheidsprofielen van de komende proeven. Bij een windsnelheid van 4m/s zal het verschil van 4.35% tussen probe '7' en '8' zo'n 0,15 m/s bedragen, wat zeer goed zichtbaar is op de snelheidsprofielen van de proeven die volgen.

	Deze verschillen moet men in acht houden tijdens het interpreteren van de snelheidsprofielen. Tijdens proeven 14 t.e.m. 21 wordt probe '8' (die veruit de traagste snelheden aangaf) geplaatst aan de kant van de wand, probe '5' in het midden en probe '7' (die de snelste windsnelheden aangaf bij 4 m/s) aan de kant van het luik. Toch moet men er ook rekening mee houden dat deze verschillen werden bepaald op 30 cm onder het plafond van de windtunnel. Deze verschillen zullen veranderen bij andere hoogtes en andere opstellingen van het voorland.
--	---

Proef 12	Symmetrie meten			29 jan 2013
Opbouw:	Aantal spires	Hoogte trimboard	Tapijt	
Laterale meting	geen	geen	geen	
Motivatie	Deze proef werd uitgevoerd om de symmetrie in de tunnel te meten. Als men kijkt naar de resultaten van de meetweek in september 2012 dan ziet men een asymmetrie in onze configuratie, waardoor de snelheid aan de kant van de wand trager is. De plaatsing van het gaas zou symmetrie moeten bevorderen. In het sneheidsprofiel van proef 8 was duidelijk te zien dat de wind aan de kant van de wand trager was. Proef 12 bestaat uit een lege tunnel zodat er geen objecten zijn die asymmetrie zouden kunnen veroorzaken. Er zijn in deze proef geen spires, geen trimboard en geen tapijt. Om een beter beeld te krijgen van de symmetrie in de tunnel wordt er lateraal gemeten. Er wordt gemeten over 210 cm met stappen van 10 cm. De hoogte van de probes bedragen 40, 60 en 80 cm maar enkel de probe van 80 cm was voor deze proef functioneel.			
Snelheidsprofiel	Het doel was om de snelheid lateraal gelijk te houden. Er zou dus geen groot verschil meer mogen zijn tussen de snelheden van de wand t.o.v. het midden en de kant van het luik. Als we het snelheidsprofiel van proef 8 opnieuw zouden meten, maar deze keer mét het gaas, dan zouden de snelheden dichterbij elkaar moeten liggen. Het laterale snelheidsprofiel van proef 12 zal er anders uitzien dan de verticale snelheidsprofielen die we voorheen hebben gemeten.			



Fig. 34. Proefopstelling proef 12 [eigen foto]



De drie probes staan verticaal tegenover elkaar opgesteld. Met een treksysteem wordt de verticale staaf elke 2 minuten 10 cm opgeschoven in de breedte. Zoals te zien in fig. 36 staat de temperatuursensor in deze meetopstelling vlak onder de tweede probe. Op een hoogte van 80 cm staat probe 8, op 60 cm staat probe 5 en de temperatuursensor en op een hoogte van 40 cm staat probe 7. De probes staan in het begin van de meting lateraal op 45,5 cm van de wand. Vanaf hier wordt er gemeten over een afstand van 210 cm.

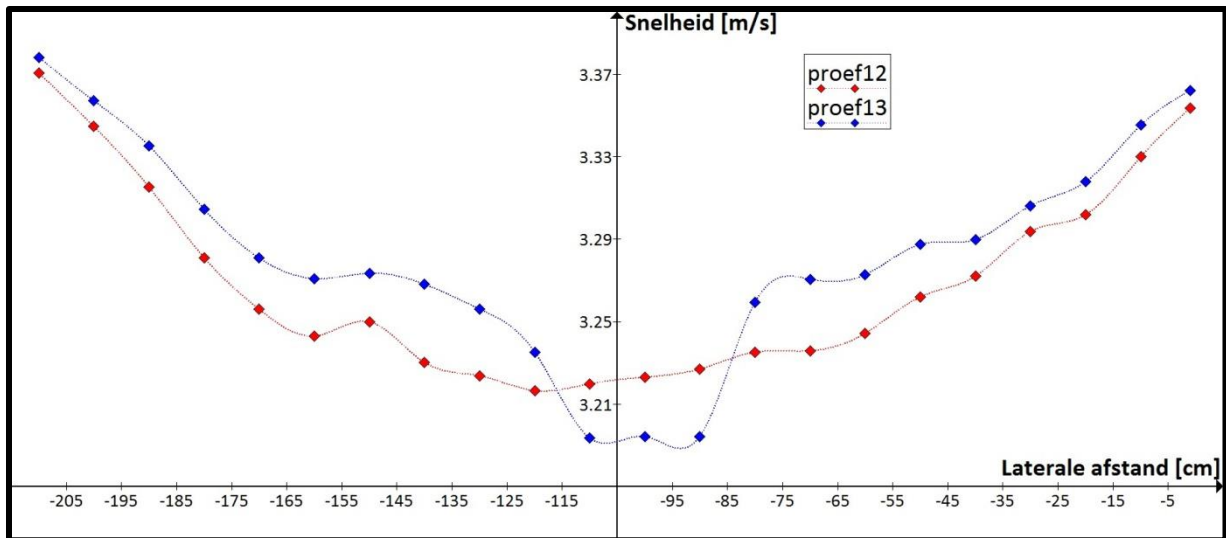
Fig. 35. Detail laterale meetopstelling [eigen foto]

Resultaat	<i>Zie meting 12 en 13 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]</i> <i>Zie meting 12 en 13 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]</i>
Snelheidsprofiel	De windsnelheid is lateraal redelijk constant. In het midden is er een kleine vertraging. De minimale windsnelheid werd gemeten op 15 cm van het midden naar de kant van de wand en bedroeg 3,216m/s. De maximale windsnelheid werd gemeten aan de kant van de wand, op

	45,5cm van de wand; 3,371m/s. Het verschil tussen de minimale en maximale snelheid is 0,155m/s.
--	---

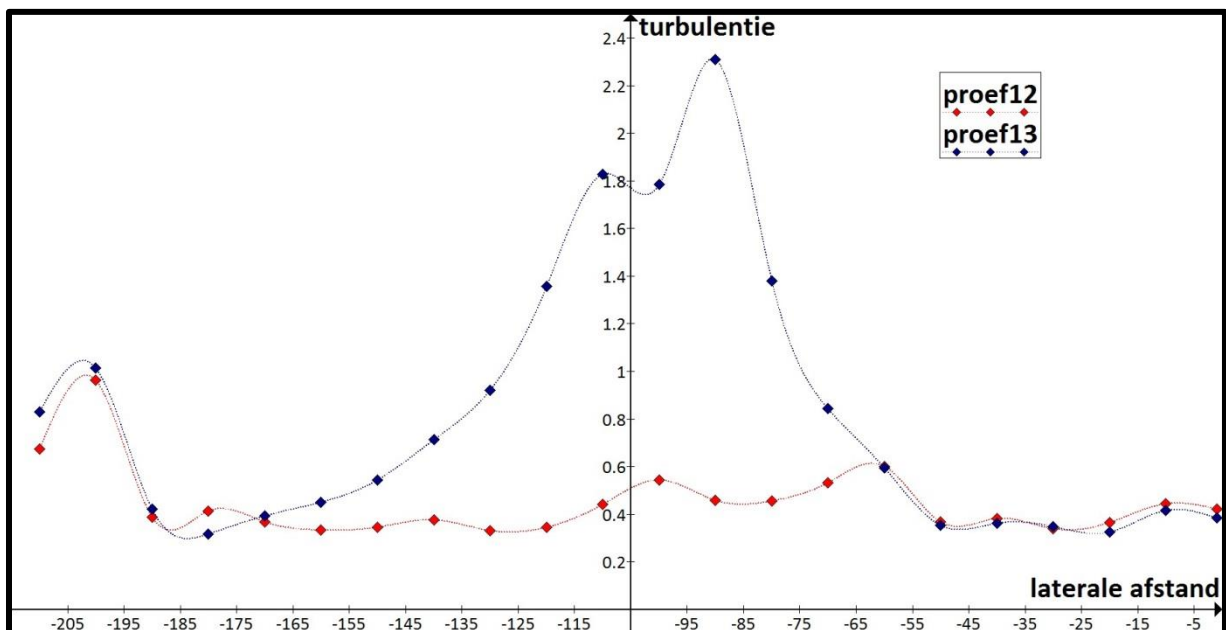
Proef 13	Invloed van slechts één spire			29 jan 2013
Opbouw:	Aantal spires	Hoogte trimboard	Tapijt	
Laterale meting	1	geen	geen	
Motivatie	In deze proef wordt gemeten over welke breedte één spire een invloed heeft op de snelheid en de turbulentie. Het resultaat van deze proef kan gebruikt worden voor het bepalen van het aantal spires dat er in de tunnel zouden moeten staan. Weer wordt er lateraal gemeten over 210 cm met stappen van 10 cm. In de tunnel bevinden zich 1 spire, geen trimboard en geen tapijt. De meetprobe (probe 8) beweegt zich lateraal op een hoogte van 80 cm.			
				
<i>Fig. 36. Proefopstelling proef 13 [eigen foto]</i>				
Resultaat	<i>Zie meting 12 en 13 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]</i> <i>Zie meting 12 en 13 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]</i>			
Snelheidsprofiel	In het laterale midden wordt een minimale snelheid gemeten van 3,193 m/s. Aan de kant van het raam en van de wand worden hogere snelheden gehaald van resp. 3,362 m/s en 3,378 m/s. Het snelheidsverschil tussen de minimum en de maximale snelheid bedraagt 0,185 m/s. Als het laterale snelheidsprofiel van deze proef 13 wordt vergeleken met proef 12, waar geen spire aanwezig is, dan is de gemiddelde snelheid in proef 13 iets hoger. In de regio van 20 cm links en rechts van de spire daarentegen is de snelheid beduidend lager dan zonder			

	de spire. De aanwezigheid van de spire is zichtbaar in het laterale snelheidsprofiel.
Turbulentieprofiel	De aanwezigheid van één spire in het voorland laat de turbulentie tot 5 keer zo hoog stijgen. De spire beïnvloedt de turbulentie tot een afstand van ongeveer 50 cm links en rechts van de spire. Een verklaring voor de asymmetrie in het turbulentieprofiel kan zijn dat de spire niet 100% parallel stond met de windrichting.

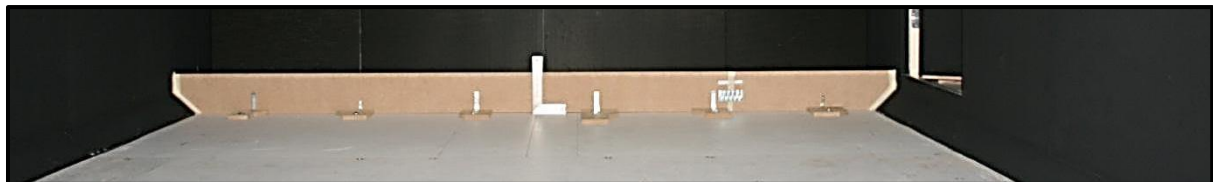


Meting 12 en 13 – Snelheidsprofiel: Vergelijking van het laterale snelheidsprofiel mét en zonder spire (resp. proef 13 en 12) op hoogte=0,80 cm. [eigen grafiek]

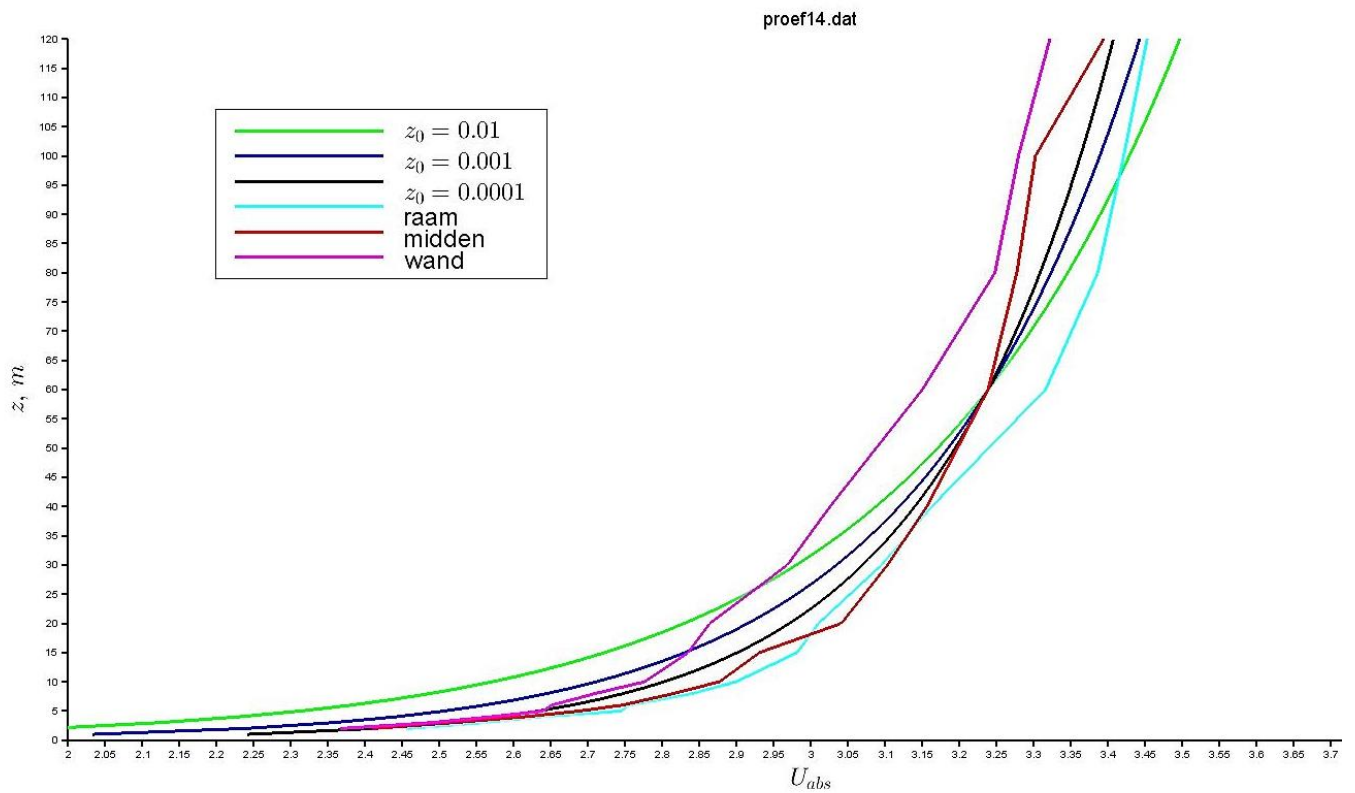
Door de keuze van de schaal lijkt er een groot verschil in windsnelheid te zijn. In realiteit is het maximale verschil voor proef 12 (rode curve) slechts 0,155m/s en voor proef 13 (blauwe curve) 0,185m/s.



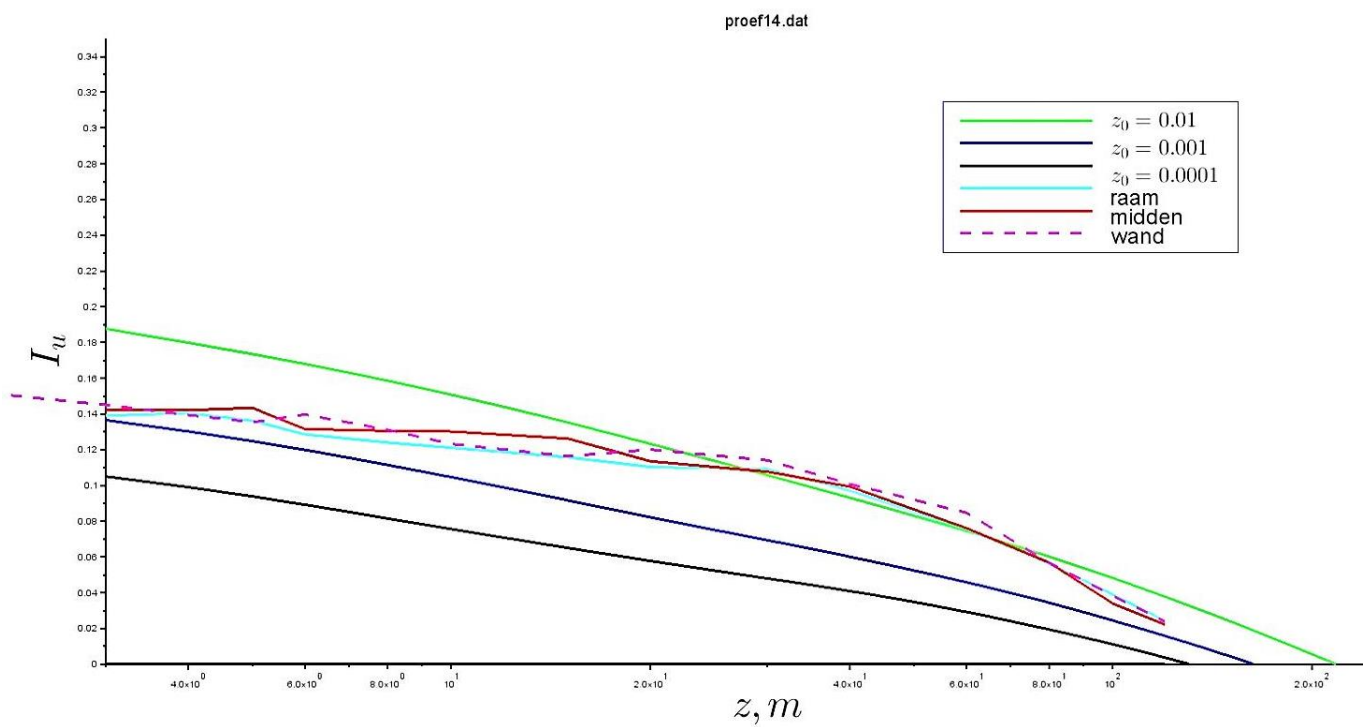
Meting 12 en 13 – Turbulentieprofiel: Vergelijking van de turbulentie mét en zonder spire (resp. proef 13 en 12) in laterale metingen op hoogte=0,80 cm. [eigen grafiek]

Proef 14	Invloed van het trimboard alleen			30 jan 2013
Opbouw:	Aantal spires	Hoogte trimboard	Tapijt	
Verticale meting	geen	18 cm	geen	
Motivatie	Dit is de eerste verticale meting van de tweede meetweek. Er wordt gemeten tot welke hoogte het trimboard een invloed heeft op de grenslaag, zonder de invloed van tapijt en spires. De meetpunten staan asymmetrisch verspreid over de breedte van de tunnel. De afstanden vanaf het luik naar de probes zijn als volgt: 56,5 cm tot de probe het dichtst bij het luik, 148,5 cm tot probe in het midden, en 243 cm tot de probe het dichtst aan de wand. De keuze van het trimboard van 18 cm is gebaseerd op de proeven van september 2012, waarbij proef 7 een redelijk goed profiel gaf met een trimboard van 18 cm hoogte. In tegenstelling tot proef 7 heeft proef 14 geen gekarteld trimboard, maar een rechte bovenkant.			
				
<i>Fig. 37. Proefopstelling proef 14 [eigen foto]</i>				
				
<i>Fig. 38. Detail van het trimboard (18cm) proef 14 [eigen foto]</i>				
Resultaat	Zie meting 14 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]			

Snelheidsprofiel	Qua vorm sluit het snelheidsprofiel redelijk goed aan bij het logaritmisch standaardprofiel. De snelheid is in de onderste 20 cm wat te snel, maar dit was verwacht aangezien er geen tapijt ligt die de snelheid in de onderste meters doet afnemen. Boven deze hoogte is de snelheidsgradiënt slechts een beetje te klein: de snelheid neemt te weinig toe met de hoogte. Er kan worden besloten dat het trimboard een belangrijk element is. De kant van de wand geeft een iets trager snelheidsprofiel aan dan het midden, maar dit relatief kleine verschil kan mogelijk verklaard worden door de iets 'tragere' probe aan de kant van de wand, die tijdens de voormeting zo'n 4% tragere windsnelheden aangaf dan de probe die in het midden meette.
Turbulentieprofiel	De turbulentie daalt in de regio van 20 tot 70 cm iets te weinig met de hoogte. Wat wel goed is, is dat de curven extreem dicht bij elkaar liggen, wat duidt op een turbulentie die over de breedte vrijwel gelijk is.



Meting 14 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



Meting 14 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Proef 15	Combinatie trimboard en tapijt			30 jan 2013
Opbouw:	Aantal spires	Trimboard	Tapijt	
Verticale meting	geen	18cm	HZS onderkant boven	
Motivatie	Het trimboard van 18 cm blijft behouden aangezien het snelheidsprofiel van proef 14 zeer goed aansluit bij de gewenste referentiecurve. In proef 15 wordt de interactie van het trimboard en van het tapijt bekeken, zonder spires.			
Snelheidsprofiel	Verwacht wordt dat de snelheid enkel in de onderste meters zal dalen ten opzichte van proef 14 door de verhoogde weerstand van het tapijt. Dit zou positief zijn, omdat onze curve dan dichterbij de logaritmische standaardcurve zou komen.			
Turbulentieprofiel	Er wordt verwacht dat de turbulentie enkel in de onderste meters zal toenemen. Hiervoor is nog marge en als de turbulentie in deze regio zou verhogen, dan zou het turbulentieprofiel ook een beter aansluiten bij de referentieprofielen.			



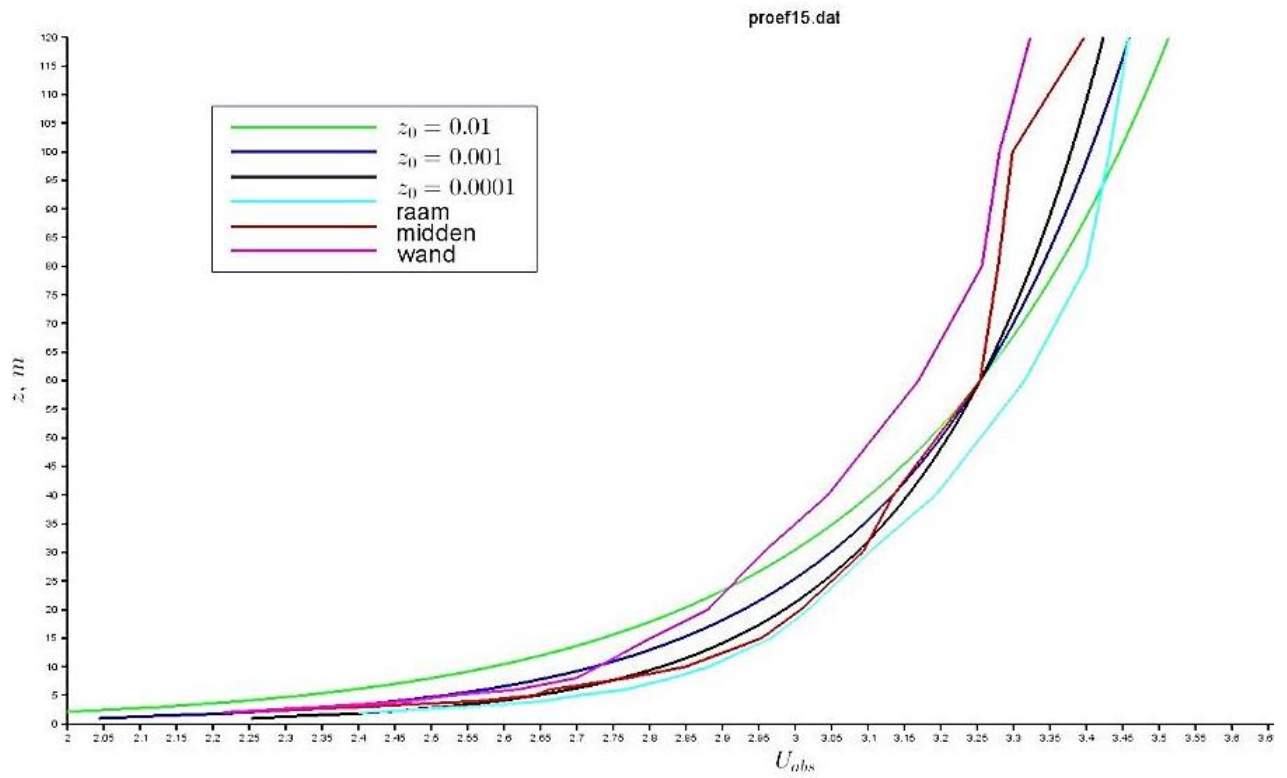
Fig. 39. Proefopstelling proef 15 [eigen foto]

Merk het verschil op dat er bij proef 15 een tapijt ligt (HZS, onderkant naar boven) en bij proef 14 niet.

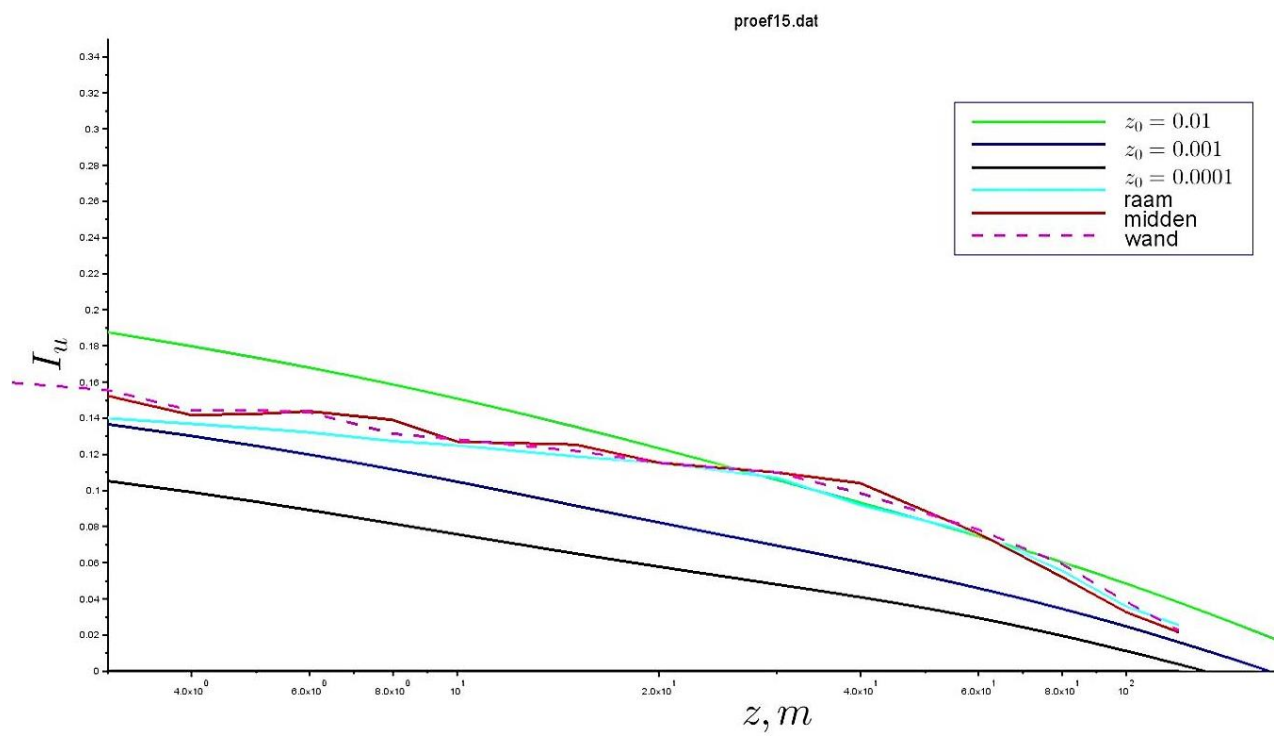
Resultaat	Zie meting 15 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]
-----------	--

Snelheidsprofiel	Het tapijt vertraagt de wind in de onderste meters. Het lijkt invloed te hebben tot een hoogte van 20 cm. Boven deze hoogte blijft het snelheidsprofiel nagenoeg hetzelfde ten opzichte van dezelfde situatie zonder tapijt (proef 14). Het verkregen snelheidsprofiel is zeer goed. De meetresultaten aan de kant van de wand zijn trager dan de metingen in het midden en aan de kant van het luik, maar weer kan dit relatief kleine verschil mogelijk verklaard worden door de iets 'tragere' probe aan de kant van de wand, die tijdens de voormeting zo'n 4% tragere snelheden aangaf dan de probe die in het midden meette.
Turbulentieprofiel	Het turbulentieprofiel wordt enkel in de onderste centimeters beïnvloed door het tapijt, waar de turbulentie wat hoger is met het tapijt. Boven de 10 cm is er weinig verschil merkbaar. Toch daalt de turbulentie nog steeds te weinig naarmate de hoogte in de onderste 40 cm.

Vergelijking proef 15 vs proef 14:	Proef 15: geen spires, trimboard 18 cm, tapijt 'HZS onderkant'	Proef 14: geen spires, trimboard 18 cm, geen tapijt
1 verandering:	Er werd een tapijt geplaatst 'HZS onderkant'	
Snelheidsprofiel	Met de aanwezigheid van het tapijt daalt de snelheid over de gehele hoogte, maar de grootste snelheidsveranderingen beperken zich tot een hoogte van 25 cm.	
Turbulentieprofiel	Door de aanwezigheid van het tapijt in proef 15 stijgt de turbulentie in de onderste 10 cm. Zonder tapijt is er een grotere asymmetrie in de onderste 20 cm.	



Meting 15 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



Meting 15 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Proef 16	Van 6 naar 5 spires; een verbetering?		30 jan 2013
Opbouw:	Aantal spires	Hoogte trimboard	Tapijt
Verticale meting	5	18cm	HZS onderkant boven
Motivatie	Door het aantal spires van 6 naar 5 te brengen wordt de invloed van de spires hopelijk minder. De afstand tussen de muur en spires: 17 cm, de afstand tussen de spires onderling: 66,5 cm. In proef 13 is aangetoond dat de aanwezigheid van 1 spire een noemenswaardig lateraal effect heeft van 0,5 m. Door slechts 5 spires te gebruiken en de afstand tussen de spires onderling naar 66,5cm te brengen overlappen de gebieden van invloed aan weerskanten van de spires dus ruim. Door tijdsgebrek werd er enkel verticaal gemeten en niet lateraal, waardoor we voor deze proef geen beeld hebben van de dwarsdoorsnede van de windtunnel. Dit zou interessant zijn geweest om nu al te kijken of de laterale snelheidscurve geen dalen vertoont omdat er minder spires zijn gebruikt. Een laterale meting met 5 spires werd wel uitgevoerd in proef 23. Tijdens de week van metingen in september 2012 werd er telkens gemeten met 6 spires die ook op 17 cm van de wanden stonden en waarbij de afstand tussen de spires onderling 53,2 cm bedroeg. In proef 16 is de afstand tot de wand behouden (17 cm), maar de onderlinge afstand tussen de spires is vergroot, aangezien er slechts met 5 i.p.v. 6 spires wordt gewerkt.		
Snelheidsprofiel	Er wordt verwacht dat de snelheid over de gehele hoogte, ook in de grotere hoogten, zal afnemen door de aanwezigheid van de spires. Uit proeven 12 en 13 bleek immers dat de snelheid zal afnemen tot zo'n 20 cm links en rechts van de spire. In deze proef is de onderlinge afstand van de spires 66,5 cm waardoor er in theorie zo'n 26,5 cm niet in deze vertraagde zone zit tussen twee spires.		
Turbulentieprofiel	Verwacht wordt dat de turbulentie zal toenemen over de gehele hoogte door de aanwezigheid van de spires aangezien proef 13 een duidelijke verhoging van de turbulentie toonde bij de aanwezigheid van een spire.		

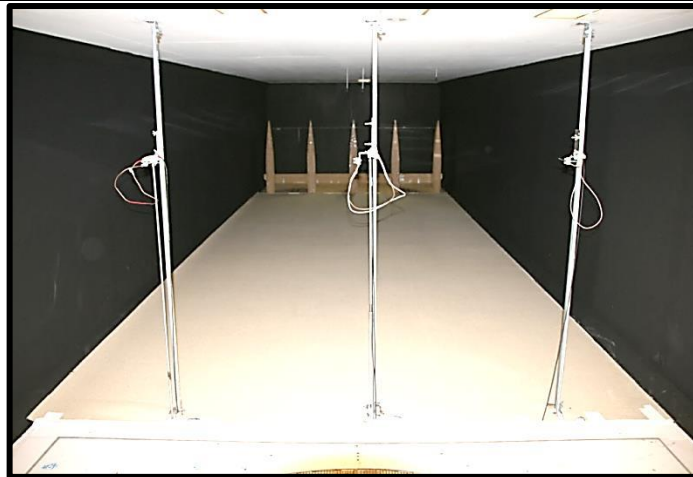
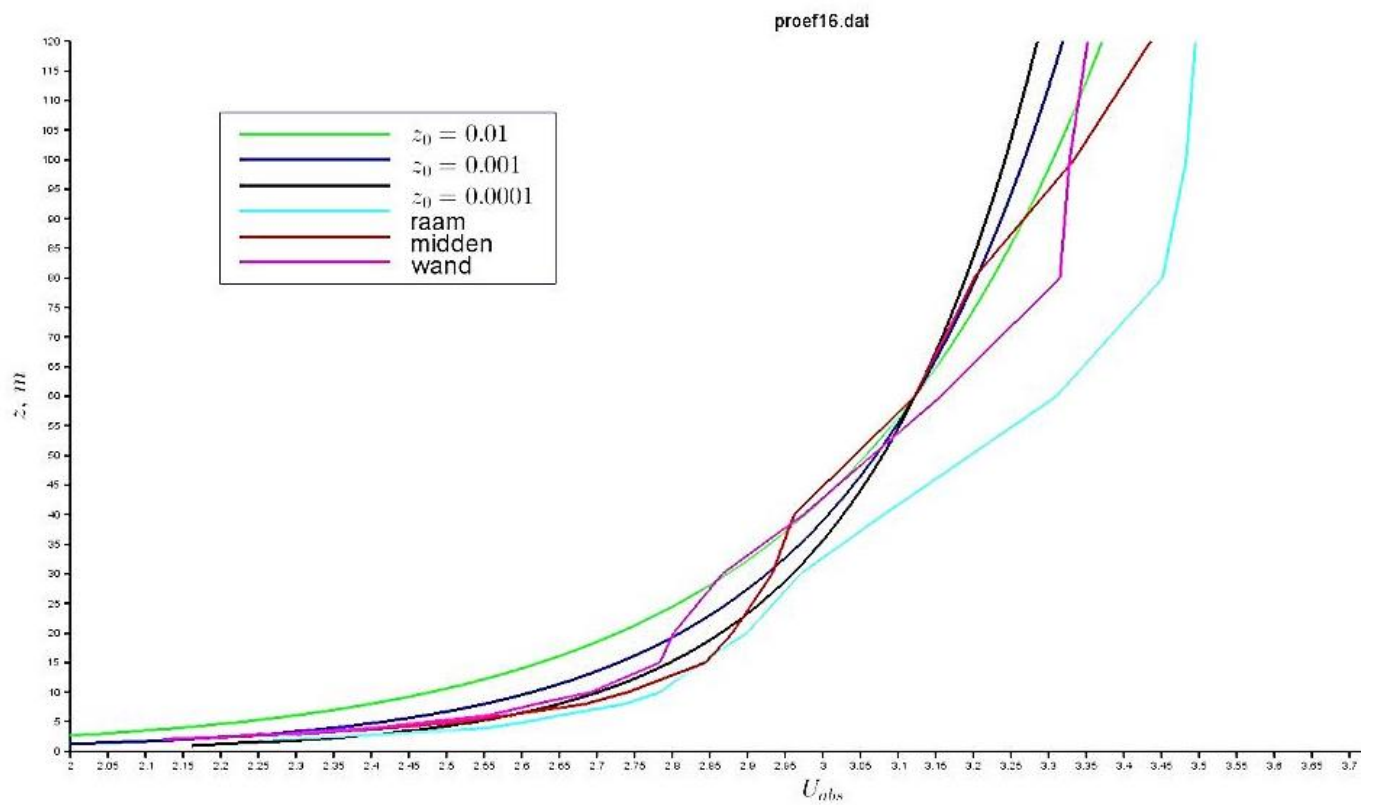
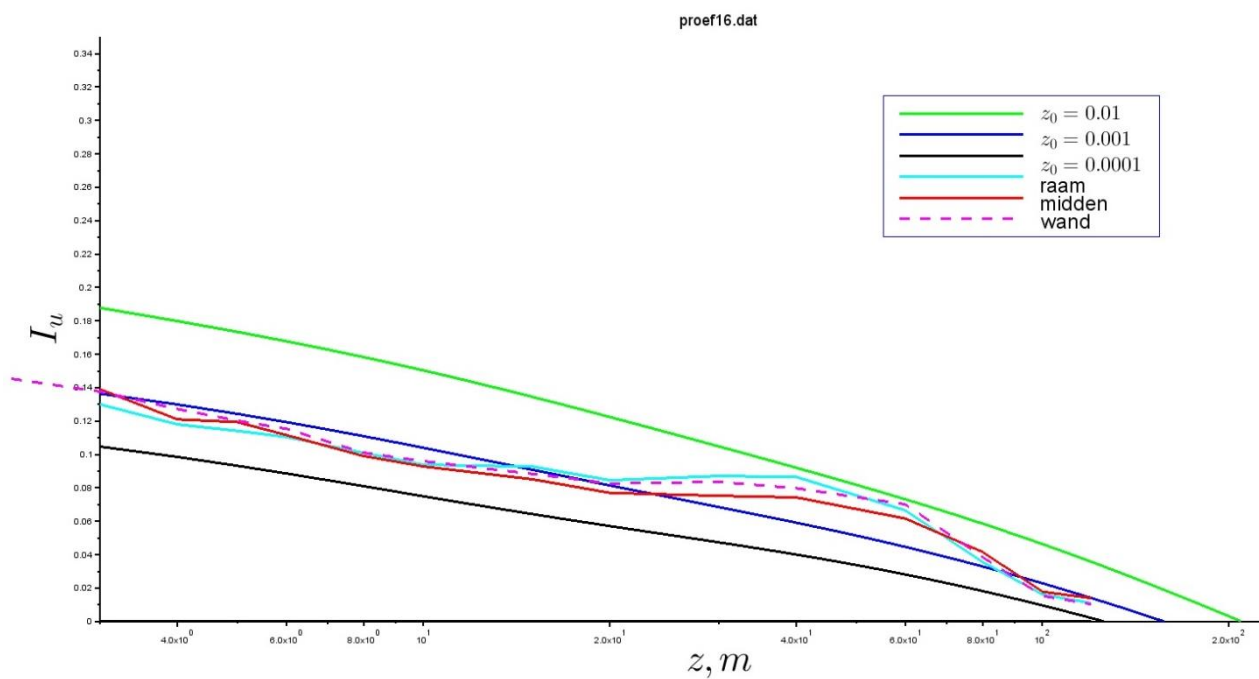


Fig. 40. Proefopstelling proef 16 [eigen foto]

Resultaat	<i>Zie meting 16 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]</i>
Snelheidsprofiel	Tot op een hoogte van 15 cm is de snelheidscurve bijna perfect, maar boven deze hoogte blijken er meer onregelmatigheden en asymmetrie te komen in het profiel. Met name de kant aan het luik is sneller in de grotere hoogten, wat ook in proeven 17 en 18 blijft. De vorm van de curve lijkt verstoord boven de 15 cm.
Turbulentieprofiel	Verbazend genoeg is de turbulentie lager met de spires en trimboard dan enkel met het trimboard. Dit is te verklaren door relatief hoge spires die de wind parallel gecontroleerd geleiden in het begin van het voorland. Zonder de spires zal de wind boven het trimboard in elke richting kunnen bewegen, wat de hogere turbulentie kan verklaren. Tot een hoogte van 20 cm is de turbulentie zeer goed, maar tussen 20 cm en 60 cm daalt de turbulentie te weinig naarmate de hoogte. Tussen 60 cm en 100 cm daalt de turbulentie dan weer te snel.



Meting 16 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



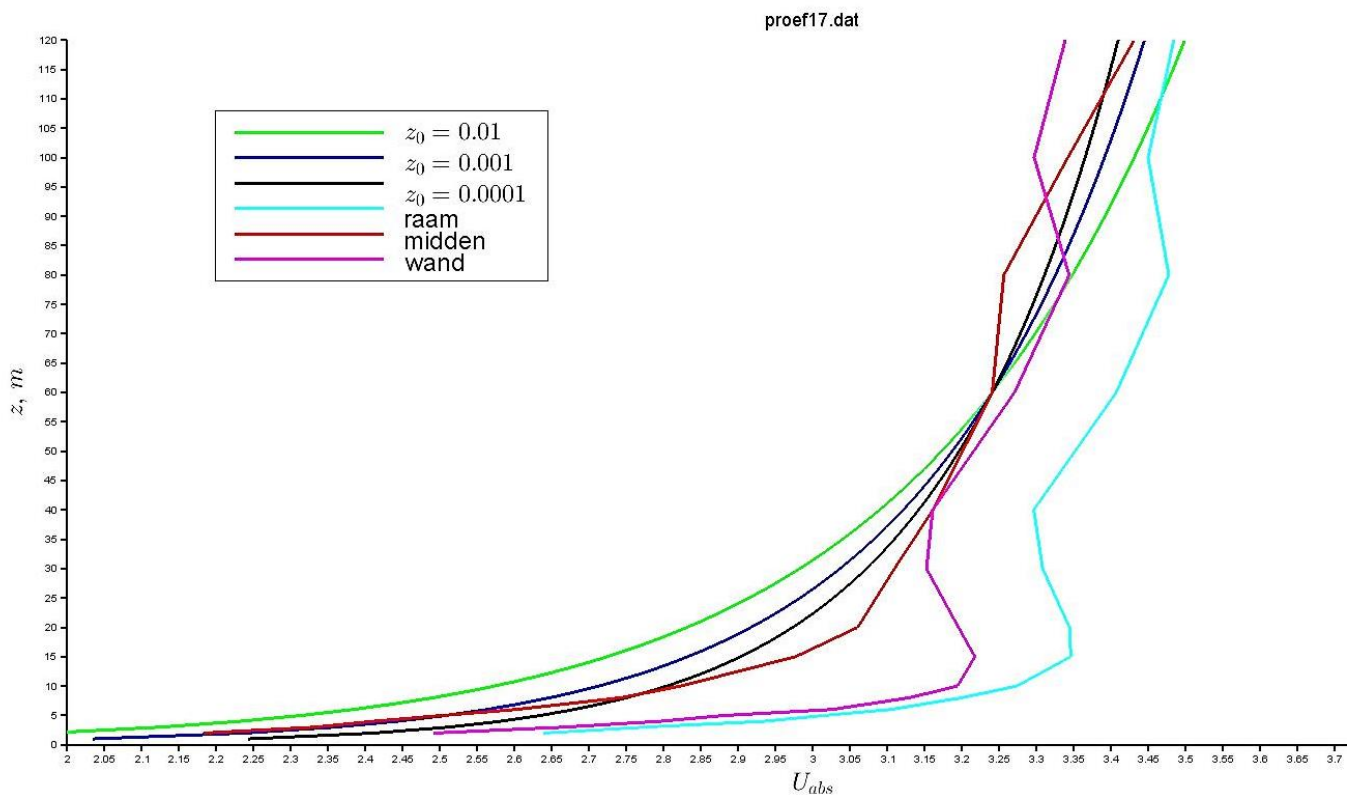
Meting 16 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Wat opvalt is dat de kant van het luik geen snellere windsnelheden weergeeft in proef 12 (bij een lege tunnel) en wel in deze en de komende proeven. Voorheen werd verwacht dat dit toe te schrijven was aan de ongelijke drukopbouw door de lage windsnelheid en lage maat van turbulentie, maar in dat geval zou deze hogere windsnelheid aan het luik ook zichtbaar moeten zijn in proef 12. Tijdens de voormeting in proef 11 werd duidelijk dat het verschil in snelheid tussen de probe die in het laterale midden is opgesteld en de probe die aan de kant van het luik staat opgesteld minimaal is (0,34%). Daarenboven zijn tussen proef 21 en proef 22 de probes met opzet zijn omgewisseld, en toch is er nog steeds een grotere snelheid aan de kant van het luik. Een mogelijke verklaring is de aanwezigheid van het trimboard of spires in het voorland.

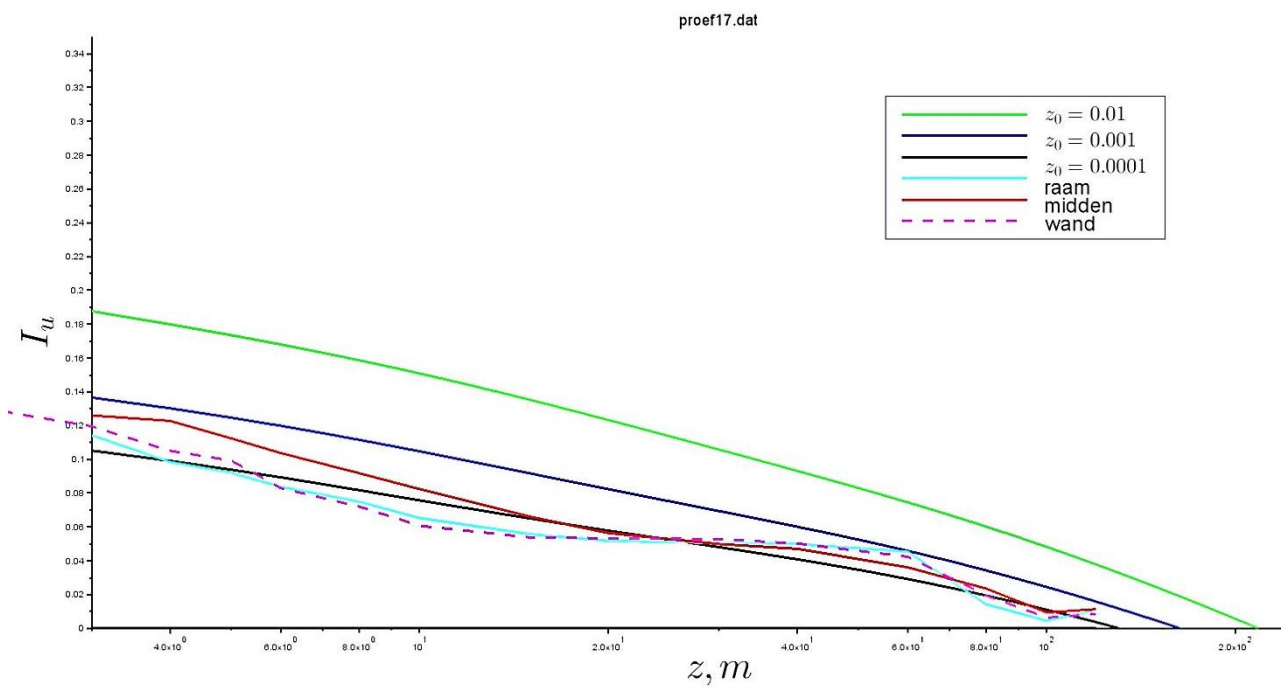
Vergelijking proef 16 vs proef 15	Proef 16: 5 spires , trimboard 18 cm, tapijt 'HZS onderkant'	Proef 15: geen spires , trimboard 18cm, tapijt 'HZS onderkant'
1 verandering:	Van geen spires naar 5 spires	
Snelheidsprofiel	Zonder spires is er een betere symmetrie in de tunnel. Het snelheidsprofiel heeft een zeer goede vorm zonder spires.	
Turbulentieprofiel	De spires zorgen voor een daling van de turbulentie over de hele hoogte, maar vooral in de onderste 20 cm waar de turbulentie daalt met zo'n 4%.	

Proef 17	De invloed van 5 spires in het voorland			31 jan 2013
Opbouw:	Aantal spires	Hoogte trimboard	Tapijt	
Verticale meting	5	geen	HZS onderkant boven	
Motivatie	Gezien het opmerkelijk resultaat in het turbulentieprofiel van proef 16 wordt er in proef 17 gekeken hoeveel invloed enkel 5 spires en het tapijt ‘HZS ruwe kant naar boven’ hebben in de tunnel. Er wordt geen trimboard geplaatst. Proef 17 is een verticale meting. Voor deze meting zou een laterale meting ook interessant zijn geweest. De afstand tussen de wand en de spires bedraagt 17 cm, de afstand tussen de spires onderling 66,5 cm.			
Snelheidsprofiel	We zijn benieuwd welke invloed de spires en het tapijt hebben op het snelheidsprofiel. Van het resultaat wordt niet verwacht dat het de standaardcurve zal evenaren, maar om het voorland te verbeteren is het nuttig te weten wat de invloed is van enkel de spires en het tapijt.			
Turbulentieprofiel	We zijn benieuwd welke invloed de spires en het tapijt hebben op het turbulentieprofiel.			
				
<i>Fig. 41. Proefopstelling proef 17 [eigen foto]</i>				
Resultaat	<i>Zie meting 17 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]</i>			
Snelheidsprofiel	Vooral in de onderste 40 cm gaat de windstroom te snel. De hoogste snelheid komt voor op een hoogte van ongeveer 15 cm. In de regio van 15 cm tot 40 cm hoogte vermindert de snelheid dan weer met de hoogte. Op het eerste zicht lijken de spires niet veel wind tegen te			

	houden of voor niet veel ruwheid te zorgen in de onderste 15 cm. De spires lijken te zorgen voor asymmetrie in de tunnel. Een denkbare verklaring voor het feit dat de windsnelheid in het midden van de windtunnel lager lijkt dan de windsnelheid aan de zijkanten, is het gegeven dat de probe in het midden in lijn ligt met de middelste spire. De twee buitenste probes staan niet in lijn met de buitenste spires. Een tweede, meer aannemelijke verklaring is het feit dat het laterale snelheidsprofiel van proef 12 ook al aantoont dat de windsnelheid in het midden van de windtunnel iets trager is, en de zijkanten iets sneller. De middelste probe zal zich in het 'dal' bevinden, de buitenste probes in de buitenste snellere zones.	
Turbulentieprofiel	De spires verlagen de turbulentie over de gehele hoogte, wat ook het resultaat was in proef 16. In de regio van 5 cm tot 20 cm is de turbulentie té laag. Voor een schaal 1/100 is de turbulentie laag, zó laag dat het te vergelijken is met de standaardcurve voor een situatie op zee met een ruwheidsfactor $z_0 = 0,0001m$, wat een uiterst vlakke zee voorstelt. Deze situatie komt op open zee slechts zeer zelden voor.	
Vergelijking proef 17 vs proef 16:	Proef 17: 5 spires, geen trimboard , tapijt 'HZS onderkant'	Proef 16: 5 spires, trimboard 18cm , tapijt 'HZS onderkant'
1 verandering:	Van een trimboard van 18 cm naar geen trimboard	
Snelheidsprofiel	Het trimboard in proef 16 houdt duidelijk de windstroom tegen in de onderste 30 cm, waar de windsnelheid aanzienlijk trager is mét trimboard. De snelheden boven 60 cm zijn groter in proef 16 met een trimboard. Zonder trimboard is er een uitzonderlijke hoge snelheid op een hoogte van 15 cm, boven deze hoogte zal de snelheid eerst kleiner worden voor ze terug begint te stijgen.	
Turbulentieprofiel	Zonder trimboard is de turbulentie lager dan met een trimboard. In proef 16 is de turbulentie zeer goed tussen 0 en 20 cm dankzij de aanwezigheid van het trimboard.	

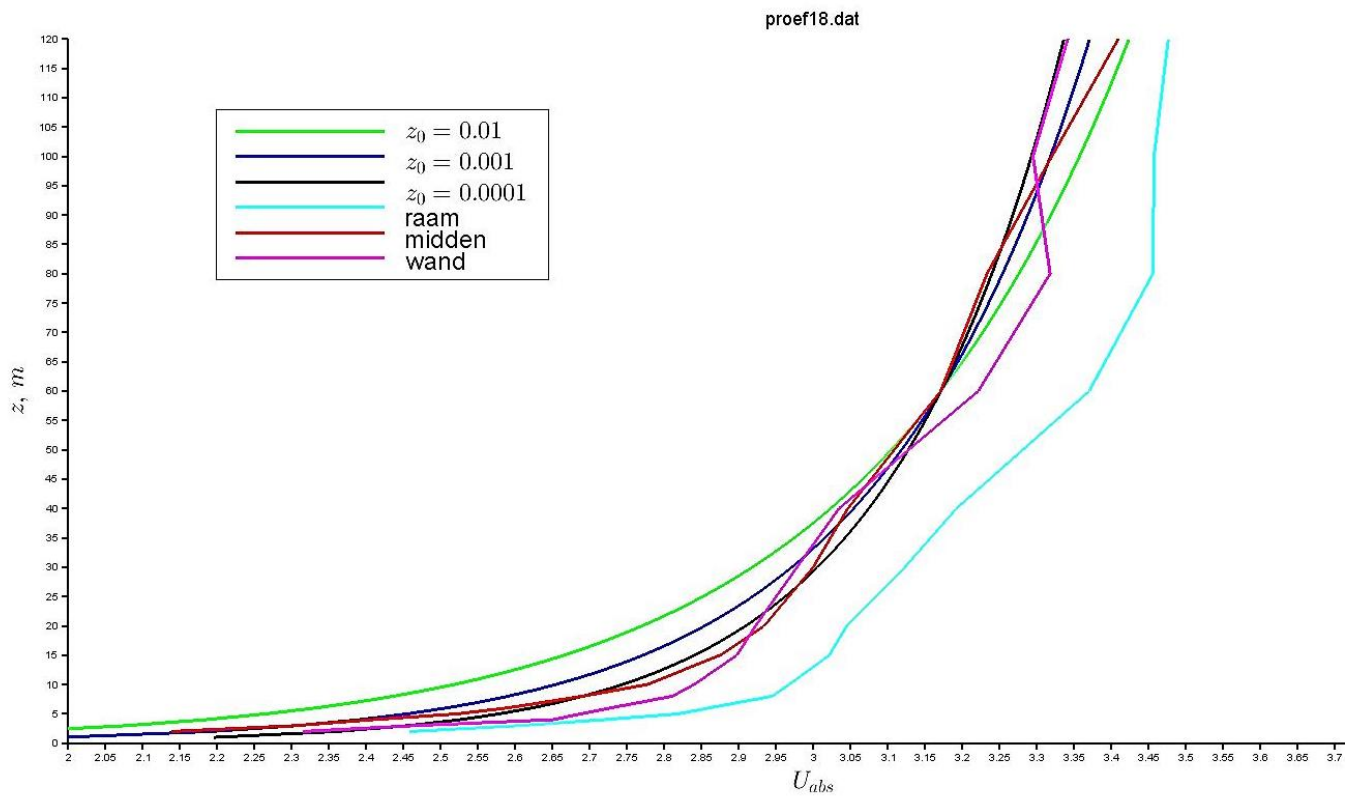


Meting 17 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]

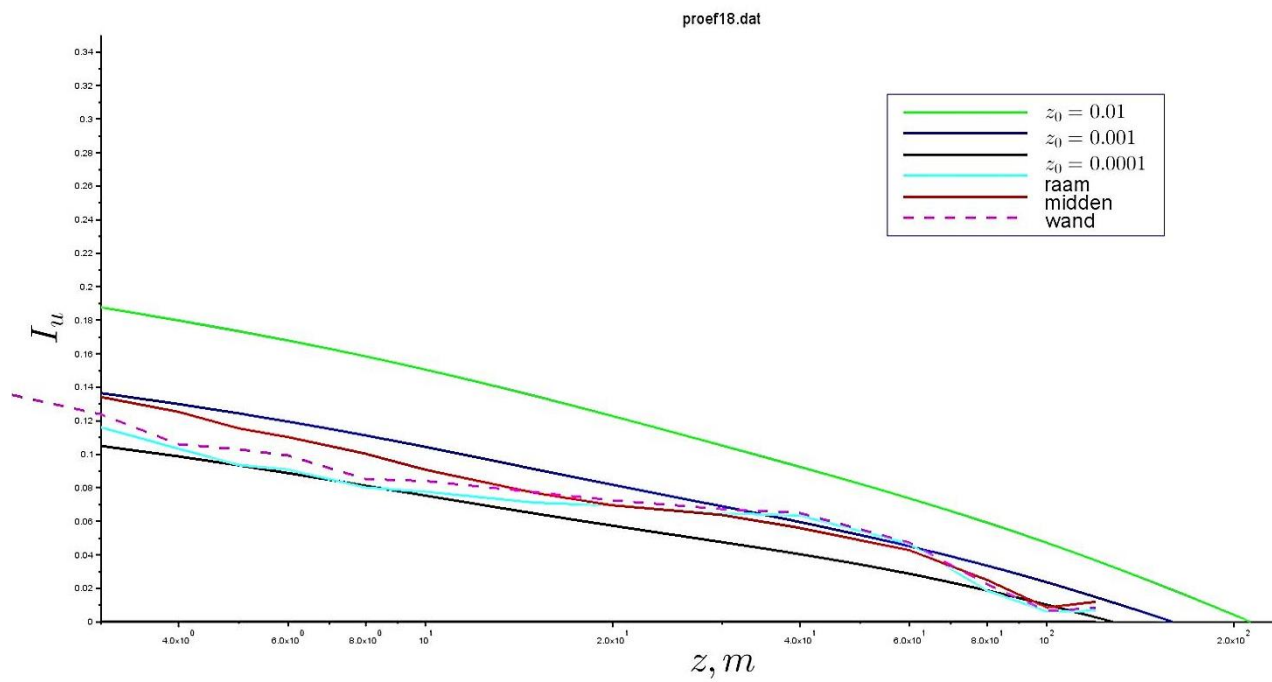


Meting 17 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Proef 18	Verlagen van het trimboard naar 10 cm			31 jan 2013
Opbouw:	Aantal spires	Hoogte trimboard	Tapijt	
Verticale meting	5	10cm	HZS onderkant boven	
Motivatie	Het trimboard wordt verder verlaagd tot een hoogte van 10 cm. Gebaseerd op het verkregen turbulentieprofiel van proef 6 zien we dat de turbulentie in de regio van 20 cm t.e.m. 60 cm bij een lager trimboard een betere dalingsgraad heeft. Toch is het trimboard nog voldoende hoog om de snelheid in de onderste meters van het snelheidsprofiel te dempen.			
				
<i>Fig. 42. Proefopstelling proef 18 [eigen foto]</i>				
Resultaat	<i>Zie meting 18 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]</i>			
Snelheidsprofiel	Voor de onderste regio tot 15 cm, wordt de snelheid minder gedempt door het lagere trimboard van 10 cm dan bij het trimboard van 18 cm en hierdoor kan de lucht sneller bewegen in die regio. Het perfecte snelheidsprofiel lijkt nu een combinatie te zijn van proef 16 (met een trimboard van 18 cm) voor de onderste 15 cm, en van proef 18 (met een trimboard van 10 cm) voor de hoogten boven 30 cm. Toch blijft de snelheid aan de kant van het luik te hoog.			
Turbulentieprofiel	Het turbulentieprofiel is zeer goed. De probleemzone van 20 cm tot 60 cm waar de turbulentie met een trimboard van 18 cm te weinig daalde naarmate de hoogte is nu gematigder.			



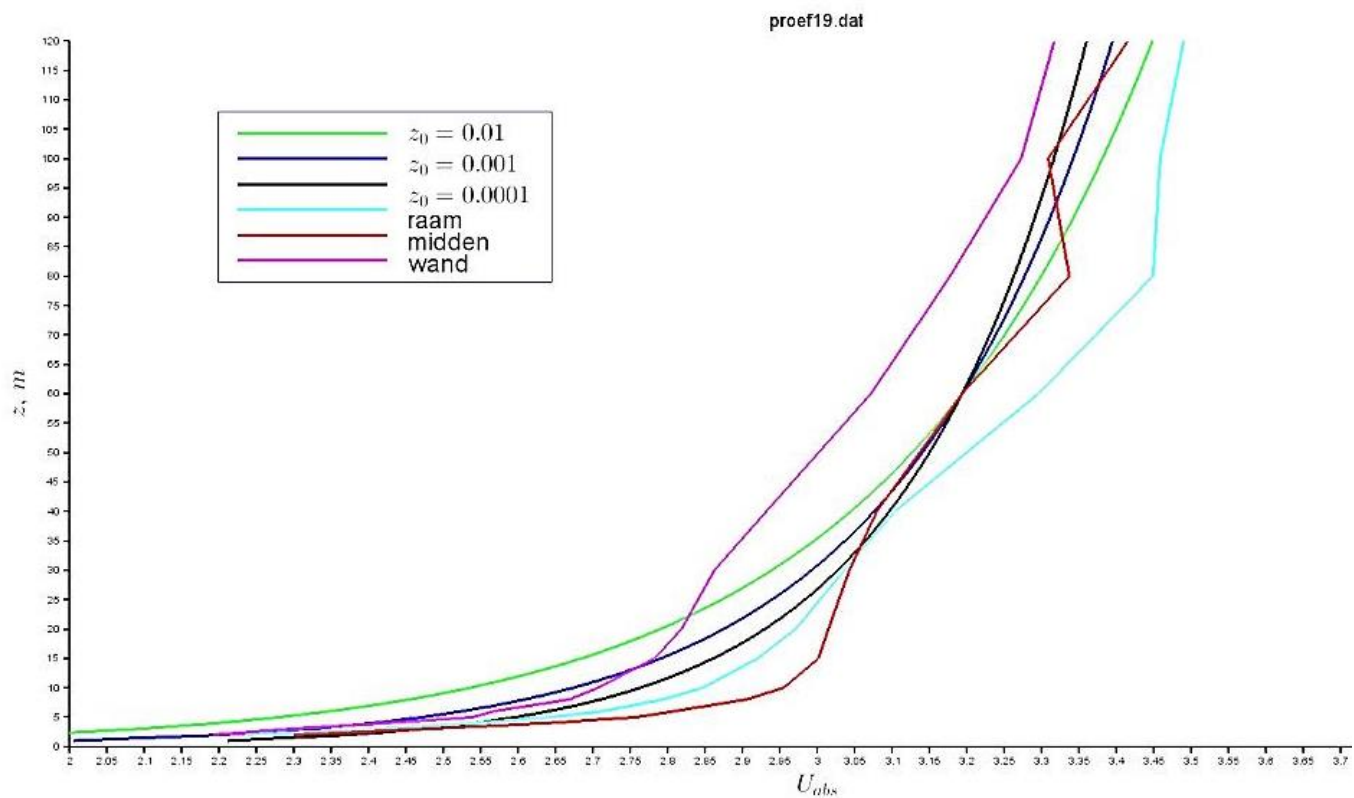
Meting 18 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



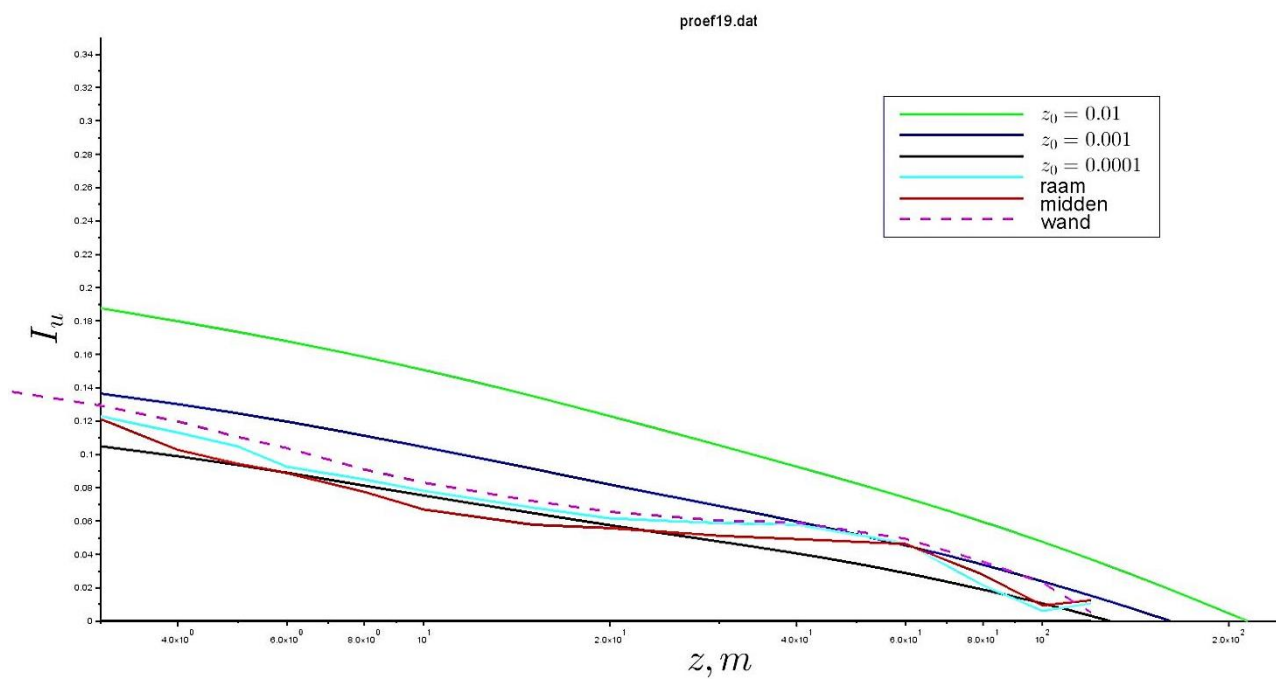
Meting 18 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Proef 19	Invloed van een 6 ^e spire			31 jan 2013
Opbouw:	Aantal spires	Hoogte trimboard	Tapijt	
Verticale meting	6	10cm	HZS onderkant boven	
Motivatie	Door 6 spires te plaatsen in plaats van 5 is er hopelijk een betere verdeling van de invloed van de spires. De afstand tussen de spires onderling bedraagt 53 cm, de afstand tussen de spires en de wand bedraagt 17cm. We willen het verschil zien in snelheids-en turbulentieprofielen door het plaatsen van een extra spire. Het zou interessant zijn geweest om deze proef ook lateraal te meten.			
 <i>Fig.43. Proefopstelling proef 19 [eigen foto]</i>				
Resultaat	<i>Zie meting 19 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]</i> Door het aantal spires te verhogen wordt de invloed van de spires vergroot. Hoewel het snelheidsprofiel er over het algemeen slechter uitziet dan bij proef 18, houden we er rekening mee dat er bij proef 19 niet lateraal is gemeten. Wellicht zou de snelheid lateraal constanter zijn geweest met 6 spires dan met 5.			

Snelheidsprofiel	Het snelheidsprofiel is asymmetrischer. De snelheid in de onderste 20 cm is hoger bij deze proefopstelling met 6 spires dan met 5 spires en de windsnelheidsgradiënt is in deze regio te groot. Zowel het ontstaan van de asymmetrie als de té hoge windsnelheid in de onderste meters zijn het gevolg van de spires, zoals ook in proef 17 duidelijk werd.
Turbulentieprofiel	De turbulentie is gedaald over de hoogte van 5 tot 60 cm en is in deze regio te laag om parallel te liggen met de referentiecurven.



Meting 19 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



Meting 19 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Proef 20	Afstand tussen de spires onderling			01 feb 2013
Opbouw:	Aantal spires	Hoogte trimboard	Tapijt	
Verticale meting	5	10cm	HZS onderkant naar boven	
Motivatie	De 5 spires zijn geplaatst met een onderlinge afstand van 60 cm en een afstand tot de wand van 30 cm. Er wordt gestreeft naar een afstand tot de wand die de helft is van de onderlinge afstand van de spires. In de vorige proeven (uitgezonderd proef 13) was de afstand tot de wand telkens slechts 17 cm. Hierdoor kan een versnelling optreden. Deze opstelling werd niet lateraal gemeten.			
Snelheidsprofiel	Er wordt gehoopt op een meer symmetrisch resultaat. De oorzaak van de terugkerende te hoge snelheid aan de kant van het luik is mogelijk de oorzaak van de lucht die versneld werd door de te korte afstand tussen de spires en de wand die in vorige proeven (uitgezonderd proef 13) slechts 17 cm bedroeg.			

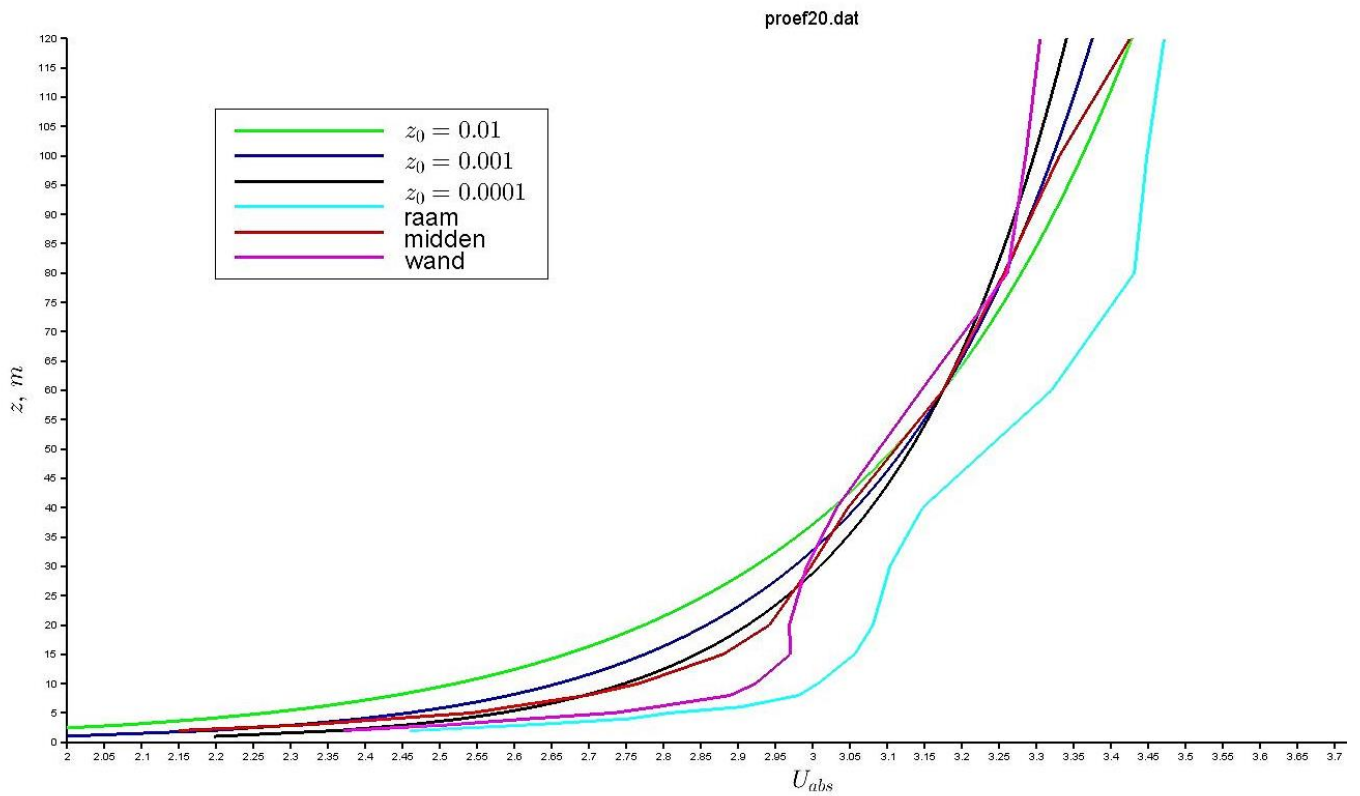


Fig. 44. Proefopstelling proef 20 [eigen foto]

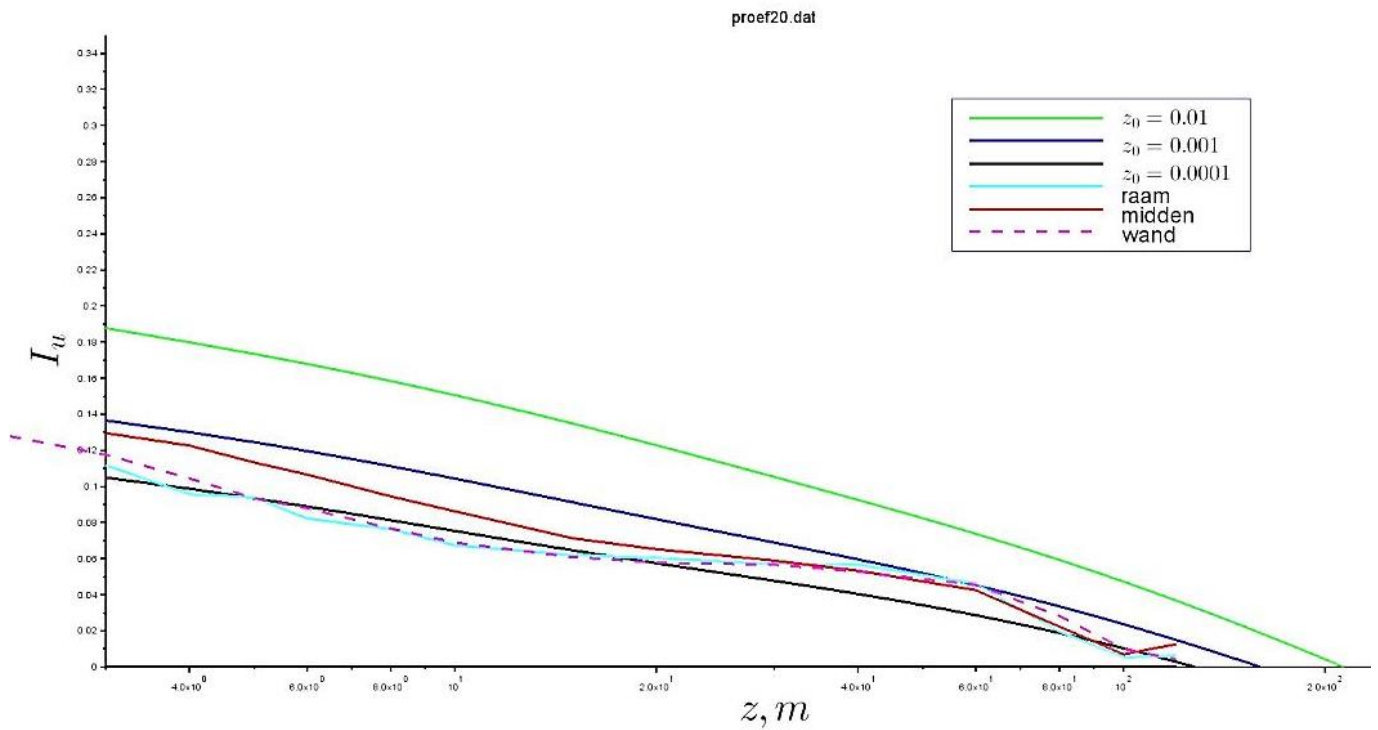
Resultaat	Zie meting 20 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]
-----------	--

	De invloed van de spires lijkt te vergroten bij deze opstelling. Dezelfde resultaten die de spires gaven in proef 17 komen welliswaar afgezwakt terug in deze proef 20. De snelheid stijgt in de onderste 15 cm en de turbulentie daalt over de hele hoogte.
Snelheidsprofiel	De snelheidsgradiënt is nog steeds te groot in de onderste 15 cm. Boven de hoogte van 25 cm heeft het snelheidsprofiel een goede vorm. De snelheid aan de kant van het luik is nog wel te hoog.
Turbulentieprofiel	De turbulentie in de regio van 5 tot 30 cm is aan de lage kant.

Vergelijking proef 20 vs proef 18	Proef 20: 5 spires (30/60cm) , trimboard 10 cm, tapijt 'HZS onderkant'	Proef 18: 5 spires (17/66,5cm) , trimboard 10 cm, tapijt 'HZS onderkant'
1 verandering:	De onderlinge afstand tussen de spires is veranderd alsook de afstand tussen de spires en de muur.	
Snelheidsprofiel	Bij de opstelling van proef 20 met afstanden 30/60cm is de asymmetrie toegenomen in de onderste 20 cm. Er is een duidelijk effect van de grotere afstand tussen de spires en de wand, waardoor de snelheid aan de kant van het raam en de wand opvallend groter is dan de snelheid in het midden in de onderste 25 cm. Boven de hoogte van 30 cm is er slechts een gering verschil in snelheid.	
Turbulentieprofiel	Bij de opstelling van proef 20 met afstanden 30/60cm is de turbulentie licht gedaald over de hele hoogte (1 tot 3%). De daling van de turbulentie is het grootst in de onderste 15 cm.	



Meting 20 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]

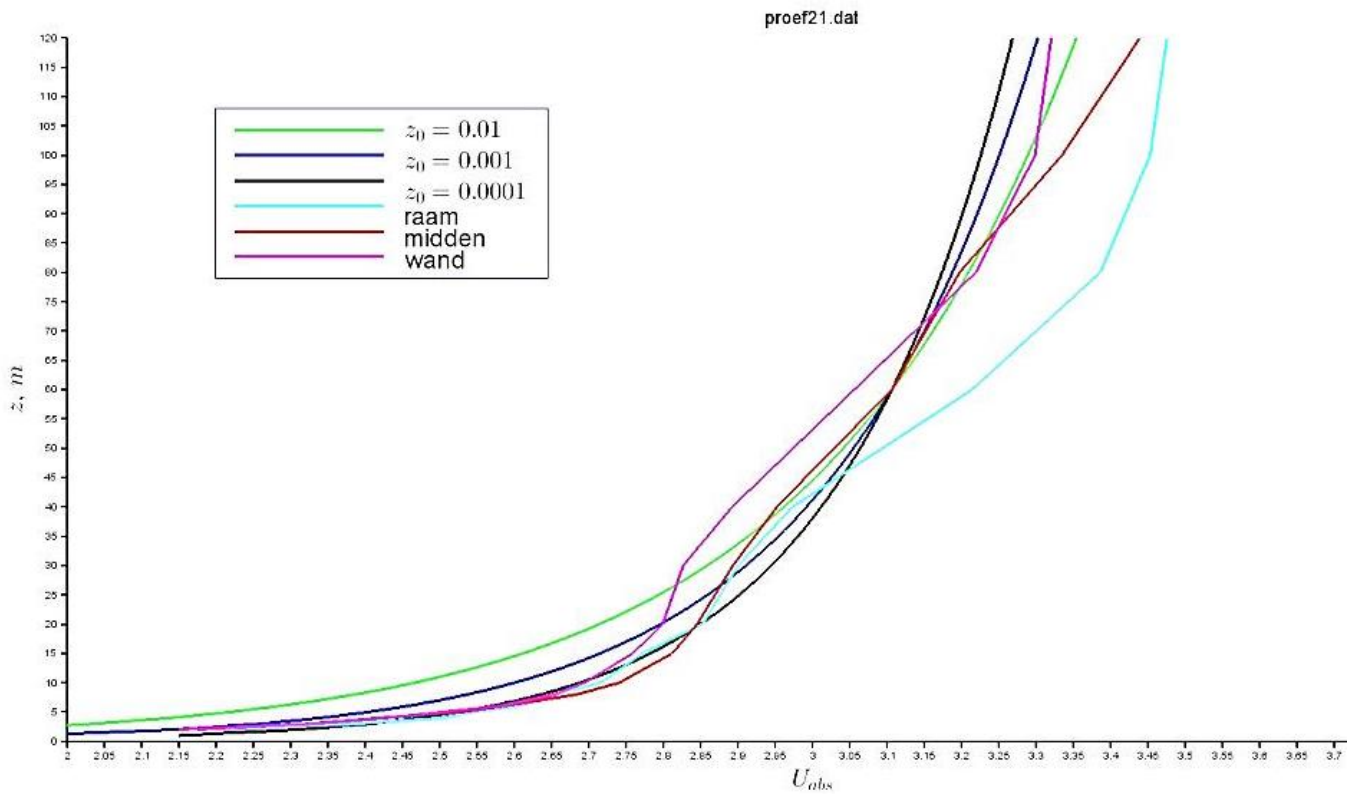


Meting 20 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

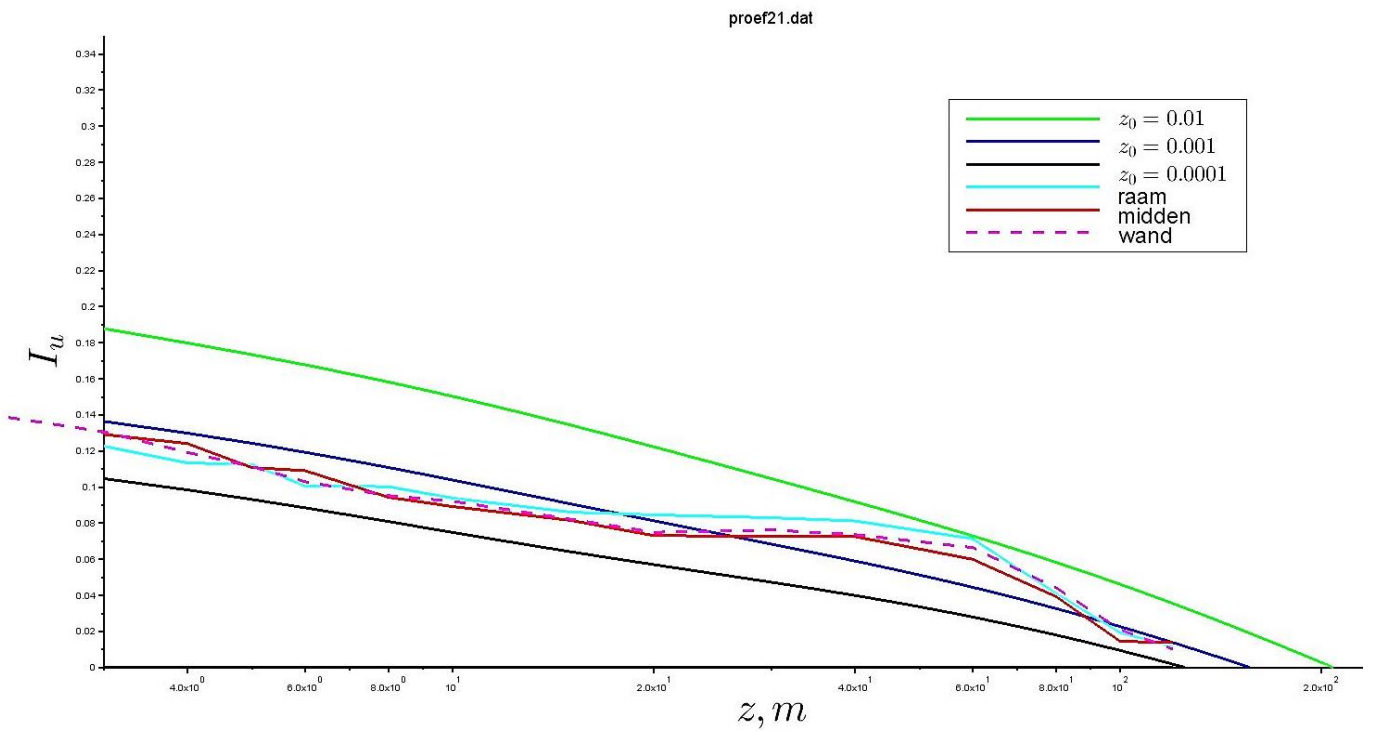
Proef 21	Terug hoger trimboard, minder effect van de spires?			01 feb 2013
Opbouw:	Aantal spires	Trimboard	Tapijt	
Verticale meting	5	18cm	HZS onderkant naar boven	
Motivatie	De aanwezigheid van een (hoger) trimboard lijkt de invloed van de spires te dempen.			
Snelheidsprofiel	In het snelheidsprofiel willen we de snelheid laten dalen in de onderste 40 cm, want de verhoogde snelheid was in deze regio niet aanwezig met een trimboard van 18 cm, maar wel met een trimboard van 10 cm. In de vergelijking tussen proeven 16 en 17 blijkt dat de aanwezigheid van een hoger trimboard zorgt voor een vertraging tot een hoogte van 60 cm. Daarom wordt voor deze proef 21 terug gekozen voor het trimboard van 18 cm. De snelheidsgradiënt in de onderste 20 cm zou ook kleiner moeten worden.			
Turbulentieprofiel	Ook de turbulentie zou iets moeten stijgen over de gehele hoogte. Dit is gebaseerd op de vergelijking van de proeven 16 en 17, waarbij de turbulentie steeg bij een hoger trimboard.			
 <i>Fig. 45. Proefopstelling proef 21 [eigen foto]</i>				
Resultaat	Zie meting 21 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek]			
Snelheidsprofiel	De asymmetrie is minder geworden in de onderste 40 cm. Ook is de snelheid gedaald in deze onderste meters, wat positief is. Nochtans is de snelheidsgradiënt op een hoogte van 10 tot 50 cm iets te klein, waardoor de snelheid te weinig stijgt met de hoogte. Vanaf een hoogte van 50 cm is er aan de kant van het luik te hoge windsnelheid.			

Turbulentieprofiel	De turbulentie is gestegen over de ganse hoogte. In de onderste 20 cm heeft de turbulentie een zeer vorm en dalingsfactor. Op een hoogte van 20 tot 60 cm daalt de turbulentie amper, wat een te hoge turbulentie veroorzaakt in deze regio.
--------------------	--

Vergelijking proef 21 vs proef 20	Proef 21: 5 spires, trimboard 18cm , tapijt 'HZS onderkant'	Proef 20: 5 spires, trimboard 10cm , tapijt 'HZS onderkant'
1 verandering:	Trimboard wordt 8 cm lager in proef 21	
Snelheidsprofiel	Bij proef 20 veroorzaakt het lage trimboard een te hoge snelheid en asymmetrie op een hoogte van 15 cm. Bij een hoger trimboard zal de snelheid vertragen tot een hoogte van 60 cm. Dit was ook het resultaat tussen proeven 16 en 17, waarin een trimboard van 18 cm hoogte wordt vergeleken met geen trimboard.	
Turbulentieprofiel	Door de verhoging van het trimboard met 8 cm stijgt de turbulentie over de gehele hoogte met zo'n 2 tot 3%.	



Meting 21 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



Meting 21 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Proef 22	Resultaat marien voorland met ruwer tapijt		01 feb 2013
Opbouw:	Aantal spires	Trimboard	Tapijt
Verticale meting	5	10cm	HZS <u>bovenkant</u> naar boven
Motivatie	Een tapijt met een iets langere en hogere vezel zal voor iets meer weerstand zorgen, waardoor de wrijving in de onderste meters zal stijgen. Hierdoor zal de snelheidsgradiënt in de onderste meters dalen en de turbulentie stijgen. Daarenboven kan het trimboard terug verlaagd worden, aangezien een verlaging van het trimboard van 18 cm naar 10 cm betekent dat de symmetrie zal verbeteren in het snelheidsprofiel en dat de turbulentie zal dalen.		
Snelheidsprofiel	In de proefopstellingen met het tapijt 'HZS onderkant naar boven' is de snelheidsgradiënt van het snelheidsprofiel in de onderste 10 cm te groot; de snelheid stijgt te hard met de hoogte. Daarom wordt het tapijt nu omgedraaid en in deze proef 22 ligt het met de bovenkant naar boven.		
Turbulentieprofiel	De turbulentie kan ook een beetje stijgen in de onderste 10 cm door de zachtere mat, maar zal ook dalen doordat het trimboard lager wordt.		



Fig. 46. Proefopstelling proef 22 [eigen foto]

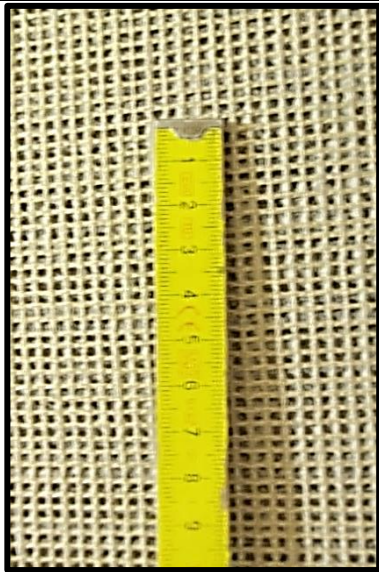


Fig. 47. (links) Tapijt 'HZZ onderkant naar boven' [eigen foto]

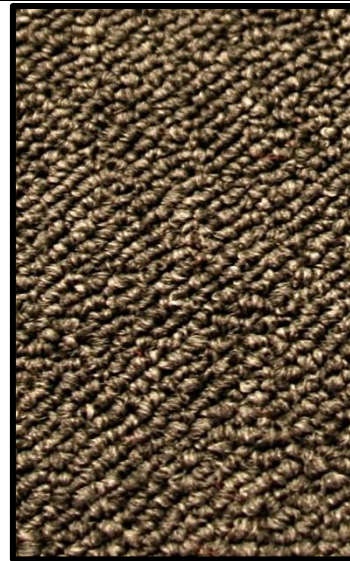
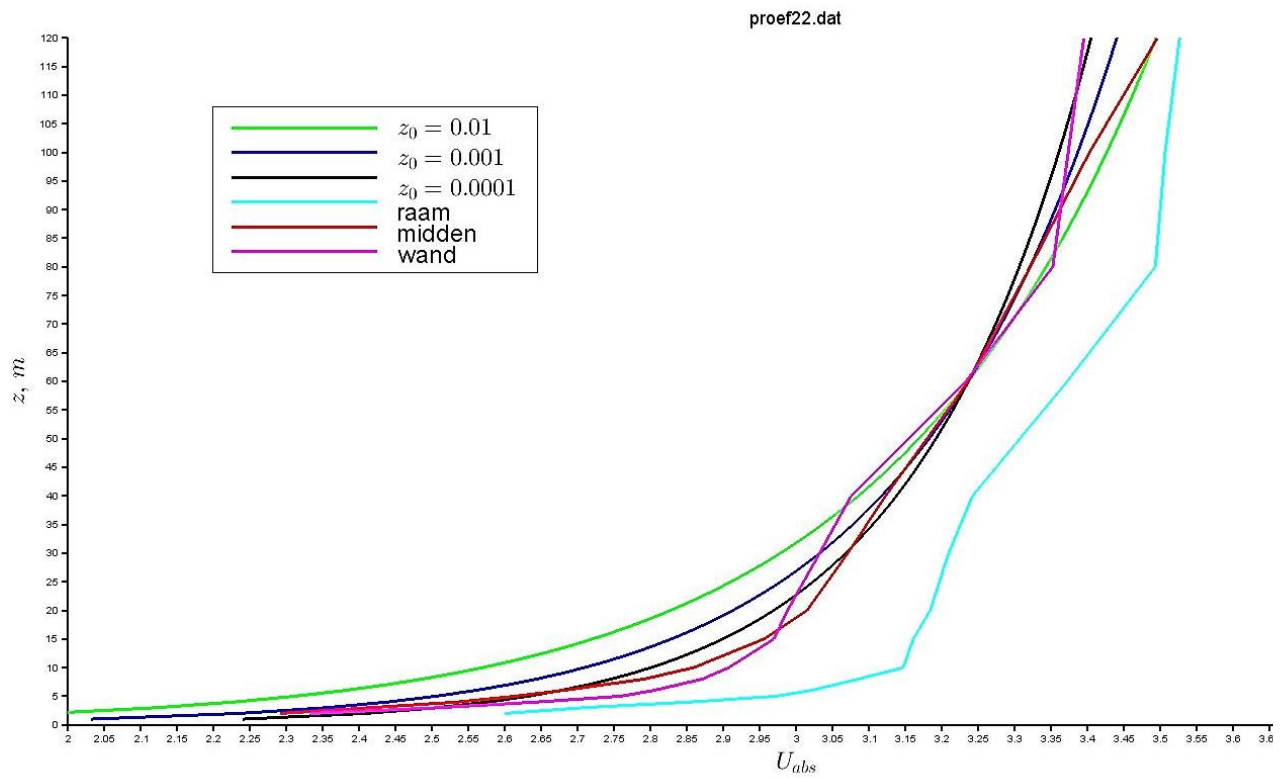


Fig. 48. (rechts) Tapijt 'HZZ bovenkant naar boven' [eigen foto]

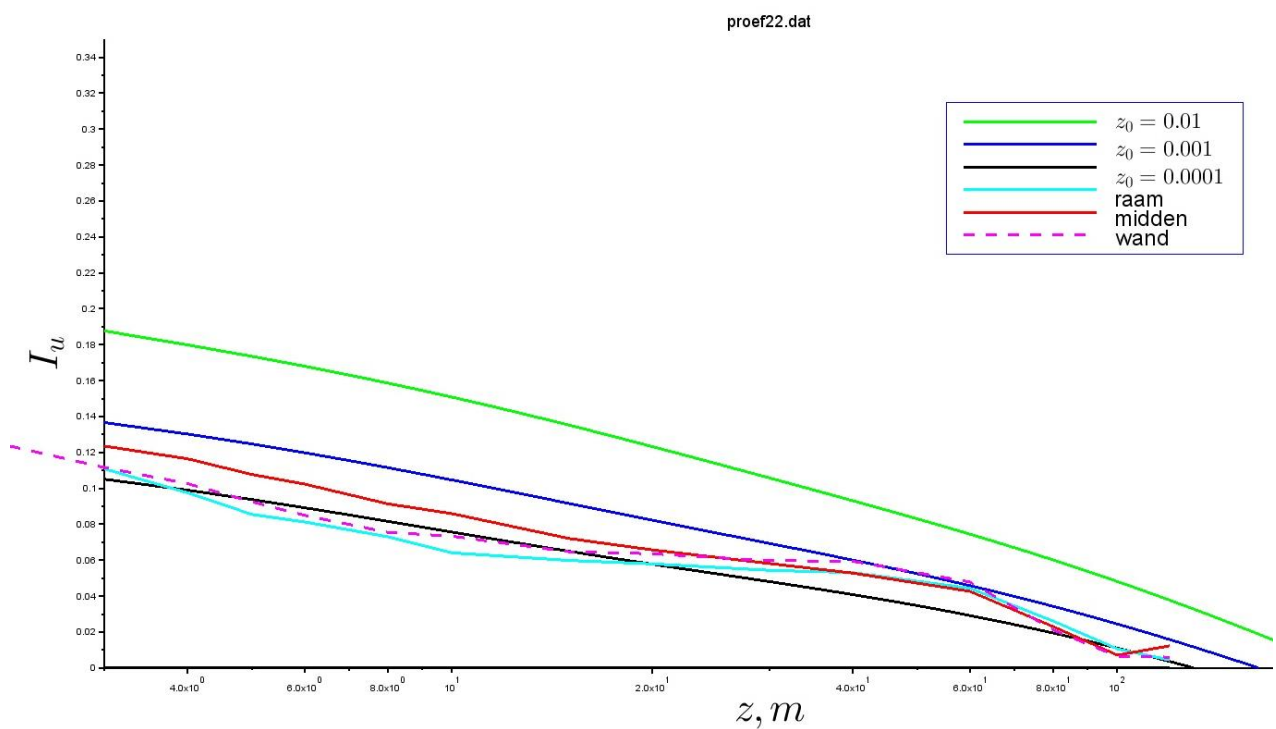
Resultaat	Zie meting 22 – Snelheidsprofiel en turbulentieprofiel [eigen grafiek] Uit het snelheidsprofiel blijkt dat de windstroom zich toch sneller zal bewegen over het tapijt 'HZZ bovenkant naar boven', waaruit kan worden besloten dat dit tapijt de wind toch niet méér tegenhoudt dan tapijt 'HZZ onderkant naar boven'.
Snelheidsprofiel	Aan de kant van het luik is de snelheid gemiddeld meer dan 0,1 m/s sneller dan de snelheid in het midden of aan de wand. De snelheidsprofielen in het midden en aan de kant van de wand lopen vrij gelijk en voor hoogtes boven 30 cm is hun vorm zeer goed. Onder de hoogte van 30 cm is de snelheid gemeten in het midden iets te hoog, maximum zo'n 0,12m/s te snel voor een referentieprofiel (blauw) met $z_0 = 0,001$ m en schaal 1/100.
Turbulentieprofiel	Het turbulentieprofiel is gematigder in het midden van de tunnel en de vorm die het daar heeft is zeer goed. Het loopt parallel aan de referentiekrommen. Bij een schaal van 1/100 is valt de turbulentiekromme van het midden binnen de referentiekrommen met $z_0=0,001$m en $z_0=0,0001$m. Dit komt overeen met de turbulentie boven een zeer kalme zee. De turbulentie aan het raam en aan de wand is in de onderste 20 cm aan de lagere kant, maar nog steeds

	parallel aan de referentiekromme. Op een hoogte van 20 tot 60 cm daalt de turbulentie aan de kant van het raam en van de wand iets minder met de hoogte dan de referentiekrommen.
--	---

Vergelijking proef 22 vs proef 20:	Proef 22: 5 spires, trimboard 10 cm, tapijt 'HYS bovenkant'	Proef 20: 5 spires, trimboard 10 cm, tapijt 'HYS onderkant'
1 verandering:	Tapijt 'HYS onderkant' werd vervangen door tapijt 'HYS bovenkant'.	
Snelheidsprofiel	Tot een hoogte van 25 cm is er verandering zichtbaar in het snelheidsprofiel. De snelheden die gemeten werden aan de kant van het raam en het midden liggen dicht bij elkaar in proef 22. De snelheidsgradiënt in de onderste 10 cm is vergroot in het midden ten opzichte van proef 20 en in de onderste 40 cm is de snelheid en asymmetrie aan de kant van het raam nog toegenomen. Het was eerder onverwacht dat de snelheidsgradiënt in de onderste 10 cm steeg, aangezien het tapijt 'HYS bovenkant' geplaatst werd met het oog op een vertraging van de snelheid in deze regio.	
Turbulentieprofiel	In proef 22 is de turbulentie slechts in de onderste 7 cm gering gedaald (-1%) ten opzichte van proef 20.	

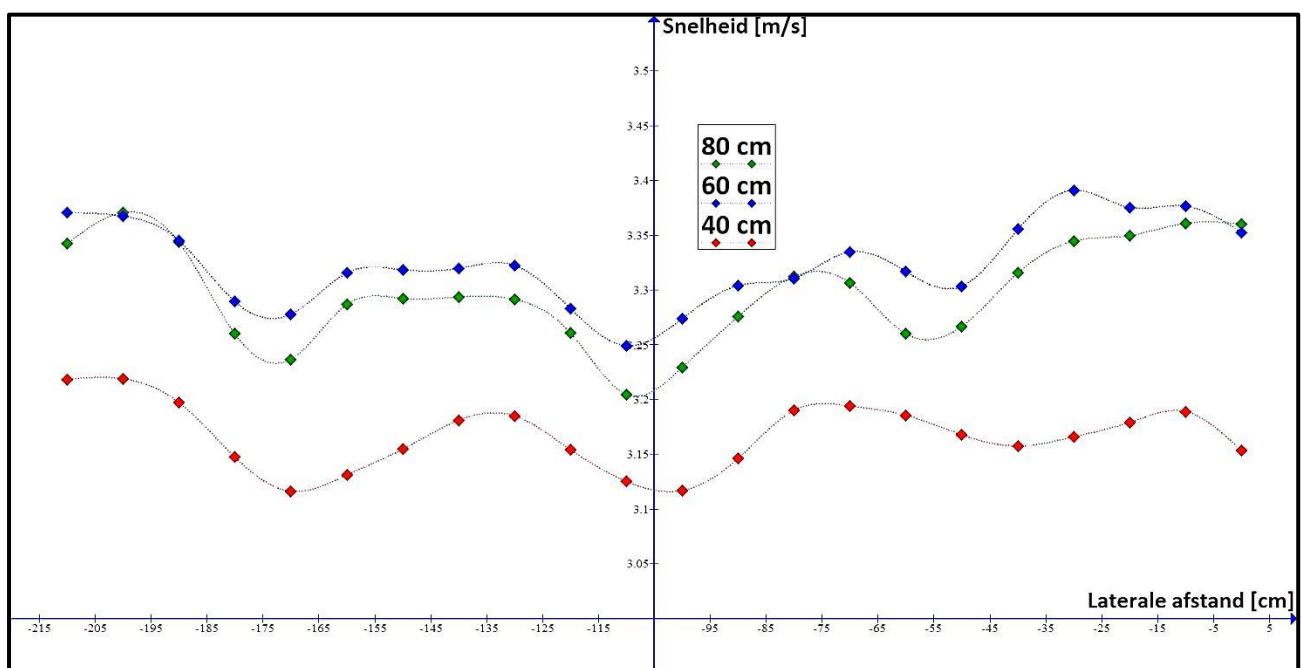


Meting 22 – Snelheidsprofiel [eigen grafiek]



Meting 22 – Turbulentieprofiel [eigen grafiek]

Proef 23	Lateraal resultaat van het marien voorland		01 feb 2013
Opbouw:	Aantal spires	Trimboard	Tapijt
Laterale meting	5	10cm	HZS bovenkant naar boven
Motivatie	Er wordt lateraal gemeten op 3 hoogten (40, 60 en 80 cm) om de laterale fluctuaties te bekijken. Deze fluctuaties kunnen het gevolg zijn van ongelijke drukopbouw voor het voorland, de opstelling van elementen in het voorland of van een te grote of te kleine afstand tussen de spires onderling of ten opzichte van de wand. Lateraal wordt er gemeten over een afstand van 210 cm met een interval van 10 cm.		
Zie meting 23 – Snelheidsprofiel lateraal [eigen grafiek]			
Resultaat	Allereerst vallen 3 plaatsen met snelheidsvertragingen op in de breedte. Deze komen voor in het midden, op zo'n 70 cm van het midden in de richting van het luik en op zo'n 60 cm van het midden in de richting van de wand. Verder zijn de vertragingen aan de kant van het luik extremer dan aan de kant van de wand. Het is opmerkelijk dat de snelheid op een hoogte van 60 cm groter is dan de snelheid op een hoogte van 80 cm.		



Meting 23 – Snelheidsprofiel lateraal [eigen grafiek]

3.4. BESLUIT VAN DE PROEVEN M.B.T. DE ONDERDELEN VAN HET VOORLAND

3.4.1. Invloed van het trimboard

Op het snelheidsprofiel:

Een hoger trimboard zorgt voor een daling van de windsnelheid tot op een hoogte van 60 cm. Een te hoog trimboard belemmert dan weer de vorm van het snelheidsprofiel maar met een te laag trimboard daarentegen is er een uitzonderlijk hoge snelheid op een hoogte van 15 cm.

Op het turbulentieprofiel:

Een hoger trimboard zorgt voor een stijging van de turbulentie over de gehele hoogte. Een te hoog trimboard veroorzaakt een minder sterke daling van de turbulentie voor hoogtes tussen 20 cm en 60 cm.

3.4.2. Invloed van het tapijt

Op het snelheidsprofiel:

De veranderingen zijn in verhouding met het verschil in tapijt. Hoe lager en ruwer het tapijt, hoe groter de snelheidsgradiënt zal zijn in de onderste meters. Het snelheidsprofiel zal het meest beïnvloed worden op kleinere hoogtes tot 25 cm.

Op het turbulentieprofiel:

De turbulentie zal ook slechts veranderen tot deze hoogte van 25 cm. Bij een lager tapijt zal de turbulentie dalen.

3.4.3. Invloed van de spires

Één spire:

Één spire heeft effect op het snelheidsprofiel tot een afstand van 20 cm links en rechts van zijn loodlijn, waar de snelheid lager is dan de omliggende regio. Buiten deze tragere zone zal de snelheid hoger zijn.

De turbulentie is tot vijf keer zo hoog bij de aanwezigheid van slechts één spire. De spire beïnvloedt de turbulentie tot een afstand van ongeveer 50 cm links en rechts van de spire.

Invloed van spires:

Op het snelheidsprofiel lijken de spires asymmetrie te bevorderen. De spires moeten minstens in combinatie met het trimboard worden opgesteld. Zonder het trimboard zullen de windsnelheden te hoog oplopen in de onderste 40 cm.

Met de aanwezigheid van spires daalt de turbulentie over de hele hoogte, maar vooral in de onderste 20 cm.

Invloed van de verdeling van de spires:

Door een grotere ruimte te laten tussen de muur en de spires zal de snelheid groter worden aan de kant van de wand en het luik dan in het laterale midden in de onderste 25 cm.

Deze grotere ruimte tussen spires en muur en een kleinere tussenafstand tussen de spires onderling levert voor het turbulentieprofiel een daling in turbulentie op.

BESLUIT

Door de grenslaag te beschrijven en in te delen in verschillende parameters wordt het duidelijker naar welke resultaten men moet streven. Onder andere het snelheidsprofiel en het turbulentieprofiel zijn belangrijk bij het uitvoeren van profielmetingen. De studie naar de eigenschappen van wind en van de windstroom is echter veel uitgebreider dan in het eerste hoofdstuk staat beschreven.

Eens men metingen uitvoert is het belangrijk om te weten wat de werkingsprincipes en beperkingen zijn van de meetinstrumenten. Toen we begonnen met de metingen was onze kennis van de effecten van het trimboard, spires en tapijt in de tunnel nog beperkt. Na de metingen van hoofdstuk 3 hebben we algemene besluiten kunnen trekken wat betreft de invloeden van deze drie ruwheidselementen, zoals vermeld staan in paragraaf 3.4.

De laatste meting, proef 22 en 23, leverde ons de beste snelheids-en turbulentieprofielen op die binnen de beschikbare termijn van twee weken door ons konden worden uitgevoerd. Na dit onderzoeksproject heeft Peutz zelf nog enige veranderingen aangebracht om het resultaat van proef 22 nog te verbeteren. Nochtans is het resultaat van proeven 22 en 23 niet het enige resultaat dat telt. De zoektocht naar een goede opstelling was minstens zo belangrijk, o.a. om te ontdekken wat het effect was van het trimboard, de spires en van het tapijt.

Indien er in de toekomst nog profielmetingen worden uitgevoerd in het onderzoek naar een mariene grenslaag kan het interessant zijn om slechts het onderste deel van de grenslaag (part-depth) te simuleren en afgeknotte spires te gebruiken. Deze afgeknotte spires zullen de turbulentie nog verhogen. Verder zou het met het nieuwe traverseersysteem (een automatisch positioneersysteem voor de probes) minder tijdrovend moeten zijn om zowel verticale als laterale metingen uit te voeren.

Eenzijds is, door literatuurstudie maar vooral door onderzoek in de tunnel, mijn inzicht in de atmosferische grenslaag en de werking van een windtunnel uitgebreider geworden. Anderzijds is het opzet van dit onderzoeksproject geslaagd door het marien voorland te verbeteren. Wat me vooral verheugd is dat het nu ook mogelijk is om goede metingen met een marien voorland uit te voeren, wat in de toekomst wellicht zal leiden tot meer

onderzoek in de maritieme industrie, zoals o.a. de verspreiding van gassen aan boord.
Hopelijk leidt dit uiteindelijk tot veiligere schepen.

BIBLIOGRAFIE

Lijst van publicaties

N. Agrawal, V. K. Gupta, A. Gupta, A. Mittal, (2012); Comparison of codal values and experimental data pertaining to dynamic wind characteristics; Journal of wind and engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 33-53

M.E. De Bortoli, B. Natalini, M.J. Paluch, M.B. Natalini, (2002); Part-depth wind tunnel simulations of the atmospheric boundary layer; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.90, p.281-291

Det Norske Veritas, (2010); Recommended practice, DNV-RP-C205, Environmental conditions and environmental loads,

Det Norske Veritas, (2002); Guidelines for design of wind turbines

Dr. J. D. Holmes, (s.d.); Wind loading and structural response; Lecture 6; Atmospheric Boundary layers and turbulence.

[8] S.A.Hsu, (1993); Determining the Power-Law Wind Profile Exponent under near-neutral stability conditions at sea; Journal of applied meteorology, Vol.33, Issue 6, p757-772

Finn E. Jørgensen, (2002); How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a practical guide; Dantec Dynamics A/S, Publication no: 9040U6151

K. Khusnutdinova, (2009); Kolmogorov's 5/3 law

H. Kozmar, (2011a); Natural wind simulation in the TUM boundary layer wind tunnel; Theoretical and Applied Climatology, Vol. 106, no.1-2

H. Kozmar, (2011b); Truncated vortex generators for part-depth wind-tunnel simulations of the atmospheric boundary layer flow; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol.99, p130-136

P. L. O'Neill et al, (2004); Autocorrelation Functions and the Determination of Integral Length with Reference to Experimental and Numerical Data

N. Thompson, (s.d.) ESDU 85020; Characteristics of atmospheric turbulence near the ground, Part II: single point data for strong winds, ISBN: 978 0 85679 526 8

K. T. Trinh, (s.d.); On the karman constant; Massey University, New Zealand

TSI Incorporated, (2005); Specifications Model 8345 Velocicalc Air Velocity Meter

K. Varshney, K. Poddar, (2011); Experiments on integral length scale control in atmospheric boundary layer wind tunnel; Theoretical and applied climatology, Vol. 106, p127-137

L. W. Wei, L. C. L. Desmond, (s.d.); Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel Design

Z. Y. Wang, E. J. Plate, M. Rau, R. Keiser, (1996); Scale effects in wind tunnel modelling; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol.61, p113-130

Y. Zhang, J. Ma, Z. Cao, (2008); The Von Karman constant retrieved from CASES-97 dataset using a variational method; Atmospheric chemistry and Physics, Vol. 8, p7045-7053

Lijst van boeken

K. Argyriadis, (s.d.); Wind conditions for offshore wind turbine design, RECOFF, comparison of Standards and Regulations

T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, (2001); Wind Energy Handbook; John Wiley & Sons Ltd; ISBN: 0-471-48997-2

W.F. Chen, (1997); Handbook of Structural Engineering; Boca Raton: CRC Press; ISBN 08-493-2674-5

P. Gipe, (2004); Wind power: Renewable energy for home, farm and business; Chelsea Green Publishing; ISBN 978-1-931498-14-2

Lijst van websites

ACIN Instruments bv, (s.d.) ;

<http://www.acin.nl/EN/products/air/pitot-tubes/pitot-tubes.htm>

A.O.L. Inc, (2013); Closed wind tunnel;

<http://green.autoblog.com/2010/08/05/gms-wind-tunnel-turns-30/>

American Institute of Chemical Engineers, (s.d.); Friction velocity;

<http://www.aiche.org/ccps/glossary/process-safety-glossary/friction-velocity-u>

American Meteorological Society, (2012); meteorology glossary; aerodynamic roughness length; http://glossary.ametsoc.org/wiki/Roughness_length

Australian Maritime Safety Authority, (s.d.); Wind and waves: The Beaufort Scale;

http://www.amsa.gov.au/search_and_rescue/Training_and_Education/Safety_Education/Wind_&_Waves.pdf

T. Benson, (2009a); Nasa; Types of wind tunnels;

<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/tuntype.html>

T. Benson, (2009b); Nasa; Open return wind tunnel;

<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/tunoret.html>

P. Bradshaw, R. Mehta, (2003); Wind tunnel design;

<http://www-htgl.stanford.edu/bradshaw/tunnel>

D. J. Dunn, (s.d.); Tutorial no.1 fluid flow theory;

<http://www.freestudy.co.uk/fluid%20mechanics/t1203.pdf>

J.M. McDonough, (s.d.); Introductory Lectures on turbulence;

<http://www.engr.uky.edu/~acfd/lctr-notes634.pdf>

P. McMurtry, (2000); Length and time scales in turbulent flows;

<http://www.eng.utah.edu/~mcmurtry/Turbulence/turb1t.pdf>