

---

# Bezinken van zand in hopperzuigers

Invloed van turbulentie en korrelverdeling  
II. Bijlagen

TCB-Rapport 2b - '98

Opgesteld voor de Vereniging van waterbouwers in Bagger-,  
Kust en Oeverwerken (VBKO)

A. de Klerk  
J.M. Meulepas  
Ir. C. van Rhee  
Dr. ir. G. Krønenburg

# Bezinken van zand in hopperzuigers

Invloed van turbulentie en korrelverdeling

II. Bijlagen

TCB-Rapport 2b

Opgesteld voor de Vereniging van waterbouwers in Bagger-,  
Kust en Oeverwerken (VBKO)

1998

A. de Klerk  
J.M. Meulepas  
Ir. C. van Rhee  
Dr. ir. C. Kranenburg

Technische Universiteit Delft  
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Sectie Vloeistofmechanica

## INHOUDSOPGAVE

<b>A</b>	<b>ADRESSEN</b>	<b>1</b>
<b>B</b>	<b>RELEVANTE GEGEVENS</b>	<b>3</b>
<b>C</b>	<b>RESULTATEN PROEVEN TURBULENTIE</b>	<b>14</b>
<b>D</b>	<b>RESULTATEN PROEVEN UNIFORME ZANDFRACTIE</b>	<b>32</b>
<b>E</b>	<b>RESULTATEN PROEVEN VERSCHILLENDE ZANDFRACTIES</b>	<b>65</b>

## A ADRESSEN

## AUTEURS

Dit rapport is geschreven door:

A. de Klerk  
Grotemarkt 21-e  
3011 PC Rotterdam

J.M. Meulepas  
Binnenrotte 112  
3011 HC Rotterdam

Ir. C. van Rhee  
TU Delft  
Fac. Ontwerp, Constructie en Productie  
Mekelweg 2  
2628 CD Delft  
E-mail: [c.vanrhee@wbmt.tudelft.nl](mailto:c.vanrhee@wbmt.tudelft.nl)

Dr. ir. C. Kranenburg  
TU Delft  
Fac. Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Stevinweg 1  
2628 CN Delft  
E-mail: [c.kranenburg@ct.tudelft.nl](mailto:c.kranenburg@ct.tudelft.nl)

## **B RELEVANTE GEGEVENS**

## B1 GEGEVENS SCHEPEN

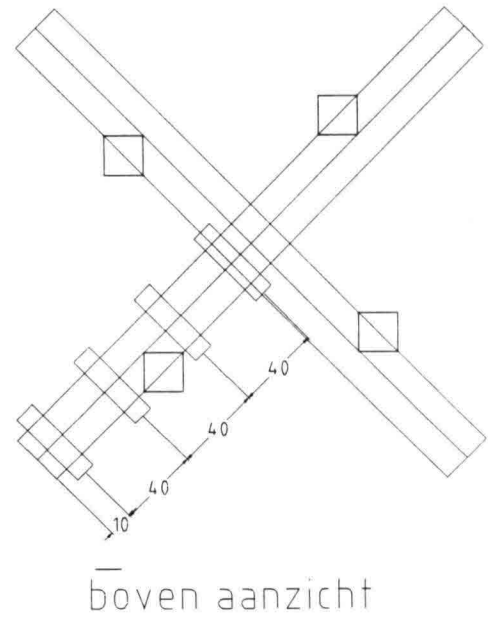
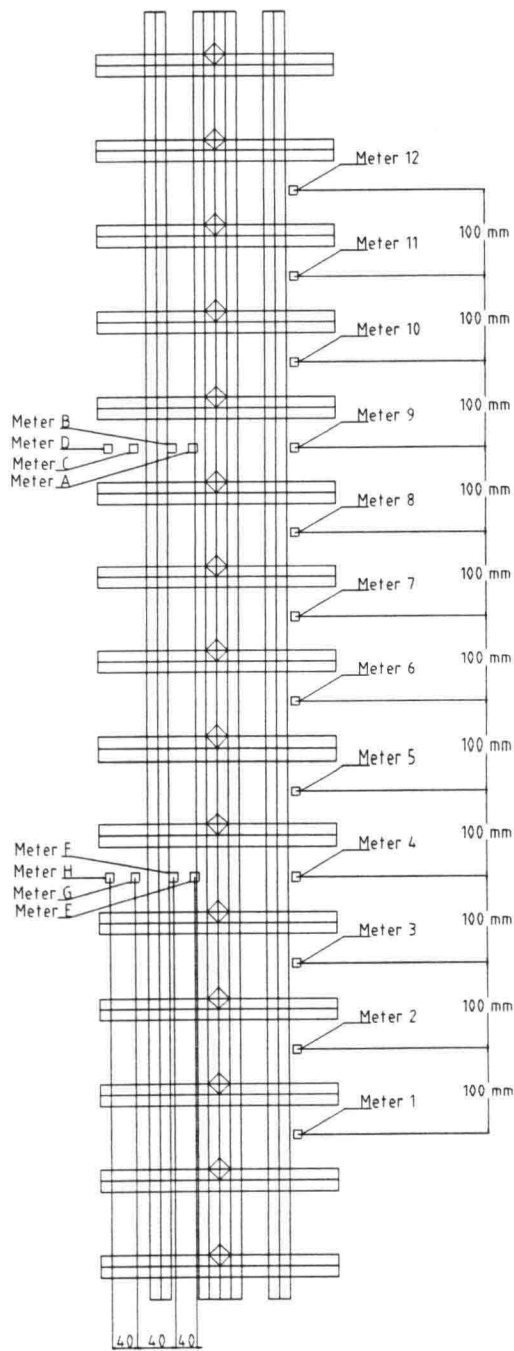
Hieronder volgen enkele gegevens over bestaande hopperzuigers:

<b>Schip</b>	<b>Beun Volume [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Beun Lengte [m]</b>	<b>Beun Breedte [m]</b>	<b>Debiet [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Leiding Snelheid [m/s]</b>
<b>Fairway</b>	23490	87.0	20.5	13.8	6.1
<b>Amsterdam</b>	18000	66.0	18.0	12.0	6.3
<b>HAM 310</b>	8225	46.3	15.4	11.4	6.0
<b>Volvox Delta</b>	8143	54.6	14.0	9.4	6.0
<b>Cornelia</b>	6395	52.4	12.6	7.1	5.6
<b>HAM 311</b>	3522	44.0	11.5	3.9	6.1
<b>Heron</b>	974	34.3	7.6	0.9	5.6

Tabel B.1

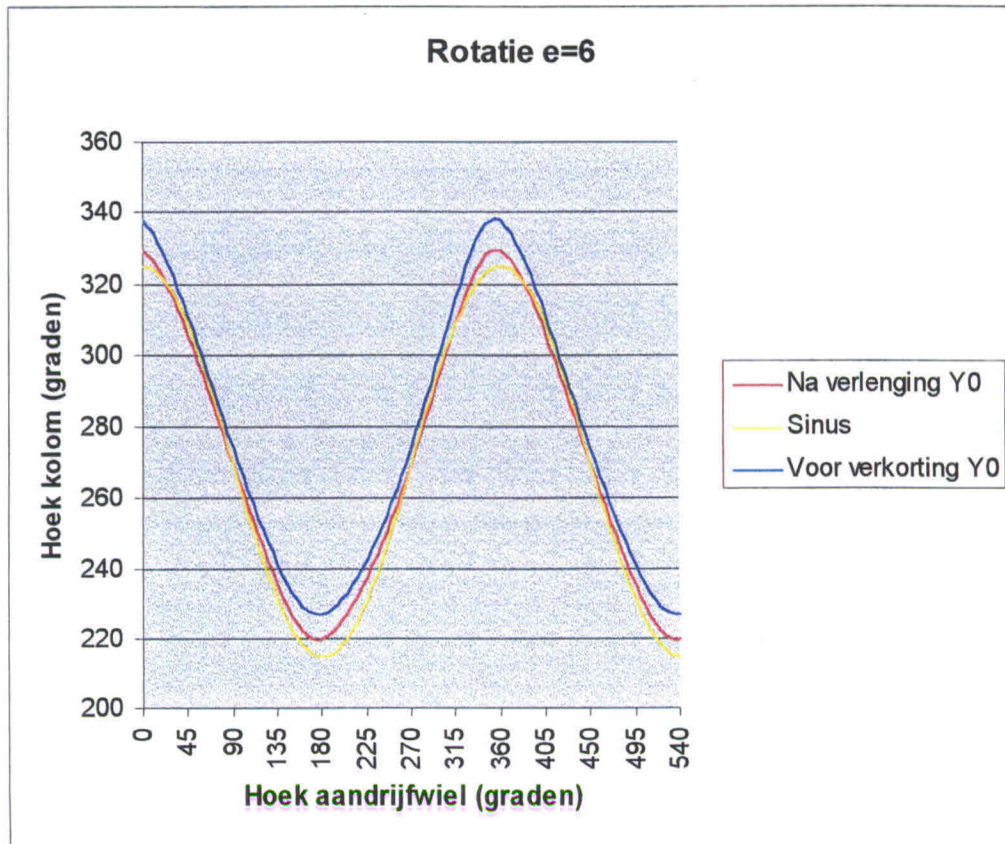
Gegevens van enkele hopperzuigers

## B2 POSITIE CONCENTRATIEMETERS

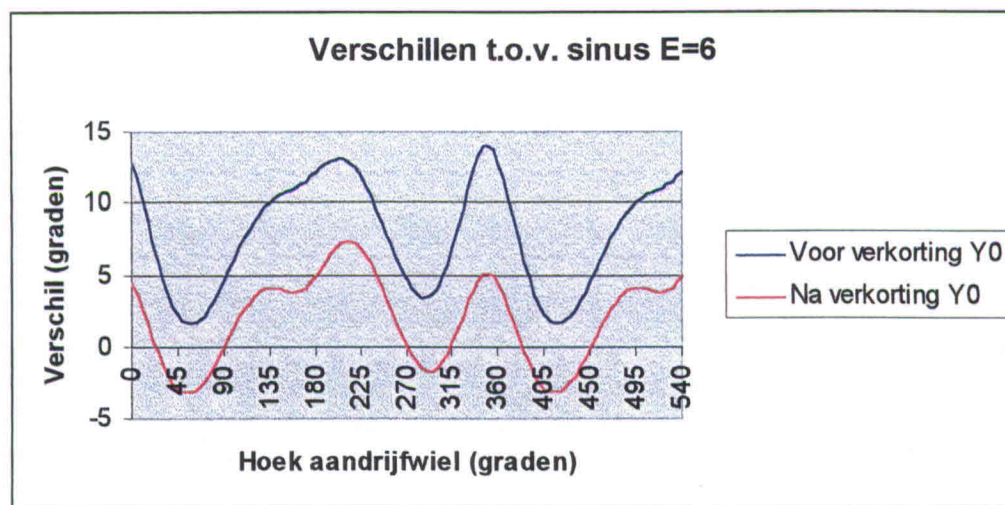




### B3 ROTATIE KOLOM E=6 DALFA =110,3°

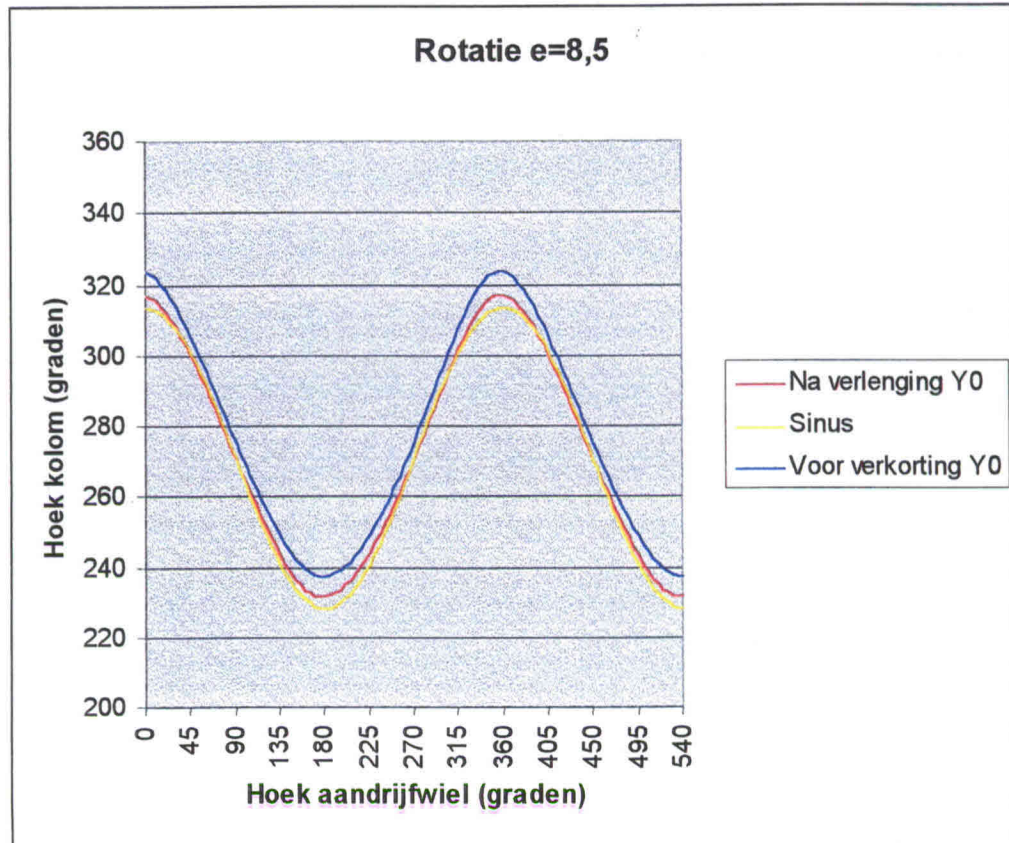


Figuur B.1  
Rotatie van de kolom bij  $d\alpha=110,3^\circ$

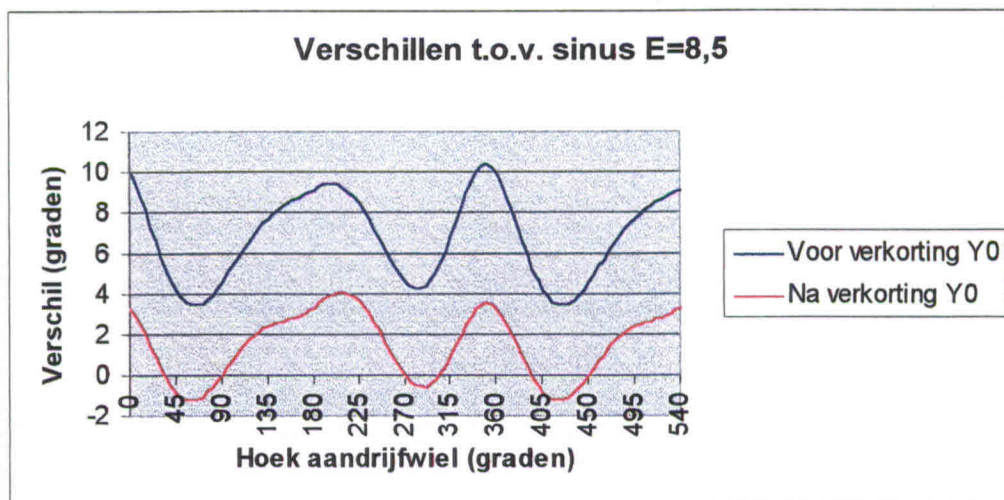


Figuur B.2  
Verschillen in rotatie voor en na verkorting van de afstand tussen aandrijf wiel en kolom (Y0) ten opzichte van een sinus

## B4 ROTATIE KOLOM $E=8,5$ DALFA $=85,3^\circ$

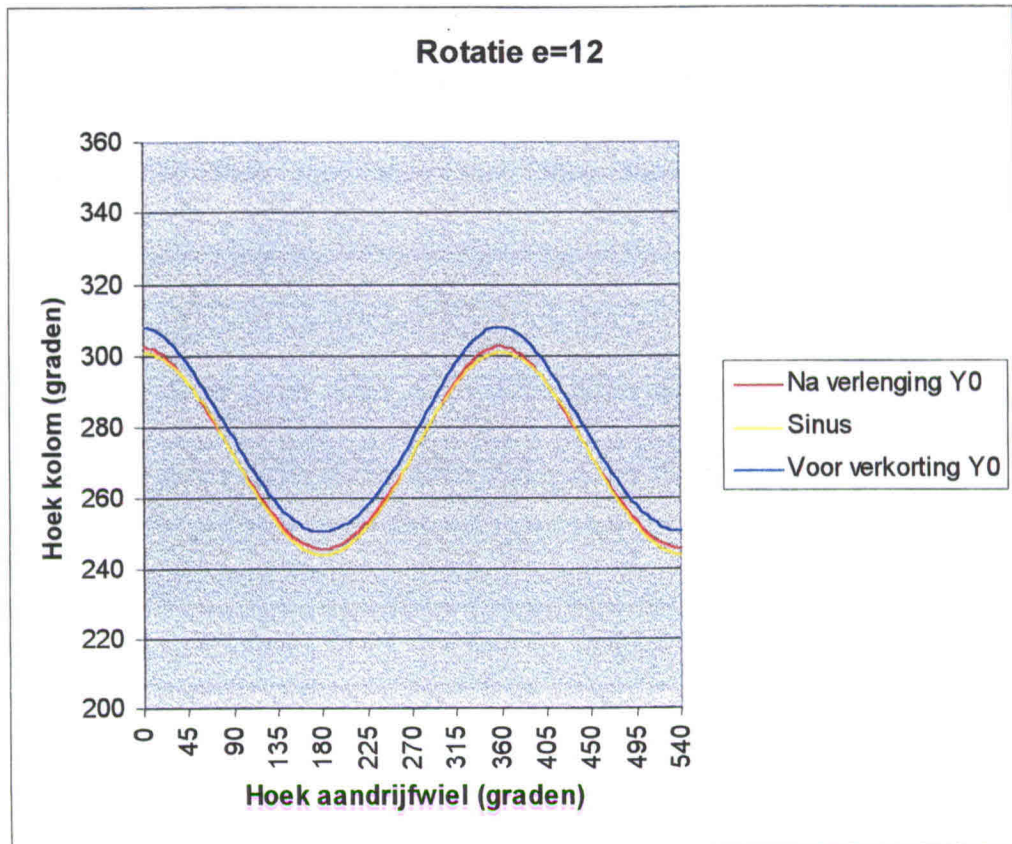


Figuur B.3  
Rotatie van de kolom bij  $d\alpha=85,3^\circ$

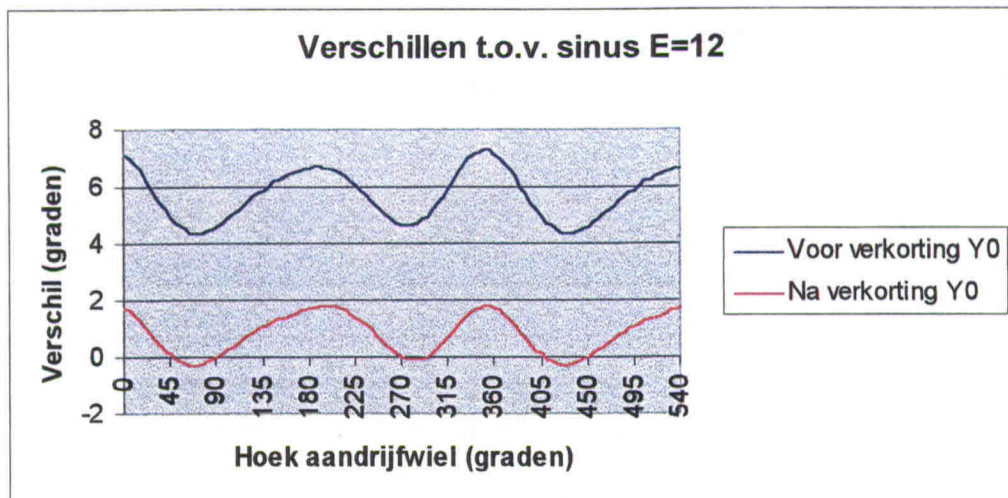


Figuur B.4  
Verschillen in rotatie voor en na verkorting van de afstand tussen aandrijf wiel en kolom (Y0) ten opzichte van een sinus

## B5 ROTATIE KOLOM E=12 DALFA =58,1°

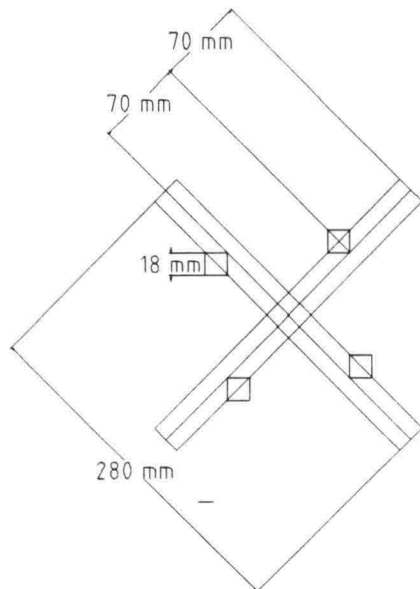


Figuur B.5  
Rotatie van de kolom bij  $d\alpha=58,1^\circ$

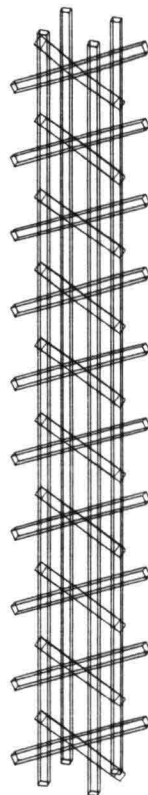


Figuur B.6  
Verschillen in rotatie voor en na verkorting van de afstand tussen aandrijf wiel en kolom (Y0) ten opzichte van een sinus

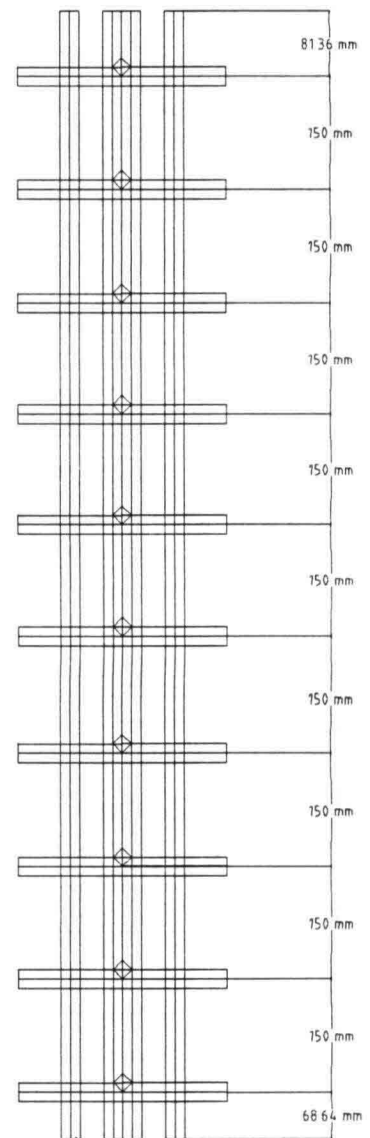
## B6 OUDE ROOSTER



Bovenaanzicht

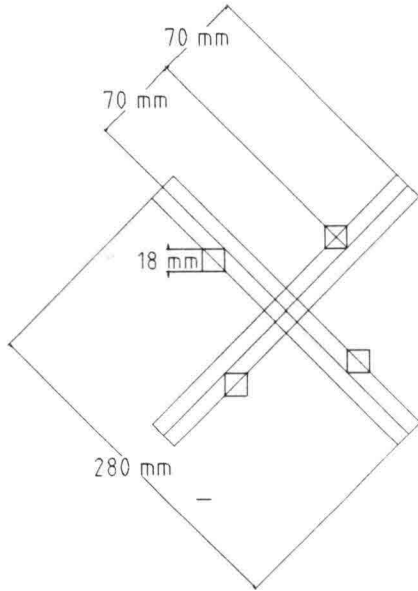


3D aanzicht

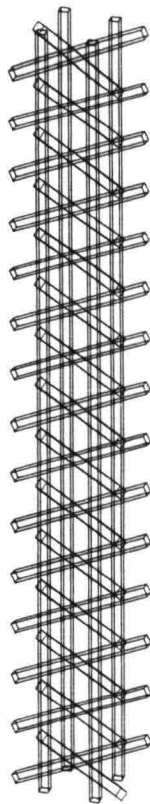


Vooraanzicht

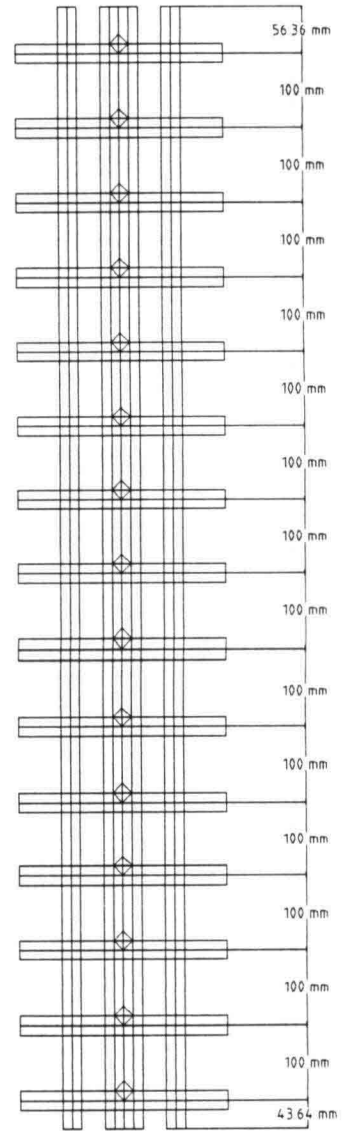
## B7 NIEUWE ROOSTER



Bovenaanzicht



3D aanzicht



Vooraanzicht

## B8 SCHAALREGELS

Uit Bradshaw (1978) volgt de transport-vergelijking voor de Turbulente Kinetische Energie (TKE):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{2} \overline{u_i^2} \right) + U_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{1}{2} \overline{u_i^2} \right) = -\overline{u_i u_i} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \overline{p' u_i} / \rho + \frac{1}{2} \overline{u_i^2 u_i} \right) - E - P_{\text{buoyancy}}$$

formule (B.1)

Links in formule (B.1) staan de transport termen door de hoofdstroom. Rechts in deze vergelijking staan respectievelijk productieterm, de herverdelings- of diffusie-term, de dissipatieterm en de afbraakterm van de TKE-vergelijking. Al deze termen hebben de eenheid [m<sup>2</sup> s<sup>-3</sup>]

Als we aannemen dat er een evenwichtssituatie heerst (geen verandering over de tijd) komen de linker termen te vervallen. Aan de rechterzijde komt de eerste twee term te vervallen omdat er geen snelheidsgradiënt aanwezig is. De tweede term vervalt als de turbulentie homogeen is. Dit is in het geval dat de turbulentie met een rooster wordt opgewerkt niet het geval.

De overgebleven termen zijn van wezenlijk belang en zien er als volgt uit:

Energiedissipatie [m<sup>3</sup> s<sup>-2</sup>]:

$$E \approx \frac{V_{rms}^3}{l} \dots\dots\dots (B.2)$$

Afbraak van TKE door buoyancy transport per eenheid van gewicht [m<sup>2</sup> s<sup>-3</sup>]:

Bij een evenwicht geldt dat het netto verticale transport nul is (B.3):

$$w_s \cdot C + \overline{w' C'} = 0 \dots\dots\dots (B.3)$$

Als voorwaarde (B.3) geldt, dan kan deze term als volgt worden omgeschreven:

$$P_{\text{buoyancy}} = -g \cdot \Delta \cdot \overline{c' w'} = g \cdot \Delta \cdot c \cdot w_s \dots\dots\dots (B.4)$$

Wanneer er gekeken wordt naar de verhouding van transport t.g.v. de valsnelheid en turbulent transport (zie B.4), dan ziet deze verhouding er als volgt uit:

$$\frac{w_s \cdot C}{w' C'} \dots\dots\dots (B.5)$$

Er geldt:

$$\begin{aligned} w' &\propto v_{rms} \dots\dots\dots (B.6) \\ C' &\propto C \end{aligned}$$

De verhouding is dus evenredig met :  $w_s / v_{z,rms}$   
 Er moet dus gelden (Galland et al., 1994)

$$\frac{w_{k;s}}{v_{k,rms}} = \frac{w_{b;s}}{v_{b,rms}} \dots\dots\dots (B.7)$$

Wanneer de formules 4.9 en 4.11 worden gecombineerd leidt dit tot:

$$\frac{v_{rms;k}^2}{l_k} = \frac{v_{rms;b}^2}{l_b} \dots\dots\dots (B.8)$$

Aangezien :

$$n_l = \frac{l_b}{l_k} = \frac{H_b}{D_k} = \frac{7,5}{0,25} = 30 = n_{v_{rms}^2} = \frac{v_{rms;b}^2}{v_{rms;k}^2} \dots\dots\dots (B.9)$$

Dus geldt:

$$\sqrt{30} = n_{v_{rms}} = \frac{v_{rms;b}}{v_{rms;k}} \approx 5,5 \dots\dots\dots (B.10)$$

De valsnelheid van een korrel in de kolom moet dus 5,5 keer lager zijn dan die in het beun van een hopperzuiger om aan de bovengenoemde eis te voldoen.

Op de volgende pagina (Tabel B.2) is een vertaling gemaakt van de korrelgrootten in de kolom naar die in het beun.

De ongestoorde valsnelheden gelden bij 20 graden Celsius.

Korrelgrootte in kolom [ $\mu\text{m}$ ]	Valsnelheid in kolom $w_{0,k}$ [m/s]	Valsnelheid in beun $w_{0,b}$ [m/s]	Korrelgrootte in beun [ $\mu\text{m}$ ]
96,56	0,0073	0,0409	278
156,71	0,0175	0,0961	741
263,50	0,0376	0,2067	2729

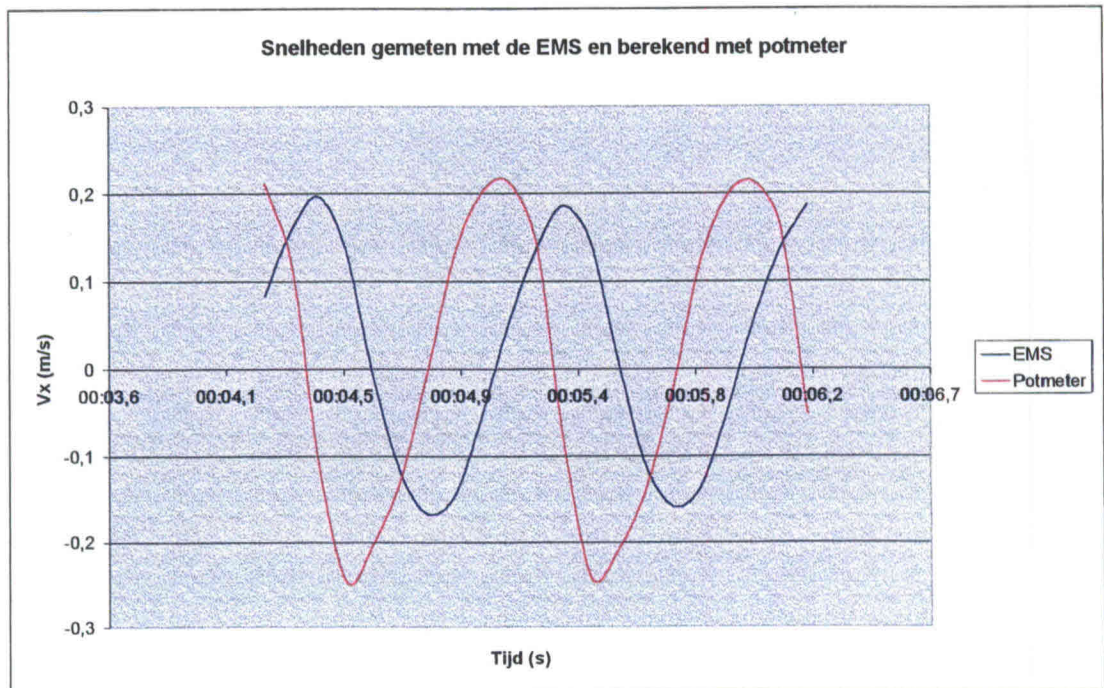
Tabel B.2  
Verschalen korrelgrootten

Hieruit blijkt dat de zandsoorten die in de kolom zijn getest te koppelen zijn aan zandsoorten die in de praktijk ook opgebaggerd zullen worden.

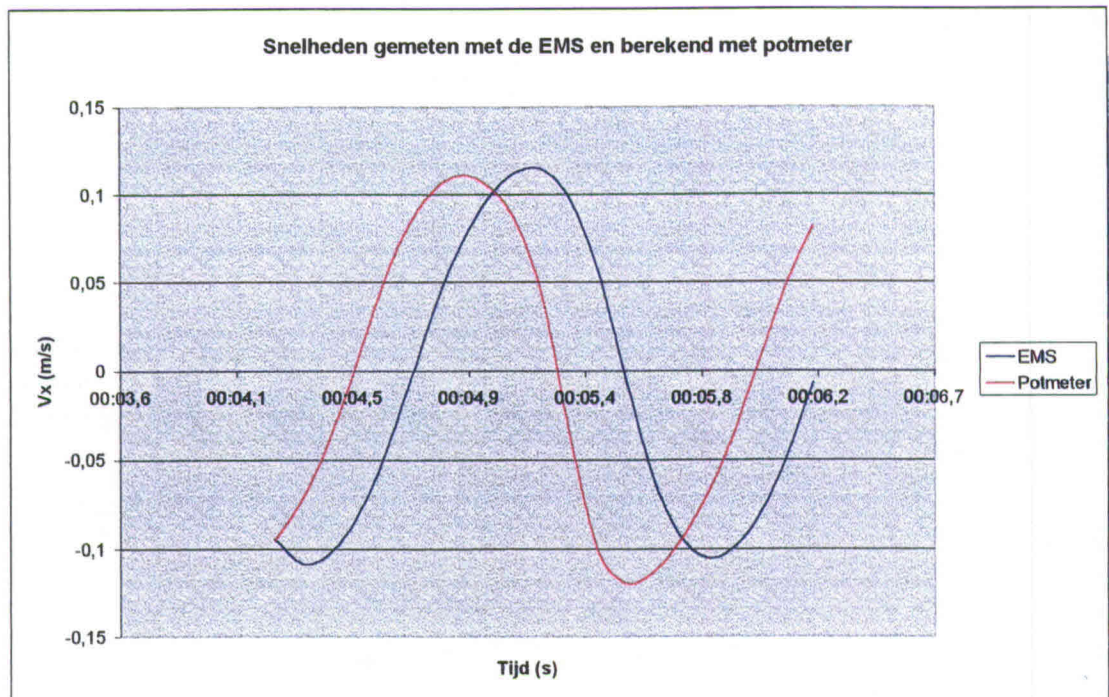


## C RESULTATEN PROEVEN TURBULENTIE

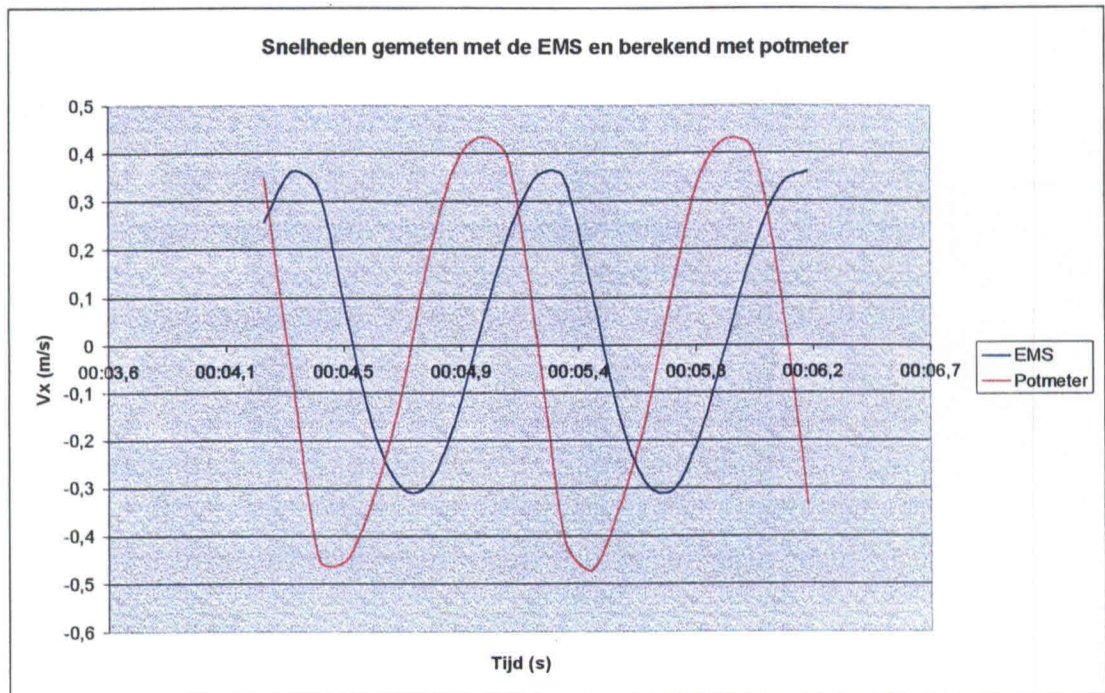
## C1 SNELHEDEN GEMETEN MET DE EMS EN BEREKEND UIT HET SIGNAAL VAN DE POTMETER



Figuur C.1  
Snelheden gemeten met de EMS en berekend uit het signaal van de potmeter voor een willekeurige proef



Figuur C.2  
Snelheden gemeten met de EMS en berekend uit het signaal van de potmeter voor een willekeurige proef



Figuur C.3  
Snelheden gemeten met de EMS en berekend uit het signaal van de potmeter voor een willekeurige proef

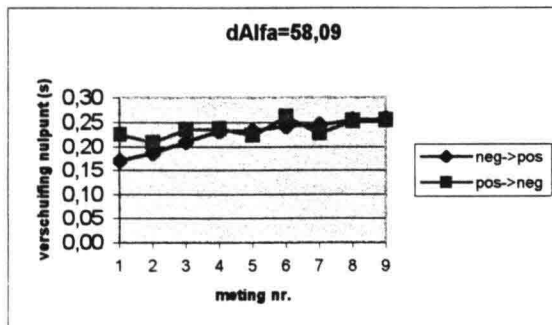
## C2 RESULTATEN WATERMETING ZONDER ROOSTER (CONSTANTE HOEK VAN UITSLAG)

In onderstaande tabellen zijn de nulpuntverschuivingen (verschil tussen signaal van de EMS en de potmeter in seconden) voor constante hoek van uitslag weergegeven. Periode en positie van de EMS zijn gevarieerd. Er is onderscheid gemaakt tussen de nulpuntverschuiving van negatieve naar positieve waarden van alfa en andersom. De nulpuntverschuivingen van negatief naar positief zijn van klein naar groot geordend. De nulpuntverschuivingen zijn in grafieken geplott. In de eerste kolom zijn de proefnummers vermeld, waarbij e iets zegt over dAlfa, d iets zegt over de positie van de EMS en t iets zegt over de periode.

dAlfa=58,09 °	toenemen -de Alfa	afnemen- de Alfa
e12d61t4	0,1708	0,2253
e12d101t4	0,1862	0,2093
e12d61t8	0,2102	0,2357
e12d61t12	0,2329	0,2368
e12d101t8	0,2338	0,2238
e12d21t4	0,2430	0,2616
e12d101t12	0,2458	0,2283
e12d21t12	0,2547	0,2530
e12d21t8	0,2580	0,2552

Tabel C.1

Nulpuntverschuiving bij dAlfa=58,1°



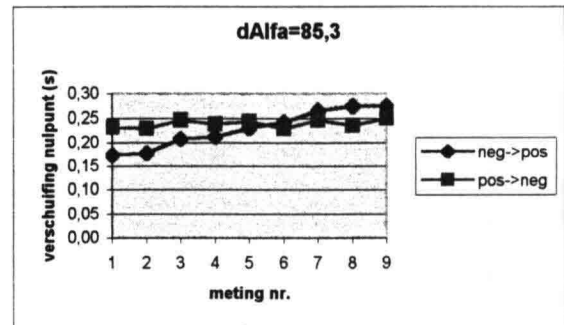
Figuur C.4

Nulpuntverschuiving bij dAlfa=58,1°

dAlfa=85,3 °	toenemen -de Alfa	afnemen- de Alfa
e85d61t4	0,1731	0,2322
e85d101t4	0,1770	0,2296
e85d101t8	0,2076	0,2466
e85d61t8	0,2122	0,2385
e85d61t12	0,2301	0,2434
e85d101t12	0,2429	0,2288
e85d21t12	0,2654	0,2470
e85d21t4	0,2744	0,2363
e85d21t8	0,2751	0,2502

Tabel C.2

Nulpuntverschuiving bij dAlfa=85,3°



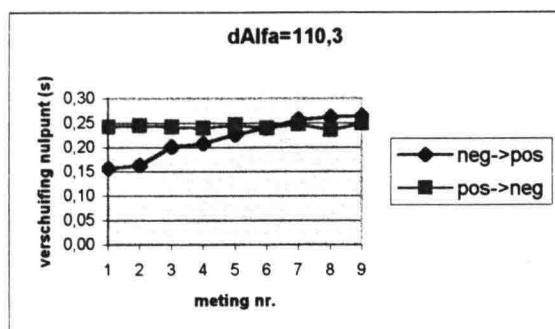
Figuur C.5

Nulpuntverschuiving bij dAlfa=85,3°

dAlfa= 110,3 °	toenemen -de dAlfa	afnemen- de dAlfa
e6d61t4	0,1564	0,2421
e6d101t4	0,1638	0,2445
e6d101t8	0,2011	0,2423
e6d61t8	0,2079	0,2395
e6d101t12	0,2265	0,2456
e6d61t12	0,2388	0,2394
e6d21t12	0,2571	0,2480
e6d21t4	0,2618	0,2349
e6d21t8	0,2639	0,2491

Tabel C.3

Nulpuntverschuiving bij dAlfa=110,3°



Figuur C.6

Nulpuntverschuiving bij dAlfa=110,3°

### C3 RESULTATEN WATERMETING ZONDER ROOSTER (CONSTANTE POSITIE VAN DE EMS)

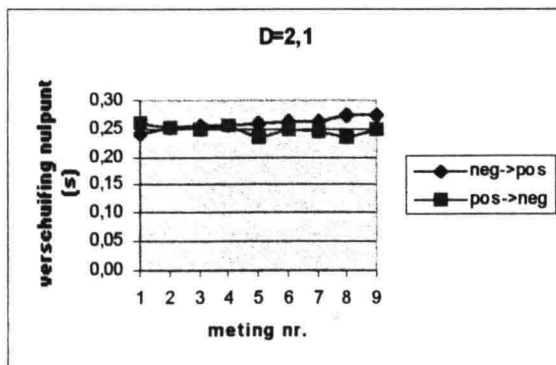
In onderstaande tabellen zijn de nulpuntverschuivingen (verschil tussen signaal van de EMS en de potmeter in seconden) voor constante positie van de EMS weergegeven. Periode en hoek van uitslag zijn gevarieerd. Er is onderscheid gemaakt tussen de nulpuntverschuiving van negatieve naar positieve waarden van alfa en andersom. De nulpuntverschuivingen van negatief naar positief zijn van klein naar groot geordend. De nulpuntverschuivingen zijn in grafieken geplott. In de eerste kolom zijn de proefnummers vermeld, waarbij e iets zegt over dAlfa, d iets zegt over de positie van de EMS en t iets zegt over de periode.

D=2,1 cm	toenemen -de Alfa	afnemen- de Alfa
e12d21t4	0,2430	0,2616
e12d21t12	0,2547	0,2530
e6d21t12	0,2571	0,2480
e12d21t8	0,2580	0,2552
e6d21t4	0,2618	0,2349
e6d21t8	0,2639	0,2491
e85d21t12	0,2654	0,2470
e85d21t4	0,2744	0,2363
e85d21t8	0,2751	0,2502

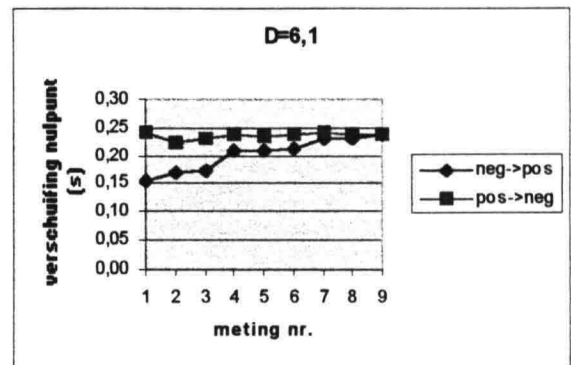
Tabel C.4  
 Nulpuntverschuiving bij D=2,1 cm

D=6,1 cm	toenemen -de Alfa	afnemen- de Alfa
e6d61t4	0,1564	0,2421
e12d61t4	0,1708	0,2253
e85d61t4	0,1731	0,2322
e6d61t8	0,2079	0,2395
e12d61t8	0,2102	0,2357
e85d61t8	0,2122	0,2385
e85d61t12	0,2301	0,2434
e12d61t12	0,2329	0,2368
e6d61t12	0,2388	0,2394

Tabel C.5  
 Nulpuntverschuiving bij D=6,1 cm



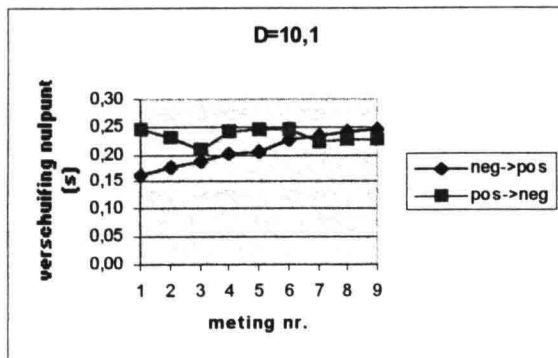
Figuur C.7  
 Nulpuntverschuiving bij D=2,1 cm



Figuur C.8  
 Nulpuntverschuiving bij D=6,1 cm

D=10,1 cm	toenemen -de dAlfa	afnemen- de dAlfa
e6d101t4	0,1638	0,2445
e85d101t4	0,1770	0,2296
e12d101t4	0,1862	0,2093
e6d101t8	0,2011	0,2423
e85d101t8	0,2076	0,2466
e6d101t12	0,2265	0,2456
e12d101t8	0,2338	0,2238
e85d101t12	0,2429	0,2288
e12d101t12	0,2458	0,2283

Tabel C.6  
 Nulpuntverschuiving bij D=10,1 cm



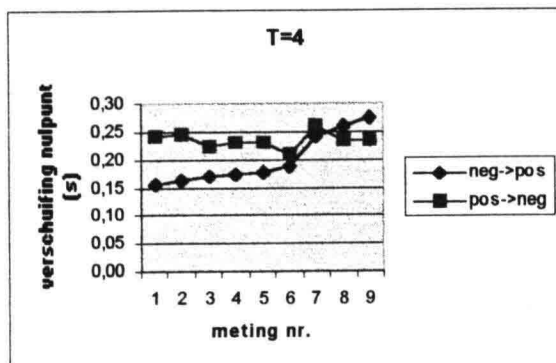
Figuur C.9  
 Nulpuntverschuiving bij D=10,1 cm

## C4 RESULTATEN WATERMETING ZONDER ROOSTER (CONSTANTE PERIODE)

In onderstaande tabellen zijn de nulpuntverschuivingen (verschil tussen signaal van de EMS en de potmeter in seconden) voor constante periode weergegeven. Positie van de EMS en hoek van uitslag zijn gevarieerd. Er is onderscheid gemaakt tussen de nulpuntverschuiving van negatieve naar positieve waarden van alfa en andersom. De nulpuntverschuivingen van negatief naar positief zijn van klein naar groot geordend. De nulpuntverschuivingen zijn in grafieken geplot. In de eerste kolom zijn de proefnummers vermeld, waarbij e iets zegt over dAlfa, d iets zegt over de positie van de EMS en t iets zegt over de periode.

T=4 s	toenemen -de Alfa	afnemen- de Alfa
e6d61t4	0,1564	0,2421
e6d101t4	0,1638	0,2445
e12d61t4	0,1708	0,2253
e85d61t4	0,1731	0,2322
e85d101t4	0,1770	0,2296
e12d101t4	0,1862	0,2093
e12d21t4	0,2430	0,2616
e6d21t4	0,2618	0,2349
e85d21t4	0,2744	0,2363

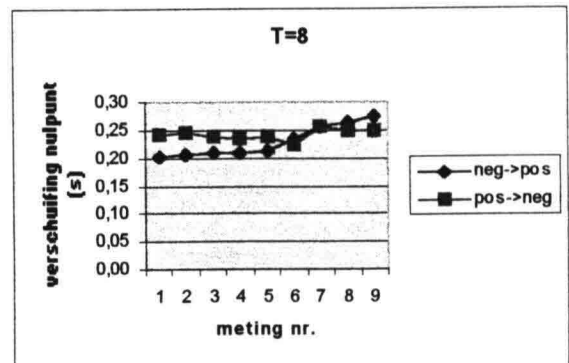
Tabel C.7  
 Nulpuntverschuiving bij T=4 s



Figuur C.10  
 Nulpuntverschuiving bij T=4 s

T=8 s	toenemen -de Alfa	afnemen- de Alfa
e6d101t8	0,2011	0,2423
e85d101t8	0,2076	0,2466
e6d61t8	0,2079	0,2395
e12d61t8	0,2102	0,2357
e85d61t8	0,2122	0,2385
e12d101t8	0,2338	0,2238
e12d21t8	0,2580	0,2552
e6d21t8	0,2639	0,2491
e85d21t8	0,2751	0,2502

Tabel C.8  
 Nulpuntverschuiving bij T=8 s

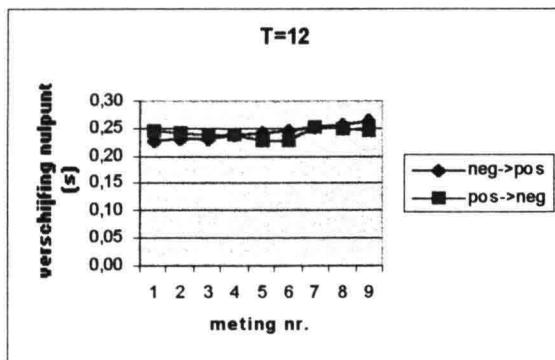


Figuur C.11  
 Nulpuntverschuiving bij T=8 s



T=12 s	toenemen -de Alfa	afnemen- de Alfa
e6d101t12	0,2265	0,2456
e85d61t12	0,2301	0,2434
e12d61t12	0,2329	0,2368
e6d61t12	0,2388	0,2394
e85d101t12	0,2429	0,2288
e12d101t12	0,2458	0,2283
e12d21t12	0,2547	0,2530
e6d21t12	0,2571	0,2480
e85d21t12	0,2654	0,2470

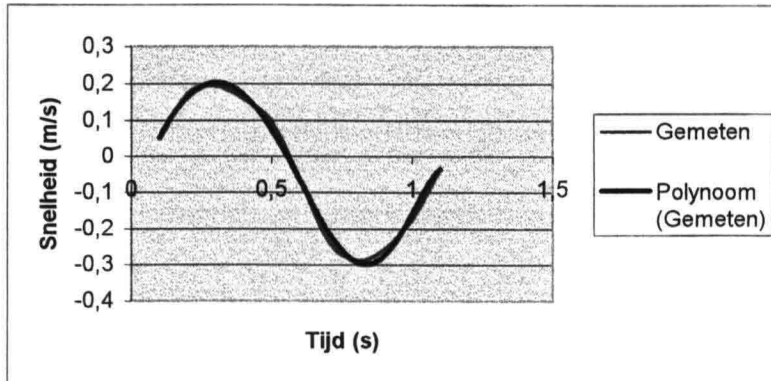
Tabel C.9  
 Nulpuntverschuiving bij T=12 s



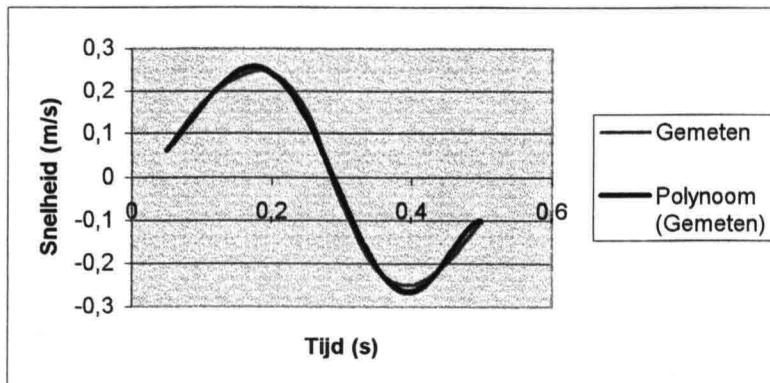
Figuur C.12  
 Nulpuntverschuiving bij T=12 s

## C5 VERGELIJKING MET $V_{x,RMS}$

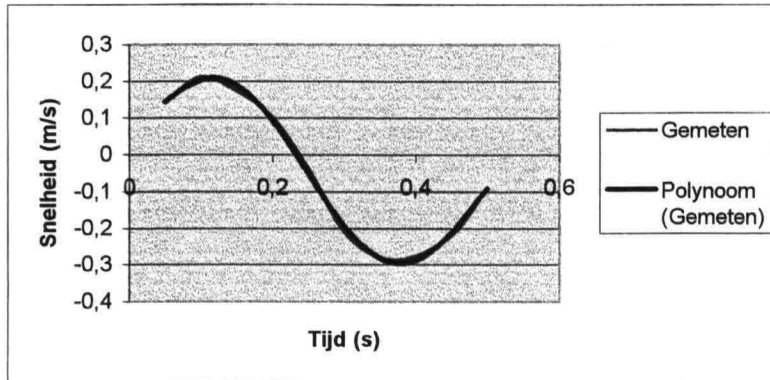
stapgrootte	$V_x$ (EMS)	$V_x$ (polyno verschil	kwadraat	$V_{rms}$
0,1	0,049469	0,051795	0,002326	5,40982E-06
0,2	0,173656	0,164057	-0,0096	9,21391E-05
0,3	0,192675	0,202026	0,009351	8,74438E-05
0,4	0,159252	0,170576	0,011324	0,000128223
0,5	0,095892	0,074119	-0,02177	0,000474074
0,6	-0,06096	-0,06578	-0,00482	2,32217E-05
0,7	-0,23073	-0,2061	0,024625	0,000606393
0,8	-0,28801	-0,29134	-0,00333	1,11144E-05
0,9	-0,25786	-0,27581	-0,01795	0,000322226
1	-0,17273	-0,1592	0,01353	0,000183061
1,1	-0,03259	-0,03545	-0,00287	8,22358E-06



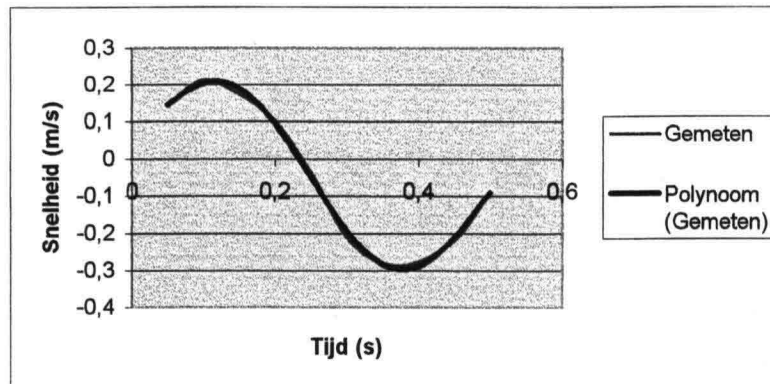
stapgrootte	$V_x$ (EMS)	$V_x$ (polyno verschil	kwadraat	$V_{rms}$
0,05	0,061336	0,06279	0,001454	2,11499E-06
0,1	0,170056	0,162974	-0,00708	5,01519E-05
0,15	0,233738	0,245312	0,011574	0,000133966
0,2	0,243476	0,242273	-0,0012	1,44769E-06
0,25	0,149473	0,133253	-0,01622	0,000263084
0,3	-0,05735	-0,04382	0,013534	0,000183164
0,35	-0,21227	-0,2062	0,006069	3,68268E-05
0,4	-0,24968	-0,26539	-0,01572	0,000246986
0,45	-0,19893	-0,19148	0,007451	5,55107E-05
0,5	-0,09963	-0,10283	-0,00319	1,01825E-05



stapgrootte	Vx (EMS)	Vx (polyno verschil	kwadraat	Vrms
0,05	0,141751	0,14341	0,001659	2,75129E-06
0,1	0,212191	0,203611	-0,00858	7,36113E-05
0,15	0,173141	0,18923	0,016089	0,000258852
0,2	0,101048	0,093152	-0,0079	6,23468E-05
0,25	-0,03878	-0,05113	-0,01235	0,000152438
0,3	-0,20919	-0,19251	0,016684	0,000278359
0,35	-0,28137	-0,28187	-0,0005	2,50724E-07
0,4	-0,27831	-0,28821	-0,0099	9,80971E-05
0,45	-0,21791	-0,21132	0,006593	4,34739E-05
0,5	-0,08984	-0,09104	-0,0012	1,43161E-06



stapgrootte	Vx (EMS)	Vx (polyno verschil	kwadraat	Vrms
0,05	0,141751	0,14341	0,001659	2,75129E-06
0,1	0,212191	0,203611	-0,00858	7,36113E-05
0,15	0,173141	0,18923	0,016089	0,000258852
0,2	0,101048	0,093152	-0,0079	6,23468E-05
0,25	-0,03878	-0,05113	-0,01235	0,000152438
0,3	-0,20919	-0,19251	0,016684	0,000278359
0,35	-0,28137	-0,28187	-0,0005	2,50724E-07
0,4	-0,27831	-0,28821	-0,0099	9,80971E-05
0,45	-0,21791	-0,21132	0,006593	4,34739E-05
0,5	-0,08984	-0,09104	-0,0012	1,43161E-06



## C6 SYMMETRIE

### OUDE ROOSTER

	<b>h=0 cm</b>	<b>h=15 cm</b>	<b>h=3,75 cm</b>	<b>h=11,25 cm</b>
<b>T=4,E=6,d=2,1</b>	0,025252	0,024679	0,021473	0,021176
<b>T=4,E=8,5,d=6,1</b>	0,018164	0,017974	0,014927	0,014801
<b>T=4,E=12,d=10,1</b>	0,007274	0,007072	0,005068	0,005169
<b>T=8,E=6,d=2,1</b>	0,035796	0,036363	0,021681	0,021824
<b>T=8,E=8,5,d=6,1</b>	0,026307	0,026269	0,02221	0,022764
<b>T=8,E=12,d=10,1</b>	0,011674	0,011795	0,006634	0,006591
<b>T=12,E=6,d=2,1</b>	0,05175	0,050824	0,035724	0,035134
<b>T=12,E=8,5,d=6,1</b>	0,034211	0,033952	0,026722	0,027143
<b>T=12,E=12,d=10,1</b>	0,023007	0,023013	0,01852	0,018434

Tabel C.10

$V_{z,rms}$  (m/s) bij het oude rooster

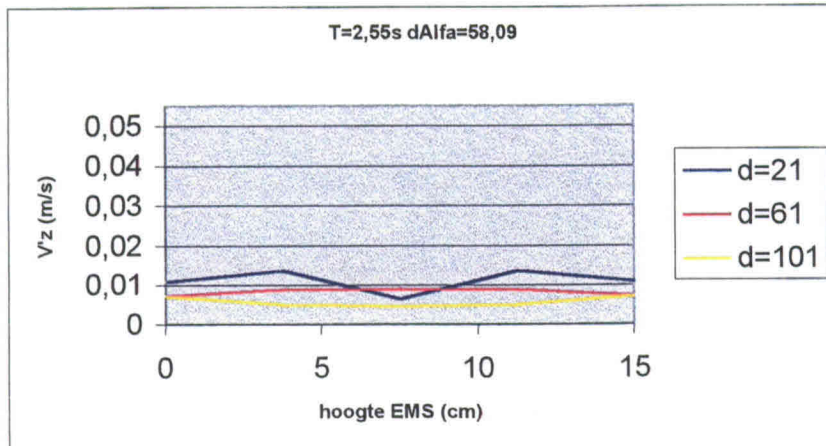
### NIEUWE ROOSTER

	<b>h=0 cm</b>	<b>h=10 cm</b>	<b>h=2,5 cm</b>	<b>h=7,5 cm</b>
<b>T=4,E=6,d=2,1</b>	0,028783	0,029498	0,024236	0,024692
<b>T=8,E=8,5,d=6,1</b>	0,017957	0,01787	0,019243	0,019416
<b>T=12,E=12,d=10,1</b>	0,017216	0,017163	0,010563	0,010269

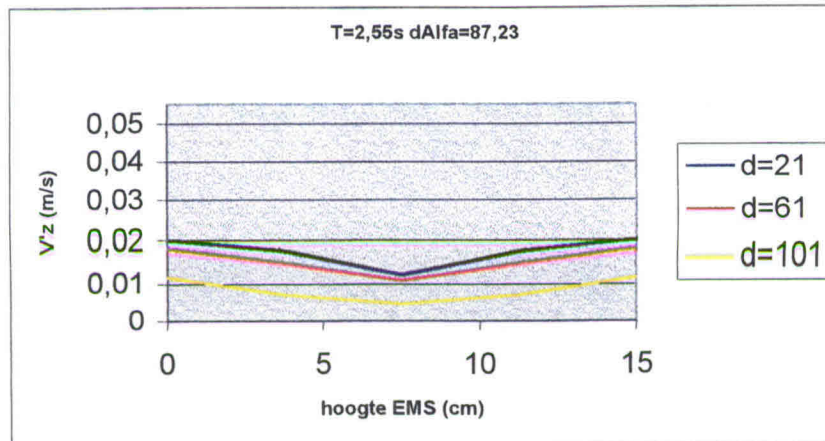
Tabel C.11

$V_{z,rms}$  (m/s) bij het nieuwe rooster

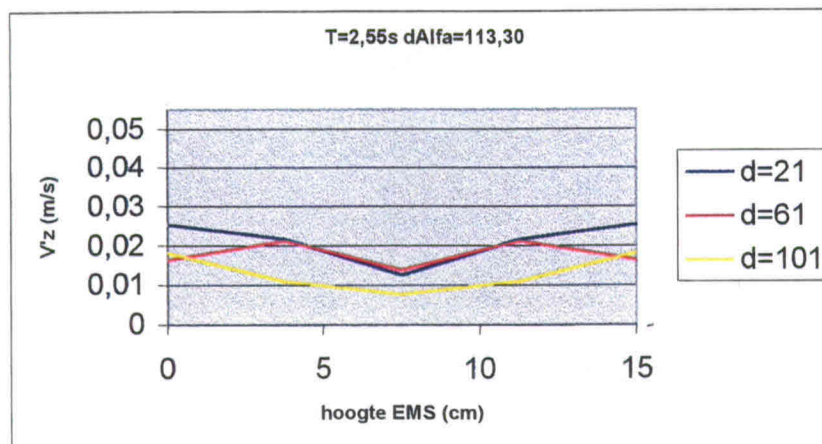
## C7 RESULTATEN WATERMETING MET HET OUDE ROOSTER



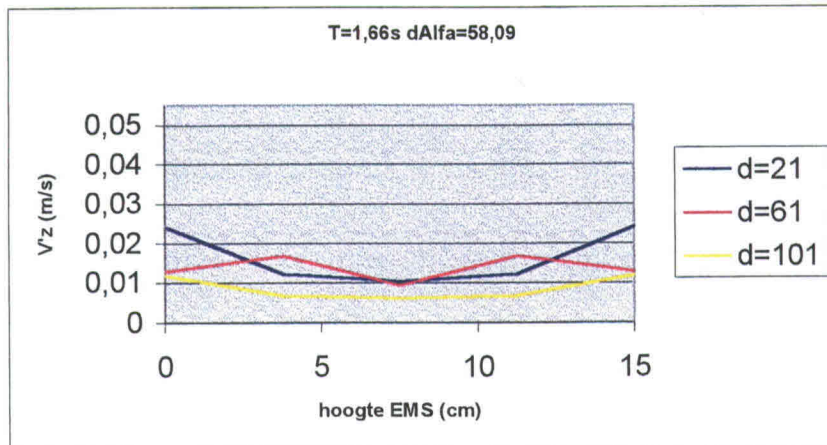
Figuur C.13  
Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=2,55s$  en  $dAlfa=58,1^\circ$



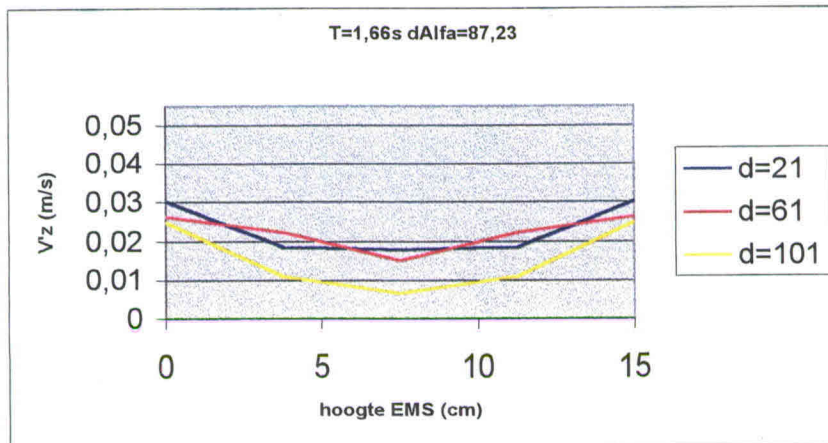
Figuur C.14  
Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=2,55s$  en  $dAlfa=87,2^\circ$



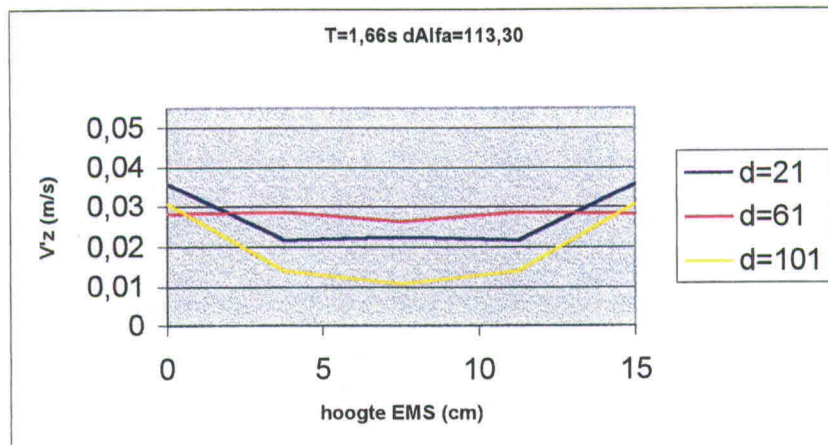
Figuur C.15  
Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=2,55s$  en  $dAlfa=113,3^\circ$



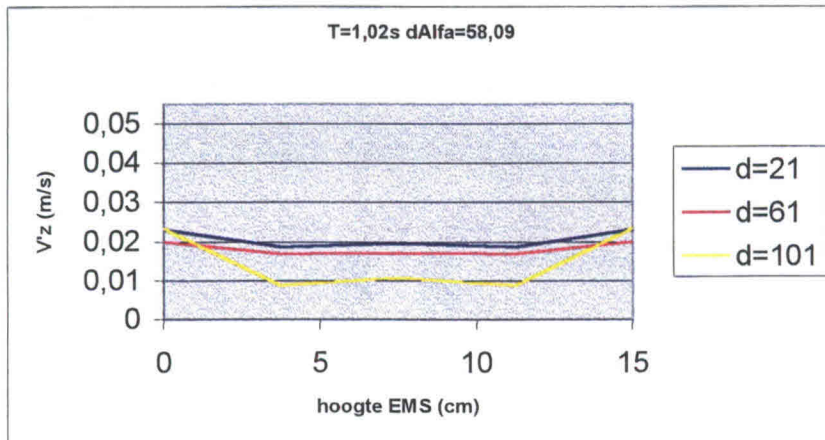
Figuur C.16  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=1,66s$  en  $dAlfa=58,1^\circ$



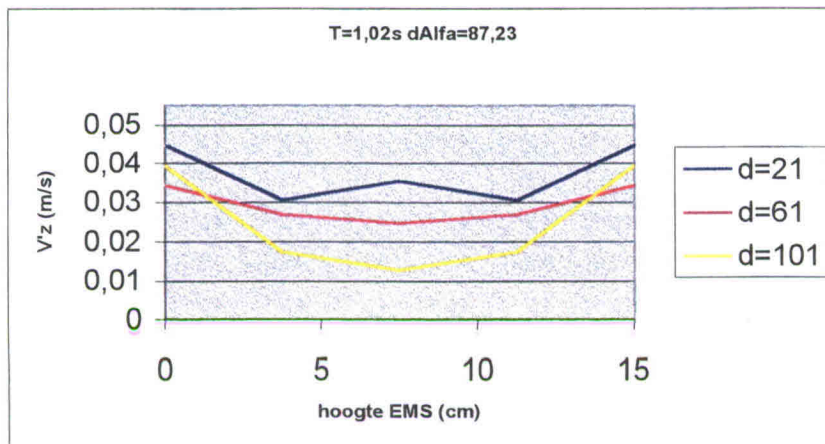
Figuur C.17  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=1,66s$  en  $dAlfa=87,2^\circ$



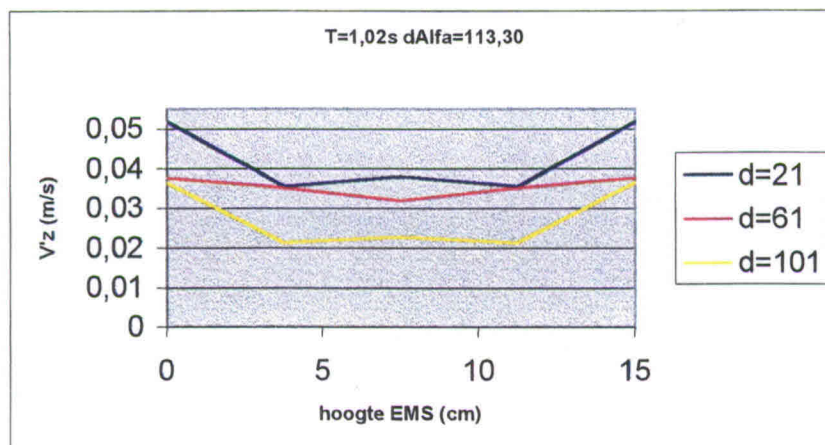
Figuur C.18  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=1,66s$  en  $dAlfa=113,3^\circ$



Figuur C.19  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=1,02s$  en  $dAlfa=58,1^\circ$

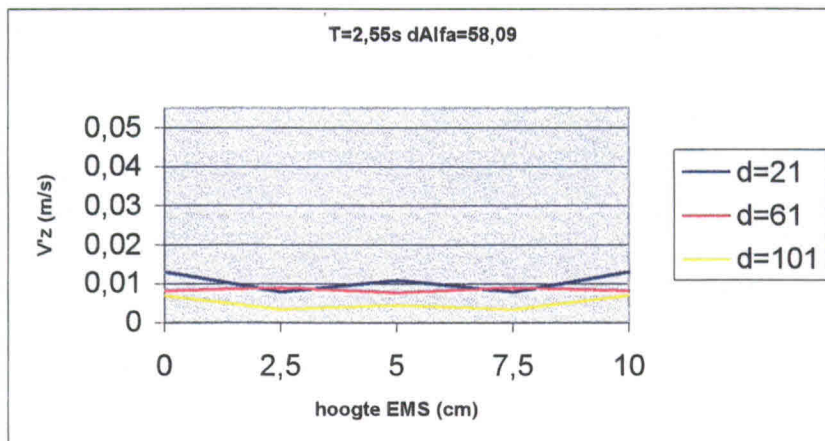


Figuur C.20  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=1,02s$  en  $dAlfa=87,2^\circ$

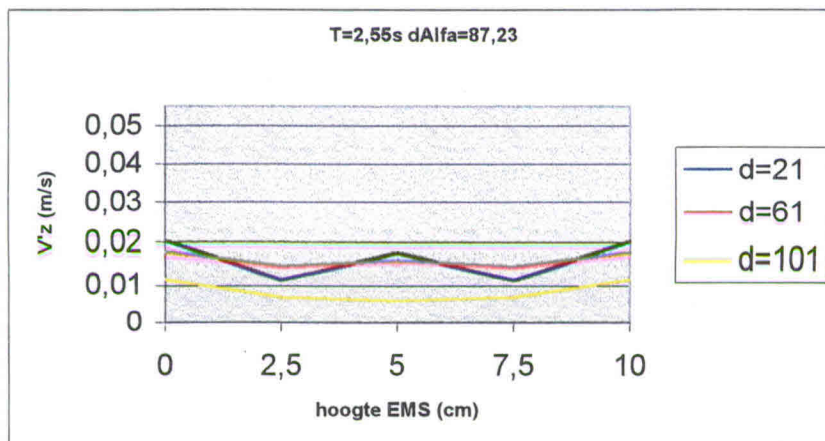


Figuur C.21  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=1,02s$  en  $dAlfa=113,3^\circ$

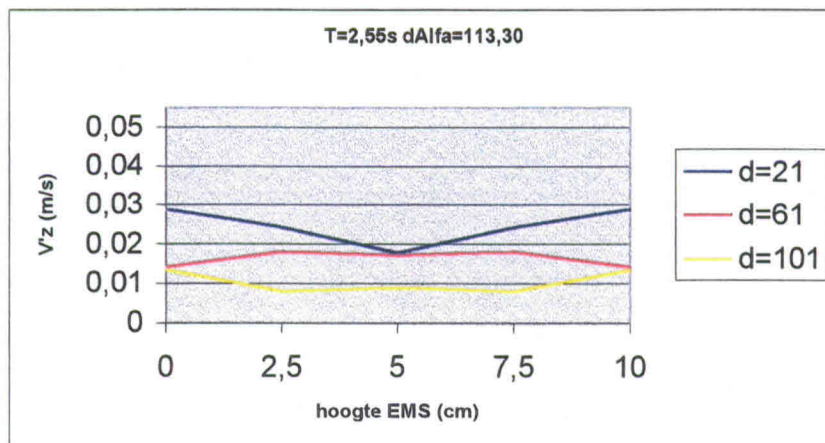
## C8 RESULTATEN WATERMETING MET HET NIEUWE ROOSTER



Figuur C.22  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=2,55s$  en  $d\text{Alfa}=58,1^\circ$

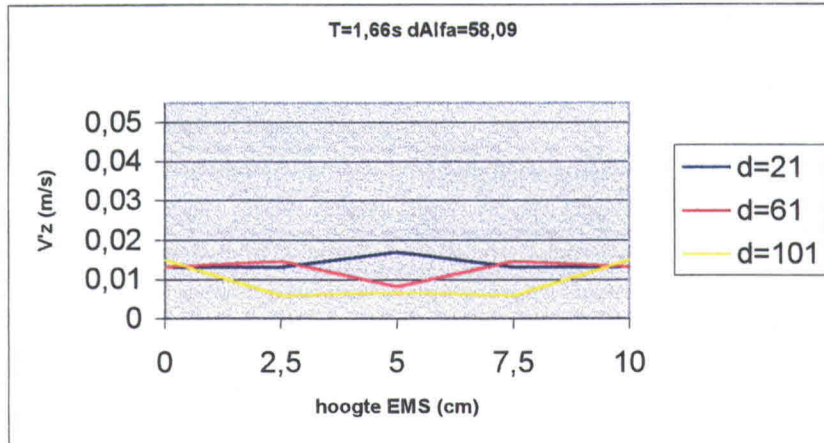


Figuur C.23  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=2,55s$  en  $d\text{Alfa}=87,2^\circ$

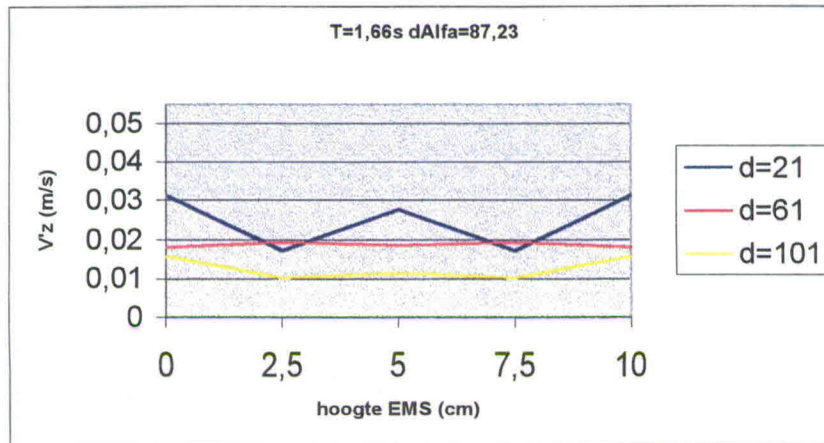


Figuur C.24  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=2,55s$  en  $d\text{Alfa}=113,3^\circ$

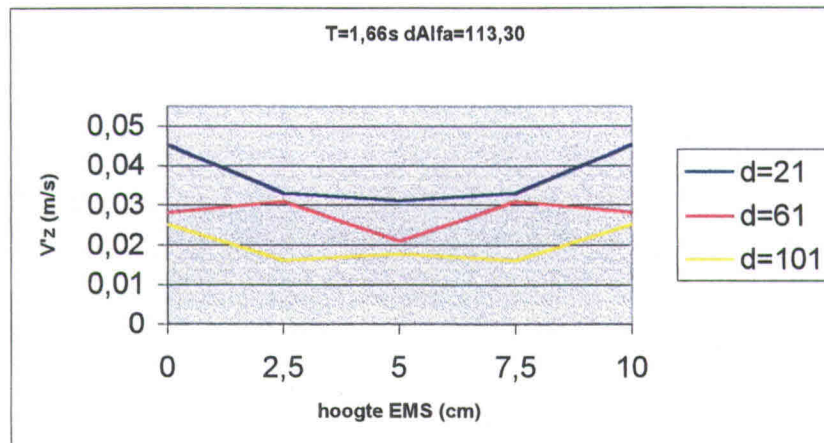




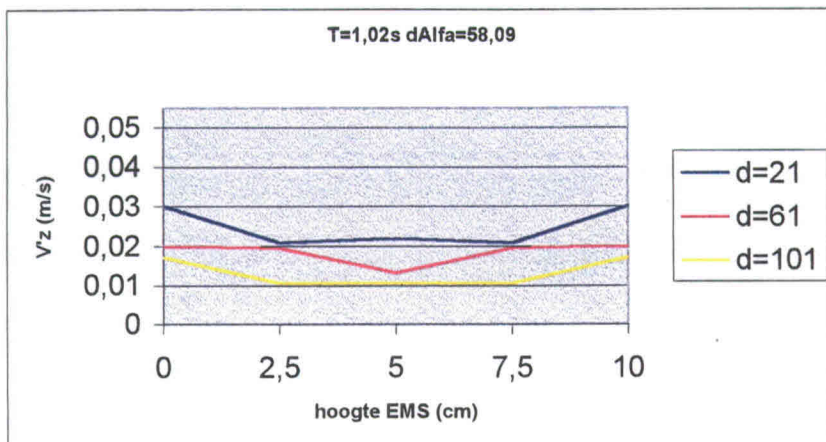
Figuur C.25  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=1,66s$  en  $dAlfa=58,1^\circ$



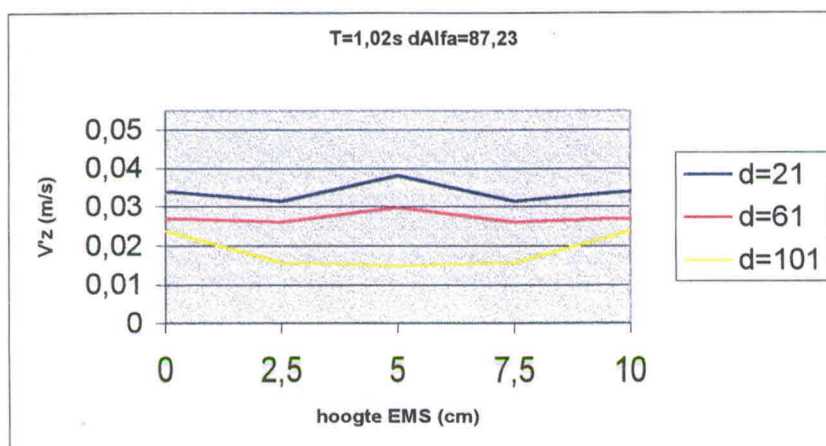
Figuur C.26  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=1,66s$  en  $dAlfa=87,2^\circ$



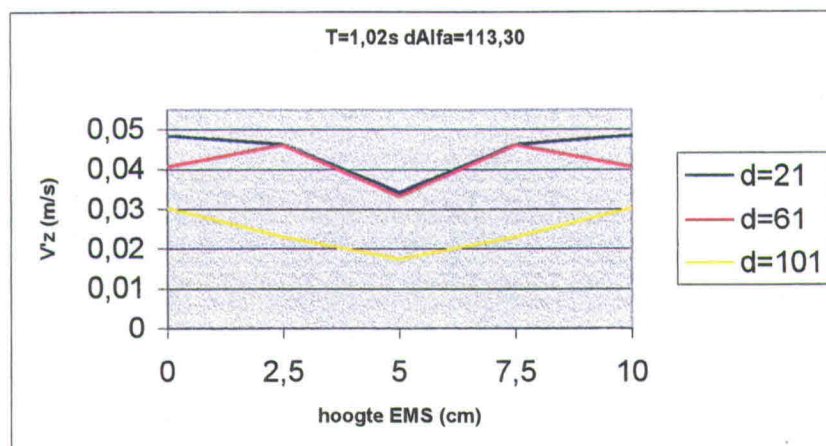
Figuur C.27  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=1,66s$  en  $dAlfa=113,3^\circ$



Figuur C.28  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=1,02s$  en  $dAlfa=58,1^\circ$



Figuur C.29  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=1,02s$  en  $dAlfa=87,2^\circ$



Figuur C.30  
 Verloop van  $V_{z,rms}$  bij  $T=1,02s$  en  $dAlfa=113,3^\circ$

## D RESULTATEN PROEVEN UNIFORME ZANDFRACTIE

## D1 BEPALING PORIËNVOLUME $D_{50}=80 \mu\text{M}$

bepaling poriënvolume $D_{50}=80 \mu\text{m}$	proef 1	proef 2	proef 3	proef 4	proef 5
inhoud voor toevoegen zand (ml)	122,2	137,7	50	50,5	51
inhoud na toevoegen zand (ml)	199,5	208,5	78,2	82	78,7
volume zand (ml)	77,3	70,8	28,2	31,5	27,7
volume zand mengsel na bezinken (ml)	149,5	138	54,2	60,5	53
poriënvolume (-)	0,482943	0,486957	0,479705	0,479339	0,477358
poriënvolume proef 1	0,482943				
poriënvolume proef 2	0,486957				
poriënvolume proef 3	0,479705				
poriënvolume proef 4	0,479339				
poriënvolume proef 5	0,477358				
gemiddelde poriënvolume	0,48126				
$C_{\text{max}}$ (%) rust	51,87396				
Hoogte zand rust (cm)	67,3				
Hoogte water (cm)	141,9				
Netto hoogte zand (cm)	34,91118				
Concentratie $T=0$ (%)	51,87396				
Hoogte zand $T=1,30$ s (cm)	63,7				
Concentratie $T=1,30$ s (%)	54,80562	Onderste deel vast gepakt.			
Hoogte zand $T=1,03$ s (cm)	62,5	Bovenste deel in suspensie			
Concentratie $T=1,03$ s (%)	55,85788				

Tabel D.1

Bepaling poriënvolume  $D_{50}=80 \mu\text{m}$

## D2 BEPALING PORIËNVOLUME $D_{50}=160 \mu\text{M}$

bepaling poriënvolume $D_{50}=160 \mu\text{m}$	proef 1	proef 2	proef 3	proef 4	proef 5
inhoud voor toevoegen zand (ml)	134	133,2	46	54,8	49,8
inhoud na toevoegen zand (ml)	202	206	84,5	93	89,2
volume zand (ml)	68	72,8	38,5	38,2	39,4
volume zand mengsel na bezinken (ml)	134,2	141,7	74,2	71,4	76
poriënvolume (ml)	0,493294	0,486239	0,481132	0,464986	0,481579
poriënvolume proef 1	0,493294				
poriënvolume proef 2	0,486239				
poriënvolume proef 3	0,481132				
poriënvolume proef 4	0,464986				
poriënvolume proef 5	0,481579				
gemiddelde	0,481446				
$C_{\text{max}}$ (%) rust	51,85542				
Hoogte zand rust (cm)	79,5				
Hoogte water (cm)	139,5				
Netto hoogte zand (cm)	41,22506				
Concentratie $T=0$ s (%)	51,85542				
Hoogte zand $T=1,30$ s (cm)	69,4				
Concentratie $T=1,30$ s (%)	59,4021				
Hoogte zand $T=1,03$ s (cm)	68,8				
Concentratie $T=1,03$ s (%)	59,92014				

Tabel D.2

Bepaling poriënvolume  $D_{50}=160 \mu\text{m}$

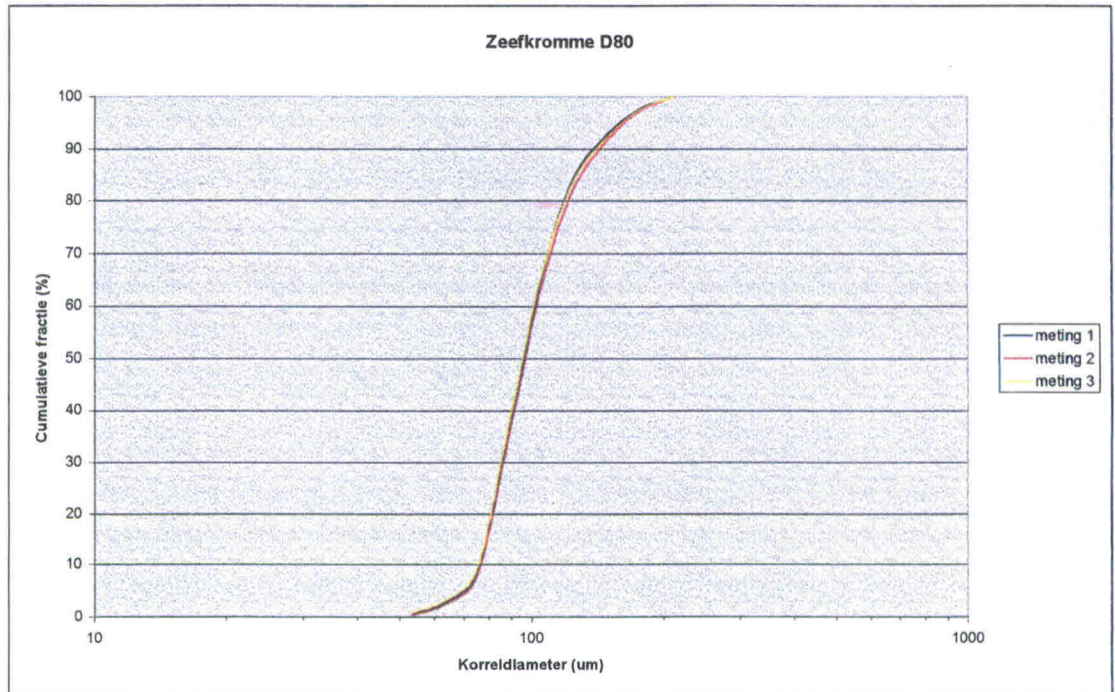
### D3 BEPALING PORIËNVOLUME $D_{50}=270 \mu\text{M}$

bepaling poriënvolume $D_{50}=270 \mu\text{m}$	proef 1	proef 2	proef 3	proef 4	proef 5
inhoud voor toevoegen zand (ml)	121,5	106,5	134	123,5	128
inhoud na toevoegen zand (ml)	191,5	190,5	203	183,7	193,7
volume zand (ml)	70	84	69	60,2	65,7
volume zand mengsel na bezinken (ml)	128	146	124	107,7	122
poriënvolume (-)	0,453125	0,424658	0,443548	0,44104	0,461475
poriënvolume proef 1	0,453125				
poriënvolume proef 2	0,424658				
poriënvolume proef 3	0,443548				
poriënvolume proef 4	0,44104				
poriënvolume proef 5	0,461475				
gemiddelde poriënvolume D270	0,444769				
$C_{\text{max}}$ (%) rust	55,52307				
kolom					
Hoogte zand rust (cm)	82				
Hoogte water (cm)	130,6				
Netto hoogte zand (cm)	45,52892				
Concentratie $T=0$ s (%)	55,52307				
Hoogte zand $T=1,30$ s (cm)	75,4				
Concentratie $T=1,30$ s (%)	60,38318				
Hoogte zand $T=1,03$ s (cm)	75,2				
Concentratie $T=1,03$ s (%)	60,54378				

Tabel D.3

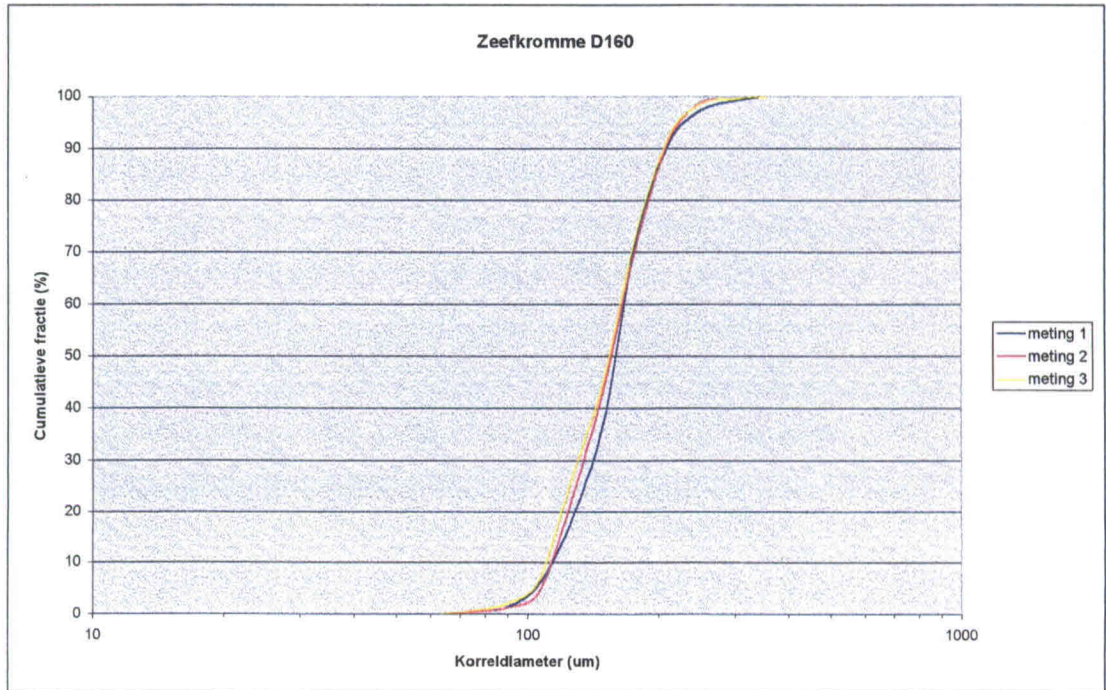
Bepaling poriënvolume  $D_{50}=270 \mu\text{m}$

## D4 ZEEFKROMME $D_{50}=80 \mu\text{M}$



Figuur D.1  
Zeefkromme  $D_{50}=80 \mu\text{m}$

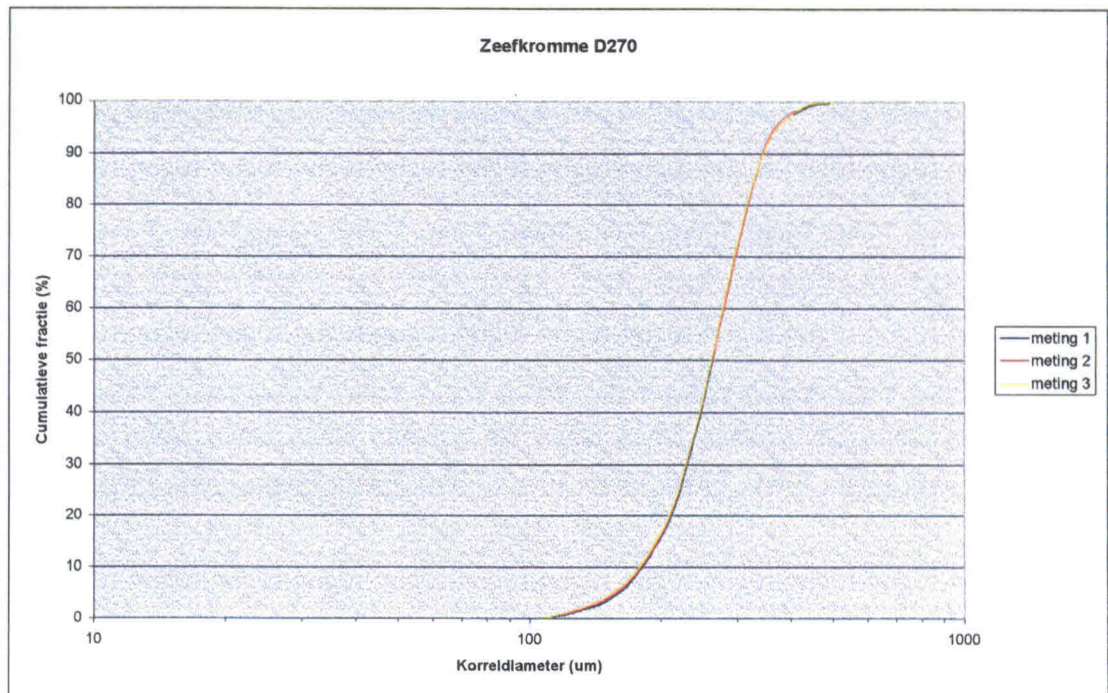
## D5 ZEEFKROMME $D_{50}=160 \mu\text{M}$



Figuur D.2  
Zeefkromme  $D_{50}=160 \mu\text{m}$



## D6 ZEEFKROMME $D_{50}=270 \mu\text{M}$



Figuur D.3  
Zeefkromme  $D_{50}=270 \mu\text{m}$

## D7 MEETPLAN PROEVEN UNIFORM ZAND

In de onderstaande tabellen is het meetplan van de uitgevoerde proeven opgenomen, bij het bepalen van de proefnummers is er gebruik gemaakt van de parameters  $e$  en  $T$ .

Hierbij geeft  $T$  de stand van het klokje op de aandrijfmotor weer, hieruit is de frequentie van de kolom af te leiden. Dit is in de derde kolom terug te vinden waar de periode in seconden is vermeld. In deze kolom is ook de waarde van  $d\text{Alfa}$  terug te vinden die af te leiden is uit de waarde van  $e$ .

### Hoogte metingen met concentratiemeters 1-12 (D80 en D160)

proefnummer	korrelgrootte	turbulentieniveau	concentratie
D80,1-12,10%,T=0	D=80 mu	T=0	10 %
D80,1-12,10%,T=8,e=8.5	D=80 mu	T=1,66s, dAlfa=85,3°	10 %
D80,1-12,10%,T=10,e=7	D=80 mu	T=1,30s, dAlfa=99,5°	10 %
D80,1-12,10%,T=12,e=7	D=80 mu	T=1,03s, dAlfa=99,5°	10 %
D80,1-12,10%,T=10,e=6	D=80 mu	T=1,30s, dAlfa=110,3°	10 %
D80,1-12,22.5%,T=0	D=80 mu	T=0	22,5 %
D80,1-12,22.5%,T=8,e=8.5	D=80 mu	T=1,66s, dAlfa=85,3°	22,5 %
D80,1-12,22.5%,T=10,e=7	D=80 mu	T=1,30s, dAlfa=99,5°	22,5 %
D80,1-12,22.5%,T=12,e=7	D=80 mu	T=1,03s, dAlfa=99,5°	22,5 %
D80,1-12,22.5%,T=12,e=7	D=80 mu	T=1,30s, dAlfa=110,3°	22,5 %
D80,1-12,30%,T=0	D=80 mu	T=0	30 %
D80,1-12,30%,T=8,e=8.5	D=80 mu	T=1,66s, dAlfa=85,3°	30 %
D80,1-12,30%,T=10,e=7	D=80 mu	T=1,30s, dAlfa=99,5°	30 %
D80,1-12,30%,T=12,e=7	D=80 mu	T=1,03s, dAlfa=99,5°	30 %
D80,1-12,30%,T=12,e=7	D=80 mu	T=1,30s, dAlfa=110,3°	30 %
D80,1-12,45%,T=0	D=80 mu	T=0	45 %
D80,1-12,45%,T=8,e=8.5	D=80 mu	T=1,66s, dAlfa=85,3°	45 %
D80,1-12,45%,T=10,e=7	D=80 mu	T=1,30s, dAlfa=99,5°	45 %
D80,1-12,45%,T=12,e=7	D=80 mu	T=1,03s, dAlfa=99,5°	45 %
D80,1-12,45%,T=10,e=6	D=80 mu	T=1,30s, dAlfa=110,3°	45 %
D160,1-12,10%,T=0	D=160 mu	T=0	10 %
D160,1-12,10%,T=10,e=7	D=160 mu	T=1,30s, dAlfa=99,5°	10 %
D160,1-12,10%,T=12,e=7	D=160 mu	T=1,30s, dAlfa=110,3°	10 %
D160,1-12,10%,T=10,e=6	D=160 mu	T=1,03s, dAlfa=99,5°	10 %
D160,1-12,10%,T=12,e=6	D=160 mu	T=1,03s, dAlfa=110,3°	10 %
D160,1-12,22.5%,T=0	D=160 mu	T=0	22,5 %
D160,1-12,22.5%,T=10,e=7	D=160 mu	T=1,30s, dAlfa=99,5°	22,5 %
D160,1-12,22.5%,T=12,e=7	D=160 mu	T=1,30s, dAlfa=110,3°	22,5 %
D160,1-12,22.5%,T=10,e=6	D=160 mu	T=1,03s, dAlfa=99,5°	22,5 %
D160,1-12,22.5%,T=12,e=6	D=160 mu	T=1,03s, dAlfa=110,3°	22,5 %
D160,1-12,30%,T=0	D=160 mu	T=0	30 %
D160,1-12,30%,T=10,e=7	D=160 mu	T=1,30s, dAlfa=99,5°	30 %
D160,1-12,30%,T=12,e=7	D=160 mu	T=1,30s, dAlfa=110,3°	30 %
D160,1-12,30%,T=10,e=6	D=160 mu	T=1,03s, dAlfa=99,5°	30 %
D160,1-12,30%,T=12,e=6	D=160 mu	T=1,03s, dAlfa=110,3°	30 %
D160,1-12,45%,T=0	D=160 mu	T=0	45 %
D160,1-12,45%,T=10,e=7	D=160 mu	T=1,30s, dAlfa=99,5°	45 %
D160,1-12,45%,T=12,e=7	D=160 mu	T=1,30s, dAlfa=110,3°	45 %
D160,1-12,45%,T=10,e=6	D=160 mu	T=1,03s, dAlfa=99,5°	45 %
D160,1-12,45%,T=12,e=6	D=160 mu	T=1,03s, dAlfa=110,3°	45 %

### Hoogte metingen met concentratiemeters 1-12 (D270)

proefnummer	korrelgrootte	turbulentieniveau	concentratie
D270,1-12,10%,T=0	D=270 $\mu$	T=0	10 %
D270,1-12,10%,T=10,e=7	D=270 $\mu$	T=1,30s, dAlfa=99,5°	10 %
D270,1-12,10%,T=12,e=7	D=270 $\mu$	T=1,30s, dAlfa=110,3°	10 %
D270,1-12,10%,T=10,e=6	D=270 $\mu$	T=1,03s, dAlfa=99,5°	10 %
D270,1-12,10%,T=12,e=6	D=270 $\mu$	T=1,03s, dAlfa=110,3°	10 %
D270,1-12,22.5%,T=0	D=270 $\mu$	T=0	22,5 %
D270,1-12,22.5%,T=10,e=7	D=270 $\mu$	T=1,30s, dAlfa=99,5°	22,5 %
D270,1-12,22.5%,T=12,e=7	D=270 $\mu$	T=1,30s, dAlfa=110,3°	22,5 %
D270,1-12,22.5%,T=10,e=6	D=270 $\mu$	T=1,03s, dAlfa=99,5°	22,5 %
D270,1-12,22.5%,T=12,e=6	D=270 $\mu$	T=1,03s, dAlfa=110,3°	22,5 %
D270,1-12,30%,T=0	D=270 $\mu$	T=0	30 %
D270,1-12,30%,T=10,e=7	D=270 $\mu$	T=1,30s, dAlfa=99,5°	30 %
D270,1-12,30%,T=12,e=7	D=270 $\mu$	T=1,30s, dAlfa=110,3°	30 %
D270,1-12,30%,T=10,e=6	D=270 $\mu$	T=1,03s, dAlfa=99,5°	30 %
D270,1-12,30%,T=12,e=6	D=270 $\mu$	T=1,03s, dAlfa=110,3°	30 %
D270,1-12,45%,T=0	D=270 $\mu$	T=0	45 %
D270,1-12,45%,T=10,e=7	D=270 $\mu$	T=1,30s, dAlfa=99,5°	45 %
D270,1-12,45%,T=12,e=7	D=270 $\mu$	T=1,30s, dAlfa=110,3°	45 %
D270,1-12,45%,T=10,e=6	D=270 $\mu$	T=1,03s, dAlfa=99,5°	45 %
D270,1-12,45%,T=12,e=6	D=270 $\mu$	T=1,03s, dAlfa=110,3°	45 %

### Breedte metingen met concentratiemeters a-h (D80,D160 en D270)

proefnummer	korrelgrootte	turbulentieniveau	concentratie
D80,a-h,22.5%,T=10,e=7	D=80 $\mu$	T=1,30s, dAlfa=99,5°	22,5 %
D160,a-h,30%,T=12,e=6	D=160 $\mu$	T=1,03s, dAlfa=110,3°	30 %
D270,a-h,10%,T=10,e=7	D=270 $\mu$	T=1,30s, dAlfa=99,5°	10 %
D270,a-h,10%,T=12,e=6	D=270 $\mu$	T=1,03s, dAlfa=110,3°	10 %
D270,a-h,22.5%,T=10,e=7	D=270 $\mu$	T=1,30s, dAlfa=99,5°	22,5 %
D270,a-h,22.5%,T=12,e=6	D=270 $\mu$	T=1,03s, dAlfa=110,3°	22,5 %

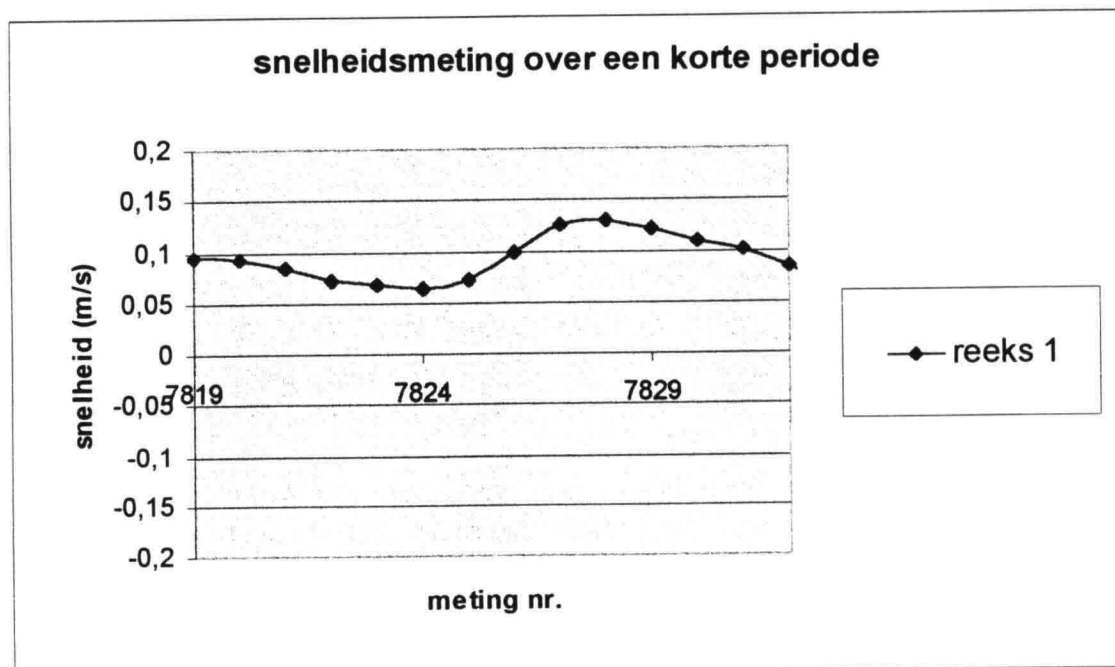
### Controlemetingen met concentratiemeters 1-12

proefnummer	korrelgrootte	turbulentieniveau	concentratie
D270,1-12,30%,T=10,e=7	D=270 $\mu$	T=1,30s, dAlfa=99,5°	30 %
D270,1-12,30%,T=12,e=6	D=270 $\mu$	T=1,03s, dAlfa=110,3°	30 %

Tabel D.4

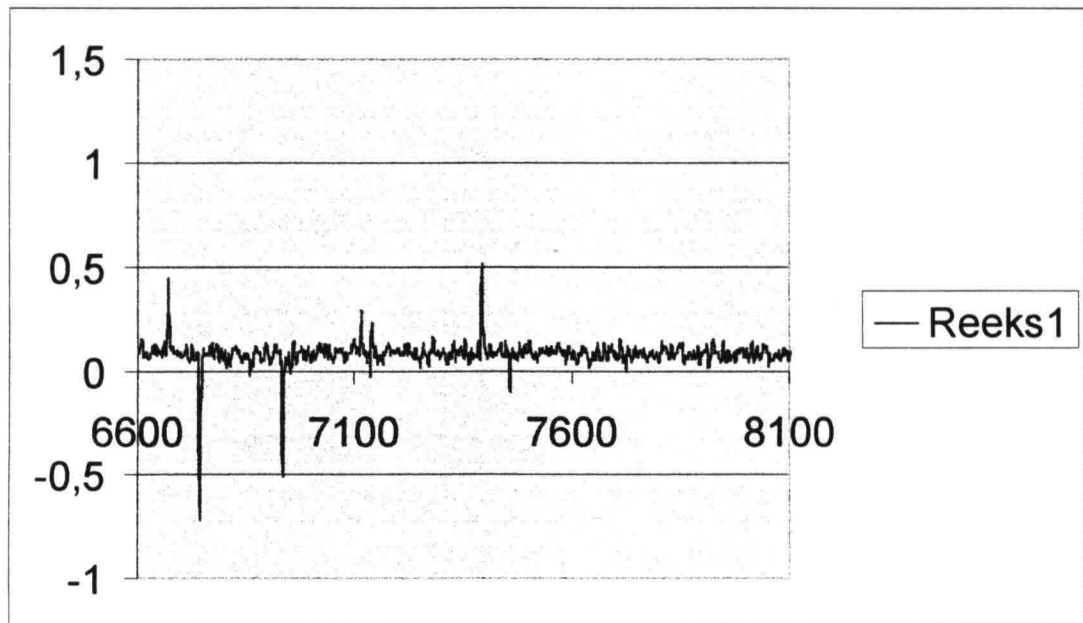
Meetplan proeven uniform zand

## D8 AANTAL METINGEN PER PERIODE



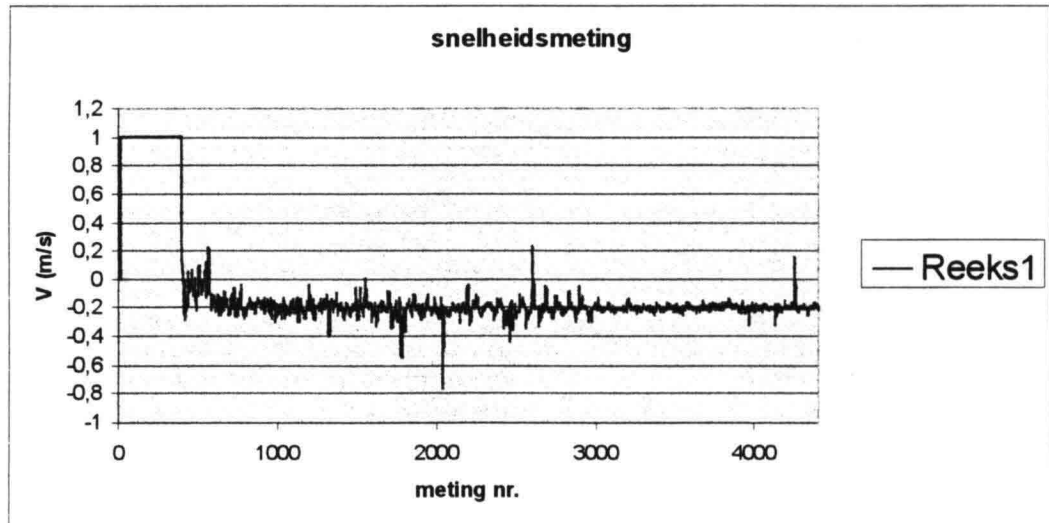
Figuur D.4  
Aantal metingen per periode

## D9 AFWIJKINGEN IN SNELHEIDSMETINGEN



Figuur D.5  
Afwijkingen in snelheidsmetingen

## D10 TRAJECTEN GEDURENDE EEN SNELHEIDSMETING

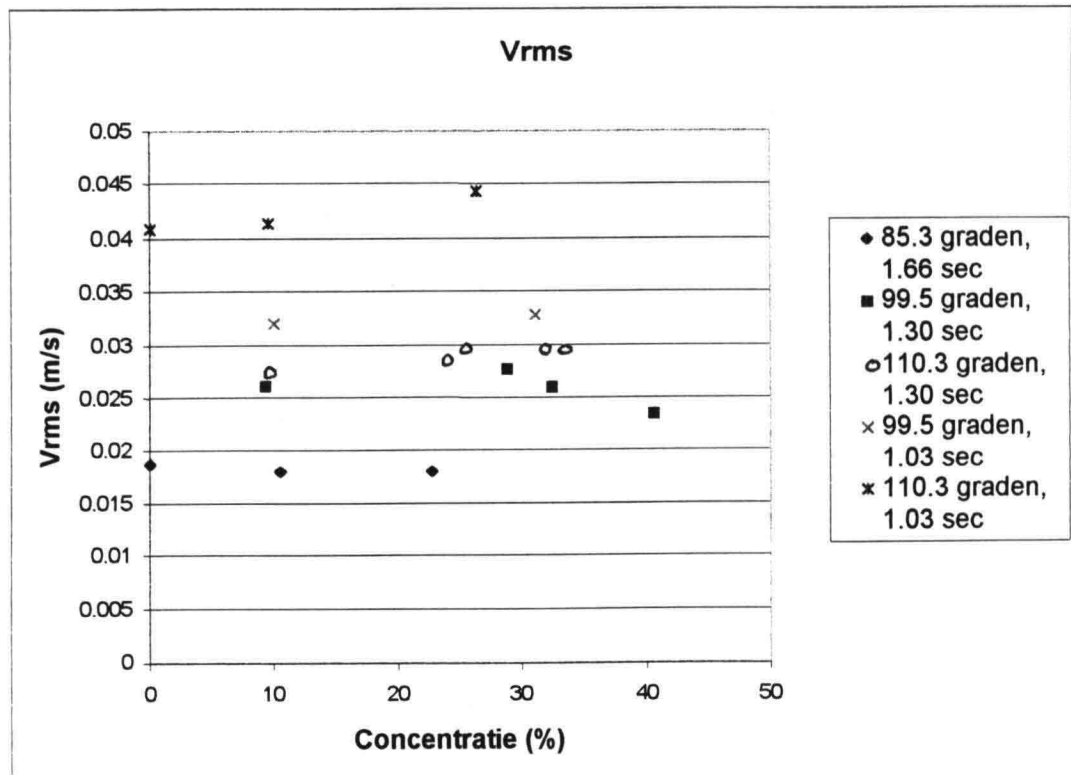


Figuur D.6  
Trajecten gedurende een snelheidsmeting

## D11 $V_{RMS}$

proef nr.	$d\alpha$ (°)	Periode (s)	Concentr (%)	$V_{rms}$ (m/s)
water T8,e8.5	85,3	1,66	0	0,182021
water T12,e6	110,3	1,03	0	0,040987
d80,10.52,T8,e8.5	85,3	1,66	10,52	0,018071
d80,22.77,T8,e8.5	85,3	1,66	22,77	0,017949
d80,9.21,T10,e7	99,5	1,30	9,21	0,026122
d270,28.71,T10,e7	99,5	1,30	28,71	0,027726
d80,32.36,T10,e7	99,5	1,30	32,36	0,026018
d80,40.63,T10,e7	99,5	1,30	40,63	0,023368
d80,9.47,T10,e6	110,3	1,30	9,47	0,027544
d80,23.39,T10,e6	110,3	1,30	23,99	0,028499
d270,25.50,T10,e6	110,3	1,30	25,50	0,029575
d270,31.72,T10,e6	110,3	1,30	31,72	0,029445
d80,33.36,T10,e6	110,3	1,30	33,36	0,029405
d80,9.93,T12,e7	99,5	1,03	9,93	0,032066
d270,31.11,T12,e7	99,5	1,03	31,11	0,032797
d270ah,9.51,T12,e6	110,3	1,03	9,51	0,041417
d270,26.40,T12,e6	110,3	1,03	26,40	0,044224

Tabel D.5  
 $V_{rms}$  volgens meting



Figuur D.7  
 $V_{rms}$  volgens meting

## D12 IJKFORMULES VAN DE CONCENTRATIEMETERS

Concentratiemeter (nr.)	Formule C=0 %	Formule C=55,68 %
1	$V = 0,194 T + 1,7015$	$V = 0,064 T - 2,0609$
2	$V = 0,1977 T + 1,1648$	$V = 0,0823 T - 2,6798$
3	$V = 0,1889 T + 1,2516$	$V = 0,0658 T - 2,315$
4	$V = 0,1873 T + 1,5382$	$V = 0,06 T - 2,2513$
5	$V = 0,2036 T + 1,6124$	$V = 0,0705 T - 2,1738$
6	$V = 0,1989 T + 1,3186$	$V = 0,066 T - 2,3887$
7	$V = 0,2032 T + 1,4275$	$V = 0,0688 T - 2,3002$
8	$V = 0,2087 T + 1,3252$	$V = 0,0688 T - 2,3857$
9	$V = 0,1997 T + 1,1468$	$V = 0,0604 T - 2,3464$
10	$V = 0,199 T + 1,2782$	$V = 0,0699 T - 2,5167$
11	$V = 0,192 T + 1,5378$	$V = 0,073 T - 2,5946$
12	$V = 0,1992 T + 1,3041$	$V = 0,0588 T - 2,156$
A	$V = 0,2059 T + 1,1604$	$V = 0,0654 T - 2,1268$
B	$V = 0,1948 T + 0,3511$	$V = 0,0753 T - 2,5087$
C	$V = 0,2084 T + 0,8687$	$V = 0,0743 T - 2,5095$
D	$V = 0,2106 T + 0,8735$	$V = 0,0773 T - 2,7589$
E	$V = 0,2353 T + 0,9406$	$V = 0,0756 T - 2,2038$
F	$V = 0,216 T + 1,2422$	$V = 0,0735 T - 2,3276$
G	$V = 0,2226 T + 1,0188$	$V = 0,0843 T - 2,5283$
H	$V = 0,2158 T + 1,0113$	$V = 0,0728 T - 2,2427$

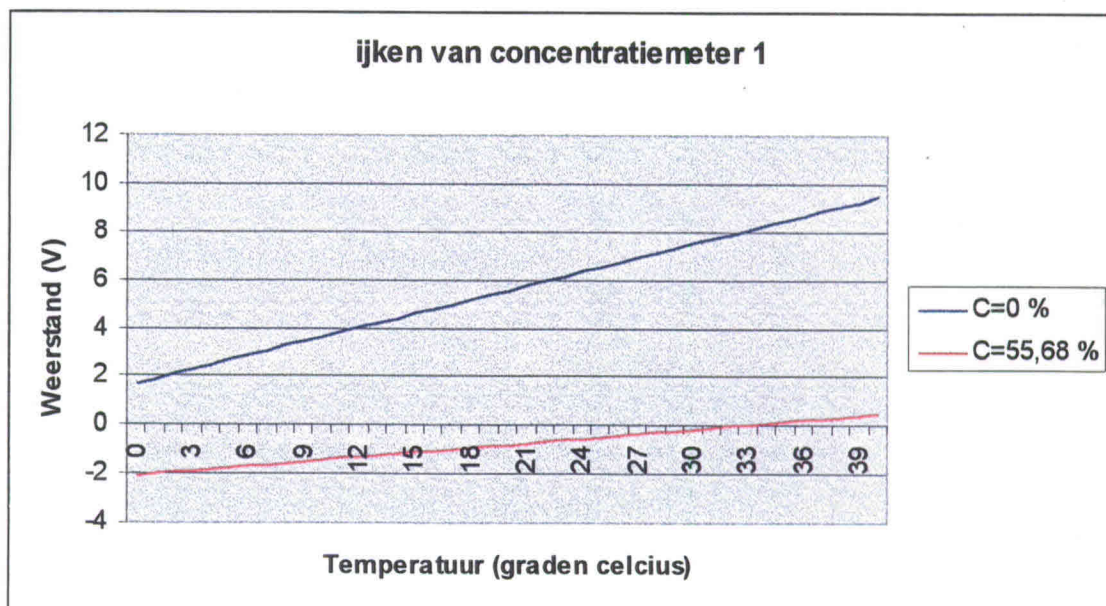
Tabel D.6  
 Formules voor C=0 % en C=55,68 %



Concentratie meter (nr.)	IJKformule
1	$C = ((0,194 T + 1,7015 - V) / ((0,194 T + 1,7015) - (0,064 T - 2,0609))) * 55,68$
2	$C = ((0,1977 T + 1,1648 - V) / ((0,1977 T + 1,1648) - (0,0823 T - 2,6798))) * 55,68$
3	$C = ((0,1889 T + 1,2516 - V) / ((0,1889 T + 1,2516) - (0,0658 T - 2,315))) * 55,68$
4	$C = ((0,1873 T + 1,5382 - V) / ((0,1873 T + 1,5382) - (0,06 T - 2,2513))) * 55,68$
5	$C = ((0,2036 T + 1,6124 - V) / ((0,2036 T + 1,6124) - (0,0705 T - 2,1738))) * 55,68$
6	$C = ((0,1989 T + 1,3186 - V) / ((0,1989 T + 1,3186) - (0,066 T - 2,3887))) * 55,68$
7	$C = ((0,2032 T + 1,4275 - V) / ((0,2032 T + 1,4275) - (0,0688 T - 2,3002))) * 55,68$
8	$C = ((0,2087 T + 1,3252 - V) / ((0,2087 T + 1,3252) - (0,0688 T - 2,3857))) * 55,68$
9	$C = ((0,1997 T + 1,1468 - V) / ((0,1997 T + 1,1468) - (0,0604 T - 2,3464))) * 55,68$
10	$C = ((0,199 T + 1,2782 - V) / ((0,199 T + 1,2782) - (0,0699 T - 2,5167))) * 55,68$
11	$C = ((0,192 T + 1,5378 - V) / ((0,192 T + 1,5378) - (0,073 T - 2,5946))) * 55,68$
12	$C = ((0,1992 T + 1,3041 - V) / ((0,1992 T + 1,3041) - (0,0588 T - 2,156))) * 55,68$
A	$C = ((0,2059 T + 1,1604 - V) / ((0,2059 T + 1,1604) - (0,0654 T - 2,1268))) * 55,68$
B	$C = ((0,1948 T + 0,3511 - V) / ((0,1948 T + 0,3511) - (0,0753 T - 2,5087))) * 55,68$
C	$C = ((0,2084 T + 0,8687 - V) / ((0,2084 T + 0,8687) - (0,0743 T - 2,5095))) * 55,68$
D	$C = ((0,2106 T + 0,8735 - V) / ((0,2106 T + 0,8735) - (0,0773 T - 2,7589))) * 55,68$
E	$C = ((0,2353 T + 0,9406 - V) / ((0,2353 T + 0,9406) - (0,0756 T - 2,2038))) * 55,68$
F	$C = ((0,216 T + 1,2422 - V) / ((0,216 T + 1,2422) - (0,0735 T - 2,3276))) * 55,68$
G	$C = ((0,2226 T + 1,0188 - V) / ((0,2226 T + 1,0188) - (0,0843 T - 2,5283))) * 55,68$
H	$C = ((0,2158 T + 1,0113 - V) / ((0,2158 T + 1,0113) - (0,0728 T - 2,2427))) * 55,68$

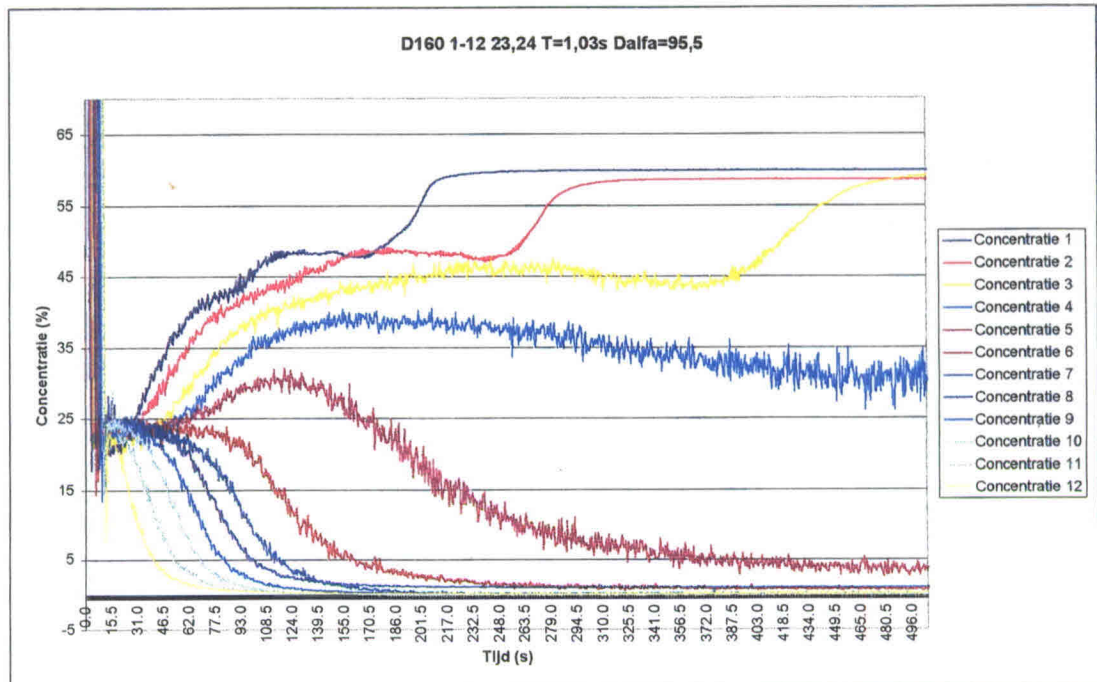
Tabel D.7  
 IJKformules van de verschillende concentratiemeters

## D13 IJKEN VAN CONCENTRATIEMETER 1

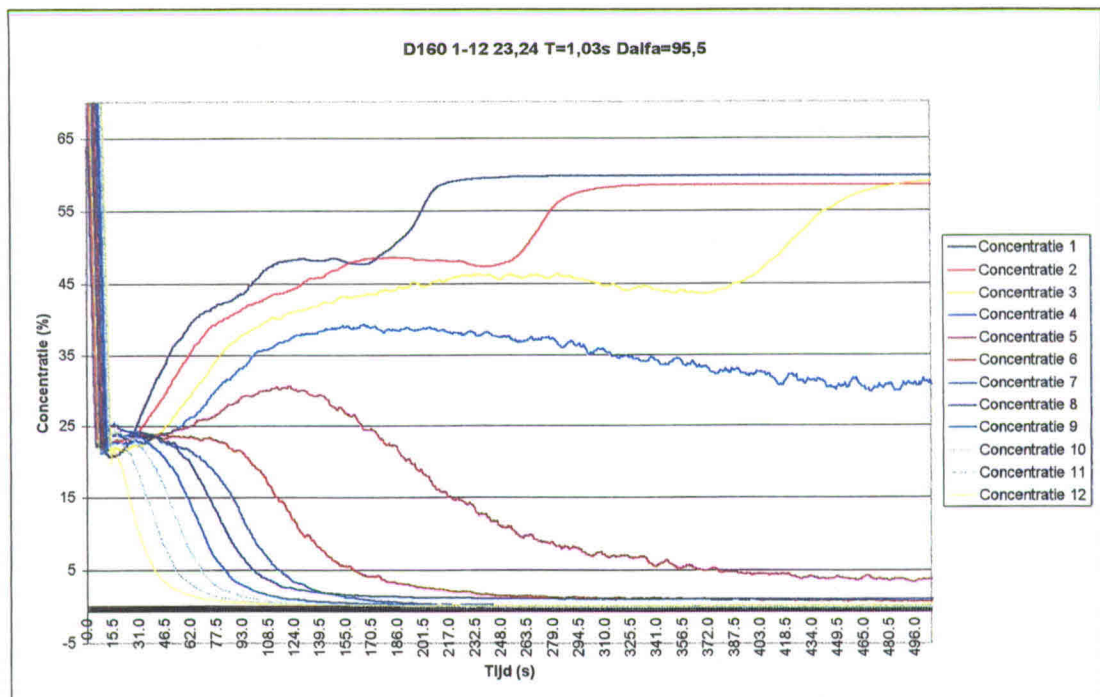


Figuur D.8  
IJken van concentratiemeter 1

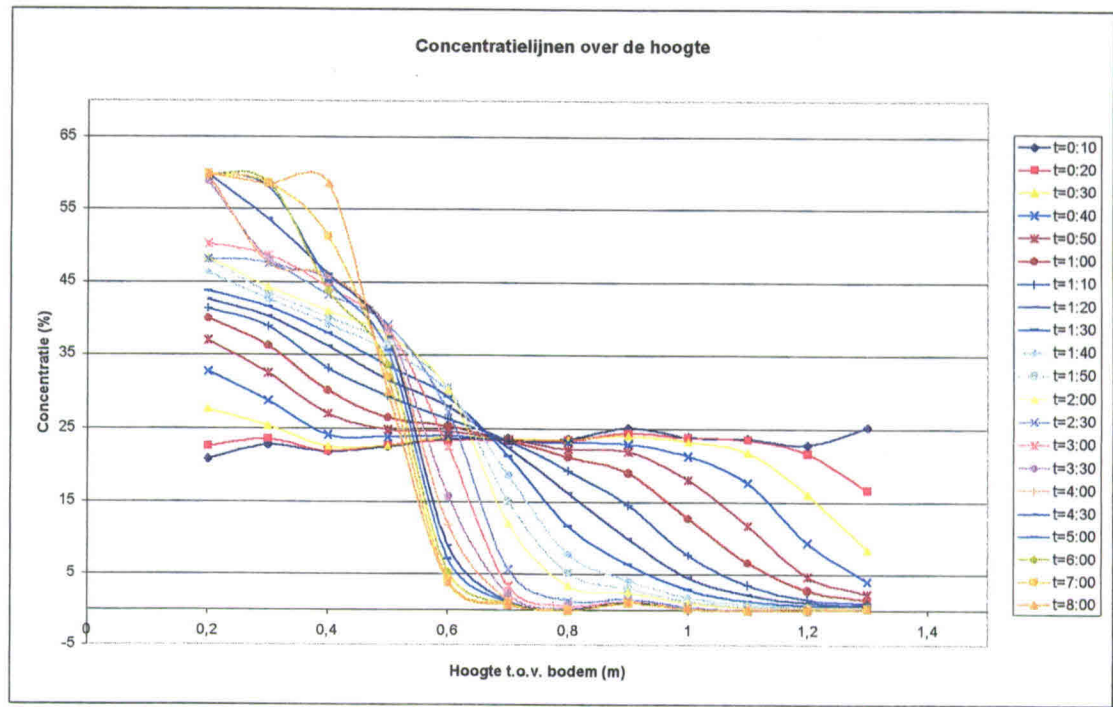
## D14 CONCENTRATIEVERLOOP OVER HOOGTE EN TIJD



Figuur D.9  
Concentratieverloop in de tijd

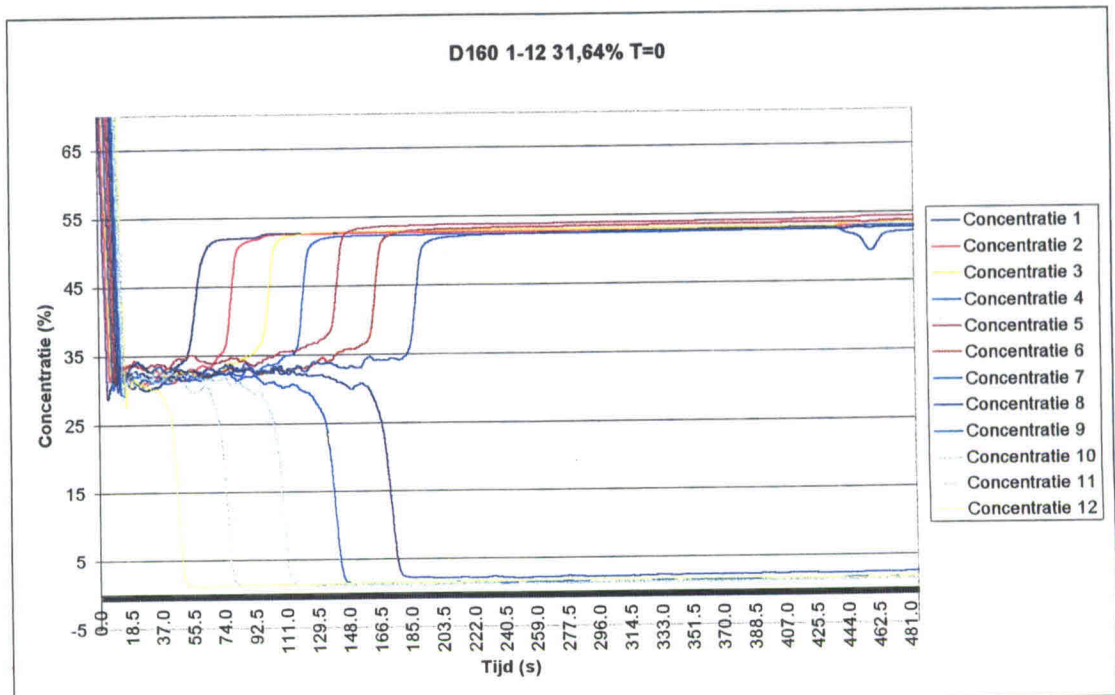


Figuur D.10  
Gefilterde concentratieverlopen

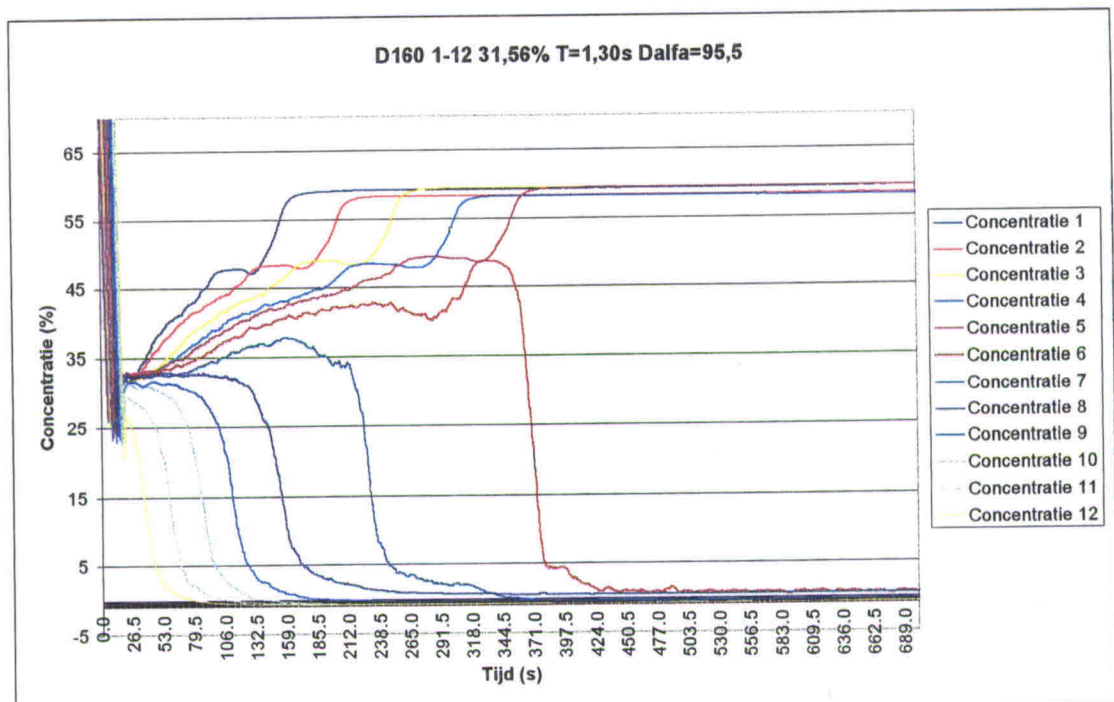


Figuur D.11  
Concentratieverloop over de hoogte

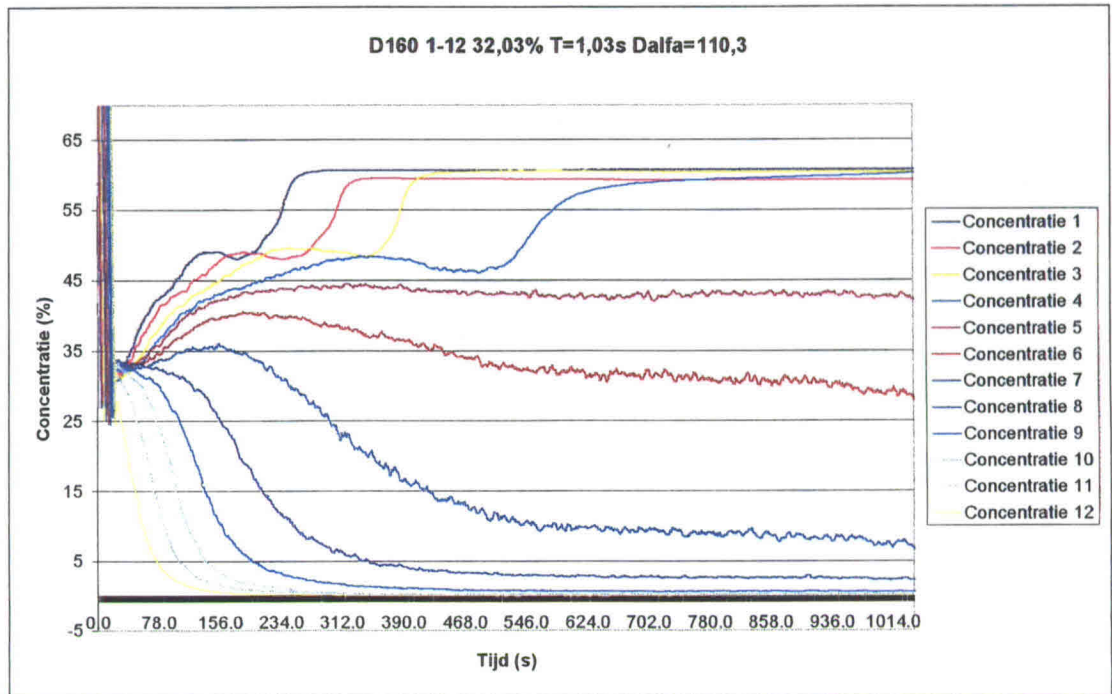
## D15 INVLOED VAN DE TURBULENTIE OP HET CONCENTRATIEVERLOOP IN DE TIJD



Figuur D.12  
Concentratieverloop in de tijd zonder turbulentie



Figuur D.13  
Concentratieverloop in de tijd bij een relatief laag turbulentieniveau.



Figuur D.14  
Concentratieverloop in de tijd bij een relatief hoog turbulentieniveau.

## D16 BEPALING VALSNELHEDEN

Uit de datareeksen zijn voor de verschillende zandfracties de bezinksnelheden van de  $D_{50}$  te bepalen. Zo is bijvoorbeeld met behulp van de onderstaande figuur de bezinksnelheid van zand met een  $D_{50}$  van  $156,71 \mu\text{m}$  te berekenen.

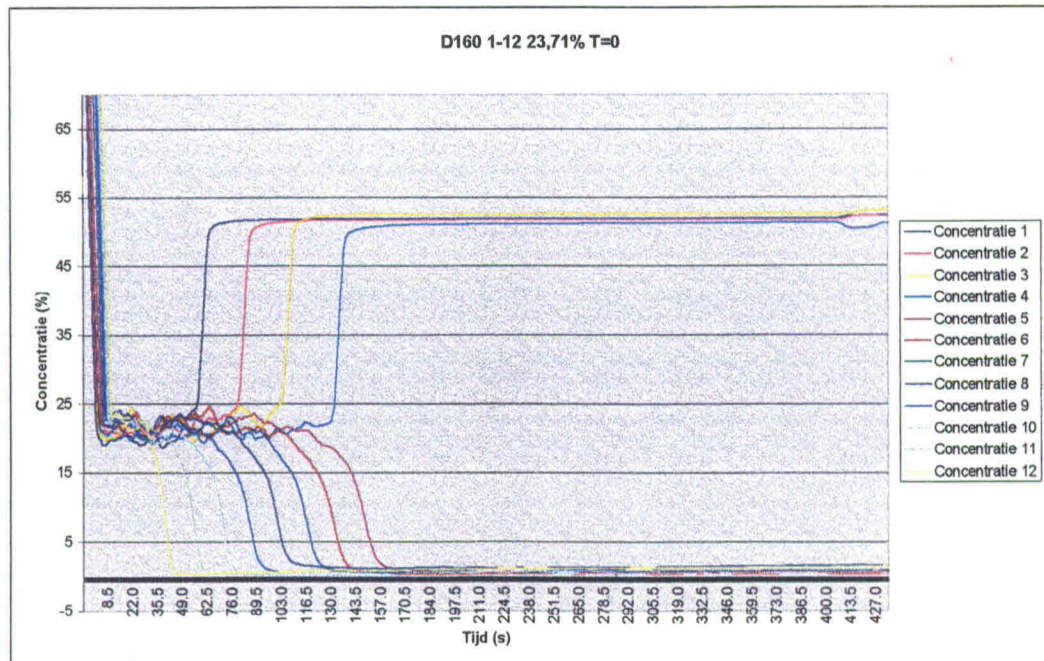
De berekening gaat als volgt:

- Aflezen beginconcentratie, deze is voor alle proeven bepaald.
- Tijdstip aflezen waarbij concentratiemeter 12 een concentratie aangeeft die half zo groot is als de beginconcentratie. Concentratiemeter 12 bevindt zich op 130 cm boven de onderzijde van de kolom (bijlage B2).
- Tijdstip aflezen waarop de onderste concentratiemeter die niet in zand dezelfde concentratie aangeeft. In dit geval is dat concentratiemeter 5, deze bevindt zich op 60 cm boven de bodem van de kolom.
- Berekenen van  $\Delta t$  en  $\Delta h$ .
- Hieruit  $w_s$  berekenen,  $w_s = \Delta h / \Delta t$

In dit geval is de beginconcentratie 23,71 %. Uit de datareeks (cd-rom ..) kan afgelezen worden dat na 37,50 seconden meter 12 een concentratie van ongeveer 11,86 % aangeeft. Meter 5 geeft dezelfde waarde na 144,75 seconden.

Hieruit volgt:

$$\begin{aligned}\Delta t &= 144,75 - 37,5 = 107,25 \text{ s} \\ \Delta h &= 130 - 60 = 70 \text{ cm} = 700 \text{ mm} \\ w_s &= 700 / 107,25 = 6,53 \text{ mm/s}\end{aligned}$$



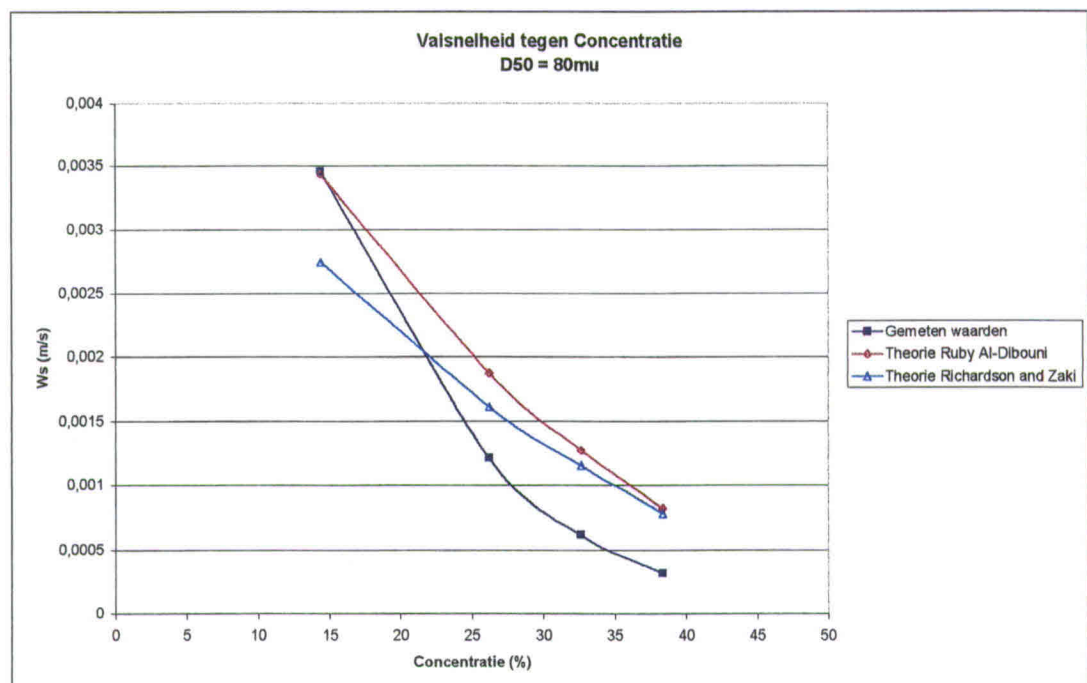
Figuur D.15  
Concentratieverloop in de tijd

Op identieke wijze zijn voor alle overige nulmetingen de valsnelheden bepaald. De uitkomsten zijn te vinden in de onderstaande tabel. Ook zijn in de tabel de waarden zoals die volgen uit de theorieën van Richardson and Zaki en Ruby en Al-Dibouni weergegeven.

D <sub>50</sub> (μm)	Concentratie (%)	w <sub>s</sub> volgens proeven (mm/s)	w <sub>s</sub> Richardson and Zaki (mm/s)	w <sub>s</sub> Ruby Al-Dibouni (mm/s)
96,56	14,37	3,458213	2,742	3,43825
96,56	26,16	1,208459	1,612	1,87039
96,56	32,57	0,616523	1,152	1,27433
96,56	38,31	0,312647	0,782	0,8251
156,71	14,65	10,48218	6,245	7,81513
156,71	23,71	6,526807	4,701	5,42822
156,71	31,64	3,155819	3,199	3,43969
156,71	43,8	0,83682	1,202	1,17522
263,50	14,73	21,276596	16,812	19,38544
263,50	23,96	13,445378	14,763	15,36398
263,50	32,89	5,743001	7,948	7,97563
263,50	39,16	3,355705	5,292	5,06692
263,50	39,39	4,056795	5,923	5,62714
263,50	43,75	4,024145	5,361	4,8904

Tabel D.8

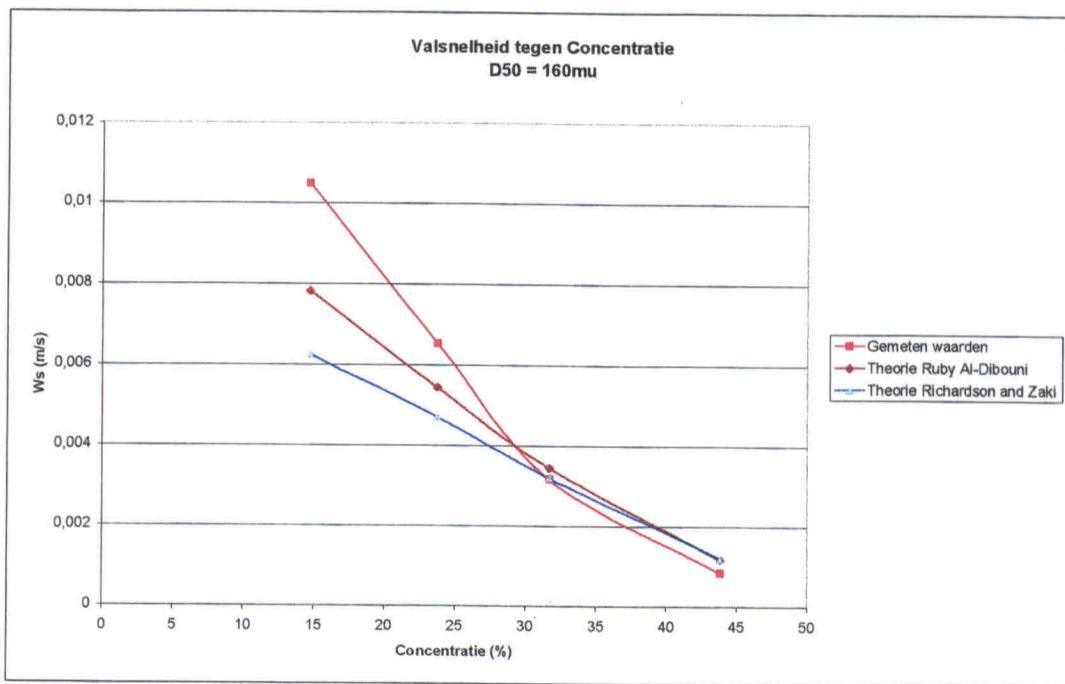
Valsnelheden volgens proeven en theorie



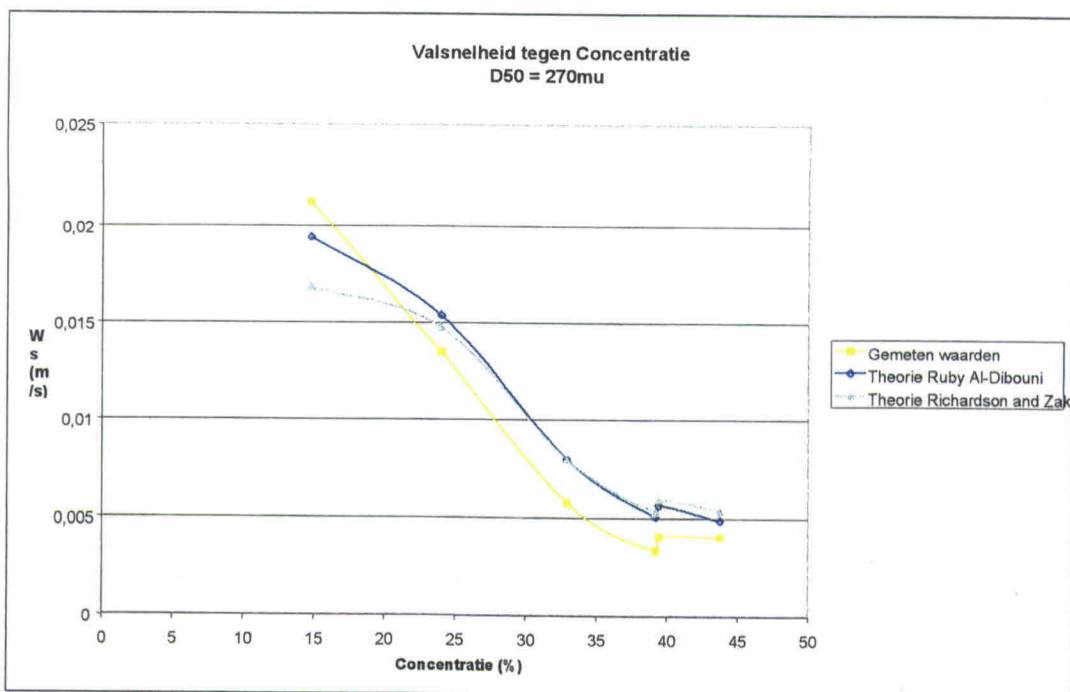
Figuur D.16

Valsnelheden volgens proeven en theorie





Figuur D.17  
 Valsnelheden volgens proeven en theorie



Figuur D.18  
 Valsnelheden volgens proeven en theorie

## D17 BEREKENING VAN EPSILON UIT HET CONCENTRATIEPROFIEL (EVENWICHTSTOESTAND)

Epsilon kan berekend worden op de hoogtes 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.95, 1.05, 1.15 en 1.25 meter precies tussen twee concentratiemeters in.

De concentratie op deze hoogte is berekend als het gemiddelde van concentraties in de onderstaande en bovenliggende punten.

Zo is bijvoorbeeld de concentratie op 0.25 meter:

$$C(0.25) = \frac{C(0.20) + C(0.3)}{2}$$

De concentratiegradiënt kan berekend worden door het concentratieverschil tussen het bovenliggende en onderliggende punt te delen door de afstand tussen deze punten.

Zo is bijvoorbeeld de concentratiegradiënt op 0.25 meter:

$$\frac{\partial C}{\partial z}(0.25) = \frac{C(0.30) - C(0.20)}{0.30 - 0.20}$$

Met de formules 4.52, 4.61 en 4.62 kan  $w_s$  als functie voor verschillende zandsoorten berekend worden. Indien deze waarde bekend is kan ook  $\varepsilon$  eenvoudig berekend worden.

In onderstaande tabellen zijn deze berekeningen uitgevoerd voor een willekeurige proef.

Hoogte (m)	Concentratie (%) in evenwichtstoestand t=25:00
0.2	38,8776
0.3	38,04472
0.4	35,2397
0.5	32,36551
0.6	28,74513
0.7	23,21043
0.8	16,78582
0.9	10,76102
1.0	5,98871
1.1	2,565764
1.2	0,795039
1.3	-0,36641

Tabel D.9  
Concentratieprofiel in evenwichtstoestand na 25 minuten

Hoogte (m)	Conc. (%)	dC/dz (1/m)	w <sub>s</sub> (m/s)	ε (m <sup>2</sup> /s)
0.25	38,46116	0,08329	0,0007733	0,00351
0.35	36,64221	0,28050	0,0008918	0,00117
0.45	33,80260	0,28742	0,0011052	0,00130
0.55	30,55532	0,36204	0,0013972	0,00118
0.65	25,97778	0,55347	0,0019096	0,00090
0.75	19,99812	0,64246	0,0027931	0,00087
0.85	13,77342	0,60248	0,0040306	0,00092
0.95	8,37486	0,47723	0,0054258	0,00095
1.05	4,27724	0,34229	0,0067215	0,00084
1.15	1,68040	0,17707	0,0076624	0,00073
1.25	0,21432	0,11614	0,0082382	0,00015

Tabel D.10

Berekening van ε uit meetdata

Van het concentratieprofiel kan een polynoom opgesteld worden die de concentraties goed benadert. Dit is voor het bovenstaande concentratieprofiel gedaan.

Hieruit volgt de volgende vergelijking voor de concentratie als functie van de hoogte:

$$C(h) = -324,03 \cdot h^6 + 1297,5 \cdot h^5 - 1958,6 \cdot h^4 + 1443,3 \cdot h^3 - 599,02 \cdot h^2 + 115,55 \cdot h + 30,988$$

In onderstaande tabel zijn de concentraties berekend met het polynoom vergeleken met die gemeten tijdens de proeven. Ook is het verschil tussen beide uitgezet.

Hoogte (m)	Concentratie gemeten (%)	Concentratie polynoom (%)	Vershil (%)
0.2	38,8776	38,94430	0,0667
0.3	38,04472	37,76235	-0,2824
0.4	35,2397	35,55501	0,3153
0.5	32,36551	32,49191	0,1264
0.6	28,74513	28,36470	-0,3804
0.7	23,21043	23,09426	-0,1162
0.8	16,78582	17,00452	0,2187
0.9	10,76102	10,86299	0,1020
1.0	5,98871	5,68800	-0,3007
1.1	2,565764	2,32265	-0,2431
1.2	0,795039	0,77544	-0,0196
1.3	-0,36641	-0,67241	-0,3060

Tabel D.11

Concentraties gemeten en berekend met polynoom

De verschillen tussen de berekende waarden en de gemeten waarden zijn klein zodat het verantwoord lijkt om  $\varepsilon$  uit het polynoom te berekenen. De concentratiegradiënt kan dan berekend worden met onderstaande formule.

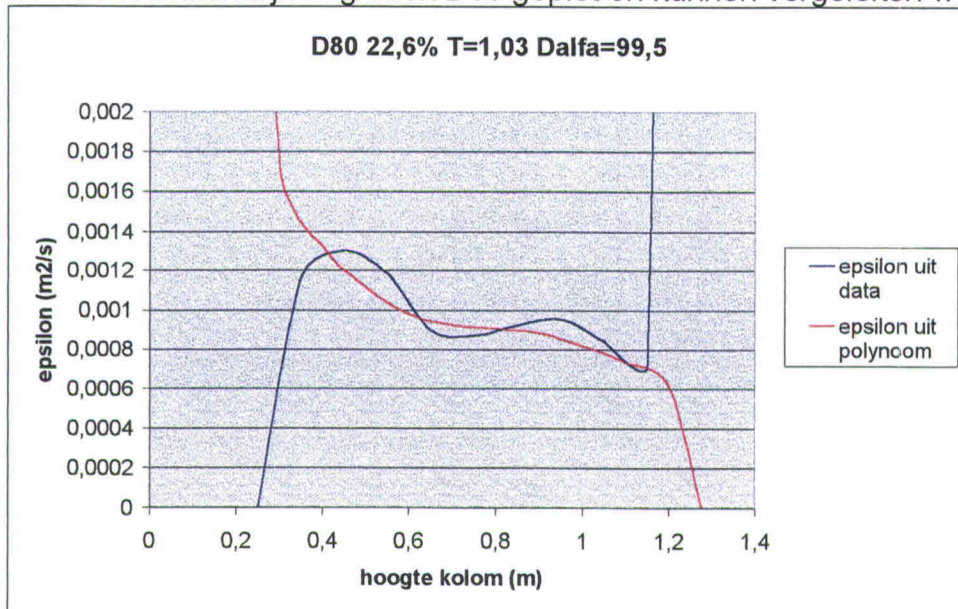
$$\frac{\partial C}{\partial z}(h) = -1944,18 \cdot h^5 + 6487,5 \cdot h^4 - 7834,4 \cdot h^3 + 4329,9 \cdot h^2 - 1198,04 \cdot h + 115,55$$

Indien de concentratiegradiënt bekend is kan  $w_s$  berekend worden met de formules 4.52, 4.61 en 4.62. Hieruit kan vervolgens  $\varepsilon$  berekend worden, dit is in onderstaande tabel gedaan.

Hoogte (m)	$\varepsilon$ (m <sup>2</sup> /s)
0.2	0,0076664
0.3	0,0017263
0.4	0,0013197
0.5	0,0011109
0.6	0,0009787
0.7	0,0009210
0.8	0,0009060
0.9	0,0008833
1.0	0,0008141
1.1	0,0007342
1.2	0,0006124
1.3	-0,0002216

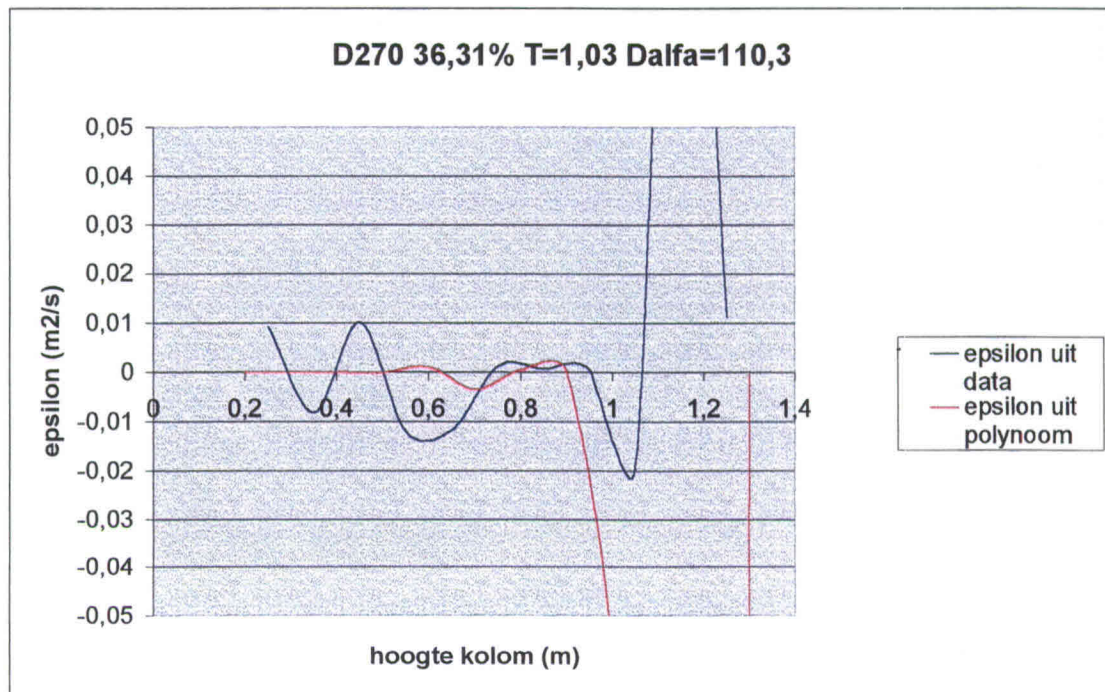
Tabel D.12  
 Berekening van  $\varepsilon$  uit polynoom

Beide resultaten zijn in grafiek D19 geplot en kunnen vergeleken worden.

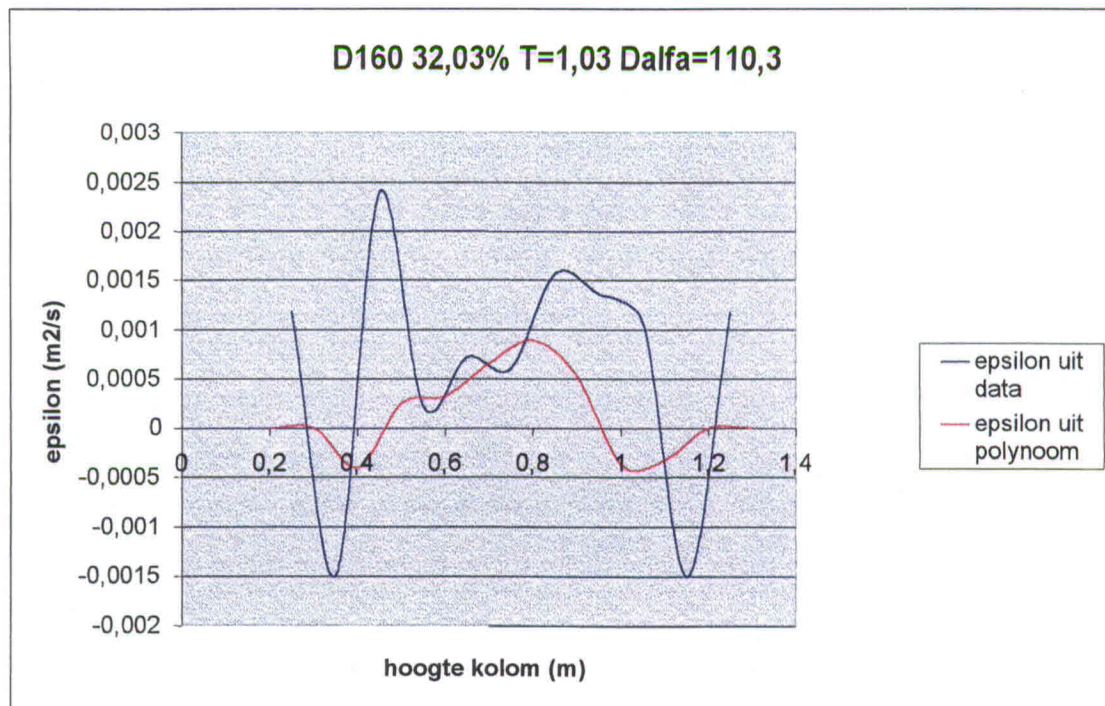


Figuur D.19  
 $\varepsilon$  als functie van h, uit data en polynoom.

Om aan te duiden dat de meetdata niet altijd tot even mooi data leiden zijn ook voor twee andere proeven de ' $\varepsilon$ ' tegen de hoogte in de kolom geplot.



Figuur D.20  
 $\varepsilon$  als functie van h, uit data en polynoom.



Figuur D.21  
 $\varepsilon$  als functie van h, uit data en polynoom.

Het concentratieprofiel kan ook benaderd worden door een e-macht, hierbij wordt het profiel gesplitst in twee delen, groter en kleiner dan  $0,5 \cdot C_{\max}$ . De concentraties kleiner dan  $0,5 \cdot C_{\max}$  ( $k < h < 1,5$ ) worden benaderd met een functie zoals de onderstaande:

$$C(h) = 0,5 \cdot C_{\max} \cdot e^{-\alpha(h-K)}$$

Hierin is:

- |            |   |     |
|------------|---|-----|
| h          | = Hoogte in de kolom                                      | [m] |
| $\alpha$   | = Constante die de steilheid van het profiel bepaalt      | [-] |
| k          | = Constante, hoogte waarvoor geldt $C=0,5 \cdot C_{\max}$ | [m] |
| $C_{\max}$ | = De maximale concentratie in het profiel                 | [-] |

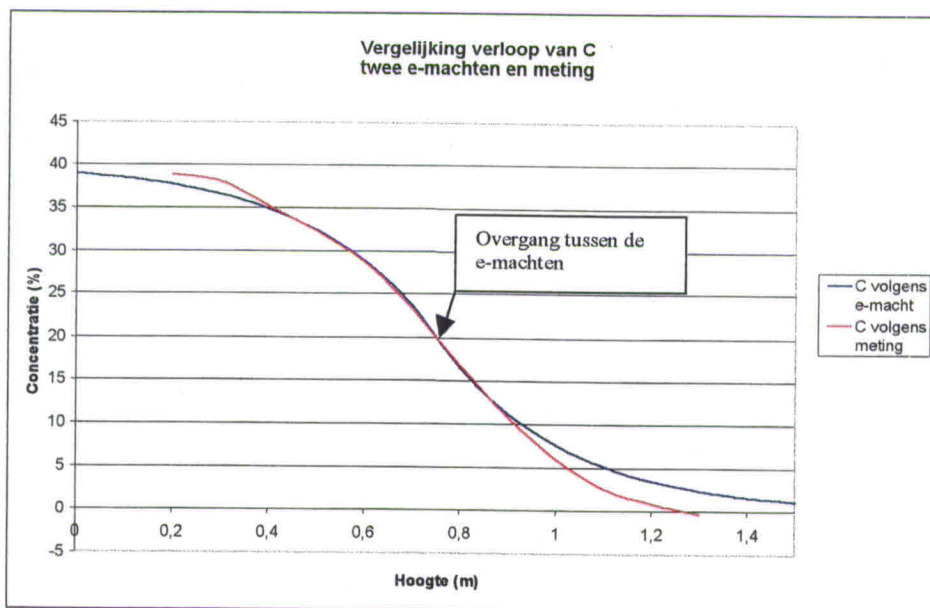
De concentraties groter dan  $0,5 \cdot C_{\max}$  ( $0 < h < k$ ) worden berekend door de waarden 180 graden te roteren rond de hoogte  $h=k$  en de concentratie  $C=0,5 \cdot C_{\max}$ , hieruit volgt voor dit bereik van h:

$$C(k-h) = C_{\max} - C(h)$$

Het evenwichtsprofiel uit tabel D16.1 blijkt het best door de e-macht te benaderen indien de volgende waarden worden gekozen.

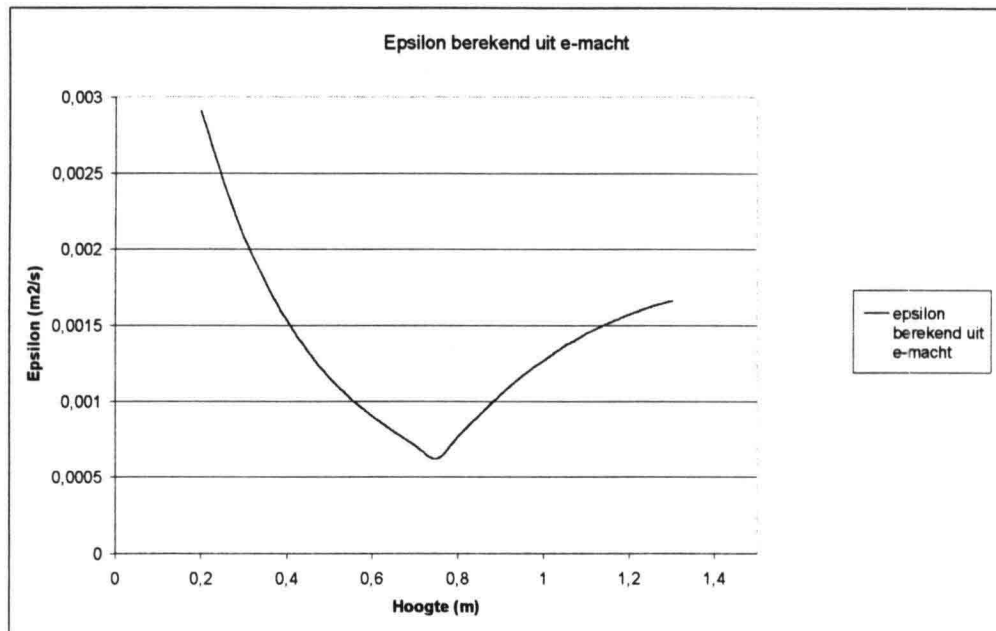
- |            |          |
|------------|----------|
| $\alpha$   | = 3,9    |
| k          | = 0,75 m |
| $C_{\max}$ | = 40 %   |

In de onderstaande grafiek zijn het concentratieverloop volgens tabel D.9 en volgens de e-macht getekend.



Figuur D.22  
 Concentratieverloop volgens twee e-machten en meting

Uit het concentratieprofiel berekend met een e-macht is  $\varepsilon$  te bepalen,  $\varepsilon$  is in de onderstaande grafiek als functie van de hoogte h geplot. Omdat het concentratieprofiel niet over het gehele bereik van h een goede benadering geeft mogen de resultaten van  $\varepsilon$  slechts vergeleken worden voor  $0,4 < h < 0,9$ .



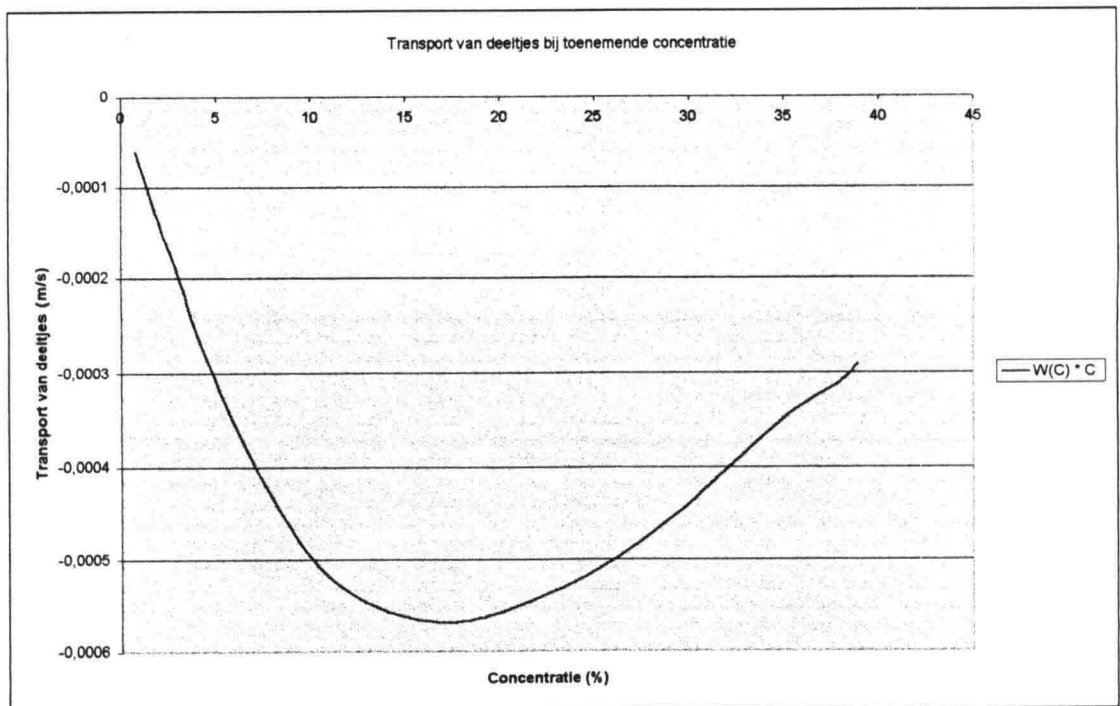
Figuur D.20  
Epsilon berekend uit een concentratieprofiel benadert door een e-macht

## D18 VERLOOP VAN CONCENTRATIEGRADIËNT EN VALSNELHEID

Als we willen laten zien dat  $\varepsilon$  altijd positief is kunnen we volstaan met het aantonen dat zowel de teller als de noemer in onderstaande formule altijd het zelfde teken hebben.

$$\varepsilon = \frac{w_s(C) \cdot C}{\frac{\partial C}{\partial z}}$$

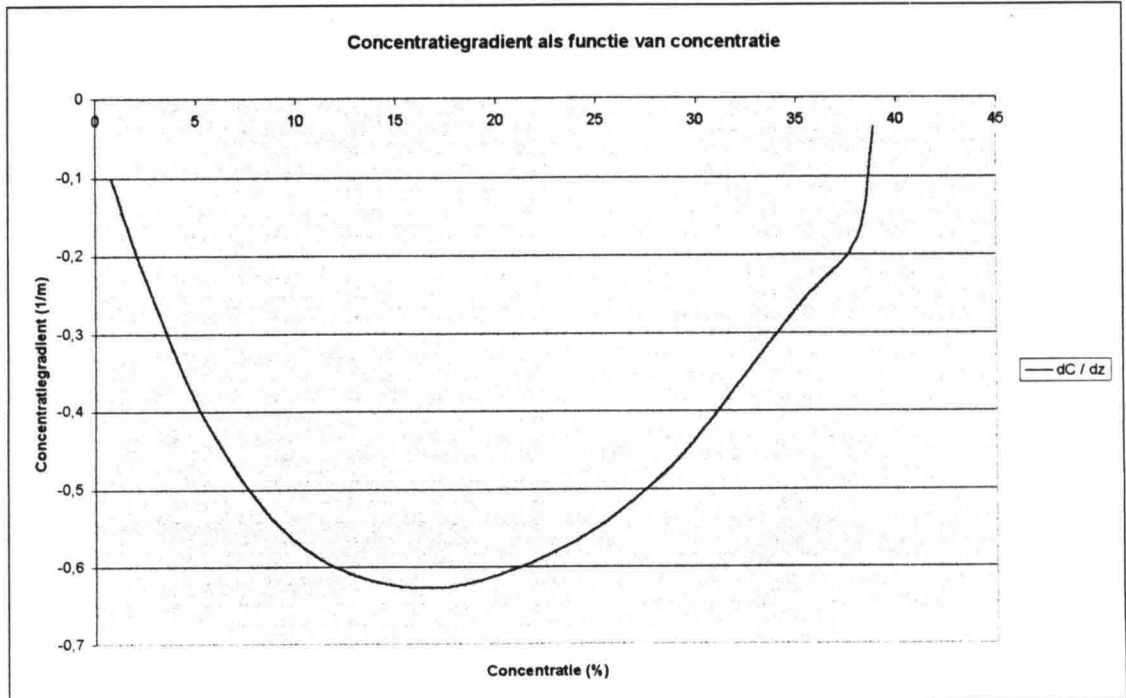
De term in de teller geeft het transport van deeltjes door de zwaartekracht naar beneden aan (in z-richting) uitgezet tegen de concentratie ziet dat er als volgt uit:



Figuur D.24  
Transporten bij toenemende concentratie



De term in de noemer is de concentratiegradiënt. Gezien het feit dat de concentratie in een evenwichtsprofiel van boven naar beneden altijd afneemt zal deze gradiënt (als de metingen volledig goed zijn) altijd negatief zijn. Uitzet tegen de concentratie geeft dat het volgende beeld:



Figuur D.25  
Concentratiegradiënten als functie van concentratie

Deze figuren maken duidelijk dat beide componenten van de deling altijd negatief zijn. Dit maakt duidelijk dat  $\varepsilon$  dus altijd positief is.

Dit is fysisch gezien ook noodzakelijk omdat er anders de convectie diffusievergelijking instabiel zou worden.

## D19 BENADERING VAN $\varepsilon$ MET BEHULP VAN HET MODEL

Epsilon is met behulp van het model benaderd door de “gedempte” grafieken te vergelijken met de uitvoer van het model. Beide geven het verloop van de concentratie in de tijd weer op 12 hoogtes in de kolom. Door  $\varepsilon$  te variëren kan totdat de profielen zo goed mogelijk overeenkomen kan een goede schatting van  $\varepsilon$  gemaakt worden. In de figuren D.26 en D.27 zijn een gedempte grafiek en een uitvoer van het model gegeven. In tabellen de D.13 en D.14 is een overzicht gegeven van alle proeven waarvoor  $\varepsilon$  benaderd is.

Turbulentie Instelling	Concentratie epsilon	Concentratie epsilon	Concentratie epsilon	Concentratie epsilon
$d\alpha=95,5^\circ$ $T=1,30s$	$C=9,21\%$	$C=22,28\%$	$C=32,26\%$	$C=40,63\%$
	$\varepsilon=0,00022m^2/s$	$\varepsilon=0,00045m^2/s$	$\varepsilon=0,0011m^2/s$	$\varepsilon=0,002m^2/s$
$d\alpha=110,3^\circ$ $T=1,30s$		$C=23,39\%$	$C=33,36\%$	$C=38,73\%$
		$\varepsilon=0,0006m^2/s$	$\varepsilon=0,0013m^2/s$	$\varepsilon=0,002m^2/s$
$d\alpha=99,5^\circ$ $T=1,03s$	$C=9,93\%$	$C=22,60\%$	$C=33,17\%$	$C=39,45\%$
	$\varepsilon=0,00045m^2/s$	$\varepsilon=0,00085m^2/s$	$\varepsilon=0,0015m^2/s$	$\varepsilon=0,0025m^2/s$

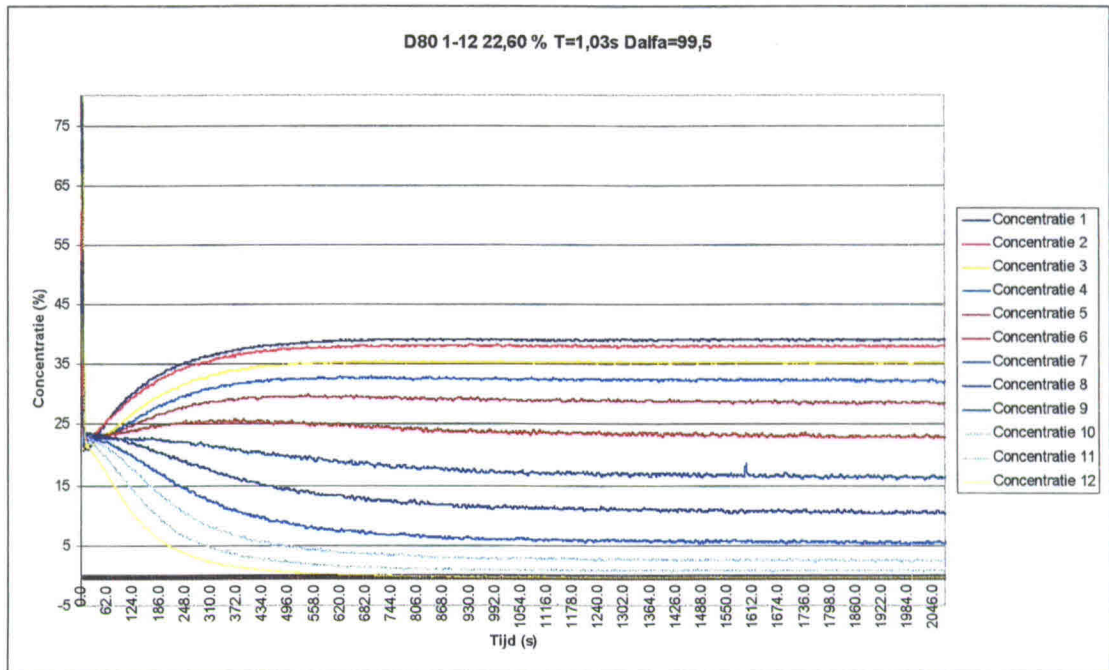
Tabel D.13

Verloop van  $\varepsilon$  bij zand  $D_{50}=96,56 \mu m$

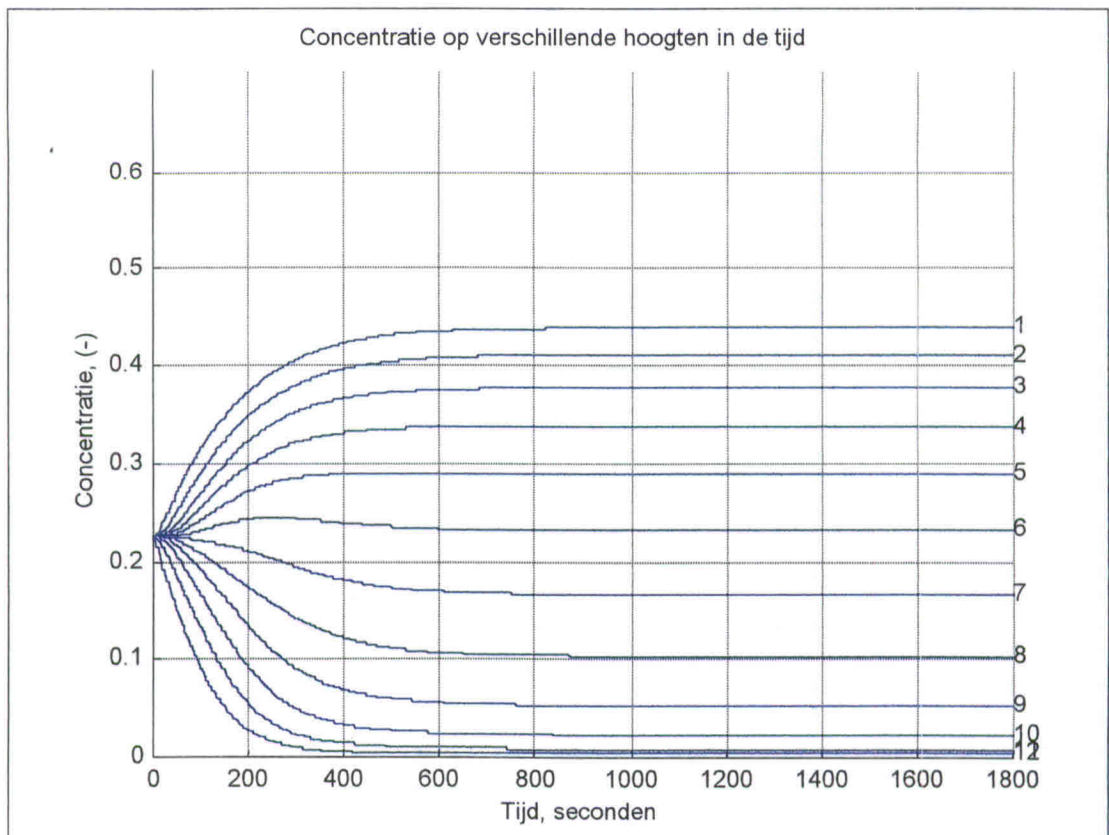
Turbulentie Instelling	Concentratie epsilon	Concentratie epsilon	Concentratie epsilon	Concentratie epsilon
$d\alpha=95,5^\circ$ $T=1,30s$	$C=12,54\%$	$C=28,71\%$	$C=28,88\%$	$C=44,06\%$
	$\varepsilon=0,0002m^2/s$	$\varepsilon=0,00035m^2/s$	$\varepsilon=0,0004m^2/s$	$\varepsilon=0,0004m^2/s$
$d\alpha=110,3^\circ$ $T=1,30s$	$C=14,94\%$	$C=25,50\%$	$C=31,72\%$	$C=44,87\%$
	$\varepsilon=0,0003m^2/s$	$\varepsilon=0,0004m^2/s$	$\varepsilon=0,0005m^2/s$	$\varepsilon=0,0005m^2/s$
$d\alpha=99,5^\circ$ $T=1,03s$	$C=17,74\%$	$C=24,28\%$	$C=31,11\%$	$C=42,89\%$
	$\varepsilon=0,00035m^2/s$	$\varepsilon=0,0005m^2/s$	$\varepsilon=0,00055m^2/s$	$\varepsilon=0,00058m^2/s$
$d\alpha=110,3^\circ$ $T=1,03s$	$C=14,79\%$	$C=25,07\%$	$C=30,00\%$	$C=48,00\%$
	$\varepsilon=0,00037m^2/s$	$\varepsilon=0,0006m^2/s$	$\varepsilon=0,0006m^2/s$	$\varepsilon=0,0006m^2/s$

Tabel D.14

Verloop van  $\varepsilon$  bij zand  $D_{50}=263,50 \mu m$



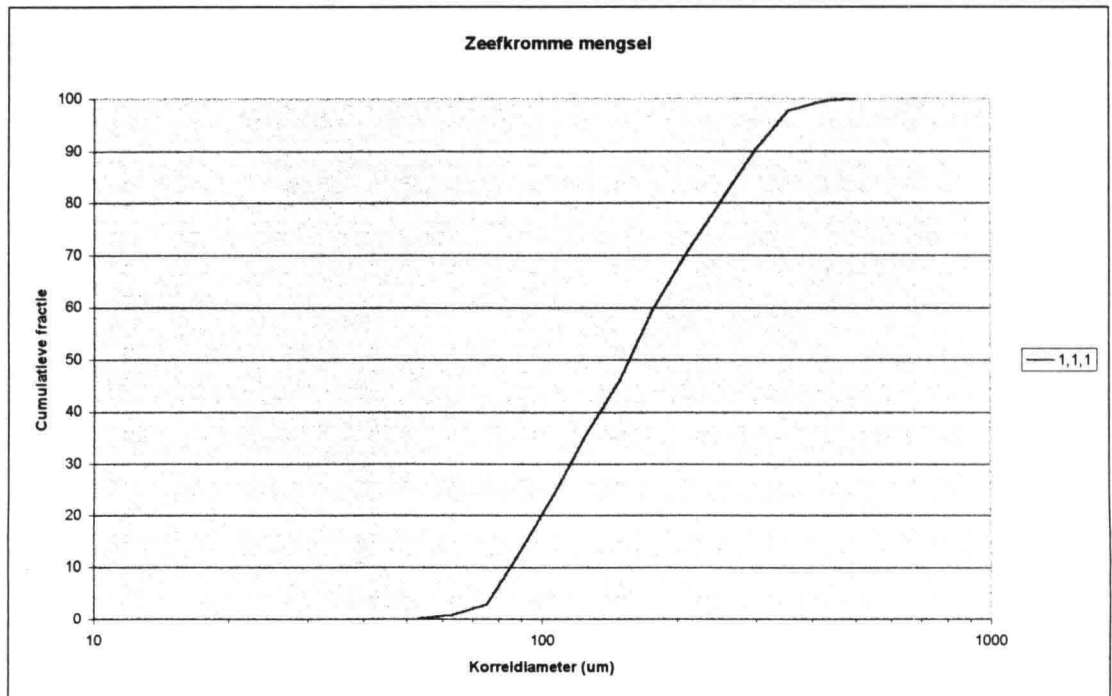
Figuur D.26  
 Concentratieverloop volgens de metingen



Figuur D.27  
 Concentratieverloop volgens het model

## **E RESULTATEN PROEVEN VERSCHILLENDE ZANDFRACTIES**

## E1 ZEEFKROMME NIET UNIFORM ZAND



Figuur E.1  
Zeefkromme van het niet uniforme mengsel

## E2 MEETPLAN PROEVEN NIET UNIFORM ZAND

In de onderstaande tabel is het meetplan van de uitgevoerde proeven opgenomen, bij het bepalen van de proefnummers is er gebruik gemaakt van de parameters  $e$  en  $T$ .

Hierbij geeft  $T$  de stand van het klokje op de aandrijfmotor weer, hieruit is de frequentie van de kolom af te leiden. Dit is in de derde kolom terug te vinden waar de periode in seconden is vermeld. In deze kolom is ook de waarde van  $d\text{Alfa}$  terug te vinden die af te leiden is uit de waarde van  $e$ .

### Hoogte metingen met concentratiemeters 1-12

proefnummer	korrelgrootte	turbulentieniveau	concentratie
1-12,12.5%,T=0	D=159,44 mu	T=0	12.5 %
1-12,12.5%,T=8,e=8.5	D=159,44 mu	T=1,66s, $d\text{Alfa}=85,3^\circ$	12.5 %
1-12,12.5%,T=10,e=7	D=159,44 mu	T=1,30s, $d\text{Alfa}=99,5^\circ$	12.5 %
1-12,12.5%,T=12,e=7	D=159,44 mu	T=1,03s, $d\text{Alfa}=99,5^\circ$	12.5 %
1-12,12.5%,T=12,e=6	D=159,44 mu	T=1,03s, $d\text{Alfa}=110,3^\circ$	12.5 %
1-12,25%,T=0	D=159,44 mu	T=0	25 %
1-12,25%,T=8,e=8.5	D=159,44 mu	T=1,30s, $d\text{Alfa}=99,5^\circ$	25 %
1-12,25%,T=10,e=7	D=159,44 mu	T=1,30s, $d\text{Alfa}=110,3^\circ$	25 %
1-12,25%,T=12,e=7	D=159,44 mu	T=1,03s, $d\text{Alfa}=99,5^\circ$	25 %
1-12,25%,T=12,e=6	D=159,44 mu	T=1,03s, $d\text{Alfa}=110,3^\circ$	25 %
1-12,37.5%,T=0	D=159,44 mu	T=0	37.5 %
1-12,37.5%,T=8,e=8.5	D=159,44 mu	T=1,30s, $d\text{Alfa}=99,5^\circ$	37.5 %
1-12,37.5%,T=10,e=7	D=159,44 mu	T=1,30s, $d\text{Alfa}=110,3^\circ$	37.5 %
1-12,37.5%,T=12,e=7	D=159,44 mu	T=1,03s, $d\text{Alfa}=99,5^\circ$	37.5 %
1-12,37.5%,T=12,e=6	D=159,44 mu	T=1,03s, $d\text{Alfa}=110,3^\circ$	37.5 %

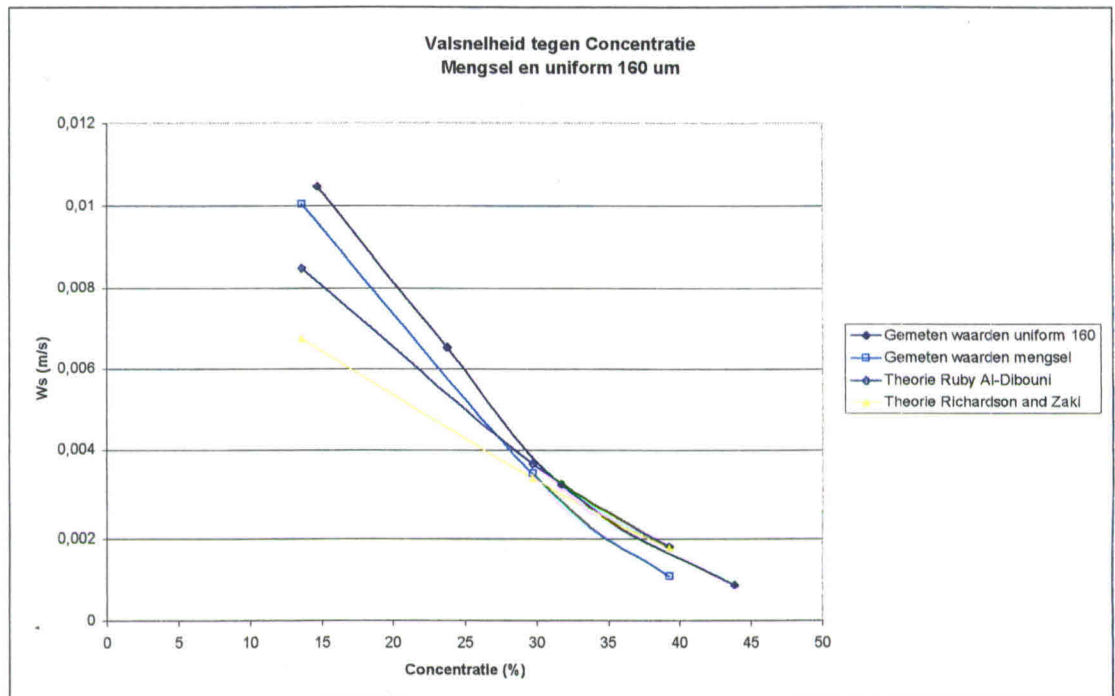
Tabel E.1

Meetplan van de proeven met niet uniform zand

### E3 BEPALING VALSNELHEDEN

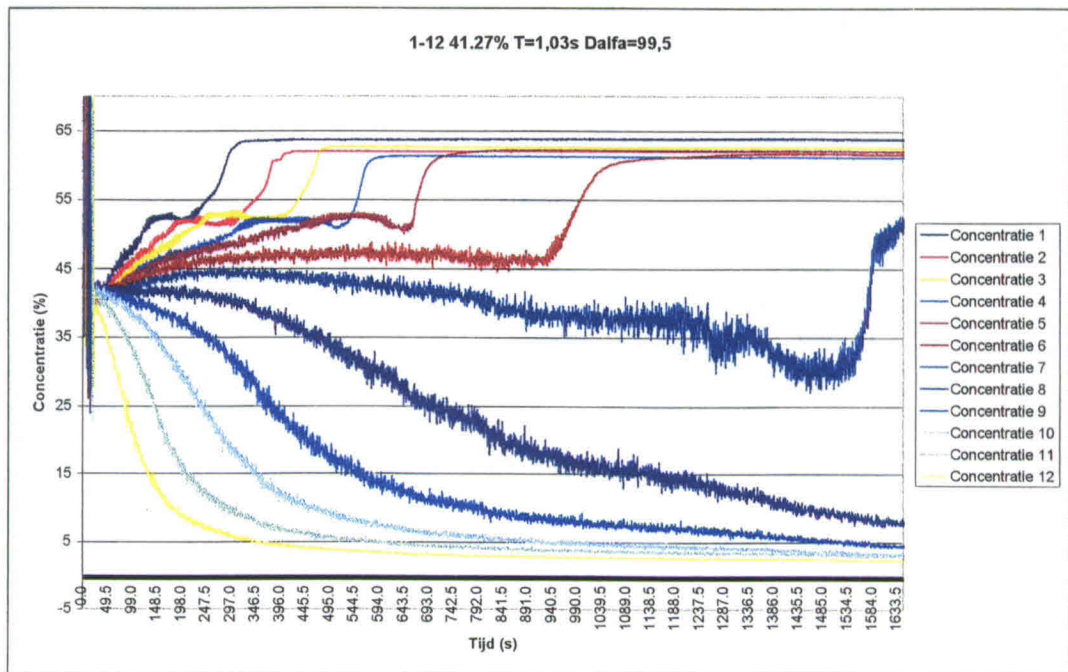
$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Concentratie (%)	$w_s$ volgens proeven (mm/s)	$w_s$ Richardson and Zaki (mm/s)	$w_s$ Ruby Al-Dibouni (mm/s)
159,44	13,56	10,050251	6,738	8,48329
159,44	29,68	3,42368	3,322	3,66442
159,44	39,25	1,056896	1,784	1,80984

Tabel E.2  
 Bepaling van de valsnelheden volgens theorieën en metingen

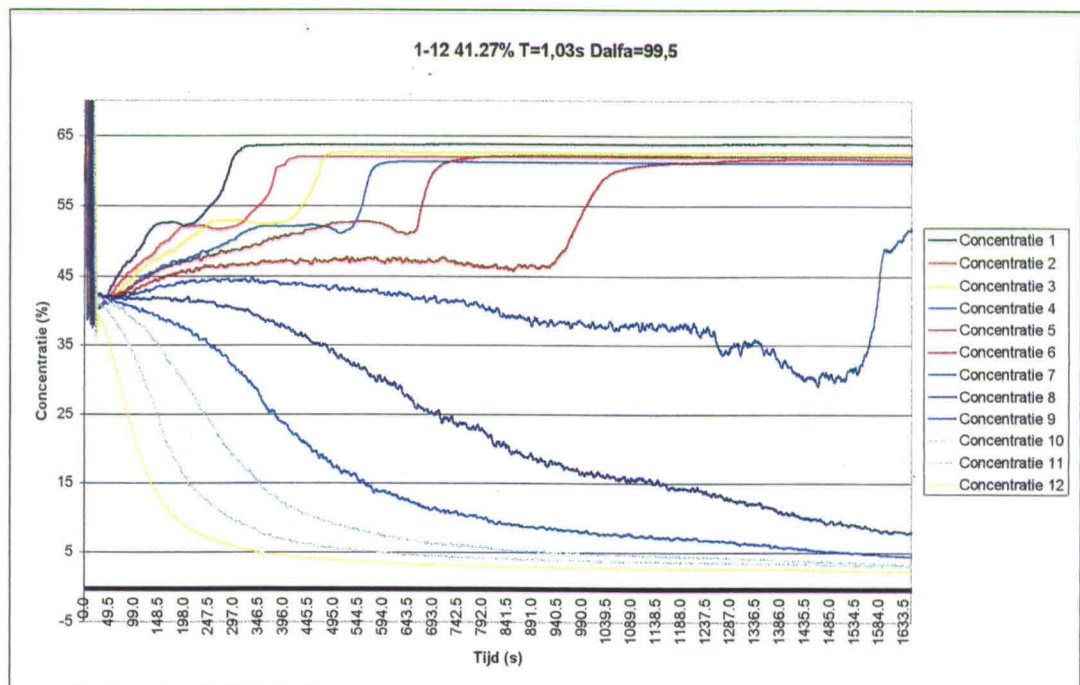


Figuur E.2  
 Valsnelheden voor het mengsel en een uniforme zandfractie met gelijke  $D_{50}$

## E4 CONCENTRATIEVERLOOP OVER DE HOOGTE EN IN DE TIJD

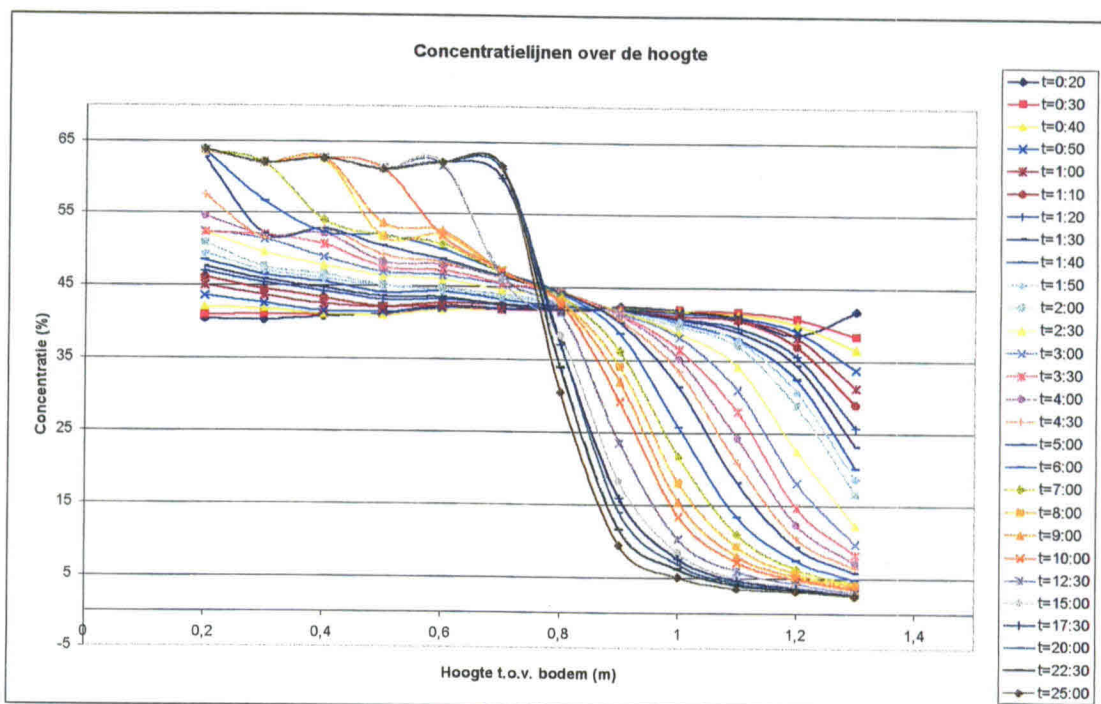


Figuur E.3  
Concentratieverloop in de tijd



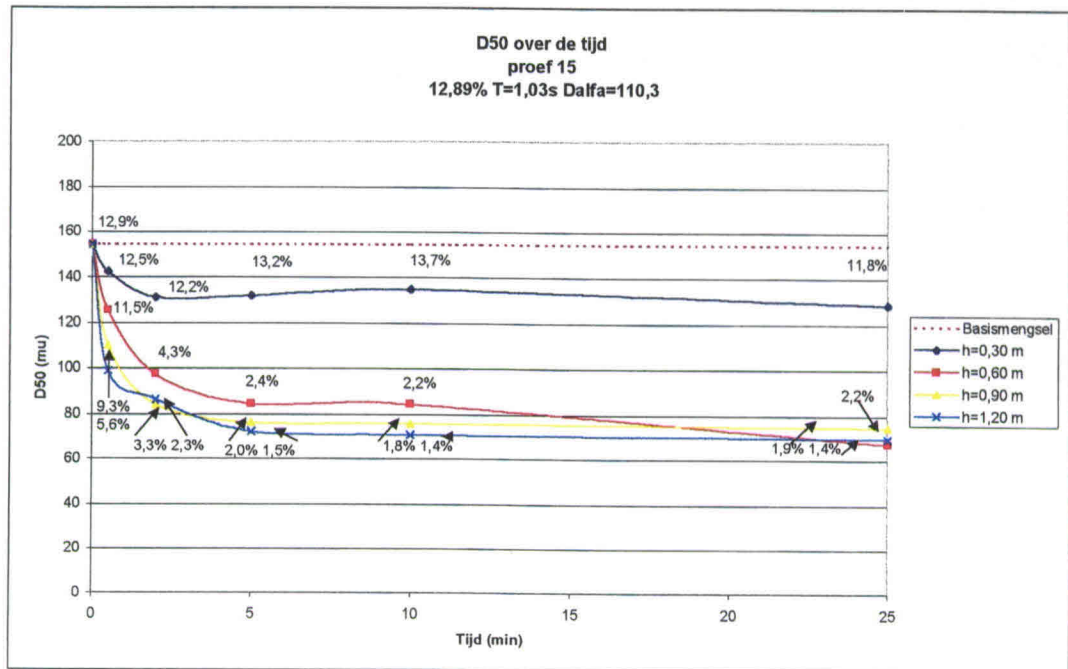
Figuur E.4  
Gefilterde concentratieverlopen



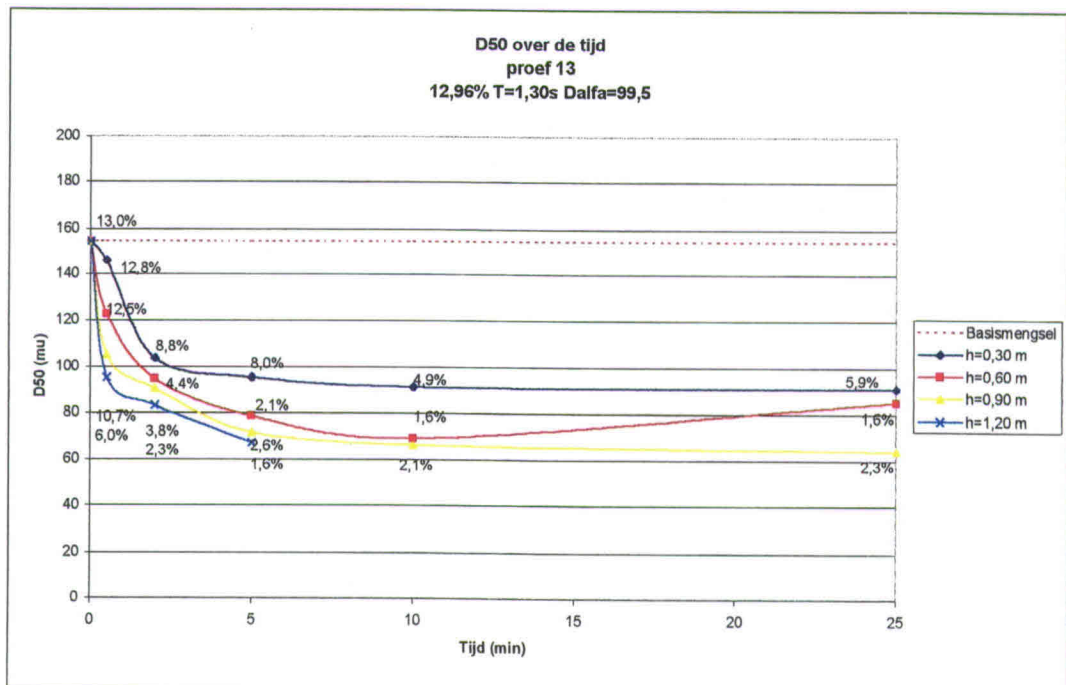


Figuur E.5  
Concentratieverloop over de hoogte

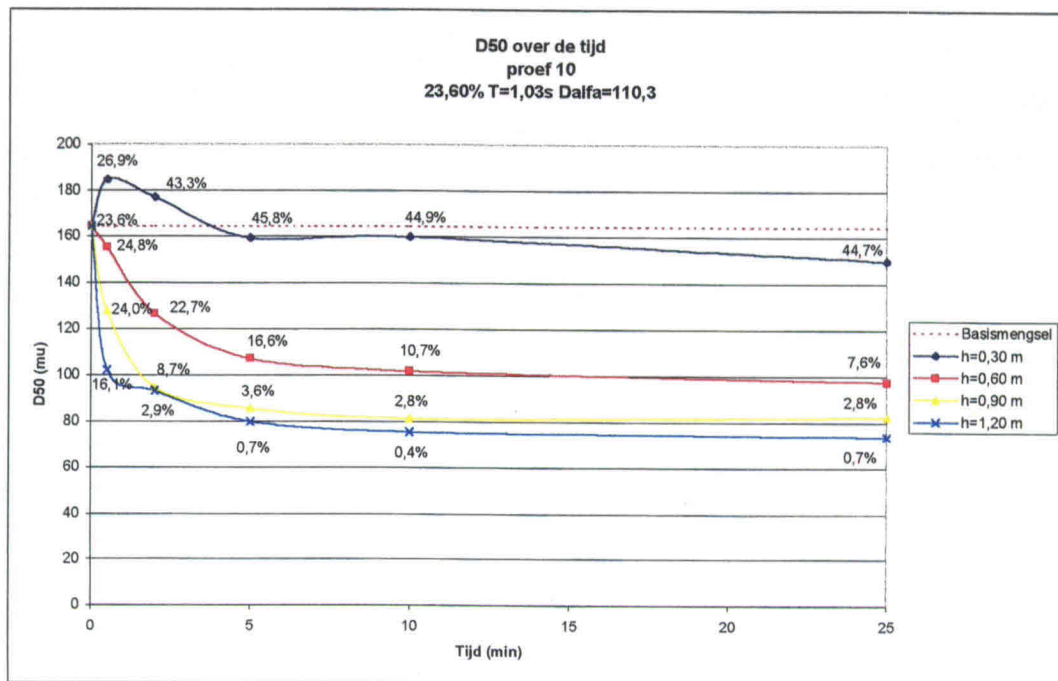
## E5 VERLOOP VAN DE $D_{50}$ BIJ VERSCHILLENDE TURBULENTIEINSTELLINGEN EN CONCENTRATIES



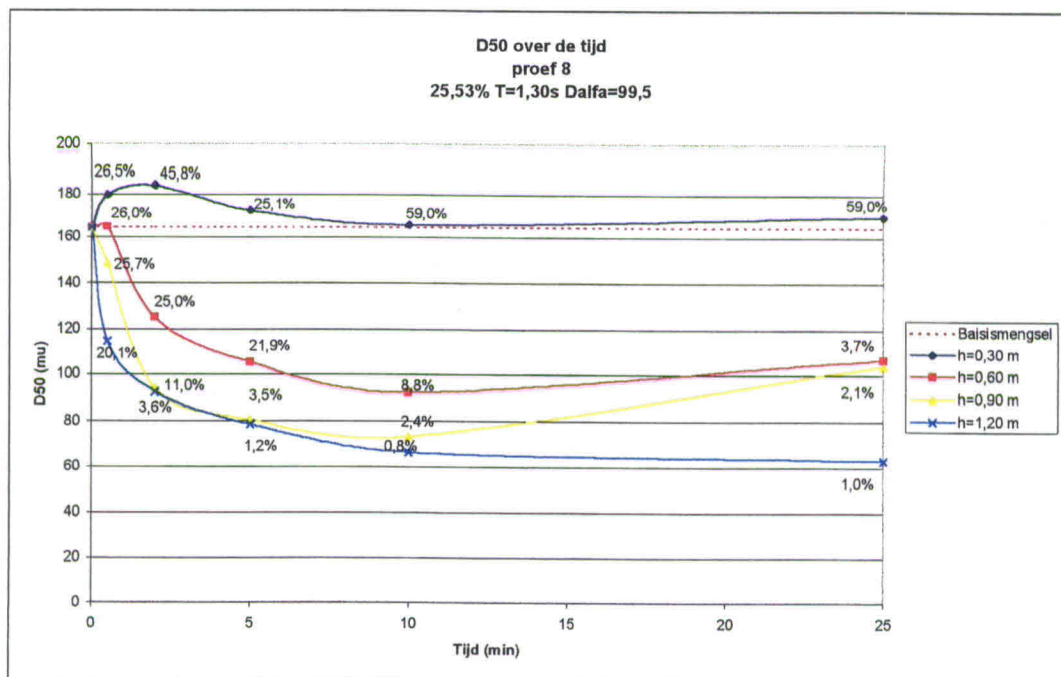
Figuur E.6  
 Verloop van  $D_{50}$  bij  $C=12,89\%$ ,  $T=1,03s$ ,  $d\alpha=110,3^\circ$  (relatief hoog turbulentieniveau)



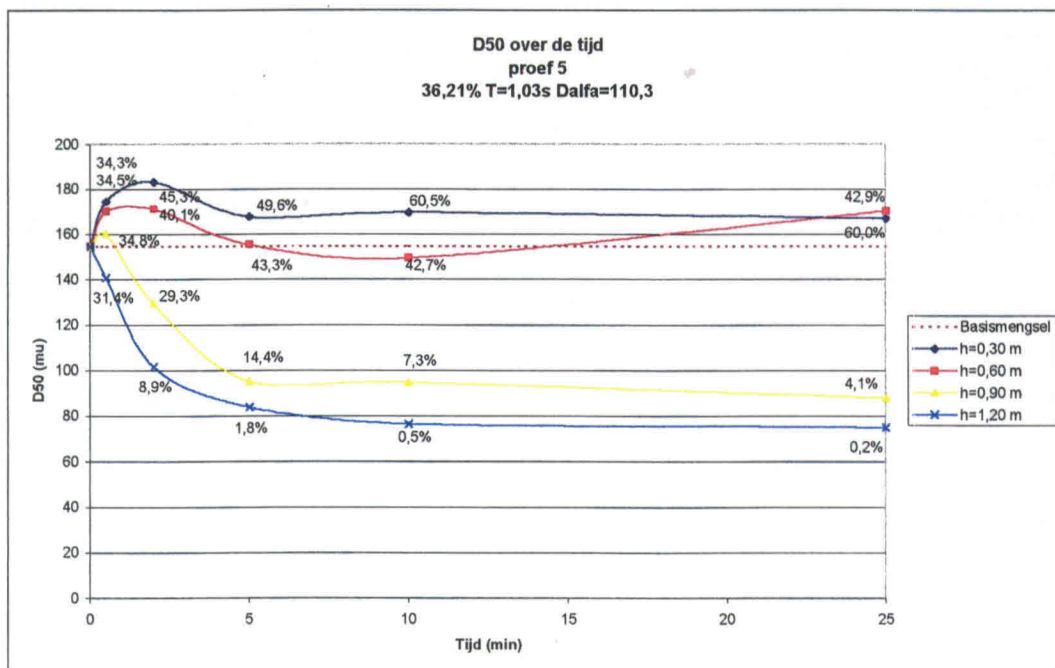
Figuur E.7  
 Verloop van  $D_{50}$  bij  $C=12,96\%$ ,  $T=1,30s$ ,  $d\alpha=99,5^\circ$  (relatief laag turbulentieniveau)



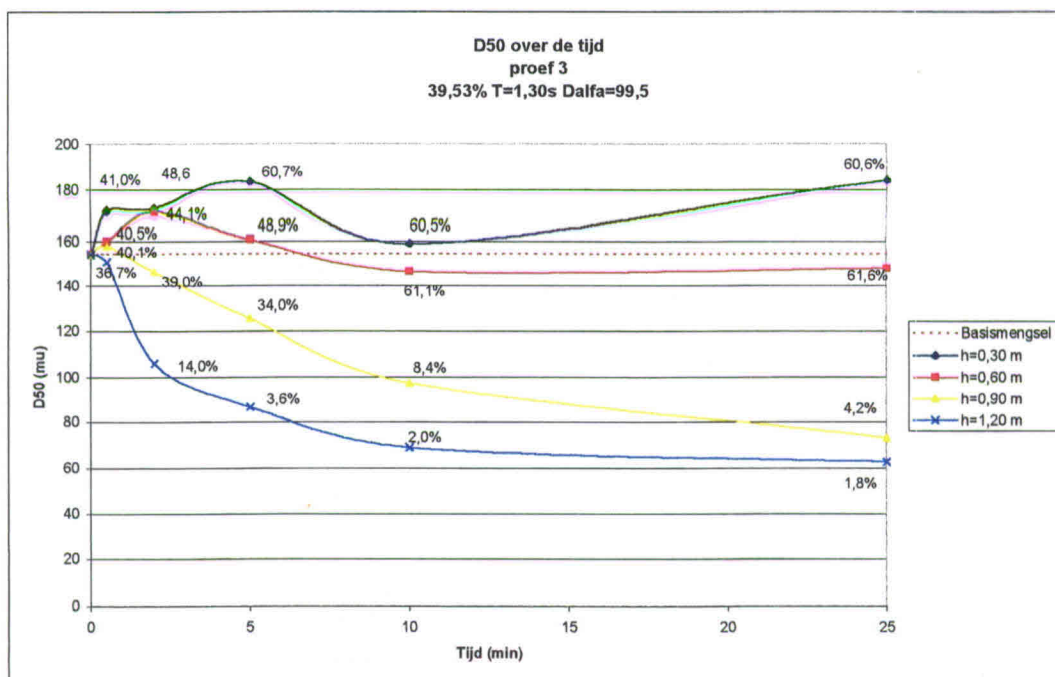
**Figuur E.8**  
 Verloop van  $D_{50}$  bij  $C=23.60\%$ ,  $T=1.03\text{ s}$ ,  $d\text{Alfa}=110.3^\circ$  (relatief hoog turbulentieniveau)



**Figuur E.9**  
 Verloop van  $D_{50}$  bij  $C=25.53\%$ ,  $T=1.30\text{ s}$ ,  $d\text{Alfa}=99.5^\circ$  (relatief laag turbulentieniveau)

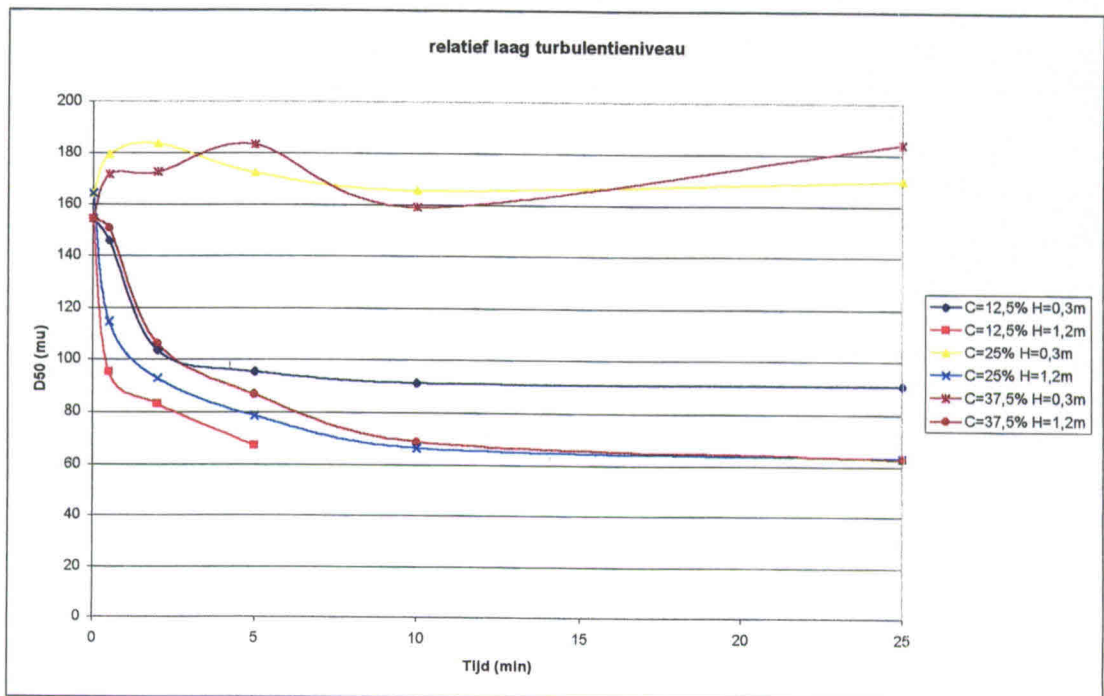


Figuur E.10  
 Verloop van  $D_{50}$  bij  $C=36.21\%$ ,  $T=1.03\text{ s}$ ,  $d\text{Alfa}=110.3^\circ$  (relatief hoog turbulentieniveau)

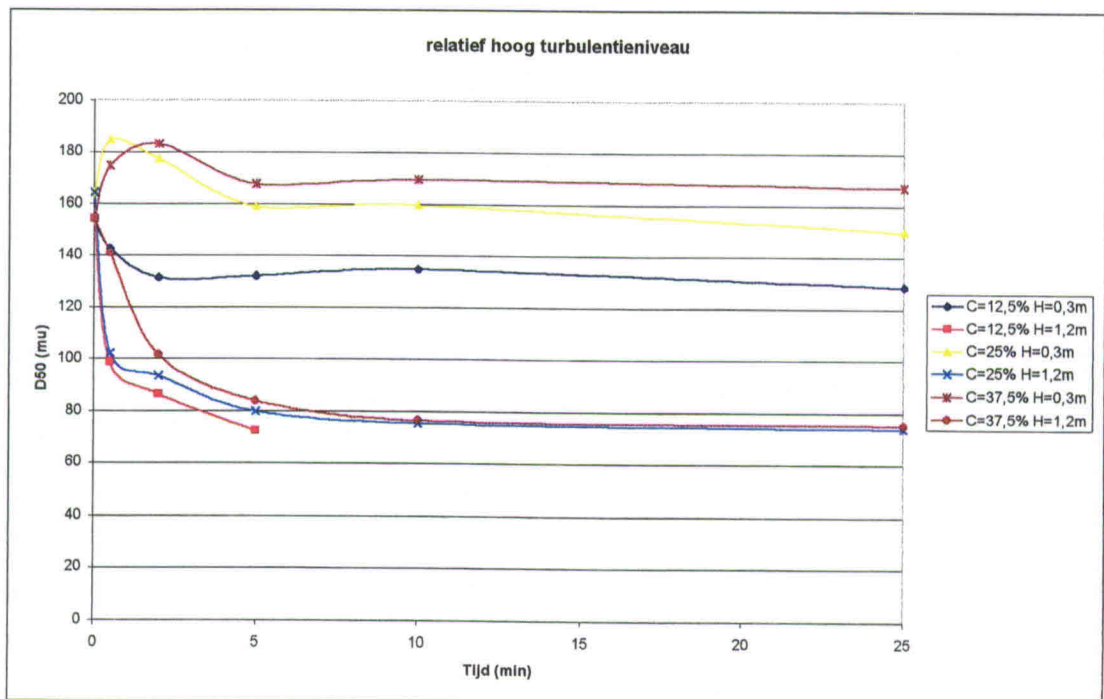


Figuur E.11  
 Verloop van  $D_{50}$  bij  $C=39.53\%$ ,  $T=1.30\text{ s}$ ,  $d\text{Alfa}=99.5^\circ$  (relatief laag turbulentieniveau)

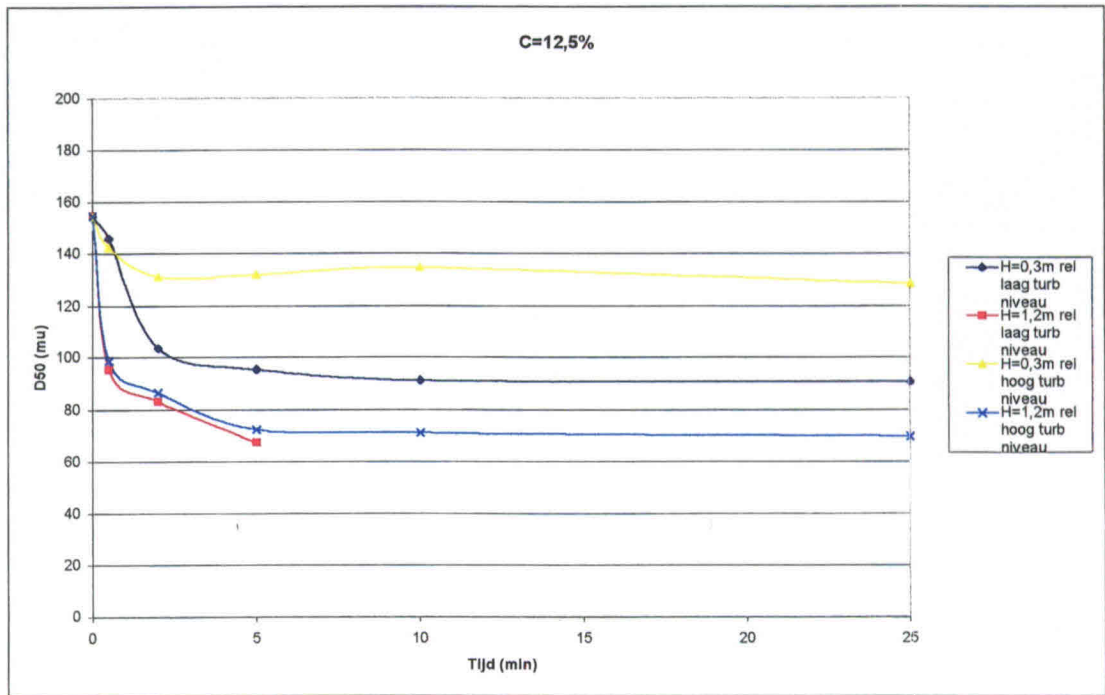
## E6 VERLOOP VAN $D_{50}$ BIJ CONSTANTE CONCENTRATIE OF CONSTANTE TURBULENTIEINSTELLING



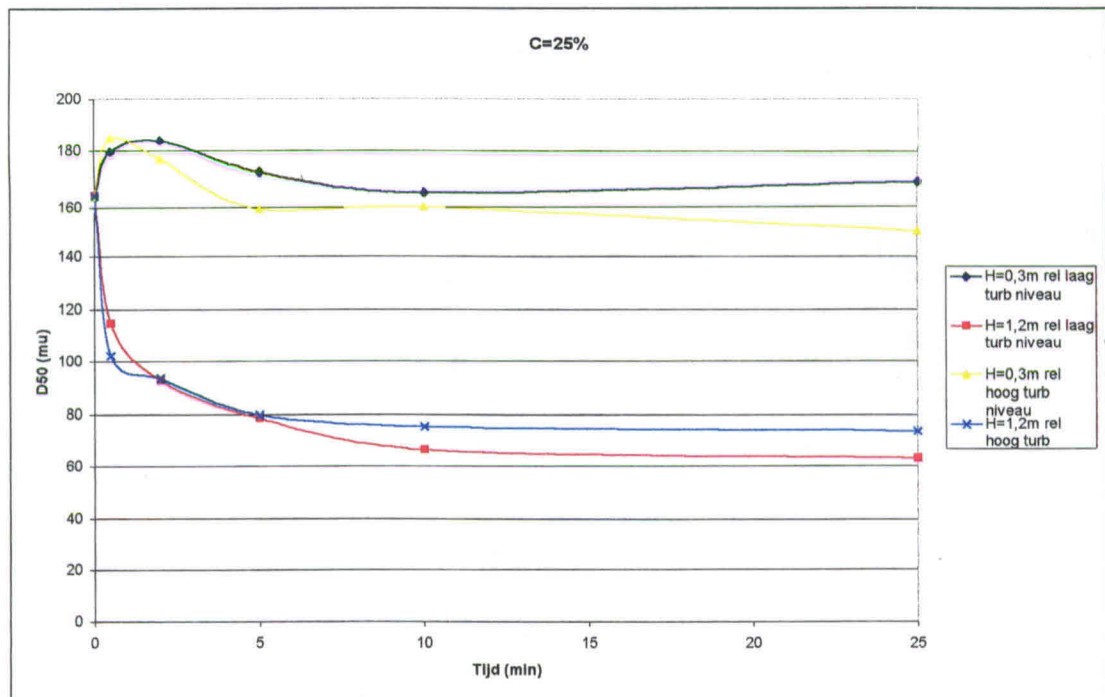
Figuur E.12  
 Verloop van  $D_{50}$  op de hoogtes  $h=0,3m$  en  $h=1,2m$  bij verschillende concentraties en een relatief laag turbulentieniveau



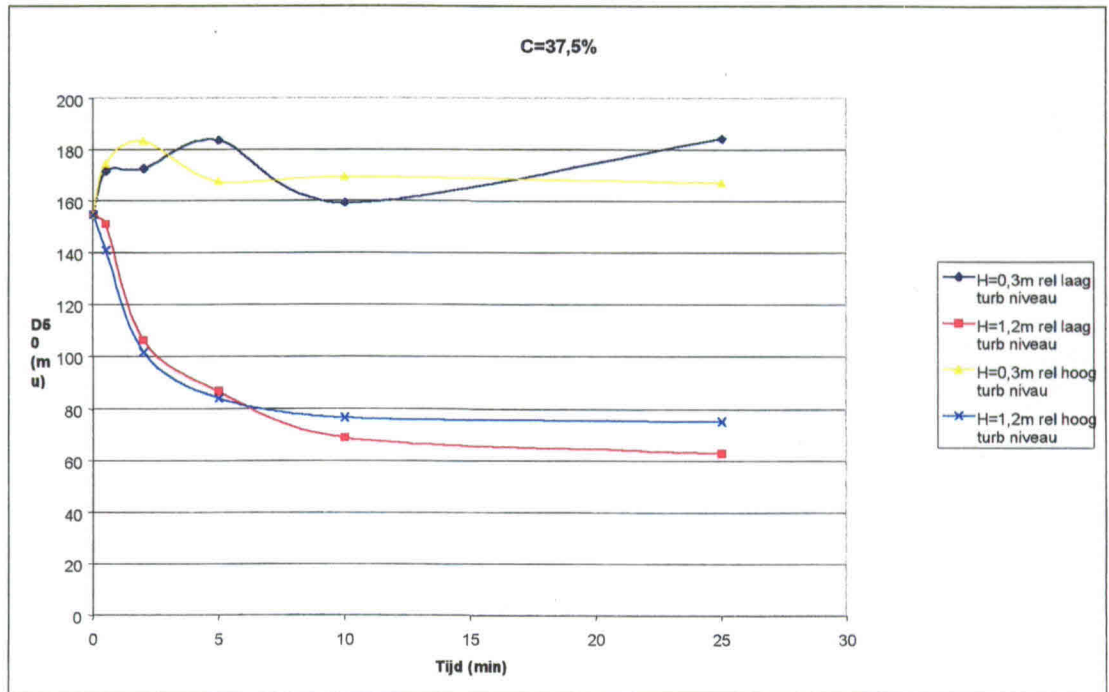
Figuur E.13  
 Verloop van  $D_{50}$  op de hoogtes  $h=0,3m$  en  $h=1,2m$  bij verschillende concentraties en een relatief hoog turbulentieniveau



Figuur E.14  
 Verloop van D<sub>50</sub> op h=0,3m en h=1,2 bij relatief hoge en lage turbulentieniveaus



Figuur E.15  
 Verloop van D<sub>50</sub> op h=0,3m en h=1,2 bij relatief hoge en lage turbulentieniveaus



Figuur E.16  
Verloop van  $D_{50}$  op  $h=0,3\text{m}$  en  $h=1,2$  bij relatief hoge en lage turbulentiëniveaus

