

## **Zwevend stof in de Beulakerwijde**

**Aanvullende studie binnen het project BaggerNut**





**Titel**

Zwevend stof in de Beulakerwijde

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Waterschap Reest en Wieden	1206456-000	1206456-000-ZWS-0003	45

**Trefwoorden**

Opwerveling, zwevend stof, Beulakerwijde, kritische schuifspanning, erosie, wind, doorzicht, licht, uitdoving.

**Samenvatting**

Deltares heeft in deze studie gekeken naar de interne opwerveling van zwevend stof in de Beulakerwijde, omdat is gebleken dat zwevend stof in de waterfase een belangrijk lichtuitdovend effect heeft, waardoor de ontwikkeling van vegetatie wordt geremd.

De Beulakerwijde is als locatie uitgekozen, om dat dit meer groot is en daardoor gevoelig voor wind. Het ligt ten zuiden van Giethoorn en is ca. 964 ha groot. Op 23 april 2012 zijn onverstoorde steekbuizen ( $\varnothing$  6 cm) genomen van de bovenste laag van het sediment op drie locaties in het meer. Er zijn opwervelingsexperimenten uitgevoerd door met een vane te roeren, waarbij tijdens het opwervelen continu extinctie (OSLIM) en deeltjesgrootte (Malvern) werd gemeten. Het opgewervelde materiaal is nader gekarakteriseerd in een sedimentatiebalans en chemisch geanalyseerd op relevante elementen. Op basis van de in de opwervelingsproeven bepaalde kritische orbitaalsnelheid en meteogegevens is een Quick scan uitgevoerd. De Quick scan berekent hoe vaak opwerveling optreedt ten gevolge van wind.

Op basis van het veldwerk werd geconstateerd dat er geen grote verschillen zijn in het karakter van de sliblaag tussen de bemonsteringslocaties, maar slibdikte neemt af van zuidwest naar noordoost. Het zandigere noordoostelijke deel heeft een zodanig stevige bodem dat driehoeksmosselen waargenomen zijn.

De opwervelingproeven wijzen uit dat bij een stroomsnelheid aan de bodem van ongeveer 3 cm/s de opwerveling begint. Het opgewervelde zwevend stof bestaat voor 50% uit anorganisch materiaal. De organische fractie bestaat uit langzaam afbrekend plantenmateriaal en/of veenresten. De gemiddelde diameter van het zwevend stof is ca. 100  $\mu\text{m}$  bij aanvang van het opwervelingsexperiment en stijgt naar 300  $\mu\text{m}$  als de stroomsnelheid maximaal is (hoogste vane stand). Zwevend stof in de Beulakerwijde bevat veel hogere Fe- en P-gehalten dan sediment, maar de Fe/P-ratio in het sediment en zwevend stof zijn ongeveer gelijk. Uit alle experimenten blijkt dat de extinctie per mg ZS/l ongeveer 0,028  $\text{m}^{-1} \cdot \text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$  is.

Uit de Quick scan blijkt dat de kritische orbitaalsnelheid aan de bodem voor de hele Beulakerwijde gemiddeld 6 % van de tijd wordt overschreden. Van west naar oost toont de overschrijdingskans een toename van ongeveer 2 tot meer dan 15 %. Dit is te verklaren door de dominante ZW wind en het feit dat de plas in dezelfde richting georiënteerd is.

Ervan uitgaande dat minimaal 4% licht de bodem moet bereiken in de plas om waterplanten kieming mogelijk te maken, moet de extinctiewaarde lager dan 1,6  $\text{m}^{-1}$  zijn. Onder gemiddelde omstandigheden (30  $\mu\text{g}$  Chlorofyl/l, 16 mg DOC/l en 14 mg ZS/l) wordt de extinctie berekend op 1,4  $\text{m}^{-1}$ . De huidige toestand lijkt voldoende om vegetatieontwikkeling mogelijk te maken al is de onzekerheid van de uitspraak nog vrij groot.

**Titel**




Zwevend stof in de Beulakerwilde

**Opdrachtgever**  
Waterschap Reest en  
Wieden**Project**  
1206456-000**Kenmerk**  
1206456-000-ZWS-0003**Pagina's**  
45

De belangrijkste aanbeveling is om het systeem voorlopig intensiever te monitoren en vooralsnog geen (waterbodem)maatregelen te nemen. In elk geval moet dan gemeten worden bij verschillende omstandigheden (variatie in seizoenen, wind, recreatie). De monitoring dient in elk geval gericht zijn op de extinctie van de verschillende componenten (DOC, en zwevend stof incl. gloeirest en chlorofyl). Verder is het zinvol om de ontwikkeling van waterplanten- en driehoeksmosselen goed te volgen. Tenslotte kan de invloed van vis en recreatie op de zwevend stofconcentratie beter gekwantificeerd worden.

**Referenties**

Penning, W.E., J. Cornelisse, C. Thiange en L. Osté, 2012. Zwevend stof in de Beulakerwilde. Rapport 1206456, Deltares, Delft.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	november 2012	Ellis Penning		Pascal Boderie		Harm Duel	
		Leonard Oste					
		John Cornelisse					
		Christophe Thiange					

**Status**

definitief

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretisch kader</b>	<b>3</b>
2.1	Het onderwaterlichtklimaat	3
2.1.1	Licht op de bodem?	3
2.1.2	Metten van lichtuitdoving: Secchi-diepte en extinctie	3
2.1.3	Instrumenten voor het meten van extinctie	4
2.2	De relatie tussen deeltjes in het water en lichtuitdoving	4
2.3	De bijdrage van DOC aan lichtuitdoving	5
2.4	Detritus als bron van troebelheid	6
2.5	Golfwerking in relatie tot de afmetingen van een watersysteem	8
2.6	Methoden om het lichtklimaat te verbeteren	10
<b>3</b>	<b>Materiaal en methoden</b>	<b>11</b>
3.1	De locatie: de Beulakerwilde	11
3.2	Karakterisering zwevend stof Beulakerwilde	13
3.2.1	Veldmetingen en waarnemingen ter plaatse	13
3.2.2	Labmetingen	14
3.3	Quick scan – frequentie van overschrijding kritische bodemschuifspanning door golfwerking	19
<b>4</b>	<b>Resultaten</b>	<b>21</b>
4.1	Veldmetingen	21
4.2	Laboratorium metingen	22
4.2.1	Erosiegevoeligheid Beulakerwilde bodem – Vane experiment	22
4.2.2	Deeltjesgrootte	22
4.2.3	Uitdoving van licht door opgewervelde deeltjes - OSLIM metingen	26
4.2.4	Valsnelheid van deeltjes- Sedimentatiebalans	28
4.2.5	Extinctie per mg zwevend stof en vertaling naar zwevend stofmetingen in de Beulakerwilde	31
4.3	Chemische analyses	32
4.3.1	C:N verhouding, TGA en elementen.	32
4.4	Resultaten Quick scan	33
<b>5</b>	<b>Discussie</b>	<b>37</b>
5.1	Opwerveling in de Beulakerwilde	37
5.2	Lichtuitdoving van de verschillende componenten	38
5.3	Concentratie P in zwevend stof en waterbodern	38
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>41</b>
6.1	Conclusies	41
6.2	Aanbevelingen	41
	Bijlage(n)	
<b>A</b>	<b>Bijlage: referenties</b>	<b>43</b>



## 1 Inleiding

De Schutsloterwijdte is door het Waterschap Reest en Wieden ingebracht binnen het project BaggerNut. Binnen het project BaggerNut is behoefte aan uitbreiding van de BaggerNut-kennis voor het hele Wieden-gebied. Deze verbreding bestond uit twee delen:

1. ARCADIS heeft gekeken naar de wateraanvoer (ARCADIS, 2012). Daaruit blijkt dat in de verschillende meren in de Wieden (zie bijlage 1) per dag ongeveer 0,2 – 1,2 % van het water wordt ververs (1/verblijftijd). Op basis van dit getal mag worden aangenomen dat de interne processen (opwerveling, productie en bezinking) de zwevend stofconcentratie in de alle meren sterk bepalen.
2. In het werk van Deltares is gekeken naar de interne belasting van zwevend stof door opwerveling, omdat is gebleken dat zwevend stof in de waterfase een belangrijk lichtuitdovend effect heeft, waardoor de ontwikkeling van vegetatie wordt geremd. Opwerveling wordt overigens niet alleen veroorzaakt door wind, maar ook recreatie(vaart) en vis. De experimenten die Deltares heeft uitgevoerd zijn ook zinvol voor die alternatieve opwervelingsmechanismen, omdat de stabiliteit van de bodem in alle gevallen relevant is voor de mate van opwerveling.

### **Doel**

Deze studie geeft inzicht in de bijdrage van de bodem aan lichtuitdoving door het bepalen van parameters die opwerveling en bezinking veroorzaken.

### **Leeswijzer**

Dit rapport kent een standaardindeling: in hoofdstuk 2 gestart een theoretisch kader over lichtuitdoving. Hoofdstuk 3 gaat in op de locatie, de experimentele methoden en de opzet van de quick scan opwerveling. De resultaten worden beschreven in hoofdstuk 4 en bediscussieerd in hoofdstuk 5. Tenslotte volgend de conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 6.





## 2 Theoretisch kader

### 2.1 Het onderwaterlichtklimaat

#### 2.1.1 Licht op de bodem?

Helder water is belangrijk voor een ecologische goed functionerend meer. Waterplanten, die vanaf de bodem van een meer moeten beginnen aan hun groeicyclus, hebben er belang bij dat voldoende licht de bodem bereikt. De relevante straling van zonlicht voor fotosynthese in planten (en algen) wordt gedefinieerd als *Photosynthetically Available Radiation* (PAR). Deze PAR beslaat het interval in golflengte vanaf circa 400 tot circa 700 nm waarin ook het merendeel aan straling van zonlicht ligt dat het wateroppervlak bereikt (Kirk, 1994).

De intensiteit van het licht vermindert op een exponentiële manier met de diepte volgens de wet van Lambert-Beer:

$$I_z = I_0 e^{-k \cdot z} \quad [2.1]$$

waarin

$I_0$  = straling aan het oppervlakte ( $W m^{-2}$ )

$I_z$  = straling op diepte  $z$  ( $W m^{-2}$ )

$k$  = extinctie coëfficiënt ( $m^{-1}$ )

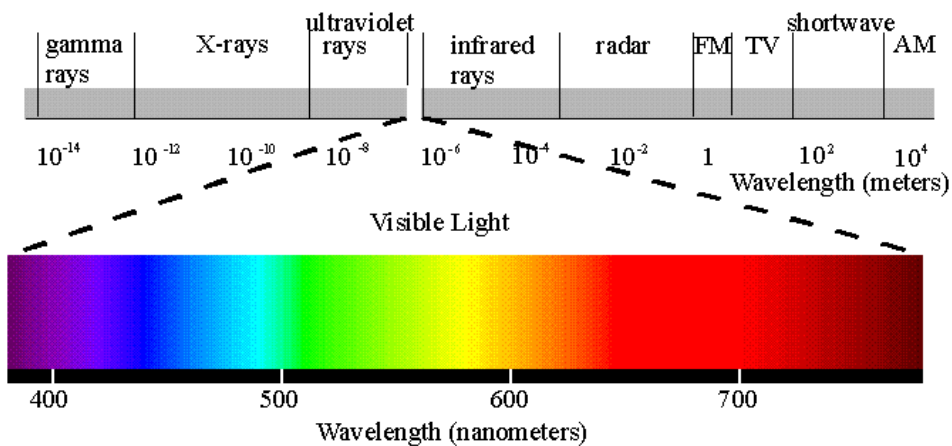
$z$  = diepte (m)

De extinctiecoëfficiënt  $k$  is voor elk waterlichaam anders en kan over een grote range variëren afhankelijk van de waterkwaliteit. Kirk (1994) geeft een overzicht van  $k$  voor verschillende waterlichamen op aarde variërend van 0,03 (Atlantische oceaan) tot 24,9 (Lake George, USA). In Nederland ligt  $k$  meestal tussen de 0,8 en 3.

Penning et al. (2012) stellen op basis van eerdere publicaties dat 4% van de straling aan het oppervlak de bodem moet bereiken om ontwikkeling van vegetatie mogelijk te maken. Dat betekent in vergelijking 2.1 dat de factor  $kz$  maximaal 3,2 mag zijn.

#### 2.1.2 Meten van lichtuitdoving: Secchi-diepte en extinctie

We hanteren hier het globale begrip lichtextinctie hoewel optisch gezien het een complex is van lichtabsorptie door pigmenten (chlorofyl, kleurstoffen) en van reflectie en verstrooiing van licht. Door de laatste mechanismen ontstaan langere optische paden waarlangs (nog meer) lichtabsorptie optreedt en ook een deel van het licht terug naar het wateroppervlak wordt gebracht. Voor een uitvoerig overzicht verwijzen we naar (Kirk, 1994). Doorzichtmetingen met behulp van een Secchi-schijf worden traditioneel vaker gedaan dan extinctiemetingen. Er kleven echter bezwaren aan het gebruik van Secchi-metingen voor het bepalen van het daadwerkelijke lichtklimaat. Het menselijk oog neemt subjectief waar, en afhankelijk van de weersomstandigheden en tijdstip van meten, blijkt de Secchi-diepte meting vaak een onnauwkeurigheid tussen de 5-25% te hebben. Daarnaast meet men met de Secchi-schijf het totale lichtspectrum en niet het voor planten belangrijke deel van het spectrum PAR (Photosynthetic Active Radiation 400-700 nm, zie Figuur 2.1).



The electromagnetic spectrum  
 from "The Joy of Visual Perception: A Web Book"  
<http://www.yorku.ca/eye/>

Figuur 2.1 Golflengtes van de verschillende kleuren.

Hoewel zichtdiepte (waargenomen met een Secchi-schijf) en uitdoving van licht nauw aan elkaar gerelateerd zijn, kan de relatie sterk variëren afhankelijk van de in het meer aanwezige stoffen. In humusrijke meren bijvoorbeeld kan soms tot op de bodem licht vallen, maar dit licht is niet langer geschikt voor fotosynthese en macrofyten zullen niet worden aangetroffen. Toch zijn er verschillende pogingen gedaan om een verband op empirische wijze vast te stellen. In 1929 vonden Pool en Atkins dat.

$$k * S_d = \text{constant} = \text{de Pool-Atkins coëfficiënt} \quad [2.3]$$

met:  $k$  = de extinctiecoëfficiënt ( $m^{-1}$ ) en  $S_d$  = de Secchidiepte.

De door de Pool-Atkins coëfficiënt verklaarde variantie is vaak niet hoger dan zo'n 50-60%. Voor de Loosdrechtse plassen wisselt de constante door het jaar heen tussen de 0,7 en 1,3).

### 2.1.3 Instrumenten voor het meten van extinctie

Extinctie kan gemeten worden over een spectrum of bij een bepaalde golflengte. In het veld kan gemeten worden met een Li-Cor-sensor, die het PAR spectrum bestrijkt. We hebben in dit onderzoek getracht om ook de OSLIM uit te rusten met een PAR-diode, maar dit is niet gelukt. De OSLIM, die bij de lab werkzaamheden is gebruikt, kijkt naar de troebelheid bij 880 nm (net buiten het visueel spectrum). Infrarood licht met die golflengte wordt uitgezonden door het monster en de sensor meet hoeveel licht overblijft. Daarnaast waren als extra ook lichtbronnen in het rode, groene en blauwe bereik van het licht toegevoegd aan de opstelling om te kijken in hoeverre de lichtkleur van invloed is op de uitdoving en of de combinatie van deze kleuren een betere weergave van het PAR (400-700 nm) zou geven en beter te relateren zou zijn aan de Li-Cor veld-metingen.

## 2.2 De relatie tussen deeltjes in het water en lichtuitdoving

In de afgelopen eeuw is veel gepubliceerd over de fysica van licht in water. Poole, Kirk, Gordon, Preisendorf en Smith hebben allen grote bijdrages geleverd aan het begrip rondom extinctie, voornamelijk voor oceanografische studies.

Zo ontwikkelde Kirk (1983) een methode om voor elke golflengte de uitdoving te bepalen in water, en gebruikte daarvoor Monte-Carlo berekeningen. Ook Buiteveld (1990) stelde voor Nederlandse watersystemen het model 'UITZICHT' op, dat gebaseerd is op extinctie per golflengte. Het doen van dit soort berekeningen voor iedere golflengte is de meest nauwkeurige manier van het berekenen van extinctie, omdat de extinctie per golflengte afhangt van de absorptiekenmerken van het medium waardoor het licht zich beweegt. Humuszuren doven bijvoorbeeld slechts een klein deel van het spectrum uit (vooral de 'blauwe' golflengtes beneden de 400 nm, zie Kirk, 1983), terwijl groenalgen rond de 550 nm een optimum hebben, en blauwalgen rond de 650 nm (onder andere Morel, Kopelevich, Ganf en Bricaud). Al deze referenties zijn terug te vinden in Kirk (1994), die een excellent handboek heeft geschreven over licht in aquatische ecosystemen.

De extinctie of 'uitdoving' van licht in water wordt veroorzaakt door een aantal verschillende parameters:

- 1 de natuurlijke achtergrondextinctie van het water zelf
- 2 de aanwezigheid van humuszuren (DOC - vaak uitgedrukt als absorptie bij 380 nm)
- 3 anorganisch zwevend stof (gloeirest)
- 4 organisch zwevend stof (detritus: zowel snel afbrekende dode algen (actief detritus) als langzaam afbrekende dode plantenresten afkomstig uit veen (refractair detritus))
- 5 algen

De extinctiecoëfficiënt  $k$  kan (naast via metingen) worden bepaald door gebruik te maken van de specifieke bijdrage aan de extinctiecoëfficiënt van bovenstaande parameters.

$$k = k_1 \cdot [\text{Chl-a}] + k_2 \cdot [\text{Det}] + k_3 \cdot [\text{ZS}] + k_4 \cdot [\text{DOC}] + k_5 \quad [2.2]$$

Waarin:

[Chl-a]	= Concentratie Chlorofyl (ug/l)
[Det]	= Concentratie Detritus, evt. onderverdeeld naar herkomst alg/plant (mg/l)
[ZS]	= Concentratie anorganisch zwevend stof (mg/l)
[DOC]	= concentraties opgeloste organische stof (mg/l)
$k_1, k_2, k_3, k_4$	= specifieke extinctiecoëfficiënten voor de verschillende fracties ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )
$k_5$	= restterm (extinctie veroorzaakt door water) ( $\text{m}^{-1}$ )

In deze vergelijking wordt een lineair verband verondersteld tussen extinctie en deze concentraties van verschillende stoffen. Dit is feitelijk niet juist, omdat de extinctiecoëfficiënt ook afhankelijk is van de samenstelling en hoek van instraling van het invallende licht, maar de aanpak geeft een redelijke benadering. Grootste probleem van vergelijking 2.2 is niet dat de relatie niet lineair is, maar dat de coëfficiënten  $k_1$  t/m  $k_4$  zeer sterk kunnen variëren afhankelijk van de aard van de deeltjes.

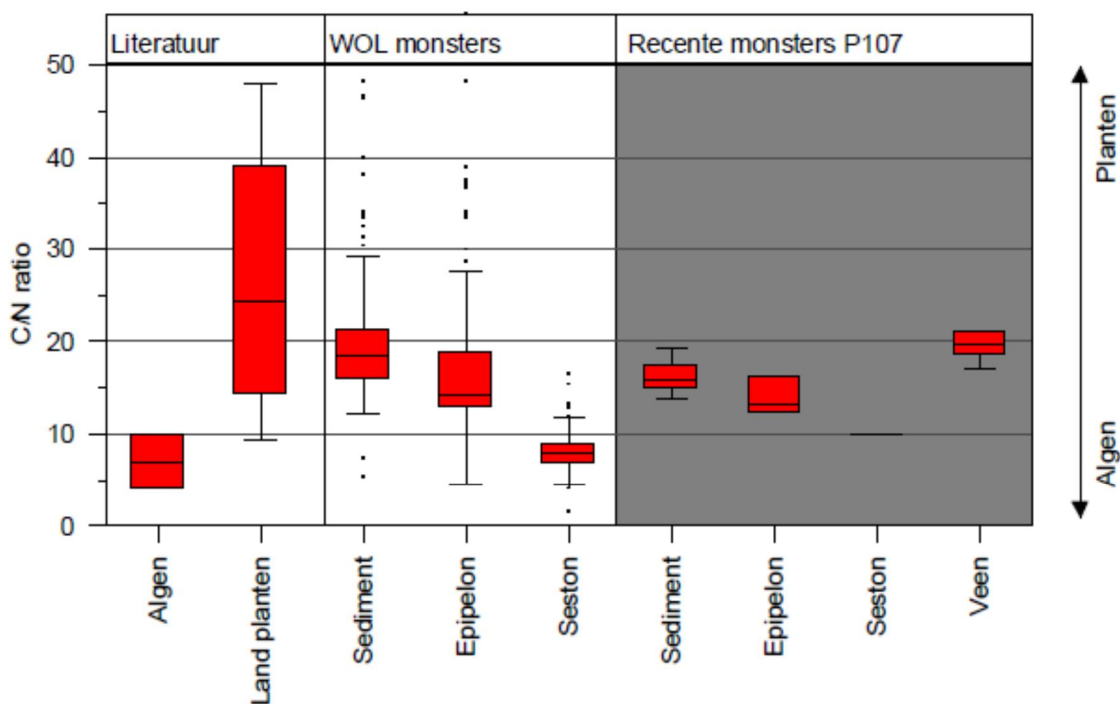
### 2.3 De bijdrage van DOC aan lichtuitdoving

Humuszuren dragen bij aan de uitdoving van licht onderwater, maar zijn geen onderdeel van de zwevende vaste deeltjes. Vaak wordt de Dissolved Organic Carbon (DOC) waarde gemeten bij 380 nm om te bepalen wat de bijdrage is van humuszuren aan de totale uitdoving van licht. Humuszuren (Kirk, 1994, p. 57) zijn opgeloste (kleur)stoffen en zogenaamde colloïdale deeltjes tot circa 1  $\mu\text{m}$  grootte gevormd uit vergane plantresten en onoplosbare macromoleculaire aggregaten. In Nederlandse ondiepe veenplassen blijken humuszuren vaak circa 0,7-1,0  $\text{m}^{-1}$  aan lichtextinctie bij te dragen. Overigens, deze grote achtergrondwaarde in lichtextinctie door humuszuren vergt sterkere reducties in de overige bijdragen tot lichtextinctie teneinde een gewenste extinctie te bereiken.

## 2.4 Detritus als bron van troebelheid

Detritus kan, naast algen, een belangrijke bijdrage leveren aan de uitdoving van licht. We maken onderscheid tussen detritus dat snel afbreekt (actief detritus, meestal direct afkomstig van dode algen) en detritus dat langzaam tot vrijwel niet afbreekt (refractair detritus, meestal afkomstig van oud, dood plantenmateriaal en daarbij behorende veenresten). Detritus zinkt vaak als een deken naar de bodem. De bovenste bodemlaag is in dit geval een zachte, weke, organische laag die makkelijk kan opwervelen onder invloed van waterbeweging (met name door golven, maar ook door stroming en mechanische verstoring door bijv. boten).

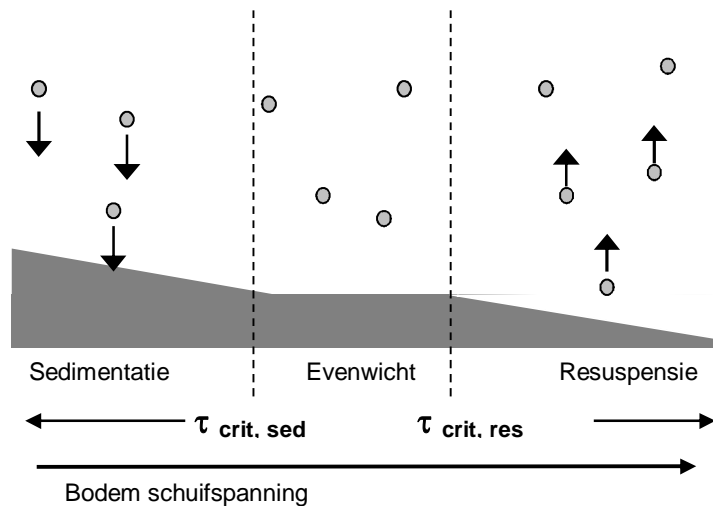
Om een indruk te krijgen van de verhouding tussen actief en refractair detritus kan gekeken worden naar de C:N verhouding. Deze kan worden gebruikt om te bepalen of organisch materiaal afkomstig is van algen of landplanten (Meyers, 1997). Algen hebben typische C/N verhoudingen van 4-10, terwijl landplanten over het algemeen C:N verhoudingen groter dan 20 hebben. Medusa (2001) maakte een overzicht van C:N verhoudingen uit de literatuur en metingen gericht op het bepalen van de herkomst van het zwevend stof en sediment in de Loosdrechtse plassen (Figuur 2.2). Daaruit bleek dat hoewel het seston (altijd zwevend materiaal in waterfase) voor een groot deel uit algen bestaat, het sediment en de toplaag voornamelijk uit 'veen' c.q. plantenmateriaal bestaat.



Figuur 2.2 Box-Whisker grafiek van de C:N ratio (g/g) van monsters uit literatuur (Cloern et al, 2002, Meyers 1997), het WOL programma (Liere and Gulati, 1992; Liere and Janse 1992) en monsters genomen door Medusa Explorations BV in 2001 in de Loosdrechtse plassen. De blokken in de grafiek geven de spreiding aan van de 50% van de data, de streep in het blok geeft de mediane waarde weer. Bron figuur: Medusa (2001).

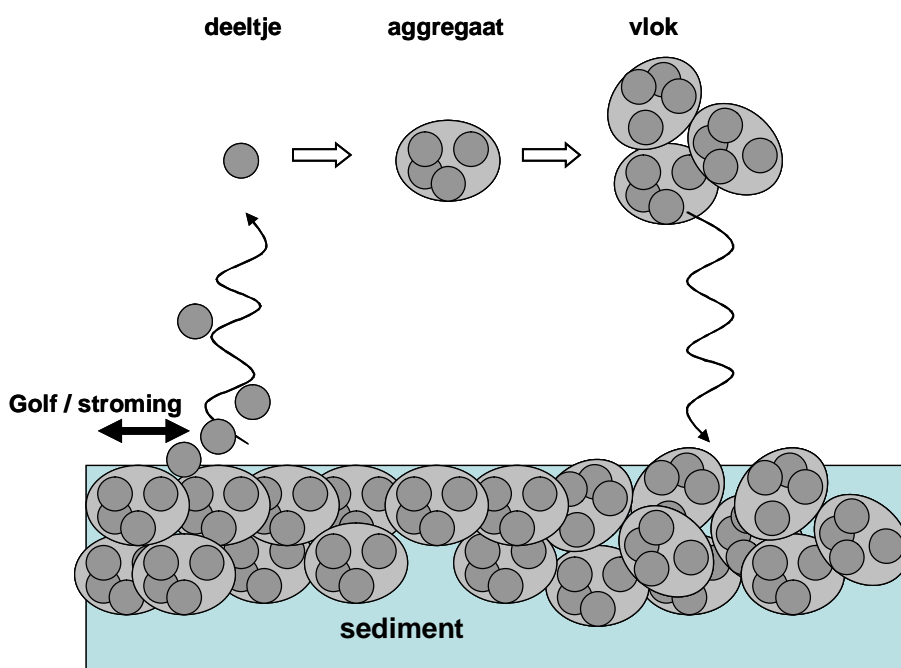
Behalve het karakter van opgewerveld detritus, is de gevoeligheid voor opwerveling van belang. In deze studie gebruiken we een kritische bodemschuifspanning, uitgedrukt als orbitaalbeweging aan de bodem (m/s), om te bepalen wanneer dit detritus wordt opgewerveld.

Een orbitaalbeweging is de heen- en weergaande stroombeweging die golven op de bodem veroorzaken. Boven een bepaalde kritische stroomsnelheid zullen de detritusdeeltjes worden opgewerveld (tau kritisch voor resuspensie), afhankelijk van de stevigheid van de bodem. Hoe zachter een bodem, hoe lager de kritische stroomsnelheid die nodig is om deeltjes op te wervelen. Onder deze kritische waarde zullen deeltjes min of meer in evenwicht blijven zweven, of bij nog rustigere situatie uitzakken naar de bodem (Figuur 2.3).



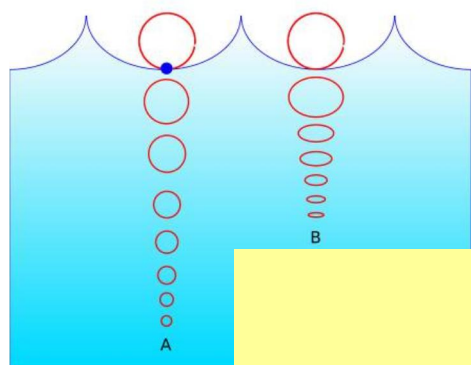
Figuur 2.3 Sedimentatie en resuspensie is afhankelijk van de bodemschuifspanning ( $\tau$ ) en de kritische waarden die de stevigheid van de bodem bepalen.

De deeltjes die worden opgewerveld kleven vaak aan elkaar eerst als aggregaten, die dan weer als vlokken aan elkaar plakken. Deze vlokken zijn relatief groot. Doordat de deeltjes worden blootgesteld aan de krachten die de waterbeweging veroorzaken (turbulentie) zullen vlokken langzaam aan mechanisch worden verpulverd tot kleinere vlokken. Hoe kleiner een vlok, hoe langzamer hij weer naar de bodem valt. In rustige situatie zullen kleinere deeltjes weer aan elkaar plakken en vlokken vormen. Ook op een bodem die tijd heeft om tot rust te komen zullen deze deeltjes aan elkaar gaan plakken en grotere, stevigere eenheden vormen, die moeilijker weer opgewerveld worden. Bewegingen aan de bodem zullen individuele deeltjes weer de waterkolom insturen (Figuur 2.4).



Figuur 2.4 Zwevend stof in de waterkolom staat in directe verbinding met het materiaal op de bodem door de continue uitwisseling als gevolg van waterbeweging, die deeltjes de waterkolom inbrengen, en via vlokken weer uitzinken.

## 2.5 Golfwerking in relatie tot de afmetingen van een watersysteem



Figuur 2.5 Golven in diep water raken de bodem niet (A), in ondiep water raakt de golf de bodem wel (B).

De golven op een meer worden aangedreven door de wind. Hoe groter een meer, hoe langer de wind over het water kan 'strijken'. Deze afstand heet de strijklengte. Hoe langer de strijklengte, hoe langer en groter een golf kan groeien, mede afhankelijk van de windsnelheid en diepte van het meer. De golfenergie op een locatie resulteert in een cirkelvormige beweging: een orbitaalbeweging. Deze energie dooft uit met de diepte. Bij de bodem is deze beweging van een cirkelvorm gereduceerd tot een heen- en weergaande schuifbeweging (Figuur 2.5).

Als de diepte van een meer grofweg kleiner is dan de helft van de golflengte, dan raakt deze energiebeweging de bodem. De golflengte is afhankelijk van zowel de strijklengte als ook de windsnelheid (en duur van deze wind snelheid). Tabel 2.1 geeft een overzicht van deze relatie. Deze tabel toont de resultaten van een oriënterende berekening die de vraag beantwoordt: kom ik in de buurt van mogelijke opwerveling? Dit gebeurt aan de hand van een paar simpele lineaire golfformules (Carper & Bachmann, 1984) gebaseerd op de shore protection manual formuleringen (CERC, 1984). Als de bodem volgens deze vuistregels regelmatig opwervelt (bijv. bij windsnelheden van 6 m/s of meer), wordt aangeraden de vervolgstap maken die in dit rapport is uitgewerkt in de quick scan (paragraaf 4.4)

Tabel 2.1 Diepte waarop het effect van de golf nog de bodem raakt, uitgaande van de vuistregel dat dit op ongeveer 0,5 \* de golflengte is gebaseerd, op de strijklengte (m) en wind snelheid (m s<sup>-1</sup>) en uitgaand van de afwezigheid van waterplanten die golven zouden kunnen dempen.

Strijklengte (m)	Wind (m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
250	0,11	0,25	0,38	0,52	0,65	0,79	0,92	1,06	1,19	1,33	1,46	1,60	
500	0,15	0,34	0,53	0,72	0,91	1,10	1,29	1,48	1,67	1,86	2,06	2,25	
750	0,17	0,40	0,63	0,86	1,10	1,33	1,57	1,80	2,03	2,27	2,50	2,74	
1000	0,19	0,45	0,72	0,99	1,26	1,53	1,80	2,07	2,34	2,61	2,88	3,15	
1250	0,21	0,49	0,79	1,09	1,39	1,69	1,99	2,30	2,60	2,90	3,20	3,51	
1500	0,22	0,53	0,86	1,18	1,51	1,84	2,17	2,50	2,83	3,17	3,50	3,83	
1750	0,23	0,57	0,91	1,27	1,62	1,98	2,33	2,69	3,05	3,41	3,76	4,12	
2000	0,24	0,60	0,97	1,34	1,72	2,10	2,48	2,87	3,25	3,63	4,01	4,39	
2250	0,25	0,62	1,02	1,41	1,82	2,22	2,62	3,03	3,43	3,84	4,24	4,65	
2500	0,26	0,65	1,06	1,48	1,90	2,33	2,75	3,18	3,61	4,03	4,46	4,89	
2750	0,26	0,67	1,10	1,54	1,98	2,43	2,88	3,32	3,77	4,22	4,66	5,11	
3000	0,27	0,69	1,14	1,60	2,06	2,53	2,99	3,46	3,92	4,39	4,86	5,33	
3250	0,28	0,71	1,18	1,65	2,13	2,62	3,10	3,59	4,07	4,56	5,05	5,53	
3500	0,28	0,73	1,21	1,71	2,20	2,71	3,21	3,71	4,22	4,72	5,22	5,73	
3750	0,29	0,75	1,25	1,76	2,27	2,79	3,31	3,83	4,35	4,87	5,40	5,92	
4000	0,29	0,77	1,28	1,80	2,34	2,87	3,41	3,94	4,48	5,02	5,56	6,10	
4250	0,30	0,78	1,31	1,85	2,40	2,95	3,50	4,05	4,61	5,16	5,72	6,28	
4500	0,30	0,80	1,34	1,89	2,46	3,02	3,59	4,16	4,73	5,30	5,87	6,45	

Er is in deze studie een quick scan uitgevoerd, waarbij is gekeken naar de effecten van windgedreven golfwerking op de bodem. Dit is gedaan om een eerste (grobe) inschatting te krijgen van de mogelijke effecten van wind op het meer. We veronderstellen een ruimtelijk uniforme bodemdiepte en bodemstevigheid. Veranderingen in diepte hebben een effect op de golflengte, golfgroei en of de golfenergie de bodem wel of niet bereikt. Deze twee veronderstellingen zijn een duidelijke beperking voor de huidige uitkomsten.

De golfwerking kan verschillende effecten hebben:

- Lichtlimitatie door te veel resuspensie en zwevend stof
- Mechanische belasting op jonge kiemplanten
- Effect op de slibverdeling (stevigheid van de bodem kan in luwe zones minder zijn doordat daar zacht slib sedimenteert, wat minder gunstig is voor vestiging van planten, al is het mogelijk)

We benadrukken dat ons quick scan model geen uitgebreid 3-dimensionaal, volledig golfmodel is, maar een beperkt model dat snel en met weinig basisinvoer een eerste indruk kan geven van een gemiddelde situatie in het meer. Het beperkt is gebaseerd op een principe van golfgroei afhankelijk van strijklengte (en bewust genaamd 'quick scan'). De spreiding of concentratie van golfenergie rond en achter eilanden en bij nauwe doorgangen is met dit quick scan model niet te schatten.

## 2.6 Methoden om het lichtklimaat te verbeteren

In algemene termen zijn er drie sporen om het lichtklimaat te verbeteren:

- Chemisch spoor: - reductie van nutriënten zorgt voor reductie van algen en actief detritus
- Mechanisch spoor – reductie van mechanische belasting zorgt voor reductie van resuspensie van deeltjes van de bodem
- Biologisch spoor: - ingrijpen in de voedselketen om via top-down benadering de troebelheid te verminderen (bijv. via actief biologisch beheer: het wegvangen van witvis of het uitzetten van roofvis)
- Wanneer de algenconcentratie gering is, zal ook de actieve detrituspool beperkt zijn en verdere nutriëntenreductie is in dit soort situaties niet meer automatisch de meest effectieve maatregel. Een waterlichaam dat veel last heeft van hoge concentraties refractair zwevend stof ten opzichte van de concentraties algenbiomassa, heeft mogelijk meer baat bij het mechanisch ingrijpen op het refractair detritus, bijv. door de bodem te verstevigen of golfwerking te reduceren. Ook de aanwezigheid van waterplanten draagt bij aan het verminderen van de resuspensie.
- Een ingreep via het biologisch spoor wordt pas aangeraden als alle andere randvoorwaarden op orde zijn (nutriëntenbelasting voldoende laag, mechanische verstoring niet langer een probleem) en moet vooral worden gezien als een incidentele behandeling die het herstelproces kan versnellen of net over het drempeltje kan helpen.



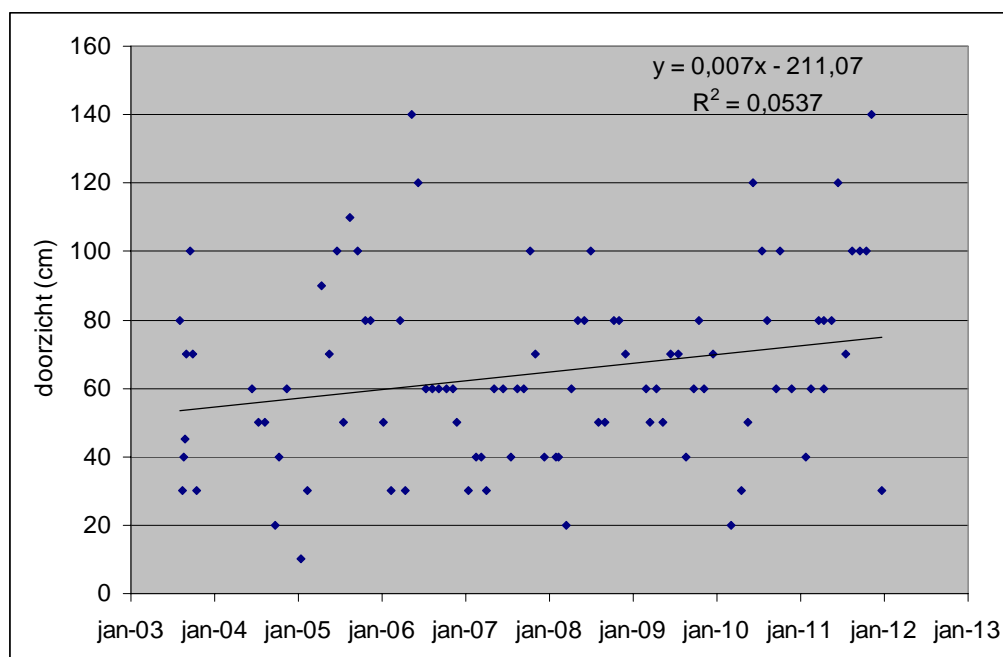
### 3 Materiaal en methoden

#### 3.1 De locatie: de Beulakerwijde

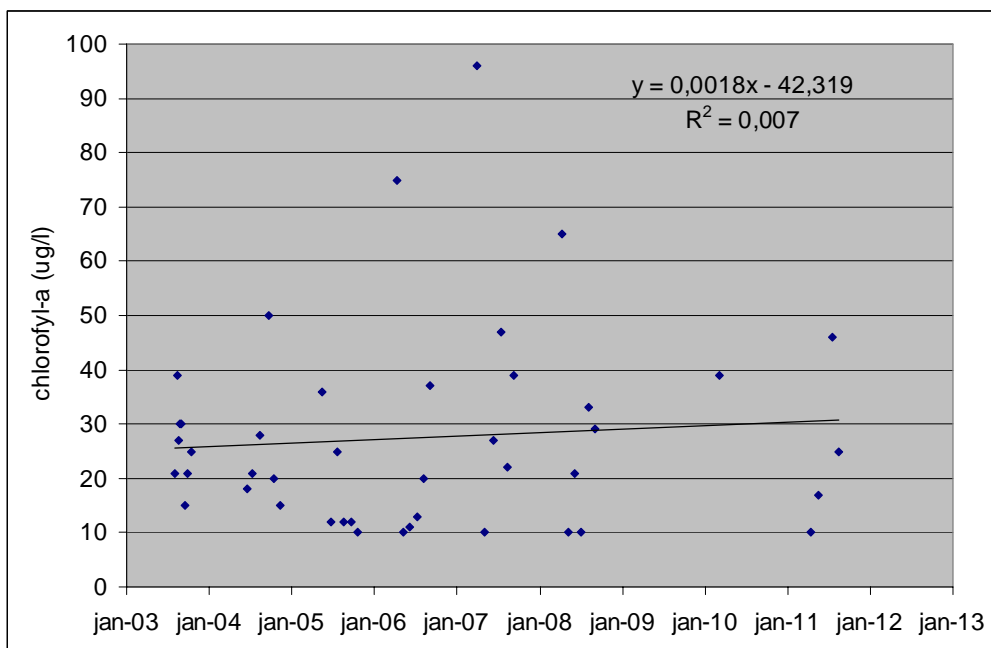
De Beulakerwijde ligt ten zuiden van Giethoorn en is ca. 964 ha groot. De maximale afstand in de richting zuidwest/noordoost is ongeveer 4.4 km. Van zuidoost tot noordwest bedraagt de afstand zo'n 2,6 km. De diepte van het meer is vrijwel overal 2 m (veldmetingen tijdens deze studie). In grove lijnen betekent dit dat bij een windkracht 3 - 4 Bft ( $5 \text{ m s}^{-1}$ ) uit zuidwestelijke richting voldoende is om golfwerking aan de bodem te ondervinden (Tabel 2.1).

In de Beulakerwijde wordt de lichtuitdoving in de reguliere monitoring gemeten met behulp van een secchi-disk. Het doorzicht lijkt over de afgelopen 8 jaar licht te zijn toegenomen van ongeveer 50 cm naar ongeveer 75 cm (Figuur 3.1). Trendtests (Lettenmaier en Spearman Rank Trend test, Kendal Slope Estimator) geven echter geen significante trend, omdat de spreiding groot is.

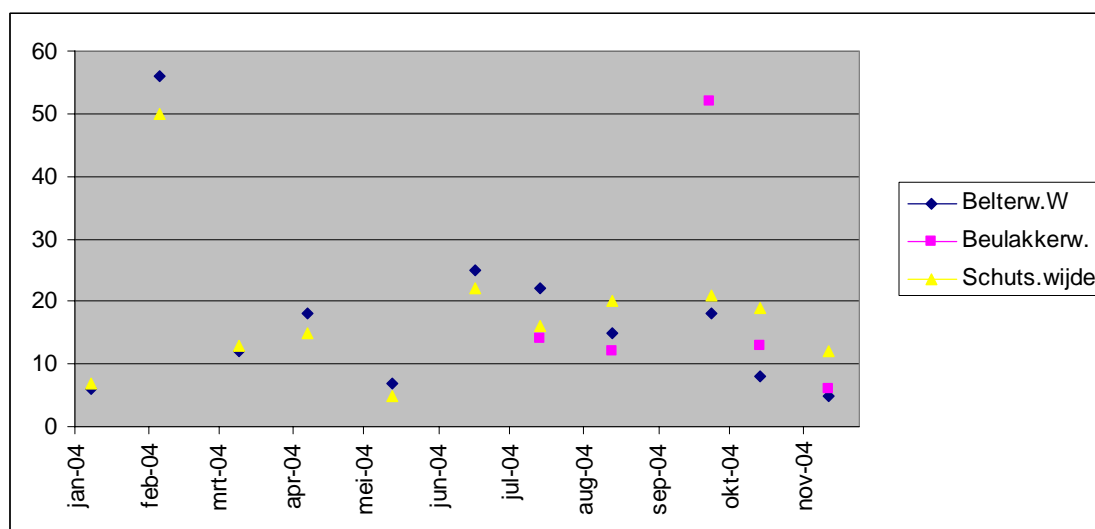
Chlorofylwaarden (Figuur 3.2) zijn ongeveer gelijk gebleven (gemiddeld rond de  $30 \text{ ug/l}$ ), met een voorjaarspiek (diatomeeën?) rond de  $80 \text{ ug/l}$ , die na 2008 niet meer is geregistreerd (weinig data punten in die jaren). De chlorofylwaarden zijn daarmee niet hoog te noemen.



Figuur 3.1 Doorzicht voor de Beulakerwijde periode augustus 2003 – eind 2011.



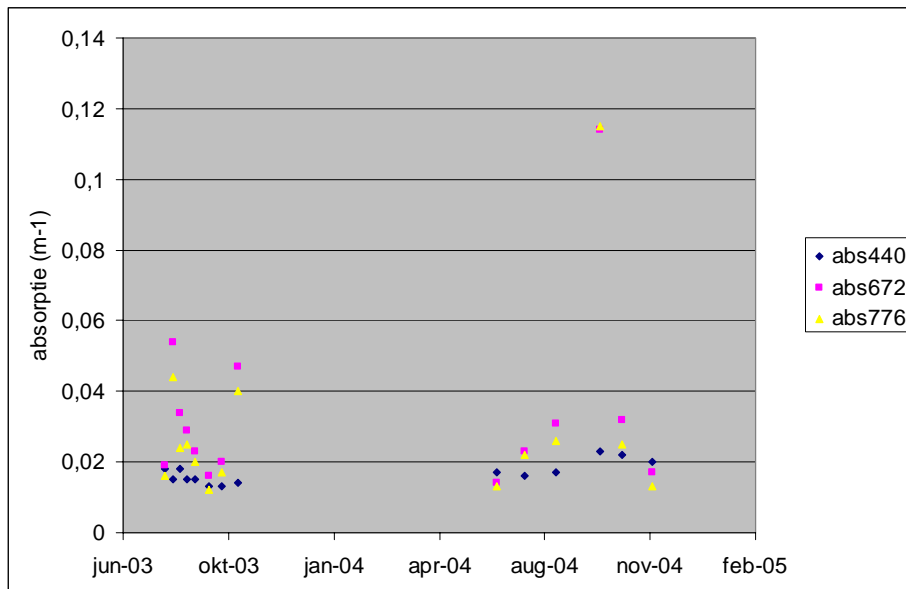
Figuur 3.2 Chorofyl-a voor de Beulakerwijde periode augustus 2003 – eind 2011.



Figuur 3.3 Zwevend stofconcentraties in 3 meren in de Wieden (zie bijlage 1 voor alle meren in de Wieden).

Van totaal zwevend stof zijn slechts weinig data punten beschikbaar in 2004 worden waarden tussen de 6 en 52 mg/l geregistreerd (gemiddeld 14 mg/l; Figuur 3.3). De piekconcentratie van 52 mg/l die is gemeten in de Beulakerwijde op 22 september 2004. Die dag was de hoogste uurgemiddelde windsnelheid 8 m/s (windkracht 5), maar er zijn windstoten tot windkracht 7 gemeten. De avond/nacht van 22/23 september was rustig, maar in de loop van de 23<sup>e</sup> wakkerde de wind aan naar vergelijkbare waarden als 22 september, maar meer noordwest i.p.v. west. Dat resulteert in kortere strijklengtes. De metingen op 23 september zijn verricht om 10.00 en 11.15 uur. De rustige nacht en de iets gedraaide win zou de verschillen tussen de Beulakerwijde enerzijds en de Belterwijde & Schutsloterwijde anderzijds kunnen verklaren. Dat indiceert dat het zwevend stof snel weer is uitgezakt. Ook op 5 februari was de wind hard (hoogste uurgemiddelde windsnelheid 10 m/s = windkracht 5).

Er is in de Wieden nog een andere parameter gemeten die gerelateerd is aan licht, namelijk de absorptie bij enkele golflengtes. De absorptie bij 440 wordt ook wel gebruikt voor het afleiden van regressievergelijking zoals vergelijking 2.2.



Figuur 3.4 Absorptie in de Beulakerwijdte bij verschillende golflengtes.

### 3.2 Karakterisering zwevend stof Beulakerwijdte

Om beter inzicht te krijgen in de rol van zwevend stof op de helderheid van de Beulakerwijdte zijn metingen verricht aan de fysieke eigenschappen van het detritus.

#### 3.2.1 Veldmetingen en waarnemingen ter plaatse

Op 23 april zijn op drie locaties (Figuur 3.5) in het meer drie onverstoorte steekbuizen ( $\varnothing$  6 cm) genomen van de bovenste laag van het sediment (genummerd: x.y, waarin x de locatie is en y het nummer van de buis op de betreffende locatie). Deze steekbuizen zijn in verticale positie naar het fysisch-chemisch laboratorium van Deltares te Delft gebracht. Daar zijn ze gekoeld bij 4°C opgeslagen tot nadere analysemomenten.



Figuur 3.5 Monsterlocaties in de Beulakerwijdte

Tevens zijn er in het veld metingen gedaan aan de lichtuitdoving in het water door middel van een Secchi-schijf en een extinctiemeter. In de plas is per meetpunt op verschillende waterdiepten PAR gemeten met een lichtsensoren (merk Li-Cor) die is gericht op verticaal invallend licht en gecorrigeerd is voor zijn openingshoek. Door de lichtsensoren op diverse diepten te plaatsen kan de extinctiecoëfficiënt  $K_{PAR}$  ( $m^{-1}$ ) worden afgeleid.

### 3.2.2 Labmetingen

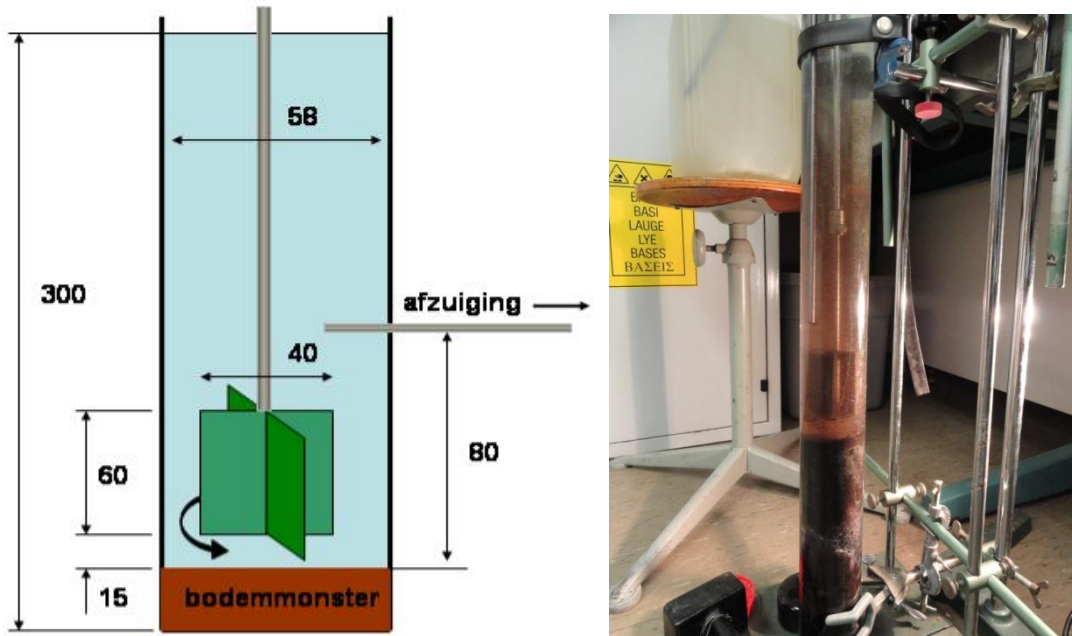
De volgende labmetingen zijn uitgevoerd in het fysisch chemisch lab in Delft:

- 1 Bepaling van de kritische stroomsnelheid waarboven erosie plaats vindt (Vane)
- 2 Bepaling van de uitdoving van licht door het geërodeerde materiaal zowel in oorspronkelijke vlokvorm als in gedeflocculeerde toestand (OSLIM)
- 3 Bepaling van de fractieverdeling van deeltjesgrootte van het geërodeerde materiaal (MALVERN)
- 4 Bepaling van de valsnelheid van de deeltjes (Sedimentatiebalans)  
Na deze metingen zijn de buizen en overgebleven water vervoerd naar Utrecht waar aanvullend de volgende metingen zijn uitgevoerd in het chemisch laboratorium.
- 6 Bepaling van de C:N verhouding, gewichtsfracties (organische stof en kalk) en macroelementen (waaronder Fe, P en S) in het zwevend stof
- 7 Bepaling van de DOC-concentratie van het oppervlaktewater

#### Onderdeel 1: Erosie metingen

De onverstoorde bodemonsters met bovenstaand plaswater zijn in het lab geërodeerd door het stapsgewijs opvoeren van de snelheid van een roterende roerder ('Vane', 40 mm diameter) die circa 15 mm boven de bodem was geplaatst (Figuur 3.6). Het water werd direct afgezogen op 80 mm boven de bodem voor verdere analyse in het OSLIM/MALVERN circuit (Figuur 3.7). Het toerental van de roerder werd gedurende circa 1800 sec. stapsgewijs opgevoerd tot 70 omwentelingen per minuut (RPM), met een maximale tipsnelheid van de roerder van 146 mm/s.

De Vane zorgt ervoor dat deeltjes en vlokken uit de bodem loskomen en als een ijle nevel tot circa 250 mm boven de bodem opwervelden. Het moment waarop dit gebeurde is zowel op zicht genoteerd als via de OSLIM/MALVERN metingen te bepalen.



Figuur 3.6 Laboratoriumopstelling voor bepaling kritische snelheid voor erosie in onverstoorde kernen. In de buis is een roterende roerder geïnstalleerd (maten in mm) en afzuiging in de waterfase voor analyse van lichtextinctie en deeltjesgrootte. Rechts een foto van de opstelling.

### Onderdelen 2 en 3: Uitdoving van licht door zwevend stof en fractieverdeling deeltjesgrootte

De karakterisering van de optische eigenschappen het zwevend materiaal en de grootte van de deeltjes gebeurt in een driedelige opzet (Figuur 3.7)

A. Van het afgezogen water is in *forward-scatter mode* de lichtreductie gemeten bij 880 nm (infrarood) en in de kleuren Rood, Groen en Blauw, die gezamenlijk de PAR range representeren met OSLIMs (Optical Silt Measuring Instrument, Deltares) (genaamd: OSLIM-1).

B. Daarna stroomt het afgezogen water naar een Malvern particle-sizer voor de bepaling van de verdeling van de deeltjesgrootte. De Malvern meet met behulp van een laser de deeltjesgrootteverdeling van het monster. Het licht van de laser wordt door deeltjes van verschillende grootte op verschillende wijze gebroken. Het gebroken licht valt op verschillende ringen die het signaal doorgeven en vertalen naar een deeltjesgrootte.

C. Na metingen in de Malvern wordt het afgezogen water in een recirculatielus met diverse pompjes gedeflocculeerd tot de fijne individuele deeltjes waaruit vlokken zijn opgebouwd. Daarna wordt opnieuw in *forward-scatter mode* de lichtreductie bij 880 nm (bijna infrarood) en in PAR range gemeten (genaamd: OSLIM-2). Met deze laatste stap is getracht de verandering in turbiditeit te meten van de eventueel door turbulentie opgebroken vlokken. Opbreken van vlokken kan in het veld ook gebeuren door de werking van turbulentie en golven in het veld.

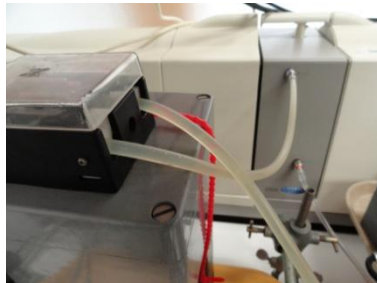


## Gebruikte meetinstrumenten

**OSLIM:** de OSLIM meet over een weglengte van 5 mm licht van 880 nm dat het apparaat zelf uitzendt: de OSLIM meet hoeveel er voorwaarts op de ontvangende elektrode (diode) overkomt/blijft van de totale hoeveelheid uitgezonden licht. Er is dus een deel geabsorbeerd/gescatterd door deeltjes die tussen de uitzender en ontvanger zweven. meetvolume is de afstand vermenigvuldigd met de diameter van de lichtbundel ( $= < 1$  mm). Resulteert in waarden uitgedrukt in FTU (alle instrumenten zijn geijkt in een vloeistof van formazine dat zijn kleine deeltjes van bekende samenstelling. Dus als de OSLIM X FTU formazine geeft, geeft de Li-cor ook X FTU formazine, evenzo de Seapoint, Malvern. Formazine is gebruikt om een vergelijking te maken tussen de uitkomsten van de verschillende instrumenten). Helaas hebben niet alle meetapparaten dezelfde range van golflengtes waar ze in meten (OSLIM 880 nm, Li-cor 440-650 nm, Seapoint 880 nm, Malvern heeft 2 golflengtes: blauw voor doorzicht en rood voor korrelverdeling).



Oslims

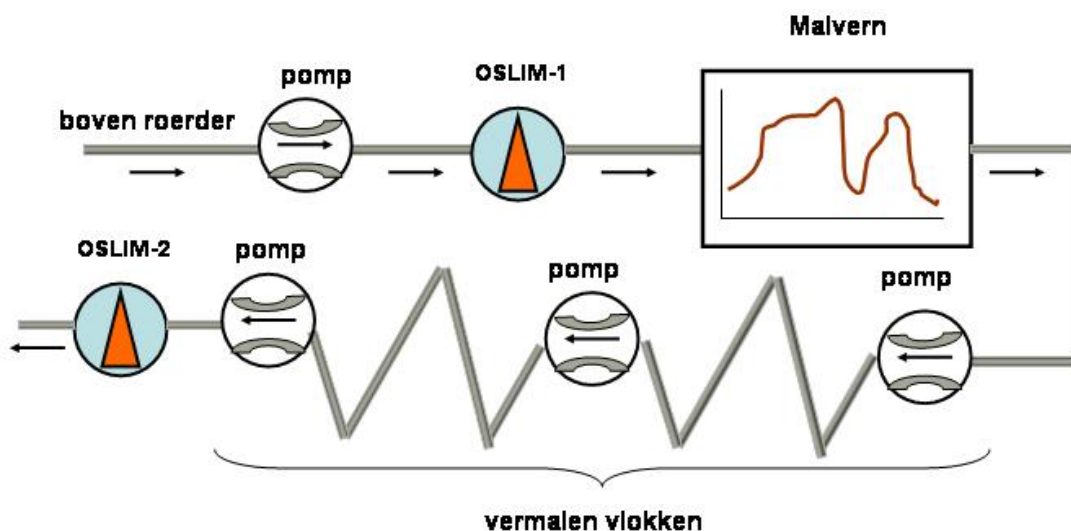


Malvern

**Malvern:** Laserdiffractie is een instrumentele techniek welke meestal toegepast wordt voor deeltjeskarakterisering en korrelgrootte analyse van poeders en suspensies. Laserdiffractie (ook wel statische lichtverstrooiing of voorwaartse lichtverstrooiing) meet het verstrooiingspatroon verkregen door het beschijnen van deeltjes met een laserstraal. Het verkregen verstrooiingspatroon via zo'n deeltjesanalyse bevat informatie over deeltjesgrootte en de korrelgrootteverdeling.

**Li-cor:** Diode-ontvanger van zonlicht. De Li-cor kijkt alleen hoeveel (zon)licht er op de ontvanger komt. Door op verschillende dieptes te meten kan het verschil worden berekend en dat is de extinctie.

**Secchi:** Een Secchi-disk geeft een totaal spectrum visuele interpretatie.



*Figuur 3.7 Water en zwevend stof afkomstig van het monster dat net boven Vane wordt afgezogen (Figuur 5.1) voor meting lichtextinctie (OSLIM circuit-1), fractieverdeling (Malvern) en na rondpompen en mogelijk destructie van vlokken in leidingcircuit opnieuw gemeten lichtextinctie (OSLIM circuit-2).*

Figuur 3.8 toont de opstelling.



*Figuur 3.8 Opstelling voor de opwervelingsexperimenten*

#### *Onderdeel 4: Sedimentatiebalans*

De valsnelheid van vlokken wordt zowel bepaald door hun afmetingen (en korrelverdeling), vormgeving als hun dichtheid en opbouw. Het combineren van voorgaande geeft uiteindelijk de sedimentatie die plaatsvindt. Daarbij is onzeker of er sprake is van kleine zware deeltjes of grote lichte deeltjes die sedimenteren.

Bij voorkeur zou je dan ook een meting uitvoeren waarbij er een koppeling is tussen vormgeving / vlokopbouw / afmetingen en valsnelheid, bijv. door video-opnames te analyseren. Dit was echter binnen dit project niet mogelijk. Er is in plaats daarvan gekozen om gebruik te maken van een sedimentatiebalans om inzicht te krijgen in de valsnelheid van het zwevend stof.

Een sedimentatiebalans bestaat uit een valkolom van ongeveer 300 mm hoog, gevuld met water waar op de bodem een weegschaal is gemonteerd. Een te onderzoeken monster worden homogeen in deze waterkolom verdeeld, waarna de meting start. Gemeten wordt in de tijd het onder watergewicht van het sediment dat op de weegschaal terecht komt. Omdat fractie na fractie zal sedimenteren is het in de tijd gemeten sedimentatie gewicht om te rekenen in een valsnelheidsverdeling. Bij lage valsnelheden heeft de meting een potentieel grote doorlooptijd (12-24 uur) en is zeer gevoelig voor temperatuurwisselingen in de omgeving bij met name kleine en deeltjes met een lage dichtheid.

Voor het bepalen van de valsnelheid van het materiaal uit de Beulakerwilde is de toplaag handmatig afgezogen van een onverstoorde buis. Dit materiaal is in oplossing gebracht en na

homogenisatie door roeren in de sedimentatiebalans geplaatst. Daarna is bijna 3 uur gemeten wat de toename is van materiaal op de onderwaterweegschaal. Het materiaal had veel minder tijd nodig om te bezinken dan de eerder genoemde 12-24 uur. Eenzelfde methode is gebruikt voor hetzelfde materiaal nadat het gedeflocculeerd was via het pompcircuit tussen de Malvern en OSLIM-2. Op die manier hebben we inzicht in het valgedrag van zowel de grotere vlokken als ook het fijnere materiaal wanneer dit langer in de waterkolom gezweefd zal hebben en onderhevig is geweest aan turbulentie.

#### *Onderdeel 5: Bepaling van de C:N verhouding, gewichtsfracties (organische stof en kalk) en macro-elementen (waaronder Fe, P en S) in het zwevend stof*

Na deze metingen zijn de kolommen naar Utrecht vervoerd. In het chemisch lab in Utrecht is het grootste gedeelte van het bovenstaande water uit de kolommen afgepompt. Door de kolom te zwenken is het zwevend stof opgewerveld en dat materiaal is vervolgens afgepompt en opgevangen. Door het zwenken was er ook iets minder fijn materiaal opgewerveld. Dit is verwijderd door het zwevende materiaal twee keer over te gieten in een nieuw bekglas, waarbij de zwaarste deeltjes achterbleven. Nadat het materiaal in een bekglas was bezonken, is het bovenstaande water afgepipetteerd en is het gedroogd bij 105°C. De volgende bepalingen zijn uitgevoerd.

#### Koolstof en stikstof

De totaal koolstof- en stikstofgehalten zijn gemeten met een CN-analyzer (Fisons NA 1500 NCS met Dumas flash combustion). Daarbij verbrandt droog sediment door flash combustion bij 1600-1800°C. Tenslotte worden de componenten gedroogd gescheiden in een gaschromatograaf (GC 2m, 6x4 Porapack QS).

#### Bepaling van gewichtsfracties (TGA)

TGA staat voor ThermoGravimetrische Analyse. Het is een kwantatieve bepaling van het gewichtsverlies bij 105 °C, 450 °C, 550 °C, 800 °C en 1000 °C in sedimenten en vaste bodemmonsters met behulp van een geautomatiseerde thermogravimetrische analysator (LECO TGA 701). De methode is van toepassing op alle soorten sediment en vaste bodemmonsters behandeld volgens (NEN 5751).



Vervolgens worden de volgende fracties onderscheiden:

- Het vochtgehalte van een bodemmonster is het gewichtsverlies in grammen tussen de (natte) inweeg en het drooggewicht bij 105°C (NEN 5748).
- Het organische stofgehalte (gloeiverlies) is de fractie die verbrand tot 550°C. Het organische stofgehalte wordt uitgedrukt als percentage van het constante drooggewicht bij 105°C.
- Tussen 550°C en 800°C worden carbonaten omgezet in CO<sub>2</sub>. Het kalkgehalte van een monster is het gewichtsverlies in grammen tussen gewicht bij 550°C en constante gewicht bij 800°C vermenigvuldigd met 100/44.
- Het totale gloeiverlies (Loss of Ignition, LOI) van een bodemmonster is het gewichtsverlies in grammen tussen het drooggewicht bij 105°C en het gewicht bij 1000°C. Het gloeiverlies wordt uitgedrukt als percentage van het drooggewicht bij 105°C.

Bepaling van macro-elementen (waaronder Fe, P en S)

Elementen worden gemeten met een SPECTRO CIROS<sup>CCD</sup> ICP-Spectrometer met een Radiaal plasma als ionenbron.

De reden om de elementen te meten is dat het een indruk geeft van de verschillen in zwevend stof en bodem.

*Onderdeel 6: Bepaling van de DOC waarde van het (oppervlakte)water*

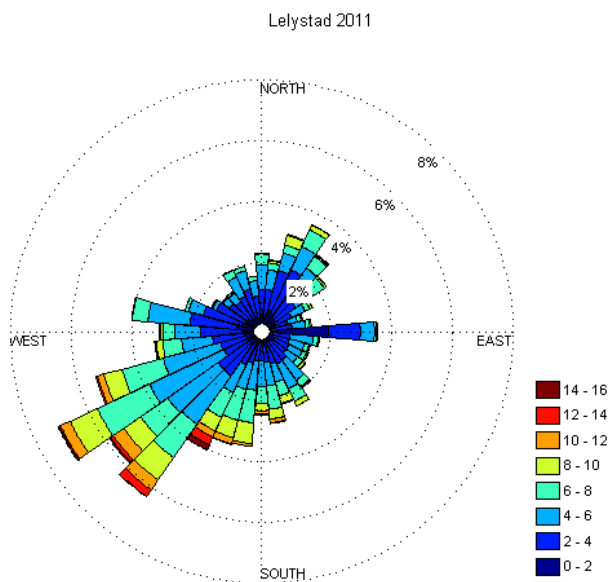
### 3.3 Quick scan – frequentie van overschrijding kritische bodemschuifspanning door golfwerking

De quick scan is gebaseerd op een principe van golfgroei afhankelijk van strijklengte.

Het quick scan model gebruikt

- a) Een strijklengte formulering (Carper and Bachmann, 1984) om strijklengte van de wind, wind snelheid en uniforme diepte te vertalen naar golfgroei. Deze formulering is een benadering voor strijklengten vanaf 0,5 km en diepten vanaf 1 m. De typische afmetingen van de Beulakerwijde zitten ruim boven deze grenzen. Als gemiddelde uniforme diepte is een waarde van 2 m gebruikt.
- b) Een formulering (CERC, 1984) om uit de golfgroei een bijdrage aan de bodemschuifspanning te berekenen. De bijdrage als gevolg van stroming wordt niet meegenomen.
- c) Een rekenmethode om de strijklengte onder verschillende windhoeken op verschillende horizontale rekencellen van het meer uit te rekenen. Hiervoor wordt de gehele Beulakerwijde bedekt met een horizontaal rekenrooster bestaande uit vierkante rekencellen van 100 m bij 100 m. Let op dat het gaat om de mate waarin de wind ongestoord over het water kan scheren. Eilanden en de grens van het meer met het vaste land vormen hierin barrières.
- d) Uurlijkse windgegevens (snelheid en richting) van KNMI station Lelystad van 2011.

De spreiding of concentratie van golfenergie rond en achter eilanden en bij nauwe doorgangen is met dit quick scan model niet te schatten.

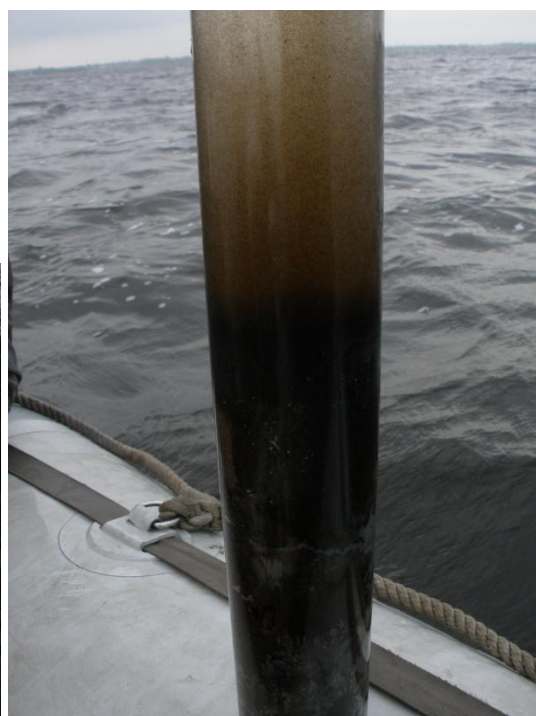


Figuur 3.9 Windroos van station Lelystad (uurlijke wind) gebruikt voor de quick scan berekening.

## 4 Resultaten

### 4.1 Veldmetingen

Op 23 april en de voorgaande dagen was het weer onstuimig, met windsnelheden van gemiddeld  $4 - 5 \text{ m s}^{-1}$  (en pieken tot  $10 \text{ m s}^{-1}$ ) uit het zuid-zuidwesten.



Figuur 4.1 Veldwerk op de Beulakerwijde

De Secchi-schijfmetingen geven voor deze velddag een doorzicht van gemiddeld 25 cm aan, wat goed te koppelen is aan de directe opwerveling van zwevend stof door de windgedreven golven op het meer. Ook wordt door de monsternemers opgemerkt dat het water opmerkelijk zwart is, ten opzichte van meren in eerder onderzoek, zoals bijv. Loosdrecht, Nieuwkoop en Reeuwijk en dat de bodem in het noordoosten van het meer vrij hard is, waardoor de buizen minder makkelijk de bodem in kunnen worden geduwd. In het midden en zuidwesten is dit veel makkelijker. De buizen kwamen erg schoon omhoog, zonder modder aan de buitenkant en de vlokken zijn op het eerste gezicht erg groot en vallen snel naar beneden.

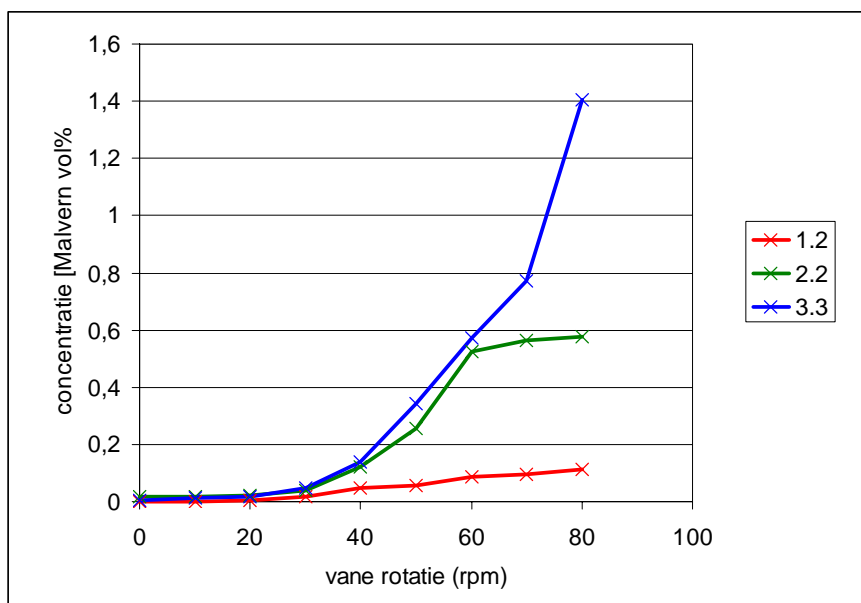
De gemeten extinctiewaarden in de Beulakerwijde op de monsterdag liggen rond de  $2 \text{ m}^{-1}$  ( $\pm 0,2$ ). De gemeten secchi-diepte was 0,3 m ( $\pm 0,05$ ). Deze combinatie geeft een pool-atkins constante (de relatie tussen secchi-diepte en extinctiewaarde) van 0,6 ( $\pm 0,15$ ), wat erg laag is. De bovenkant van de range in de Beulakerwijde is gelijk aan de onderkant van de range in de Loosdrechtse plassen (0,7-1,3). Naar verwachting fluctueert deze constante erg gedurende het seizoen. Dit maakt het lastig om de Secchi-metingen uit de reguliere monitoring te koppelen aan daadwerkelijke extinctiewaarden.

Omdat het weer op de velddag onstuimig was, zijn de gemeten Secchi-waarden vrij laag en de gemeten lichtextinctie vrij hoog ten opzichte van momenten van kalmer weer.

## 4.2 Laboratorium metingen

### 4.2.1 Erosiegevoeligheid Beulakerwijde bodem – Vane experiment

Visueel was tijdens de vane experimenten goed te zien dat tussen de 15-20 rpm de toplaag begint te eroderen op alle drie locaties. Deze snelheid in rpm komt overeen met een stroomsnelheid aan de bodem van ongeveer 3 cm/s. Het startpunt voor erosie ligt dus gelijk maar de hoeveelheid zwevend stof die in het water komt varieert sterk tussen de locaties. Locatie 1 (kolom 1.2) heeft een dunne sliblaag, waardoor er veel minder materiaal wordt geërodeerd. De verschillen zijn goed te zien in de lijnen in Figuur 4.2.



Figuur 4.2 De concentratie zwevend stof in volume% gemeten tijdens de vane-proef

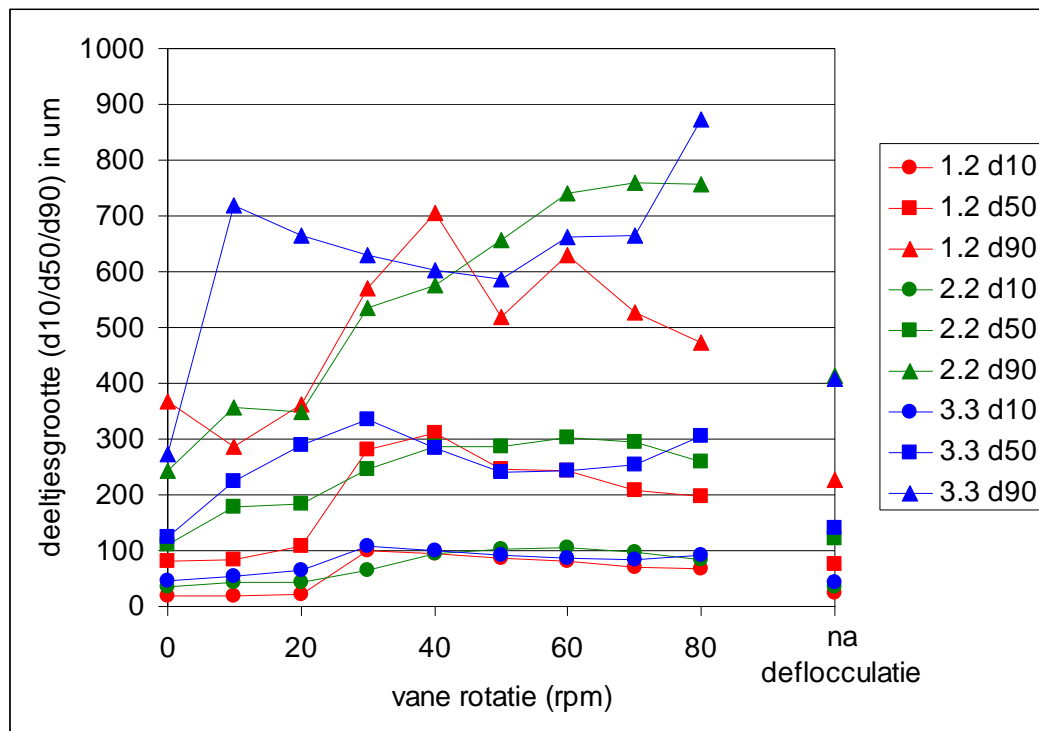
Bij locatie 2 is bij ~ 60 rpm de toplaag op en vindt geen verdere erosie plaats. Op locatie 3 wordt het meeste materiaal geërodeerd. De erodeerbare toplaag in het meer is dus in het zuidwesten dik en in het noordoosten dun. Dit kan worden verklaard door het aanwezig zijn van een retourstroom door het meer, die materiaal van noordoost naar zuidwest transporteert en het materiaal daar in rustiger water afzet.

Onder de toplaag bevindt zich in locatie 1 een stevigere laag die ook zand bevat. In de toplaag van locatie 1 zijn ook driehoeksmosselen aangetroffen in 2 van de drie steekbuizen. Deze twee buizen met driehoeksmosselen konden niet gebruikt worden voor Vane experimenten omdat de driehoeksmosselen het stromingspatroon aan de bodem teveel verstoren. Uiteindelijk is dan ook besloten om slechts 1 buis voor het erosie-experiment te gebruiken. Mede omdat na deze eerste metingen bleek dat de toplaag die gevoelig is voor erosie in alle drie de locaties op dezelfde manier reageert. In plaats daarvan is meer aandacht besteed aan de verschillen tussen geflocculeerd en gedeflocculeerd materiaal en zijn er extra sedimentatiebalans proeven gedaan met beide soorten materiaal.

### 4.2.2 Deeltjesgrootte

De toplaag heeft een gelijke samenstelling over het hele meer, gezien de gemiddelde diameter van de deeltjes ( $d_{10}$ ,  $d_{50}$  en  $d_{90}$ ). In Figuur 4.3 zijn voor de drie kolommen (1 per locatie) deze  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  en  $d_{90}$  geplot gebaseerd op de MALVERN metingen. In alle drie de locaties liggen deze  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  en  $d_{90}$  rond dezelfde deeltjesgrootte.

Bij toename van de Vanesnelheid verandert de samenstelling van deeltjesgrootte niet bijzonder. Op de rechter as in Figuur 4.3 zijn de deeltjesgroottes weergegeven van de gedeflocculeerde monsters. Het toerental is hierbij niet relevant meer, vandaar dat ze op de as zijn geplott. In het gedeflocculeerde materiaal is locatie 1 lager dan de rest, die gekoppeld lijkt aan de weinig hoeveelheid materiaal in dit monster dat geïrodeerd wordt.



Figuur 4.3 De deeltjesgrootte (d10, d50 en d90) tijdens het vane-experiment en na deflocculatie.

#### Schatting van maximale concentratie zwevend stof als gevolg van opwerveling

De opwervelingsproef van Deltares toont aan dat de gevoeligheid van de bodem voor opwerveling niet veel uitmaakt per locatie, maar dat de hoeveelheid zwevend stof die werd opgewerveld sterk varieerde. De sliblaag was in het noordoosten veel dunner. Vooral op locatie 2 was duidelijk een plateau te zien bij de hoogste snelheden van de rotor. Dat indiceert dat het materiaal op was. In onderstaande tabel zijn de maximaal opgewervelde hoeveelheden in de 20 cm hoge waterkolom in het lab doorvertaald naar concentraties in een 2 meter hoge waterkolom (de diepte van de Beulakerwijde). Daarbij zijn de volgende stappen gevolgd:

1. de volume fractie is omgerekend naar mg natte vlokken/l volgens:

$$\text{ZS-nat-kolom (g/l)} = \text{ZS-volume (l/l)} * \rho_b \text{ (mg/l)} \quad [4.1]$$

Waarin:  $\rho_b$  = de bulkdichtheid (1100 g/l)

2. We nemen aan dat de vaste stof in vlok / aggregaat een dichtheid heeft van 2000 kg/m<sup>3</sup> (50% organische stof, 50% anorganisch materiaal), dan kan de drogestoffractie in de zwevend stof berekend worden volgens:

$$\text{DS} = (\rho_b - \rho_w) / (\rho_s - \rho_w) = 100/1000 = 0,1 \quad [4.2]$$

Met:

DS = droge stof (fractie)

$\rho_b$  = droge bulkdichtheid (1100 kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_w$  = dichtheid van water (1000 kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  = dichtheid van de vaste stof (2000 kg/m<sup>3</sup>)

$$\text{ZS-droog-kolom (mg/l)} = 1000 * \text{ZS-nat (g/l)} * \text{DS} \quad [4.3]$$

3. de drogestof in de kolom wordt vertaald naar drogestof in het meer door met de ratio van de waterdiepte in de kolom en de waterdiepte in het meer te vermenigvuldigen.

$$\text{ZS-droog (mg/l) in het meer} = \text{ZS-droog-kolom} * 0,28 \text{ m} / 2 \text{ m} \quad [4.4]$$

Tabel 4.1 Omrekening van de zwevend stof volumefractie (l/l) in de kolommen naar zwevend stof drooggewicht in het meer (mg/l)

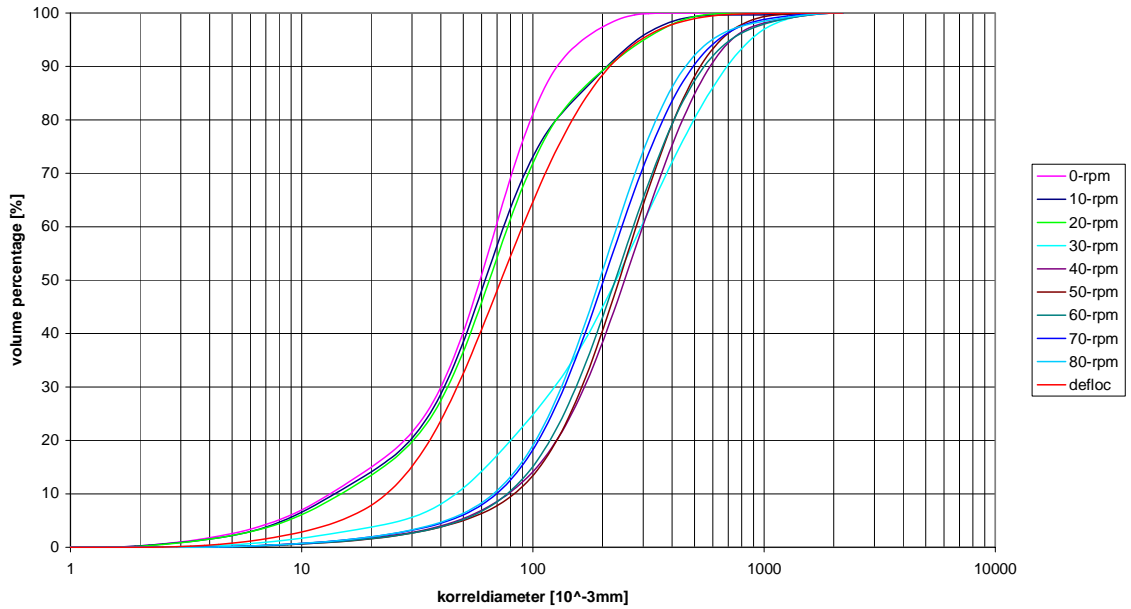
locatie	ZS in kolom (vol.fractie)	ZS-nat in kolom (g/l)	ZS-droog in kolom (mg/l)	ZS-droog in meer (mg/l)
1.2	0,001	1,10	110	15
2.2	0,006	6,60	660	92
3.3	0,014	15,40	1540	216

De ruimtelijke variatie van de maximale hoeveelheid op te wervelen materiaal is groot, maar de waarde van kolom 2 (als gemiddelde voor het hele meer) ligt in dezelfde orde van grootte als de gemeten piekconcentraties in de metingen (de beperkte monitoring data (Figuur 3.3) van Waterschap Reest en Wieden laten enkele pieken van 50 tot 60 mg/l zien).

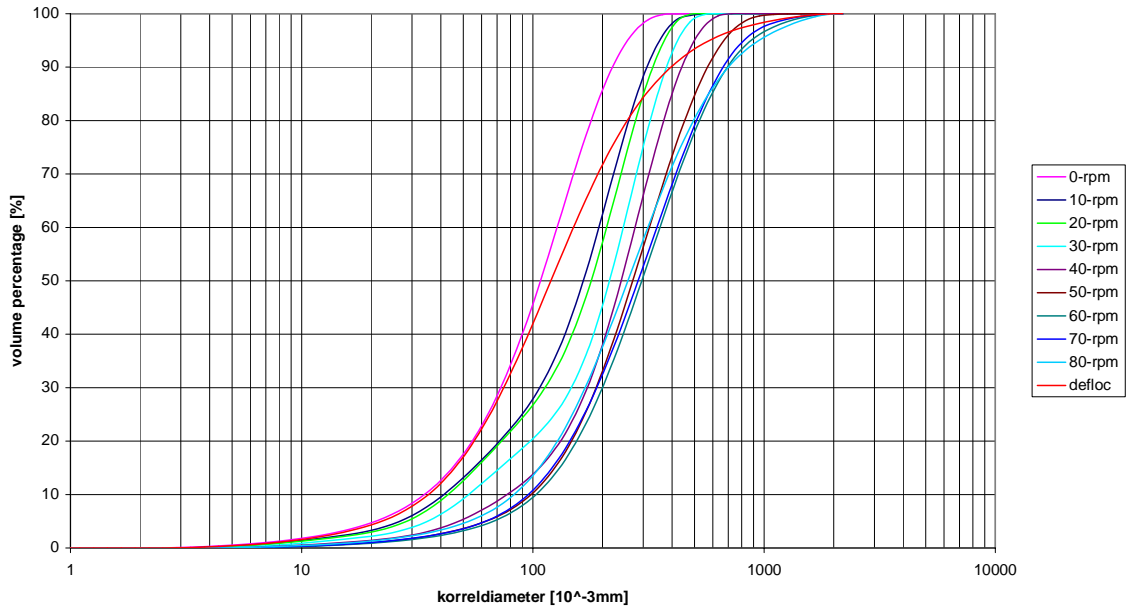
Figuur 4.4 toont de grafieken met Malvern cumulatieve volumepercentages deeltjesgrootte van de drie locaties voor de verschillende toerentallen en gedeflocculeerd. Bij deflocculatie is de gemiddelde korrelgrootteverdeling weergegeven, nadat al het geërodeerde materiaal door zowel de kleine als de grote pomp in de overall opstelling is gegaan. In alle gevallen heeft defloc een grotere d<sub>50</sub> dan het sediment dat van oorsprong in de waterkolom aanwezig was en een kleinere d<sub>50</sub> dan van het materiaal voordat het door de pompen heen ging.

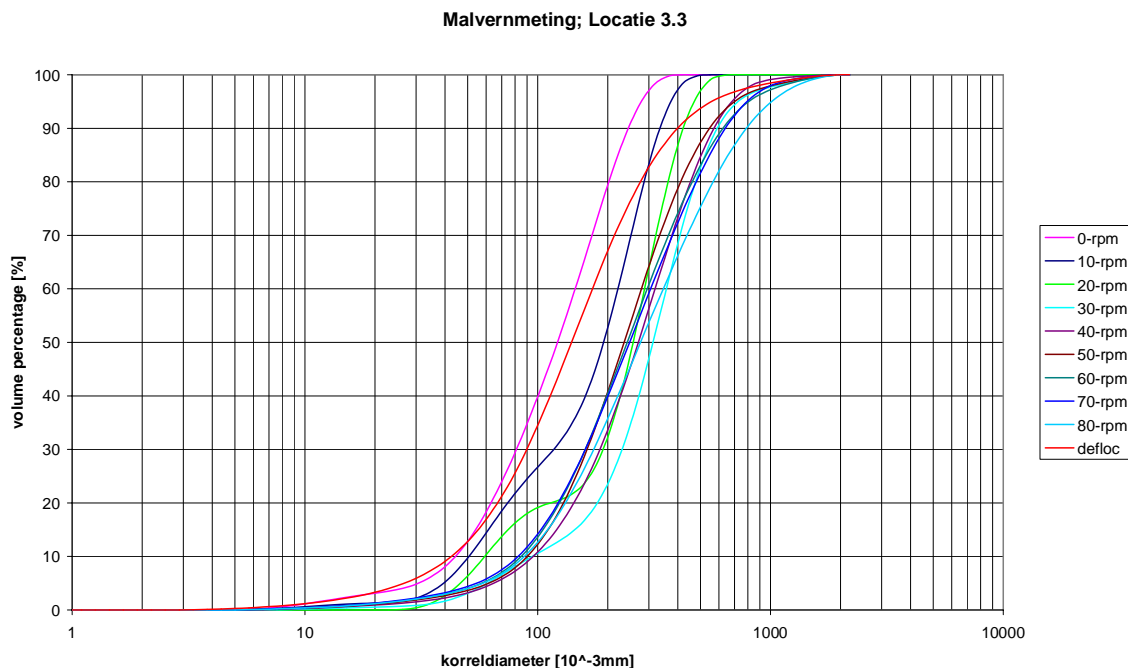
De totale korrelverdeling voor de drie locaties ligt in dezelfde orde van grootte, hoewel kolom 1.2 (Figuur 4.4) een wat lagere range in d<sub>50</sub>-waarden geeft (60-230 µm) dan kolommen 2.2 en 3.3 (100-300 µm). Daarnaast is in kolom 1.2 een scheiding te zien tussen 20 en 30 rpm, terwijl de andere kolommen een meer geleidelijke stijging tonen van de diameter bij stijging van het toerental.

Malvernmeting; Locatie 1.2



Malvernmeting; Locatie 2.1





Figuur 4.4 Malvern-metingen in het opgewervelde materiaal in kolommen 1.2, 2.2 en 3.3

#### 4.2.3 Uitdoving van licht door opgewervelde deeltjes - OSLIM metingen

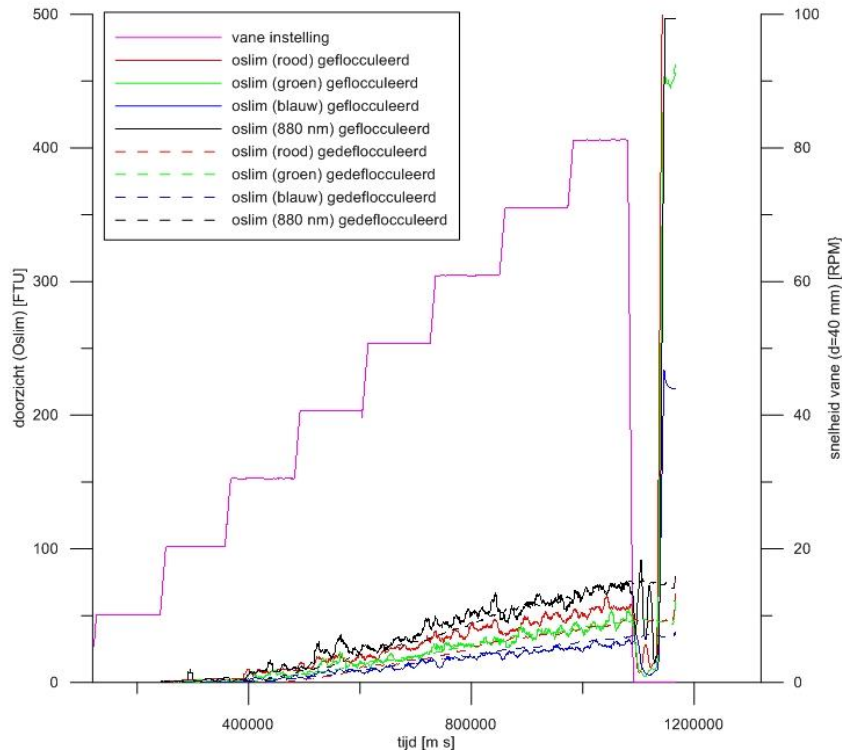
De OSLIM metingen bevestigen het beeld dat ook met de Malvern (Figuur 4.2) wordt geschetst, namelijk dat de erosie begint rond de 20 rpm (~3 cm/s stroomsnelheid aan de bodem). Figuur 4.5 t/m 4.5 geven voor de drie locaties de resultaten van de verschillende OSLIM-metingen weer. De OSLIM metingen geven aan dat in alle gevallen lichtuitdoving (en dus zwevend stof) blijft oplopen bij toenemende RPMs van de Vane, hoewel in kolom 2.2 wel een afbuiging van de lijn is te zien. Voor kolom 2.2 gaf de Malvern een plateau bij de hoogte snelheden (groene lijn in Figuur 4.2).

De hoogte van de uiteindelijk gemeten turbiditeit (FTU) is per locatie verschillend. Dit geeft, net als bij de Malvern, aan dat de toplaag in de locaties niet overal even dik is. In locatie 1 (noordoost) is de maximale turbiditeit 150 FTU. In locatie 2 (midden) is de hoeveelheid opgewerveld materiaal hoger: 370 FTU. In locatie 3 (zuidwest) is de hoeveelheid opgewerveld materiaal het hoogst: 500 FTU.

De OSLIM-metingen met verschillende lampen laten zien dat de verschillende lichtbronnen eenzelfde patroon van een stijgende lijn vertonen (Figuur 4.5 t/m Figuur 4.7). De deeltjes zijn bruin en daardoor zijn de metingen met de rode lichtbron hoger dan met de groene, welke weer hoger zijn dan met de blauwe lichtbron. De verhouding tussen de kleuren varieert wel iets. Vooral kolom 3.3 geeft nauwelijks verschil tussen rood (ca. 650-750 nm) en 880 nm. Het is niet gelukt om op basis van deze metingen een relatie af te leiden tussen de extinctie gemeten over het PAR-gebied en gemeten bij blauw, groen, rood en 880 nm. Omdat in eerdere studies een relatie is afgeleid tussen de OSLIM bij 880 nm en de extinctiecoëfficiënt, zijn de 880 nm-waarden (zwarte lijn in de onderstaande figuren) gebruikt voor verdere interpretatie.

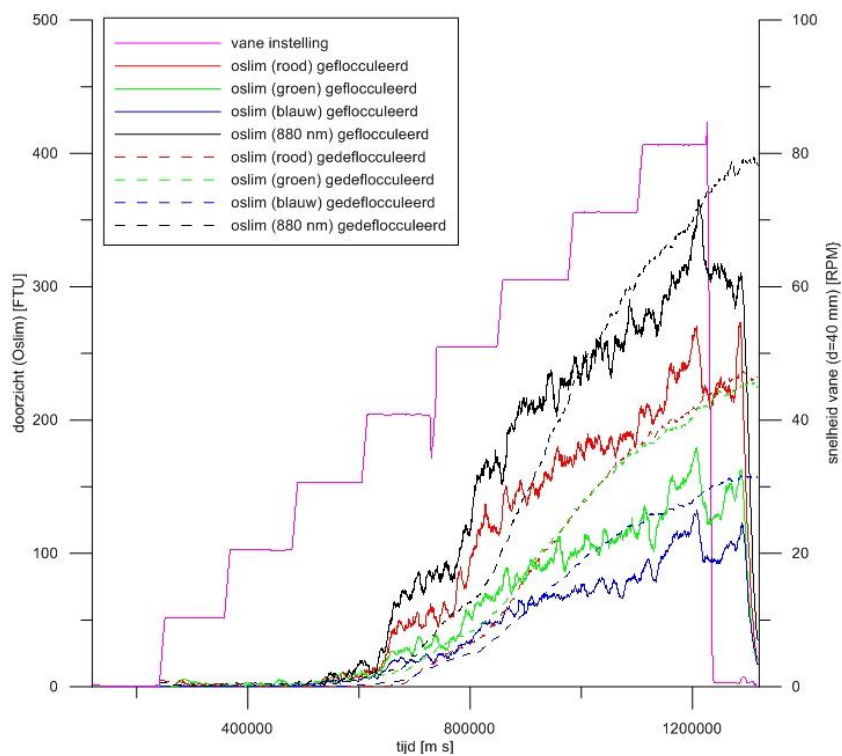


## Locatie 1.2



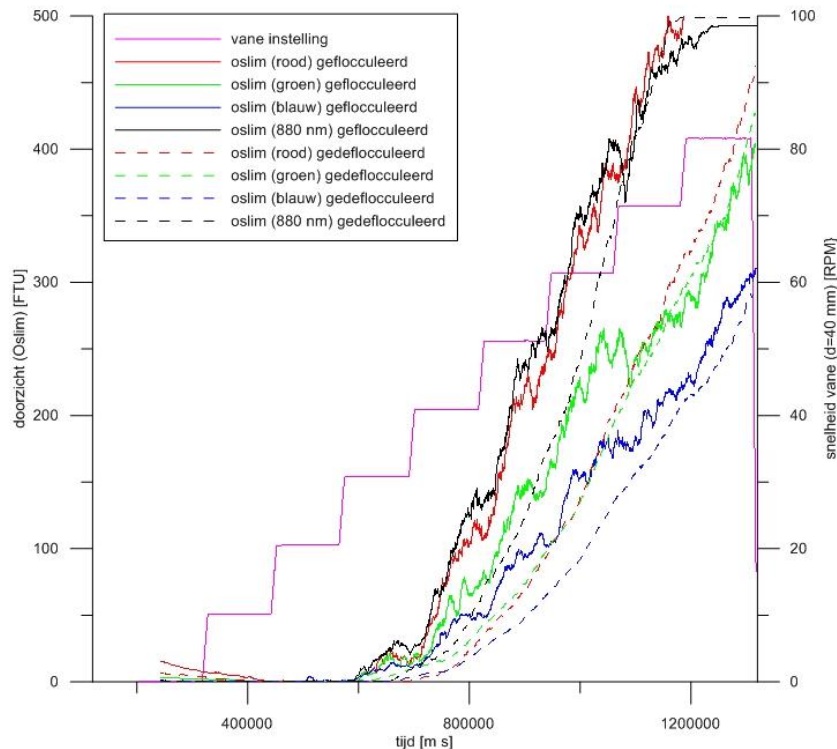
Figuur 4.5 Resultaten van de OSLIM-metingen in kolom 1.2 gedurende de proef waarin het toerental werd verhoogd (op de x-as is de tijd weergegeven in milliseconden).

## Locatie 2.2



Figuur 4.6 Resultaten van de OSLIM-metingen in kolom 2.2 gedurende de proef waarin het toerental werd verhoogd (op de x-as is de tijd weergegeven in milliseconden).

## Locatie 3.3

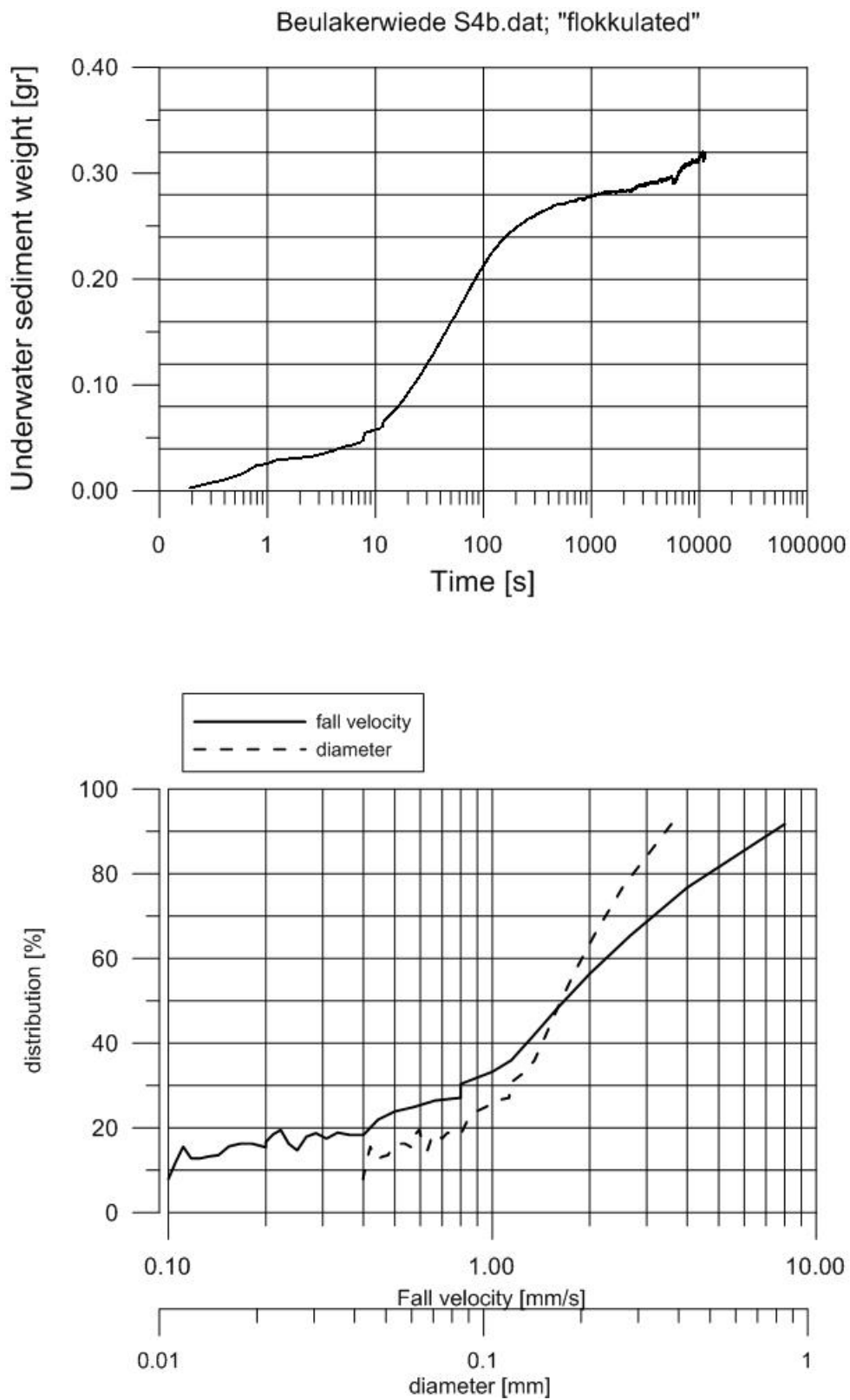


Figuur 4.7 Resultaten van de OSLIM-metingen in kolom 3.3 gedurende de proef waarin het toerental werd verhoogd (op de x-as is de tijd weergegeven in milliseconden).

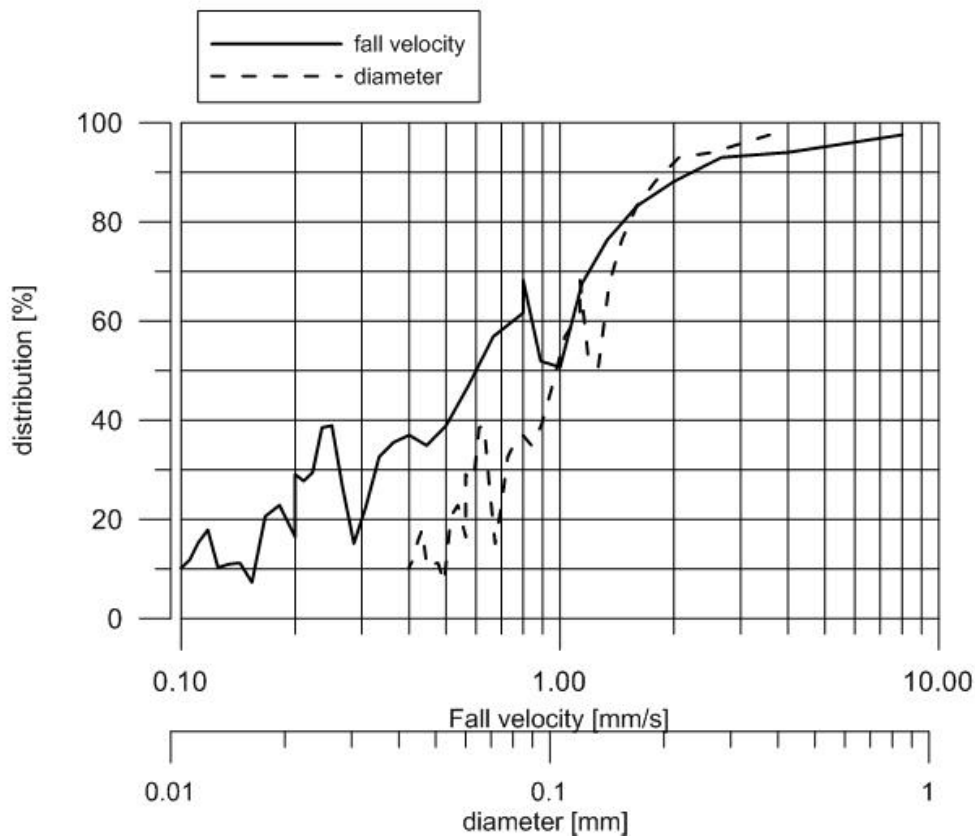
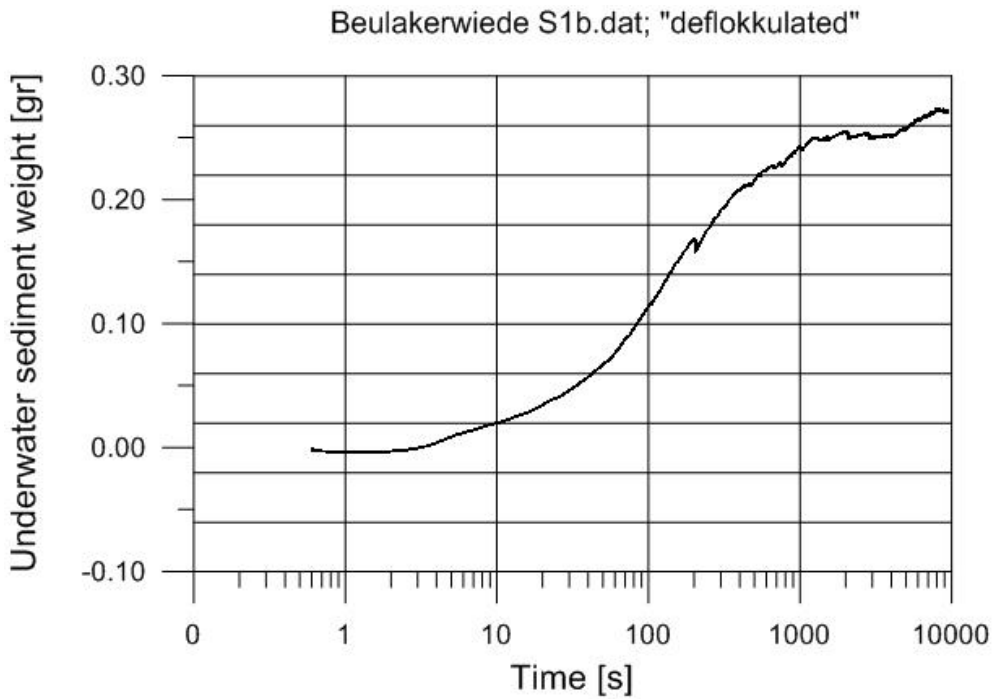
#### 4.2.4 Valsnelheid van deeltjes- Sedimentatiebalans

Al eerder (paragraaf 4.2.2) is aangenomen het materiaal in de sedimentatiebalans een dichtheid heeft van  $1,1 \text{ kg/m}^3$ . Er is zowel een geflocculeerd monster als een gedeflocculeerd monster in de sedimentatiebalans gemeten. De meetresultaten daarvan zijn in onderstaande twee figuren opgenomen. Elk figuur bestaat uit een grafiek boven – het gemeten gewicht aan materiaal op de onderwaterbalans, en een daaruit afgeleide grafiek onder, die de toename aan gewicht over de tijd omzet in een valsnelheid en diameter, gebaseerd op Stokes wet voor valsnelheid van deeltjes, ervan uitgaande dat de deeltjes een dichtheid van  $1,1 \text{ kg/m}^3$  hebben.

In de grafieken a is te zien dat er 0,32 g geflocculeerd zwevend stof op de balans is neergekomen en 0,27 g gedeflocculeerd materiaal. De deeltjes zijn vrij groot. De valsnelheid van de vlokken varieert van 0,2 tot 8 mm/s en voor de gedeflocculeerde vlokken van 0,2 tot 3 mm/s. De gemiddelde snelheid ( $d_{50}$ ) is ongeveer 1,5 mm/s, en voor de gedeflocculeerde deeltjes ongeveer 1 mm/s. De kleinere deeltjes dragen langer bij aan troebelheid dan de grotere deeltjes.



Figuur 4.8 Resultaten van de sedimentatiebalans (boven) en de daaruit berekende valsnelheden en diameter (onder) voor de opgewervelde vlokken.



Figuur 4.9 Resultaten van de sedimentatiebalans (boven) en de daaruit berekende valsnelheden en diameter (onder) voor gedeflocculeerde deeltjes in zwevend stof.

- 4.2.5 Extinctie per mg zwevend stof en vertaling naar zwevend stofmetingen in de Beulakerwijde  
 Uit de resultaten van de sedimentatiebalans kan meer afgeleid worden dan de valsnelheid en de grootte van de deeltjes. Van het monster dat is gebruikt voor de sedimentatiebalans is ook de troebelheid gemeten. De troebelheid van het gedeflocculeerde monster gemeten met de OSLIM (880 nm) was 194 FTU. Voor het geflocculeerde monster werd 159 FTU gemeten. De uitdoving van het licht wordt door de OSLIM (paragraaf 4.2.34.2.4) weergegeven in FTU – formazine turbidity units: hoe hoger de waarde, hoe troebeler het water. De OSLIM's zijn gekalibreerd met formazine, waarvoor geldt:

$$\text{Extinctie} = 0,085 \text{ m}^{-1} / \text{FTU} \quad [4.1]$$

Tabel 4.2 geeft de extinctie in FTU en de omgerekende waarden in  $\text{m}^{-1}$ . Vervolgens moet bekend zijn hoeveel materiaal verantwoordelijk is voor die extinctie. Daarvoor moet de dichtheid van het materiaal bekend zijn. Op basis van de gegevens van de sedimentatiebalans en de Malvernexperimenten samen, kan de dichtheid worden bepaald. Uitgaande van een homogene suspensie in de waterkolom kan op basis van de sedimentatiebalans een valsnelheidsverdeling worden berekend. Daarbij moet een dichtheid worden aangenomen.

In het gedeflocculeerde monster meet de Malvern een volumeconcentratie van 0,15%. Het onderwatergewicht van het sediment in het onderzochte monster is 0,27 g. Aangezien de vlokken uit water en droge stof bestaan, komt het gewicht overeen met de hoeveelheid droge stof in de sedimentatiebalans. Voor het gedeflocculeerde materiaal is een droge bulkdichtheid aangenomen van 1,2 i.p.v. 1,1 kg/l. Dat betekent dat 0,27 g droge stof komt overeen met  $(0,27/0,2=)$  1,35 g natte vlok. De natte vlok heeft een volume van  $1,35/1,2 = 1,1$  ml. Bij een totaal monster volume van ~550 ml een volume concentratie van ~0,2 %. Dit ligt in dezelfde orde van grootte als bepaald door de Malvern.

De concentratie zwevend stof (drooggewicht) in de sediment balans is eenvoudig te berekenen door de massa te delen door het volume. Het volume van de sedimentatiebalans is 550 ml. De concentratie in de sedimentatie balans is voor het geflocculeerde materiaal  $(270/0,55 =)$  486 mg/l en voor het deflocculeerde materiaal  $(320/0,55 =)$  577 mg/l.

Uitgaande van het drooggewicht van de deeltjes bij een gegeven concentratie (mg/l), kan worden uitgerekend hoeveel 1 mg deeltjes/liter bijdraagt aan de uitdoving van licht (Tabel 4.2). Deze waarde kan dan worden gebruikt in de analyse van het lichtklimaat van de plas om inzicht te krijgen in de bijdrage van de opgewervelde deeltjes aan de totale uitdoving.

Tabel 4.2 De extinctie afhankelijk van zwevend stof. Het extinctiegetal is afkomstig uit Tabel 5.1. In de laatste kolom is vermeld hoe de extinctie per mg zwevend stof per liter toeneemt.

OSLIM-meting (880 nm)	Extinctie (FTU)	Extinctie ( $\text{m}^{-1}$ )	Concentratie (mg/l)	Extinctiecoëfficiënt afhankelijk van ZS ( $\text{m}^{-1}\ell/\text{mg}$ )
OSLIM4 geflocculeerd	159	13,5	486	0,028
OSLIM8 gedeflocculeerd	194	16,5	577	0,029

Vanuit Tabel 4.3 is het dan eenvoudig om voor gemeten zwevend stofconcentraties in het veld dan de extinctie als gevolg van zwevend stof te schatten:

Tabel 4.3 De bijdrage van zwevend stof aan de extinctie in de Beulakerwijde.

Concentratie ZS in het meer (mg/l)	Extinctie tgv ZS (m <sup>-1</sup> )
5	0,14
10	0,28
25	0,7
50	1,4
100	2,8

### 4.3 Chemische analyses

#### 4.3.1 C:N verhouding, TGA en elementen.

De C-percentages zijn hoog, hetgeen verwacht mag worden in plassen met slib dat rijk is aan organisch materiaal. De C:N verhouding van het opgewervelde materiaal ligt gemiddeld op 16,5. Alleen kolom 1-3 ligt duidelijk hoger. Dat komt vooral door het koolstofpercentage. Dit wordt bevestigd door de TGA-resultaten (zie Tabel 4.5) waarin kolom 1-3 een duidelijk hoger organischestofgehalte heeft. Dat geeft aan dat de analyse hoogstwaarschijnlijk klopt, maar een duidelijke verklaring voor de resultaten is er niet.

Een C/N-ratio van 16,5 betekent dat het materiaal voor een groot deel bestaat uit langzaam afbrekend plantenmateriaal/veenresten. Het materiaal zal een deel dode alg in zich hebben, maar dat heeft niet de overhand. Dit betekent dat dit materiaal voor lange tijd in de plas aanwezig zal blijven en niet snel afbreekt. In BaggerNut is in de bodem van Schutsloterwijde (een meer niet ver van de Beulakerwijde) een C/N-ratio van 15 gemeten.

De DOC-concentratie is 16,3 mg/l. De enige andere DOC-metingen zijn gemeten in februari 2008 in het Ettenlands kanaal en Kanaal Steenwijk-Ossenzijl (Steenwijker Aa). Toen werd respectievelijk 15 en 11 mg/l gemeten.

Tabel 4.4 DOC in het oppervlaktewater en C en N-gehalten in het opgewervelde sediment.

monsternaam	C (%)	N (%)	Ratio
watermonster	16,3 mg/l		
kolom 3-1*	20,55	1,22	16,84
kolom 1-2	28,6	1,96	14,59
kolom 1-3	42,61	2,02	21,09
kolom 2-1	27,12	1,77	15,32
kolom 2-3	28,77	1,89	15,22
kolom 3-1	25,19	1,55	16,25
kolom 3-3	25,51	1,52	16,789

\* Deze meting betreft het monster dat is gebruikt voor de sedimentbalans (handmatig afgezogen door hevelen). De andere meting van kolom 3-1 betreft het monster dat in Utrecht is afgepompt cf. de methodiek in paragraaf 3.2.2.

De gedroogde monsters bevatten nog relatief veel water, maar hiervoor zijn alle resultaten gecorrigeerd. Organischestofpercentages zijn gelijk aan wat in de toplaag van de bodem Schutsloterwijde is gemeten. Het kalkgehalte ligt in zwevend stof iets lager. Bij deze waarden moet worden opgemerkt dat het in Tabel 4.5 gaat om gewichtspercentages; het volume van de vlokken bestaat grotendeels uit waterrijke organischestof, maar relatief weinig anorganische deeltjes. Die anorganische deeltjes vormen echter een flink deel van het gewicht.

Tabel 4.5 Resultaten van TGA (gewichtpercentages op basis van droge stof).

	Vochtgehalte	Organische stof	Kalkgehalte
	%	%	%
kolom 1-2	10	49,7	4,1
kolom 1-3	10,5	67,5	5,5
kolom 2-1	7,8	52,0	3,4
kolom 2-3	7,4	51,1	3,6
kolom 3-1	6,1	45,4	3,3
kolom 3-3	5,4	45,4	3,7

In tegenstelling tot de andere metingen zijn de P en Fe-gehalten in de Beulakerwilde duidelijk hoger dan de bodem. De Fe/P-ratio is wel ongeveer gelijk. De zwavelgehalten zijn nagenoeg gelijk in de bodem en het zwevend stof.

Tabel 4.6 Resultaten van ICP-OES-analyses (elementen).

locatie	Al	Ba	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Fe/P-ratio
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	mol/mol
1	18,50	0,37	42,9	84,5	4,89	3,11	5,04	2,07	2,81	7,00	16,7
2	17,98	0,36	42,9	77,1	5,08	2,98	4,01	2,45	2,43	9,31	17,6
3	18,03	0,32	39,2	66,2	6,05	2,60	2,41	3,31	1,82	12,26	20,2
gemiddeld				75,9					2,35	9,52	17,9
Bodem Beulaker				12,1					0,35	10,1	19,5
Bodem Wieden				17,9					0,67	13,1	14,8

#### 4.4 Resultaten Quick scan

De labmetingen geven voor de drie monsterlocaties eenzelfde kritische schuifspanning dat overeenkomt met een orbitale stroomsnelheid van 3 cm/s. Tabel 1 laat voor deze kritische bodemschuifspanning en uniforme diepte zien hoe onderdelen a) en b) van het quick scan model gecombineerd worden tot een kritische strijklengte voor een bepaalde windsnelheid. Bij strijklengten boven deze kritische waarde zal resuspensie optreden. Gezien de afmetingen van het meer (ZW→NO: 4,4 km), treedt vanaf windkracht 5 resuspensie op, maar niet overal.

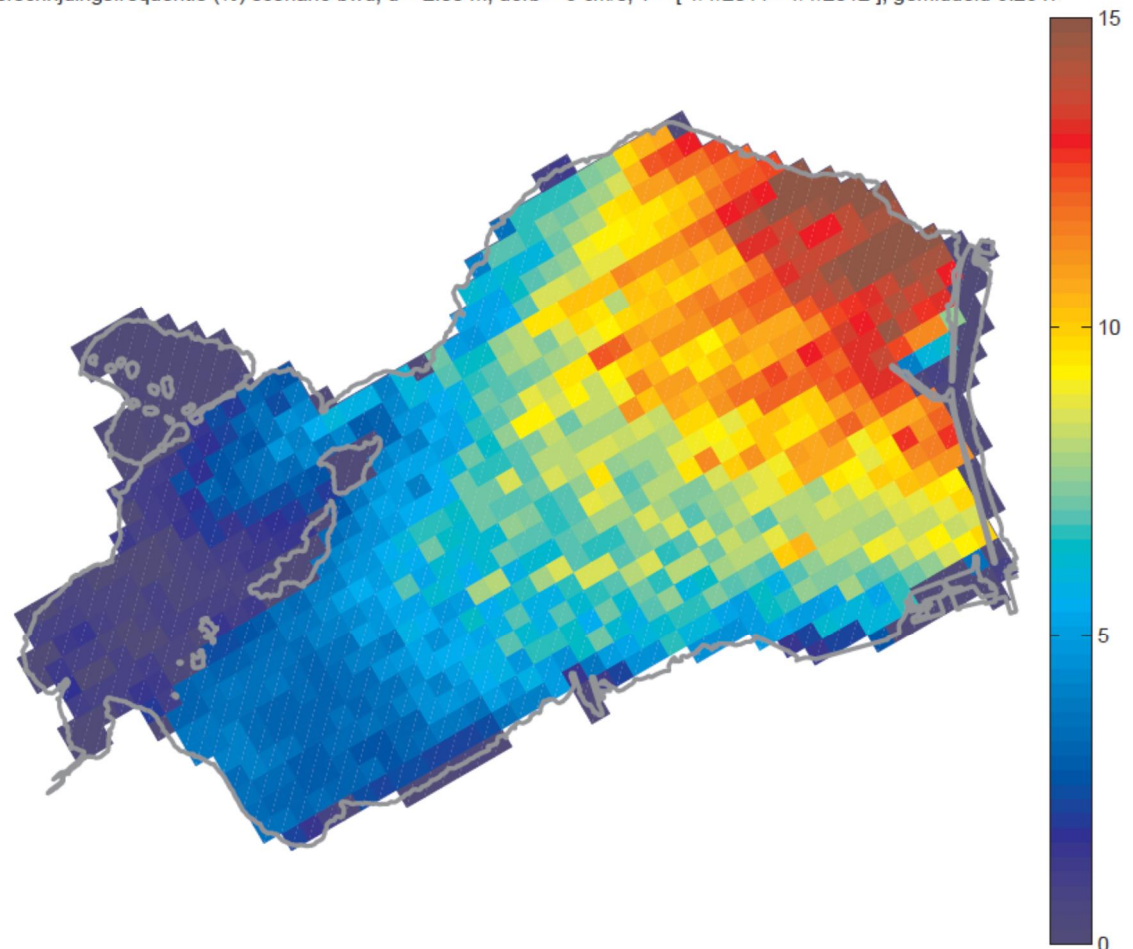
Tabel 4.7 Diepteafhankelijke relatie tussen windsnelheid en kritische strijklengte waarboven resuspensie plaatsvindt (voor diepte = 2m en kritische orbitaalsnelheid = 3 cm/s).

windsnelheid [m/s]	kritische strijklengte [m]
4	5788
5	3940
6	2934
7	2301
8	1869
9	1559
10	1327
11	1147
12	1005
13	891
14	797
15	718
16	652
17	595
18	547
19	504
20	467
21	434
22	405
23	380

Onderdeel c van het quick scan model (zie paragraaf 3.3), de rekenmethode om de strijklengte onder verschillende hoeken te berekenen, kan onafhankelijk van a (strijklengteformulering) en b (de bijdrage van golven aan de bodemschuifspanning) uitgevoerd worden. Vervolgens is aan de hand van Tabel 1 onderdeel d) gekoppeld aan onderdeel c): voor elk uur van 2011 wordt voor elk horizontaal rekenpunt van het meer gekeken of de strijklengte bij de gegeven windhoek groter is dan de kritische strijklengte die volgens tabel 1 bij de gegeven windsnelheid hoort. Dit wordt verwerkt tot ruimtelijke overschrijdingsfrequenties van de kritieke bodemschuifspanning voor de Beulakerwilde (Figuur 4.10).



overschrijdingsfrequentie (%) scenario bwd, d = 2.00 m, uorb = 3 cm/s, T = [ 1/1/2011 - 1/1/2012 ], gemiddeld 6.2347



Figuur 4.10 Ruimtelijke overschrijdingsfrequenties (in percentage van de tijd) in 2011 voor uniforme diepte van 2 meter en kritische orbitaal stroomsnelheid van 3 cm/s.

In de tekst in Figuur 4.10 is te zien dat de gemiddelde overschrijdingsfrequentie voor de hele Beulakerwilde 6 % van de tijd is. Van oost naar west zien we een toenemende gradiënt van ongeveer 2 tot meer dan 15 % van de tijd. Dit is te verklaren door de dominante ZW wind en het feit dat de plas in dezelfde richting georiënteerd is. Figuur 4.10 sluit goed aan bij de veldobservatie dat de sliblaag in het noordoosten dunner was dan in het zuidwesten. Doordat er vaker slib wordt opgewerveld (en door de richting van de retourstroming) vindt er netto transport van slib plaats van noordoost naar zuidwest.

Er zijn betere (uitgebreidere) methodes beschikbaar om een meer gedetailleerd beeld van golfwerking op het meer te krijgen, bijv. door het gebruik van de Delft3D-WAVE module die wel met gedifferentieerde bodemdpte en –stevigheid kan rekenen. Voor het beter en betrouwbaarder begrijpen van de rol van windgedreven stroming en golfwerking op de troebelheid in het meer is het dan ook nodig extra vlakdekkende metingen uit te voeren aan bodemdpte en evt. het voorkomen van waterplanten in de zomer. Pas dan kan er een goede doorvertaling worden gemaakt van windgedreven golfwerking op het doorzicht en ecologisch functioneren van het meer.



## 5 Discussie

### 5.1 Opwerveling in de Beulakerwijde

Op basis van het veldwerk is geconstateerd dat de sliblaag in het noordoosten van het meer het dunst is, terwijl opwerveling door golfwerking in het noordoosten het vaakst voorkomt (15% versus gemiddeld 6%). 6% betekent dat er een keer per 20 dagen een overschrijding plaatsvindt, vergelijkbaar met de Loosdrechtse plassen. Echter, de overschrijdingfrequentie zegt niet alles. Juist in het noordoosten van de plas zijn waterplanten en driehoeksmosselen aanwezig. Dit zal gunstig zijn voor de helderheid van het water. Niet alleen filteren de driehoeksmosselen het water, maar de waterplanten zorgen in het groeiseizoen voor een stabielere en stevigere bodem en verminderen de kans op resuspensie van materiaal uit deze hoek van het meer.

De combinatie van factoren (opwervelingsfrequentie, slibdikte, planten en driehoeksmosselen) maakt het onmogelijk om een betrouwbare uitspraak te doen over de concentratieverhogingen die als gevolg van opwerveling kunnen optreden. Het aantal zwevend stofmetingen in de Beulakerwijde is daarvoor te beperkt. De piekconcentratie van 52 mg/l die is gemeten bij windkracht 5 met windstoten tot windkracht 7. Dit zou een indicatie kunnen zijn voor maximale zwevend stofconcentraties. Dergelijke concentraties zullen echter een zeer beperkt deel van de tijd optreden. Toch kan het koppelen van meteorologische gegevens (windsterkte, pieken en windrichting) en doorzicht en zwevend stof meer inzicht geven in de bijdrage van wind.

De vlokken zijn zeer gevoelig voor opwerveling: een kritische stroomsnelheid van 3 cm/s is erg laag, zelfs nog iets lager dan andere plassen (Nieuwkoop, Reeuwijk, Loosdrecht). Alle verstoringen, zoals vis en recreatievaart, zullen al snel tot enige opwerveling leiden, maar de vlokken bezinken relatief snel als dat wordt vergeleken met eerdere onderzoeken. De sedimentatiesnelheid is echter veel groter dan eerder gerapporteerd in de Loosdrechtse Plassen. Als opgewervelde deeltjes een gemiddelde valsnelheid hebben van 1-2 mm/s en over de hele waterkolom aanwezig zijn betekent dat, dat ze voor het afleggen van de weg naar de bodem minder dan een uur nodig hebben om weer op de bodem te zakken in totaal stagnant water. Daarbij moet wel worden bedacht dat de continue turbulentie maakt dat de deeltjes langer zullen blijven zweven. Ook zijn het met name de fijnste fracties die het meeste bijdragen aan de uitdoving van licht. Zo'n 20% van de deeltjes heeft een valsnelheid van 0,4 mm/s (34 m/d) of minder. Verder moet worden opgemerkt dat wind niet de enige oorzaak is van opwerveling. Ook vis en recreatie zorgen voor beroering van de bodem en een bodem die snel opwervelt ten gevolge van windgolven zal, weliswaar lokaal, ook gevoelig zijn voor vis en bootjes.

Dit zijn hogere waarden dan de waarden dan elders gerapporteerd wordt. Doorgaans variëren de snelheid tussen de 0,5 en 10 m/d (Osté en Van de Weerd, 2012).

De meest voor de hand liggende verklaring hiervoor is dat zwevend stof in een watersysteem gedurende het vallen ook weer een opwaartse kracht mee krijgt door waterbeweging. In een sedimentatiebalans staat het water stil. De effectieve sedimentatiesnelheid is hierdoor altijd kleiner dan de valsnelheid.

De quick scan laat zien dat het zuidwesten van de plas nauwelijks golfwerking aan de bodem ondervindt. Let wel: bij noordoostelijke wind zal dat wel het geval zijn, en zal een groot deel van het materiaal dat daar is bezonken zich opnieuw door de plas verspreiden. De bodem is aldaar even gevoelig voor opwerveling, maar de hoeveelheid die opwervelt is hoger. De effecten van gebeurtenissen gerelateerd aan deze niet vaak voorkomende windrichting moeten niet worden vergeten.

Het lijkt erop dat het meer in de periode 2003-2011 een waterkwaliteitsverbetering heeft ondergaan, welke niet gerelateerd is aan veranderingen in chlorofylwaarden. Wat er met zwevend stof is gebeurd is niet duidelijk omdat daar geen metingen van zijn. Het is aan te bevelen om nu met een betere monitoring de ontwikkelingen te volgen in plaats van op zoek te gaan naar nieuwe maatregelen waarvan het effect moeilijk is in te schatten. Strijkklengte reducerende, of erosiereducerende maatregelen lijken niet nodig.

## 5.2 Lichtuitdoving van de verschillende componenten

In paragraaf 2.1 is gesteld dat  $k_z < 3,2$  om voldoende licht op de bodem te krijgen. In de Beulakerwilde geldt dat  $k < 1,6$ . Die grens geldt echter voor de totale k-waarde. Er onderzoeken gedaan naar de individuele componenten. Deze individuele waarden kunnen dan worden ingevuld in vergelijking 2.2. Vergelijking 2.2 is ook gefit in diverse studies op basis van een (groot) aantal meren. Het lijkt er op dat er dan een relatief grote restfactor ( $k_5$ ) overblijft die de bijdrage van water (en vaak ook DOC) representeert. Vermoedelijk worden bijdragen van zwevend stof, detritus en chlorofyl onderschat. Zolang de coëfficiënten-set maar gezamenlijk worden gebruikt is dat geen probleem, maar in dit geval hebben we specifiek gekeken naar de bijdrage van zwevend stof en dan mag deze factor niet zo maar vervangen worden.

Een andere mogelijkheid is om te kijken naar studies die eveneens gericht waren op een bepaalde component. Op <http://archive.chesapeakebay.net/pubs/sav/04.pdf> is een hoofdstuk te vinden waarin de coëfficiënten voor de verschillende fracties worden gegeven. Zij geven voor puur water:  $k_5 \sim 0,15 \text{ m}^{-1}$ , voor DOC  $k_4 \sim 0,026 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  en voor Chf-a  $k_1 \sim 0,015 \text{ m}^2 (\text{mg Chf-a})^{-1}$ . Voor zwevend stof variëren de coëfficiënten sterk, maar in bovengenoemd artikel komen ze uit op  $0,075 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ . De in deze studie gevonden waarde van  $0,029$  val ruim binnen de range, maar ligt lager dan gemiddeld gevonden waarden. Als vergelijking 2.2 voor standaardomstandigheden in de Beulakerwilde wordt ingevuld, nl:

ZS = 14 mg/l (waarvan 3 mg Chf/l)

Chf-a = 30 ug/l

DOC = 16 mg/l

Dan levert dat, als detritus en zwevend stof worden samengevoegd, de volgende k-waarde op:

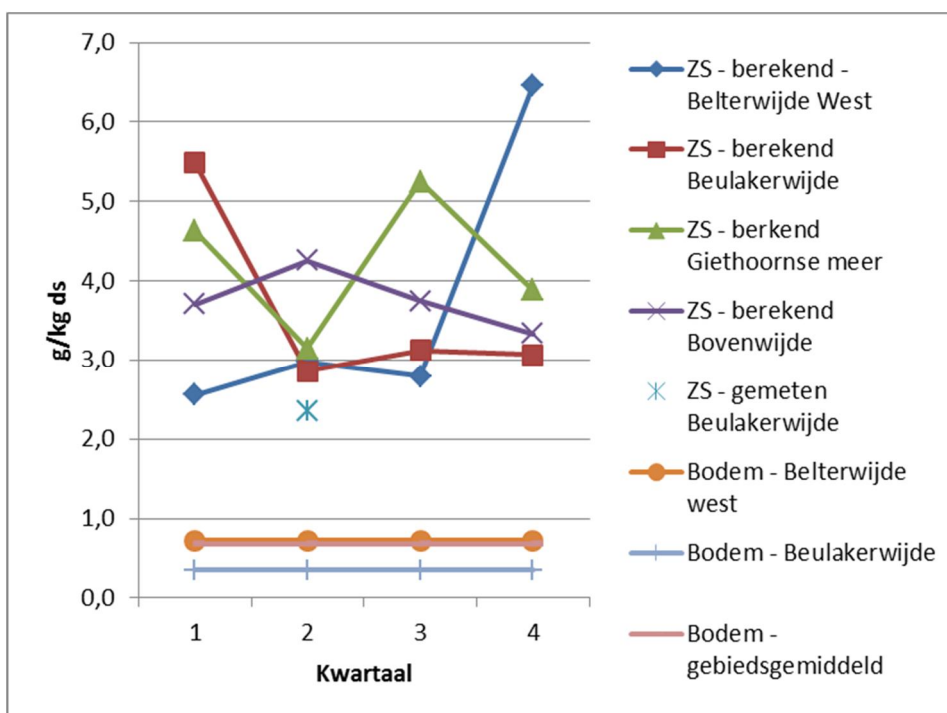
$$k = 0,015 \cdot 30 + 0,028 \cdot 14 + 0,026 \cdot 16 + 0,15 = 1,4$$

Deze waarde ligt net iets onder het criterium (1,6), maar de marge rondom dit getal is aanzienlijk. Er zal in het veld gemeten moeten worden of de berekeningen een goede weergave geven van de werkelijkheid. In elk geval blijkt ook uit deze berekening dat de k-waarde onder omstandigheden met veel zwevend stof (ca. 50 mg/l is gemeten), de extinctiecoëfficiënt stijgt naar ca.  $2,4 \text{ m}^{-1}$ .

## 5.3 Concentratie P in zwevend stof en waterbodem

Het gehalte P in zwevend stof bepaald. Dit gehalte ligt tussen de 1,8 en 2,8 g/kg ds en ligt gemiddeld op 2,4 g/kg ds.

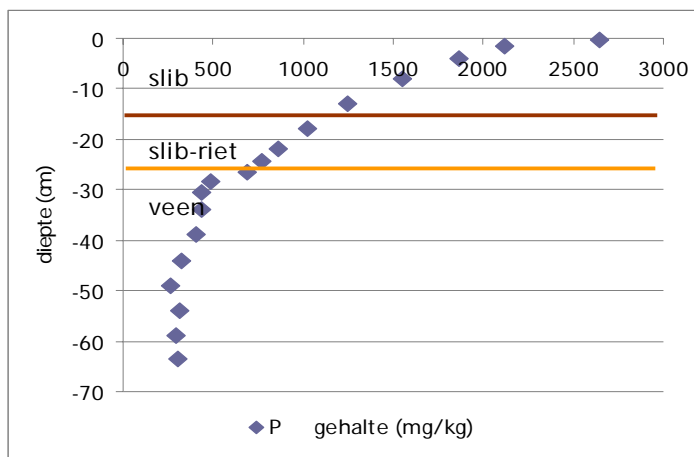
Op basis van de monitoring kan P-gehalte in zwevend stof ook berekend worden door een langjarig gemiddelde  $(P\text{-totaal} - P\text{-ortho})/ZS$ . Ten slotte zijn er P-gehalten in de bodem beschikbaar. Alle data zijn zijn weergegeven in Figuur 5.1.



Figuur 5.1 Gehalten P in zwevend stof en in de bodem in g/kg ds.

Uit Figuur 5.1 kunnen we concluderen dat in de Beulakerwijde de gemeten en berekende P-gehalten in kwartaal 2 dicht bij elkaar liggen. De berekende waardes zijn niet zo nauwkeurig maar wel indicatief. De berekende waardes kunnen ook nog hoger uitvallen doordat naast P-ortho ook nog OOP (opgelost organisch P) aanwezig kan zijn. OOP is niet van het totaal afgetrokken.

Opvallender is het verschil met het gemeten gehalte in de bodem. Het P-gehalte in ZS ligt gemiddeld 1,7 g/kg ds hoger dan het gebiedsgemiddelde van de bodem en ruim 2 g/kg ds hoger dan in de Beulakerwijde zelf (dit laatste gehalte is gebaseerd op 1 puntwaarneming). Dit kan te maken hebben met de dikte van de bemonsterde laag; zwevend stof betreft alleen de bovenste millimeters. Uit gedetailleerde metingen in de Bergse voorplas is bekend dat P-totaal in sediment een scherpe gradiënt vertoont (Figuur 5.2; Bakker et al., 2011). Het verschil tussen zwevend stof en bodem zijn wordt waarschijnlijk ook veroorzaakt door de deeltjes die opwervelen. Juist de ijzerhydroxide-vlokken zijn gevoelig voor opwerveling. In het Volkerak-Zoommeer bevat het zwevend stof ook aanzienlijk hogere gehalten dan de bodem (Osté, 2012).



Figuur 5.2 Gradiënt van P-totaal in het sediment van de Bergse Voorplas.

Naar verwachting bestaat de bovenste laag van de waterbodem uit een klein laagje P-rijk slib en neemt het P-gehalte vervolgens af met de diepte. Het rijke bovenste laagje zal bij bemonstering van de waterbodem maar gedeeltelijk het gemeten P-gehalte bepalen. De aanrijking in deze laag kan veroorzaakt worden door verschil in deeltjesgrootte, meer beschikbare Fe bindingsplaatsen voor fosfaatbinding in het bovenste laagje (a.g.v. redoxcondities) en/of organische P aanrijking als gevolg van afsterving van algen (P gehalte detritus is ca. 6 g P/kg droge stof, Los (2009)). Als gevolg van de P-gradiënt in de waterbodem zal het diepte interval van het monster dus van invloed zijn op het gemeten P-gehalte. Daarnaast is het bij het nemen van waterbodemmonsters van belang om aandacht te besteden aan de bemonsteringsmethode en de juiste locatiekeuzes.

Als ook Fe en S worden meegenomen in de beschouwing (Tabel 5.1), blijkt dat de verhouding tussen Fe en P in zwevend stof en in de bodem in dezelfde orde van grootte ligt.

Tabel 5.1 Fe/P- en Fe/S-ratio's in zwevend stof en de bodem van de Beulakerwijde en het gemiddelde in de bodem van Wieden.

Materiaal	Fe/P (mol/mol)	Fe/S (mol/mol)
Beulakerwijde ZS	17,9	4,5
Beulakerwijde bodem	19,5	0,7
Wieden gem. bodem	14,8	0,8

Fe maakt, uitgaande van  $Fe(OH)_3$ , ca. 15% uit van het zwevend stof. Dat is 30% van de minerale fractie. IJzerdeeltjes vormen dus een belangrijk deel van het gemakkelijk op te wervelen materiaal.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies

De volgende conclusies kunnen stapsgewijs worden getrokken. Op basis van het veldwerk werd geconstateerd dat:

- er geen grote verschillen zijn in het karakter van de sliblaag tussen de locaties, maar slibdikte neemt af van zuidwest naar noordoost;
- in het zandigere noordoostelijke deel zijn driehoeksmosselen waargenomen;

De opwervelingproeven wezen uit dat:

- bij een stroomsnelheid aan de bodem van ongeveer 3 cm/s de opwerveling begint
- het opgewervelde zwevend stof voor 50% uit anorganisch materiaal bestaat. Op basis van C/N-verhouding (ca. 16) wordt geconcludeerd dat de organische fractie bestaat uit langzaam afbrekend plantenmateriaal/veenresten en chlorofyl. De gemiddelde diameter van het zwevend stof is ca. 100  $\mu\text{m}$  bij aanvang van het opwervelingsexperiment en stijgt naar 300  $\mu\text{m}$  als de vane maximaal staat;
- de valsnelheid van het opgewervelde materiaal varieert van 0,2 tot 8 mm/s, het gemiddelde (d50) is ca. 1,5 mm/s.
- het zwevend stof in de Beulakerwijde veel hogere Fe- en P-gehalten heeft, maar dat de Fe/P-ratio in de bodem en het zwevend stof ongeveer gelijk zijn.
- de extinctie per mg ZS/l ongeveer 0,028  $\text{m}^{-1} \cdot \text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$  is.

Uit de Quick scan blijkt dat:

- de kritische orbitaalsnelheid aan de bodem voor de hele Beulakerwijde gemiddeld 6 % van de tijd wordt overschreden. Van oost naar west toont de overschrijdingskans een toename van ongeveer 2 tot meer dan 15 %. Dit is te verklaren door de dominante ZW wind en het feit dat de plas in dezelfde richting georiënteerd is.

Uitgaande van 4% licht dat de bodem moet bereiken in de plas om waterplanten kieming mogelijk te maken, moet de extinctiewaarde lager dan 1,6  $\text{m}^{-1}$  zijn. De geschatte bijdrage van DOC en water is samen 0,55  $\text{m}^{-1}$ , waarmee nog 0,9 resteert die mag worden opgevuld door zwevend stof (incl. chlorofyl). De maximale k-waarde wordt bereikt bij 15 mg ZS/l. Dat ligt dicht bij het gemiddelde en daarom is het aannemelijk dat er onvoldoende licht op de bodem valt zodra er erosie optreedt (6% van de tijd). Dat betekent ook dat volgens de berekeningen het grootste deel van het jaar voldoende licht op de bodem valt om vegetatie-ontwikkeling mogelijk te maken. Omdat de basisomstandigheden zo dicht bij het criterium liggen, kent de conclusie over het licht op de bodem een hoge onzekerheid.

### 6.2 Aanbevelingen

De belangrijkste aanbeveling is om het systeem voorlopig te monitoren en vooralsnog geen (waterbodem)maatregelen te nemen. De huidige toestand lijkt voldoende om vegetatieontwikkeling mogelijk te maken al is de onzekerheid van de uitspraak nog vrij groot.

Om beter zicht te krijgen om de daadwerkelijke ontwikkelingen in het gebied, is het belangrijk om de situatie goed te volgen. In elk geval moet dan gedacht worden aan:

- Meting bij verschillende omstandigheden (variatie in seizoenen, wind, recreatie). Het beste zou een meetpaal met continu-meetapparatuur zijn.
- Extinctiemetingen gericht op DOC (absorptie bij 380 of 440 nm) en PAR-extinctie. In dit experiment is specifiek gekeken naar de bijdrage van zwevend stof op de extinctie. Zwevend stof is echter niet de enige component die extinctie bepaalt. Daarom wordt aangeraden de volgende componenten voor lichtuitdoving (hoogfrequent) te meten: DOC, zwevend stof incl. gloeirest en chlorofyl, zowel onder normale condities als onder extremen (wind, zomer).
- Een vlakdekkende waterplanten- en driehoeksmosselenmonitoring. Op die manier kan meer inzicht worden gegeven in de positieve feedback mechanismen die deze sleutelorganismen kunnen uitoefenen op de waterkwaliteit en met name de helderheid van het meer. Daarbij is het zinvol om ook de geschiedenis van het meer te kennen: stonden er vroeger meer waterplanten? Was er toen bodemzicht? Waren er meer eilanden en zijn die aan erosie onderhevig?.
- De invloed van vis en recreatie op de zwevend stofconcentratie kan beter gekwantificeerd worden.



## A Bijlage: referenties

- ARCADIS, 2012. BaggerNut: opschaling Wieden. ARCADIS Apeldoorn.
- Bakker, D.J., L. Osté, G. Roskam, J. de Weert, J. Hemelraad 2011. De Bodem Bedekt. Het onderzoeken en aanbrengen van een fosfaatbindende afdeklaag in de Bergse Voorplas. Deltares-rapport 1201913-000-BGS-0004.
- Buiteveld, H. 1990. UITZICHT model voor berekening van doorzicht en extinctie. RIZA rapport 90.058, Lelystad.
- Carper, G. L. & R. W. Bachmann, 1984. Wind resuspension of sediments in a prairie lake. Can. J. Fish. aquat. Sci. 41: 1763–1767. CERC (1974 and 1984) Shore Protection Manual, US Army Coastal Engineering Research Centre, Corps of Engineers
- CERC, 1984. Shore Protection Manual, US Army Coastal Engineering Research Centre, Corps of Engineers
- Cloern, James E., Elizabeth A. Canuel, David Harris, 2002. Stable Carbon and Nitrogen Isotope Composition of Aquatic and Terrestrial Plants of the San Francisco Bay Estuarine System. Limnology and Oceanography, Vol. 47, No. 3. (May, 2002), pp. 713-729.
- Groot, S. et al., 2009. Licht en slib in de Nieuwkoopse & Reeuwijkse Plassen. Deltares-projectnummer 1002522, Rapport.
- Hurdle, D. P. and R. J. H. Stive (1989). *Revision of SPM 1984 Wave hindcast model to avoid inconsistencies in engineering applications*, Coastal Engineering, 12, pp. 339-351.
- Soulsby, R. L., L. Hamm, G. Klopman, D. Myrhaug, R. R. Simons, and G. P. Thomas (1993). *Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer*, Coastal Engineering, 21, pp. 41-69.
- Kirk, J.T.O., 1983. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, 509 pp.
- Kirk, J.T.O., 1994. Light & photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press. (second edition).
- Medusa, 2001. Nader onderzoek slibbalans Loosrechtse plassen. Bodem in beeld. Rapport nr. 2001-P-017R1.
- Meijers, P.A., 1997. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. Org. Geochem. Vol. 27, nr 5/6, pp. 213-250.
- Lürling, M., G. Blom & E. van Donk, 1995. Resuspensie, sedimentatie en lichtklimaat in de Breukeleveense Plas. H<sub>2</sub>O, vol. 28, nr. 7, pp. 194-219.

Osté, L.A. en H. Van de Weerd, 2012. Kennisregels in de Bodemdiagnose. Deltaresrapport 1201327.

Penning, W.E., 2012. Ecohydraulics in shallow lakes. PhD-thesis TU Delft.

Sloot, J., 1995. Resuspensie, sedimentatie en lichtklimaat in de Nieuwkoopse Plassen. (begeleider ir. G. Blom). Rapport No. 09/95, WUR - Vakgroep Waterkwaliteitsbeheer en Aquatische Oecologie, juni.

Van Liere, L. & R.D. Gulati (Eds), 1992. Restoration and recovery of shallow eutrophic lake ecosystems in the Netherlands. *Hydrobiologia*, 233 – special issue.

Van Liere, L. & J. H. Janse, 1992. Restoration and resilience to recovery of the Lake Loosdrecht ecosystem in relation to its phosphorus flow. *Hydrobiologia* 233: 95-104.

Bijlage 1: luchtfoto van alle meren in de Wieden (bron: Google Earth).

