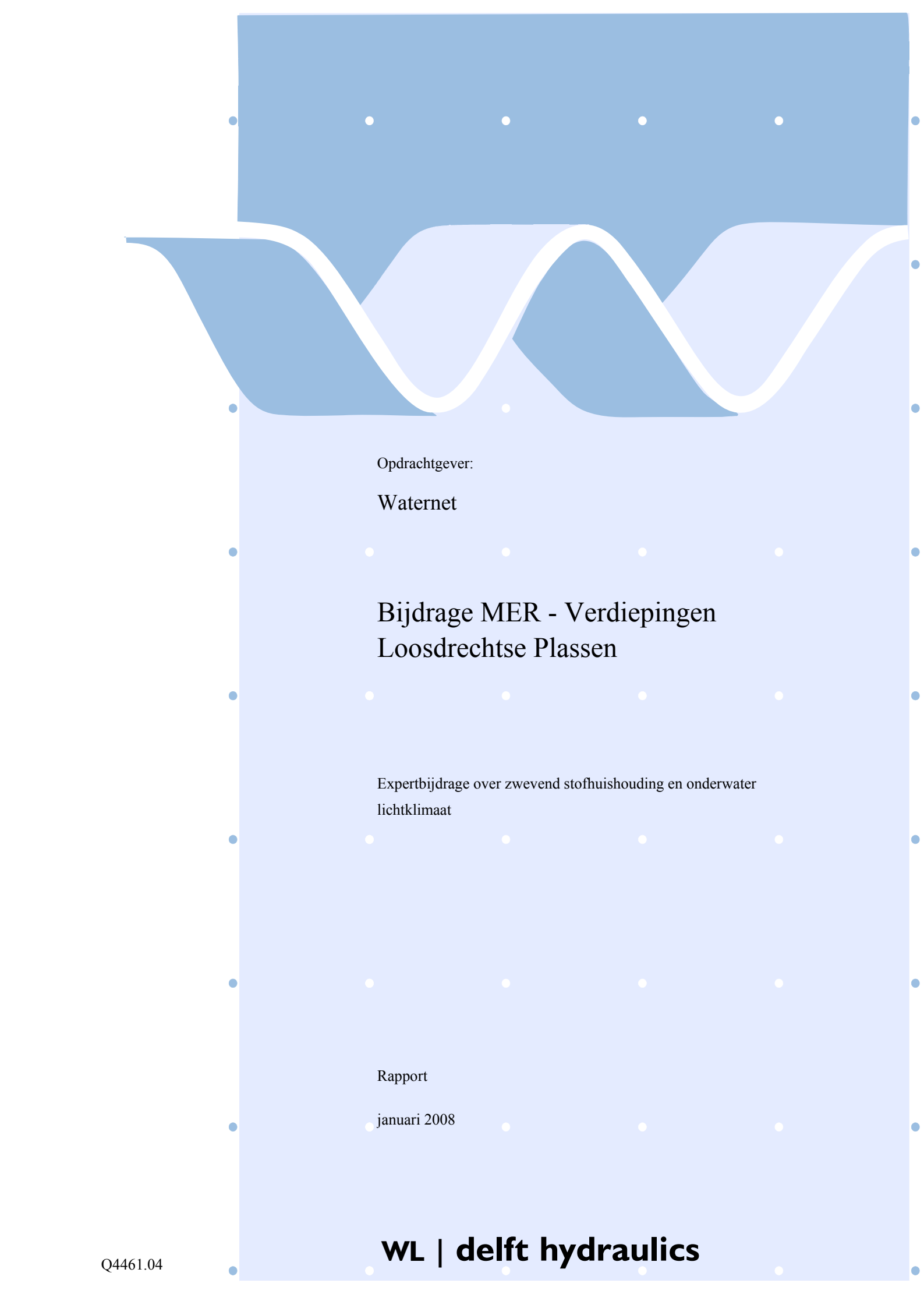




Opdrachtgever:

Waternet

Bijdrage MER - Verdiepingen Loosdrechte Plassen

Expertbijdrage over zwevend stofhuishouding en onderwater
lichtklimaat

Rapport

januari 2008

Opdrachtgever:

Waternet

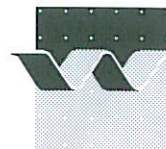
Bijdrage MER - Verdiepingen Loosdrechtse Plassen

Expertbijdrage over zwevend stofhuishouding en onderwater
lichtklimaat

Rob Uittenbogaard, Ellis Penning & Marnix van der Vat

Rapport

januari 2008



Opdrachtgever:	Waternet				
Titel:	Bijdrage MER - Verdiepingen Loosdrechtse Plassen				
Samenvatting:					
Dit rapport beschrijft de effecten van het lokaal verdiepen van de Loosdrechtse Plas op de concentraties zwevende stof en relateert dit aan het onderwater lichtklimaat en mogelijkheden voor waterplantenvestiging in de plas. Voor de huidige situatie en twee verdiepingsvarianten is met behulp van veld- en laboratoriummetingen en modellering een gedetailleerde onderbouwing gegeven voor de te verwachten zwevend stof concentratie, lichtklimaat en kans op waterplanten. De wind over de Loosdrechtse Plassen wekt oppervlaktegolven op en drijft de stroming aan. Vooral de golven woelen de weke en ijle toplaag van de plasbodem vaak op tot een decimeter-dikke moddernevel. In deze moddernevel worden vlokken bodemmateriaal tot μm-fijne deeltjes afgebroken. De fijne deeltjes wervelen tot hoog in de waterkolom waardoor ze het doorzicht beperken en de lichtextinctie voor plantengroei vergroten. Uit onze laboratoriumproeven blijkt dat in de waterkolom de fijne deeltjes weer traag (tijdschaal 20 dagen) vlokken worden die wel bezinken. Er ontstaat zodoende een intense cyclus van vlokvorming, bezinken, erosie, afbraak, opwerveling etc. waarbij de overige brontermen door algen en veenafslag en verdwijntermen door mineralisatie en verversing een orde kleiner zijn. Door het aanbrengen van verdiepingen in de plassen wordt vooral het watervolume vergroot waardoor de integrale sedimentatie na en door vlokvorming tegen de erosie in kan plaats vinden bij lagere concentraties fijn zwevend stof in de waterkolom. De putten zullen voornamelijk worden gevuld met door golven en stroming verweekte plasbodem, de netto bezinking van fijn zwevend stof in deze putten is verwaarloosbaar. De zwevend stof concentratie zal afnemen door toename van het volume. Op basis van eerder KRW gerelateerd onderzoek hanteren we een grenswaarde van minimaal 4% van het invallende licht dat de bodem moet bereiken om een geschikt lichtklimaat voor waterplantenontwikkeling te bereiken. De extinctie van licht wordt beïnvloed door de concentraties organisch zwevend stof, algen, humus en anorganisch zwevend stof. Een vermindering in zwevend stof concentraties verlaagt de extinctie en vergroot het potentieel areaal voor waterplanten. De verdiepingen dragen bij aan een verbetering van het lichtklimaat en een vergroting van de maximale diepte voor potentiële vestiging van waterplanten van 1.3 naar 1.5 meter. Het oppervlak voor potentiële vestiging neemt hierdoor toe van ± 110 ha tot ± 200 ha. Als daarnaast ook de nutriëntenbelasting wordt verminderd, neemt dit oppervlak verder toe afhankelijk van de mate van reductie in chlorofyl-a productie.					
Referenties:					
Ver	Auteur	Datum	Opmerk.	Review	Goedkeuring
1.0	Rob Uittenbogaard	06-12-2007		Hans Los	A.G. Segeren
	Ellis Penning				
2.0	Marnix van der Vat	02-01-2008		Hans Los	A.G. Segeren
3.0	Ellis Penning	15-01-2008		Hans Los	A.G. Segeren
Projectnummer: Q4461.04					
Trefwoorden: slib, zwevend stof, waterplanten, Loosdrechtse Plassen, lichtklimaat					
Aantal bladzijden: 86					
Classificatie: Geen					
Status: Definitief					

Inhoud

1	Introductie	1-1
1.1	Inleiding.....	1-1
1.2	Leeswijzer.....	1-1
1.3	Algemene samenvatting.....	1-1
2	Balans zwevend stof Loosdrechtse plassen	2-1
2.1	De kern.....	2-1
2.2	Definitie van de onderzochte varianten van lokaal verdiepen	2-2
2.3	Resultaten veldmetingen.....	2-2
2.4	Processen in huishouding fijn zwevend stof.....	2-4
2.4.1	Algemene werking.....	2-4
2.4.2	Effecten van stroming op gedrag zwevend stof.....	2-6
2.4.3	Zwevend stof balans in cijfers	2-9
2.4.4	Effecten van niet-erodeerbare bodems op de balans.....	2-13
2.5	Samenvattende conclusies slibbalans	2-15
3	Lichtklimaat	3-1
3.1	Berekening lichtklimaat.....	3-1
3.2	Waterplantenontwikkeling in relatie tot waterkwaliteit	3-4
3.3	Locaties voor mogelijk herstel plantengroei.....	3-8
3.4	Berekeningswijze UITZICHT	3-8
3.5	Gevoeligheden analyse	3-11
3.6	Samenvattende conclusie lichtklimaat.....	3-12
4	De samenstelling van de totale balans zwevend stof	4-1
4.1	Inleiding.....	4-1
4.2	Flocculatie en bruto sedimentatieflux.....	4-2
4.3	De erosieflux.....	4-4
4.4	Depositie in de put	4-6
4.5	De resterende termen in de totale balans van zwevend stof	4-7
4.6	De totale zwevend stof balans	4-8
4.7	Gevoeligheidsonderzoek balans fijn zwevend stof.....	4-11
5	De onderbouwing van de dominante termen in de balans	5-13
5.1	Inleiding.....	5-13
5.2	De benodigde valsnelheid.....	5-14

5.3	Flocculatie-bereidheid	5-15
5.4	Flocculatie-experimenten	5-17
5.5	Vertaling flocculatie-experimenten naar de Loosdrechtse Plassen.....	5-19
5.6	Conclusies en discussie en aanbevelingen	5-22
5.7	De plasbodem.....	5-23
5.8	De erodeerbaarheid van de toplaag van de plasbodem	5-25
5.9	Bodemsnelheid voor begin van erosie.....	5-28
5.10	De stroomsnelheden juist boven de verdiepte bodem ; 3D simulaties	5-29
5.11	Stroming en golven over ondiepe en verdiepte bodem met 1DV simulaties.....	5-31
5.12	Stroming van fluffy laag tegen helling	5-34
5.13	Het vollopen van de putten.....	5-35
6	Aanbevelingen.....	6-1
7	Referenties.....	7-1
Bijlagen:		
A	Aanvullende informatie over de simulatie van golven en stroming	A-1
B	Gegevens zandwinputten	B-1

I Introductie

I.1 Inleiding

In opdracht van Waternet is dit de expertvisie van WL | Delft Hydraulics over het nut van het lokaal verdiepen van de Loosdrechtse Plassen voor het verbeteren van doorzicht en plantengroei. Deze notitie beperkt zich tot de invloed van lokaal verdiepen van de plassen op de concentratie zwevende deeltjes en hun invloed op doorzicht en lichtextinctie.

I.2 Leeswijzer

We presenteren deze expertvisie in opeenvolgende stadia van detail als ware het de schillen van een ui. We presenteren eerst de ultieme essentie van het effect van lokaal verdiepen op de concentratie zwevend fijn zwevend stof, het lichtklimaat en de kans op vestiging van waterplanten. Dit is de kern. Als onderbouwing introduceren we vervolgens de generale balans van zwevend stof in getalsmatige vorm. Dit is de eerste schil rond de kern in hoofdstuk 2. Deze wordt gevolgd door een doorvertaling van zwevend stof op het lichtklimaat in de plas in hoofdstuk 3: de tweede schil. In de derde schil worden voor de belangrijkste causale verbanden en processen de gehanteerde getallen in deze balans onderbouwd in hoofdstuk 4. In de vierde schil wordt de overige fysische processen in meer detail doorgenomen en getalsmatig geschat in hoofdstuk 5. Hiermee is dan onze visie gegeven vanuit de kern naar de causale verbanden en hun onderbouwing. Deze presentatie is omgekeerd van een wetenschappelijk betoog waarbij eerst de bouwstenen in detail worden besproken en uiteindelijk de conclusie.

Dit rapport is tot stand gekomen met bijdragen van Walther van Kesteren, Han Winterwerp, John Cornelisse, Hans Los en Rolf Hulsbergen.

I.3 Algemene samenvatting

De wind over de Loosdrechtse Plassen wekt oppervlaktegolven op en drijft de stroming aan. Vooral de golven woelen de weke en ijle top laag van de plasbodem vaak op tot een decimeter-dikke moddernevel. In deze moddernevel worden vlokken bodemmateriaal tot µm-fijne deeltjes afgebroken. De fijne deeltjes wervelen tot hoog in de waterkolom waardoor ze het doorzicht beperken en de lichtextinctie voor plantengroei vergroten. Uit onze laboratoriumproeven blijkt dat in de waterkolom de fijne deeltjes weer traag (tijdschaal 20 dagen) vlokken worden die wel bezinken. Er ontstaat zodoende een intense cyclus van vlokvorming, bezinken, erosie, afbraak, opwerveling etc. waarbij de overige brontermen door algen en veenafslag en verdwijntermen door mineralisatie en verversing een orde kleiner zijn.

Door het aanbrengen van verdiepingen in de plassen wordt vooral het watervolume vergroot waardoor de integrale sedimentatie na en door vlokvorming tegen de erosie in kan plaats vinden bij lagere concentraties fijn zwevend stof in de waterkolom. De putten zullen voornamelijk worden gevuld met door golven en stroming verweekte plasbodem, de netto bezinking van fijn zwevend stof in deze putten is verwaarloosbaar. De zwevend stof concentratie zal afnemen door toename van het volume.

Er zijn twee varianten voorgesteld met betrekking van het ontwerp van de verdiepingen:

1. De AGV variant beslaat een verdieping van 120 ha met een diepte van 14 meter.
2. De Wijdmeren variant beslaat een verdieping van 220 ha met een diepte van 8 meter.

Het totale volume dat door de verdiepingen wordt gerealiseerd is voor beide varianten vrijwel gelijk. Het resultaat is dat er vrijwel geen verschil is in de te verwachten fijn zwevend stof concentraties met verdiepingen voor beide varianten. Uitgaande van 4 mgC/l fijn zwevend stof in de huidige situatie zal de concentratie fijn zwevend stof na uitvoering van de AGV of Wijdmeren varianten beiden 3 mgC/l bedragen. De keten van fysisch-chemische processen waarop deze schatting is gebaseerd, in het bijzonder de vorming van sneller bezinkende vlokken en bodemerosie, is onderbouwd met laboratoriumexperimenten op watermonsters uit de Loosdrechtse Plassen. Een uitgebreide gevoeligheidsanalyse met variatie van de invoergrootheden voor de balans van fijn zwevend stof toont dat de concentratieverlaging een robuuste uitkomst is van lokaal verdiepen van de Loosdrechtse Plassen.

Op basis van eerder KRW gerelateerd onderzoek hanteren we in dit onderzoek een grenswaarde van minimaal 4% van het invallende licht dat de bodem moet bereiken om een geschikt lichtklimaat voor waterplantenontwikkeling te bereiken. Dit percentage is onzeker: in de internationale literatuur komen waarden tussen de 1% en 30% voor afhankelijk van soortsgroep en overige omstandigheden (zie verder Hoofdstuk 3.1). Wij veronderstellen 4% een goede eerste benadering. De extinctie van licht wordt beïnvloedt door de concentraties organisch zwevend stof, algen, humus en anorganisch zwevend stof. Een vermindering in zwevend stof concentraties verlaagt de extinctie en vergroot het potentieel areaal voor waterplanten. De verdiepingen dragen bij aan een verbetering van het lichtklimaat en een vergroting van de maximale diepte voor potentiële vestiging van waterplanten van 1.3 naar 1.5 meter. Het oppervlak voor potentiële vestiging neemt hierdoor toe van ± 110 ha tot ± 200 ha. In combinatie met reductie van nutriëntenbelasting die leidt tot een reductie van chlorofyl-a concentraties van 50 $\mu\text{g/l}$ naar 30 $\mu\text{g/l}$ kan het areaal verder toenemen tot het gedeelte van de plas dat ondieper is dan 2.0 meter. Dit is bijna 500 ha. De onnauwkeurigheden in bathymetrie en hypsometrie gegevens en keuze voor het % licht op de bodem vormen echter wel enige mate van onzekerheid in de bepaling van dit oppervlak.

Zonder aanvullende maatregelen zal het volume van de putten in de loop der jaren afnemen waarmee het totale plasvolume afneemt en de concentratie zwevend stof zal toenemen bij gelijkblijvende erosie buiten de putten. Echter, gegeven de putdiepten in de AGV- en WM-varianten verstrijken er voldoende jaren waarin waterplanten zich zouden kunnen vestigen, aannemende dat aan overige condities voor vestiging van planten wordt voldaan. In deze periode wordt de rol van de putten nl. het verlagen van de concentratie zwevend stof in de waterkolom overgenomen door de afnemende resuspensie van zwevend stof op locaties

waar planten zich hebben gevestigd. Op die manier kan een zichzelf versterkend effect optreden dat een helder watersysteem met waterplanten kan laten ontstaan.

Op basis van het huidige onderzoek vinden de experts het plausibel dat de verdiepingen zullen leiden tot een verlaging van de concentratie zwevende stof en dat in combinatie met reductie van de nutriëntenbelasting het lichtklimaat zodanig verbetert dat de vestiging van waterplanten in een substantieel deel van de plassen potentieel mogelijk wordt. Het is mogelijk de onzekerheidsmarges verder te verkleinen via verdiepend onderzoek. Aanbevelingen hiervoor zijn opgenomen in hoofdstuk 6.

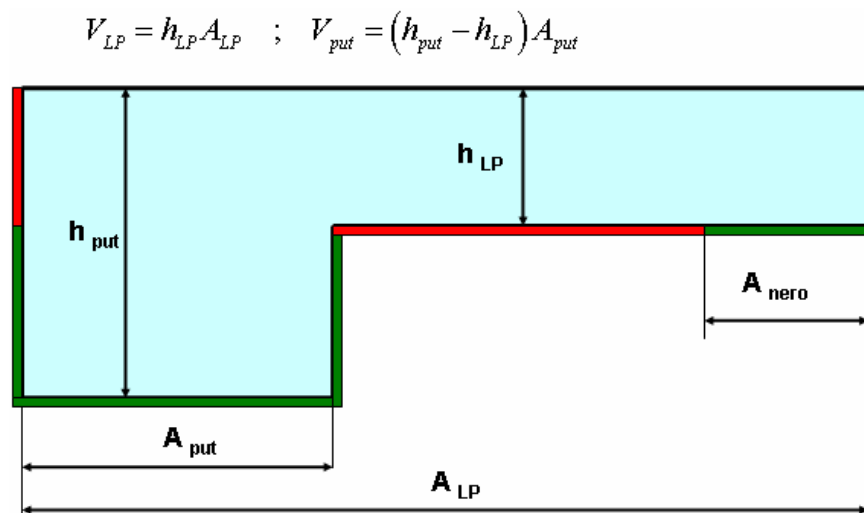
2 Balans zwevend stof Loosdrechtse plassen

2.1 De kern

In dit rapport spreken we over zwevend stof en niet over slib. Het onderscheid is dat slib betrekking heeft op anorganische deeltjes en hun eigenschappen, terwijl de gesuspendeerde deeltjes in de waterkolom van de Loosdrechtse Plassen (LP) vnl. uit organische materiaal zoals detritus blijkt te bestaan en slechts voor een zeer beperkt deel uit anorganisch materiaal.

Verder beperken we ons tot de balans van dat deel van gesuspendeerd zwevend stof dat de doorzicht beperkt en de lichtextinctie vergroot. Deze deeltjes hebben afmetingen van 1-10 μm en worden ook wel refractair detritus genoemd (zie hoofdstuk 3.1). We sluiten niet uit dat er grotere deeltjes in de Loosdrechtse Plassen in suspensie kunnen zijn maar in dermate geringe concentratie dat deze niet noemenswaardig het lichtklimaat in de Loosdrechtse Plassen benadelen. De concentratie actief detritus (ook wel labiel detritus genoemd, dood algenmateriaal, snel afbreekbaar door bacteriën) behoort niet tot deze balans omdat de mineralisatie hiervan erg snel gaat (0.1 à 0.2/dag in vergelijking met ≤ 0.001 /dag voor de andere fracties fijn organisch zwevend stof), maar wordt wel meegenomen in de lichtklimaatanalyse, omdat het hier wel een significante bijdrage heeft.

Voor de balans van zwevend stof worden de Loosdrechtse Plassen geschematiseerd volgens onderstaand figuur. De huidige gemiddelde diepte is h_{LP} en het plasoppervlak bedraagt A_{LP} , de diepte van de putten is h_{put} en hun totaal bodemoppervlak A_{put} .



Figuur 2.1 Schematisatie van de geometrie van de Loosdrechtse Plassen met putten; in rood de zwevend-stof producerende bodem en waterkant en in groen de bodemdelen die geen zwevend stof terug leveren naar het water

Analyse in dit rapport toont aan dat fijn zwevend stof opgewerveld uit putten dieper dan ca. 4m niet hoog in de waterkolom zal komen. Tevens kan een deel van de ondiep gelegen plasbodem geen fijn zwevend stof produceren b.v. door aanwezigheid van waterplanten of afdekken met zand; in Figuur 2.1 is dit het oppervlak A_{nero} . Sommige delen van de oevers zijn onbeschermd en kunnen eroderen en fijn zwevend stof produceren, dit noemen we de productie van zwevend stof door veenafslag.

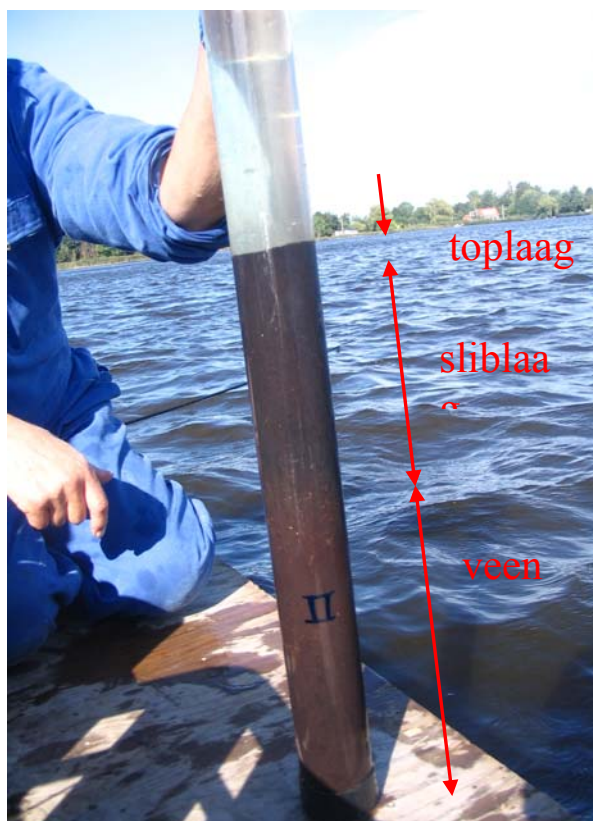
2.2 Definitie van de onderzochte varianten van lokaal verdiepen

Op basis van dieptemetingen in 2002 zijn de Loosdrechtse Plassen nu gemiddeld 1.77m diep, met een oppervlak van 1000 ha (10 Mm^2) en een plasvolume van 17.7 Mm^3 .

In dit verslag wordt voor de zg. AGV variant gerekend met een putoppervlak van 120 ha (1.2 Mm^2) en een putbodem die 12m onder de locale en huidige plasbodem ligt. Zodoende wordt het huidige plasvolume van 17.7 Mm^3 met 14.4 Mm^3 vergroot. Voor de Wijdmeren variant gaan we uit van 220 ha (2.2 Mm^2) putoppervlak maar met een putbodem die 6m dieper ligt dan de locale en huidige plasbodem waardoor het plasvolume met 13.2 Mm^3 zal toenemen. In termen van volumetoename blijken beide varianten nagenoeg dezelfde verlaging in concentratie fijn zwevend stof te geven. Verder tonen we in Hoofdstuk 4 met Figuren 4.1 en 4.2 aan dat per variant de uitkomsten robuust zijn voor redelijke toleranties in putdiepte en putoppervlak.

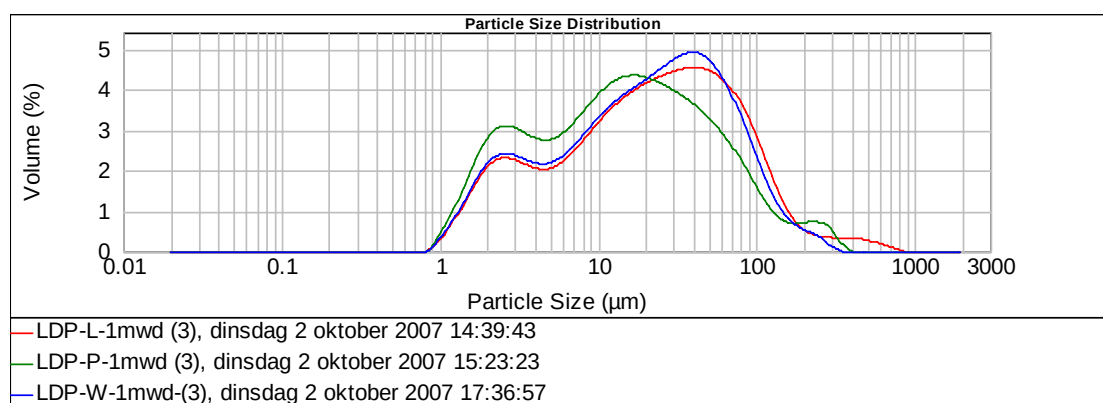
2.3 Resultaten veldmetingen

Door wind opgewekte oppervlaktegolven en ook stroming veroorzaken erosie van de resterende plasbodem (rood in Figuur 2.1) gelegen op de gemiddelde diepte h_{LP} van 1.8m. Uit bodemmonsters (Cornelisse en Grootenboer, 2007), zie Figuur 2.2, blijkt dat de plasbodem een slappe (fluffy) modderlaag is en uit analyse van de koolstof-stikstof verhouding blijkt deze bodem te bestaan uit veen en detritus (Medusa, 2007). De top laag blijkt zeer ijl met een concentratie van slechts ca. 42 gC/l . Reeds bij een stroomsnelheid van ca. 3 cm/s blijkt de top laag van deze bodem beweeglijk te worden en tot een snelheid van ca. 10 cm/s beweegt deze vloeibare fluffy laag als een verdunde maar nog steeds dichte moddernevel over de bodem met een laagdikte van hooguit enkele decimeters. De vlokken in deze vloeibare laag worden vermalen tot (weer) kleinere deeltjes. De kleine deeltjes kunnen door hun geringe valsnelheid wel ontsnappen uit de moddernevel en komen tot hoog in de waterkolom waar ze het doorzicht beperken en lichtextinctie vergroten. Dit volgt uit erosie-experimenten op de bodemmonsters (Cornelisse en Grootenboer, 2007). De stroomsnelheden van 3 resp. 10 cm/s zijn equivalent met een bodemschuifspanning van 0.01 en 0.1 Pa in onze golf- en stromingsimulaties. Deze grenswaarden voor de bodemschuifspanning zijn in de vorige studies (Los et al., 1997) en (Ouboter et al., 1999) gehanteerd maar kunnen nu dus experimenteel onderbouwd worden.

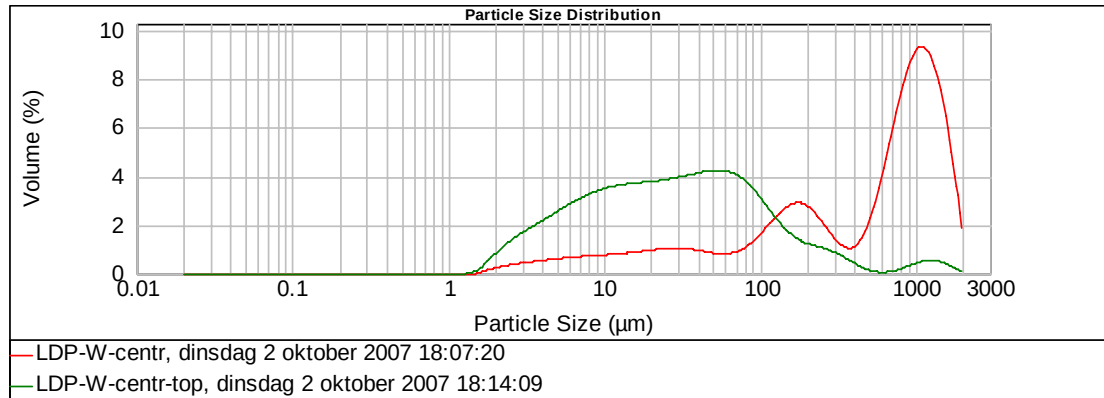


Figuur 2.2 Bodemonster met water, fluffy(top)-laag en bodem, 6 sept. 2007, Loosdrechtse Plassen

Uit analyse van deeltjesgrootte voor en na centrifuge-experimenten (Figuren 2.3 en 2.4) en de zeta-potentiaal van in 2007 genomen watermonsters volgt dat het fijne zwevende stof in de waterkolom in ca. 20 dagen tijd zal flocculeren tot grotere deeltjes; voor details zie hoofdstuk 5. De aldus gevormde vlokken bezinken met een valsnelheid van ca. 1 mm/s en deze valsnelheid is voldoende groot om tegen turbulente menging in de vlokken tot op de bodem te brengen.



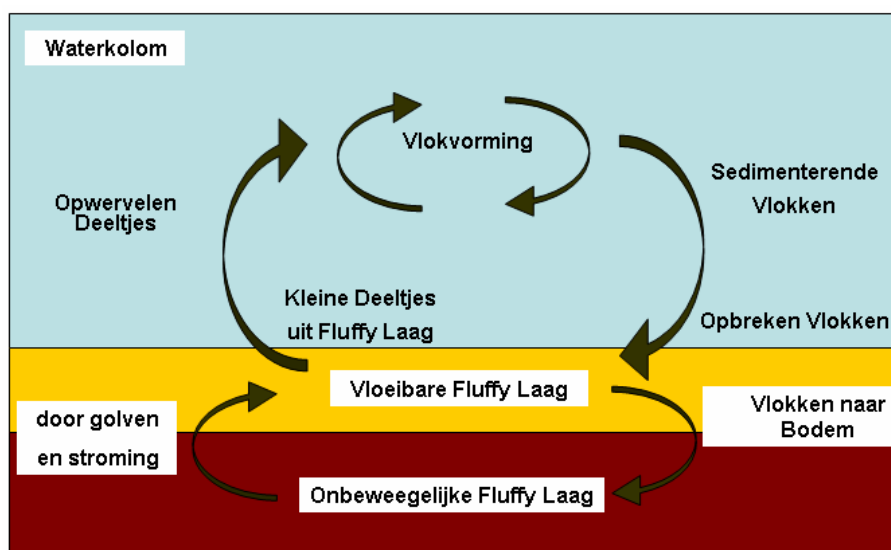
Figuur 2.3 Verdeling deeltjesgrootte in watermonsters genomen op 27 september 2007



Figuur 2.4 Toename deeltjesgrootte in watermonster genomen op 27 september 2007 na ca. één uur centrifugeren bij 500g, vergelijk met Figuur 2.3. De rode lijn refereert naar een deel onderin de testbuis waarheen de grotere deeltjes bezinken

2.4 Processen in huishouding fijn zwevend stof

2.4.1 Algemene werking



Figuur 2.5 Processen in de balans van zwevend stof

Voorgaande experimenten en onderliggende analyses die in de volgende hoofdstukken worden gepresenteerd leiden tot de belangrijkste processen die de balans van zwevend stof in de waterkolom van de Loosdrechtse Plassen domineren. Figuur 2.5 toont schematisch deze processen. Hierover presenteren we kort de kwantitatieve analyse.

De omzetting $\dot{M}_{vlok}$ van een concentratie $c_{zwevend}$ fijn zwevend stof tot een massa van sneller bezinkende vlokken in tijdsinterval T_{vlok} schrijven we als

$$\dot{M}_{vlok} = \frac{c_{zwevend}}{T_{vlok}} \left[kg \, m^{-3} s^{-1} \right] \quad (2.1)$$

Deze omzetting in sneller bezinkende vlokken bepaalt de sedimentatieflux want het fijne zwevende stof met een valsnelheid van ca. 0.1 m/dag blijft in suspensie bij het heersende turbulentieklimaat in de Loosdrechtse Plassen.

Zodoende volgt uit (2.1) de bruto sedimentatieflux:

$$V_{LP} \dot{M}_{vlok} = \frac{V_{LP} c_{zwevend}}{T_{vlok}} \quad [kg s^{-1}] \quad (2.2)$$

Samen met de som van de bronnen (algenproductie en veenafslag) en de putten (mineralisatie en afvoer door verversing) is deze flux in evenwicht met de productie van zwevend stof uit de vloeibaar gemaakte bodemlaag. We komen hier nog op terug.

Een opvallend verschil met de veronderstellingen in de studies (Los et al., 1997) en (Ouboter et al., 1999) betreft het mechanisme dat leidt tot verlaging van de concentratie zwevend stof als gevolg van het graven van putten. In eerdere studies was de veronderstelling dat de putten dienen als slibvang voor het zwevende stof, die zodoende de concentratie zwevend stof verlagen en het doorzicht verbeteren. De nieuwe analyse in dit rapport toont dat het effect van de putten ontstaat door het vergroten van het plasvolume, zodat bij gegeven productie van fijn zwevend stof door erosie van de resterende plasbodem een geringere concentratie zwevend stof nodig is om in balans te zijn met deze erosie. Hoewel er dus conceptueel vanuit een ander proces nl. flocculatie i.p.v. bezinken van zwevend stof wordt geredeneerd is er getalsmatig weinig veranderd t.o.v. de genoemde studies. Vergelijking (2.2) kan nl. worden herschreven tot:

$$V_{LP} \dot{M}_{vlok} = A_{LP} \left(\frac{h_{LP}}{T_{vlok}} \right) c_{zwevend} \quad [kg s^{-1}] \quad (2.3)$$

waarbij het quotiënt van plasdiepte (ca. 2m) en flocculatietijd (ca. 20 dagen) de eenheid van snelheid heeft en deze ca. 0.1 m/dag bedraagt wat overeenkomt met de in de eerdere studies afgeleide netto sedimentatiesnelheid (verschil tussen valsnelheid en erosiesnelheid) van fijn zwevend stof. Via een verschillende redenering komt deze nieuwe analyse dus tot eenzelfde resultaat als de eerdere studies.

Volgens het nieuwe concept, onderbouwd met experimenten en analyse, blijven fijne deeltjes van enkele μm en met ca. 0.1m/dag valsnelheid in suspensie bij het heersende turbulentieklimaat in de Loosdrechtse Plassen. Dergelijke fijne deeltjes moeten eerst vlokken worden met een valsnelheid van ca. 1 mm/s, die wel voldoende snel tegen turbulente menging in zullen bezinken. Dus het linkerlid in (2.3) is het nieuwe concept nl. sedimentatie na vlokvorming wat *de facto* een door volume bepaald proces is, terwijl het rechterlid (oude veronderstelling) een sedimentatieflux is gebaseerd op een netto sedimentatiesnelheid en plasoppervlak, dus een door plasoppervlak bepaald proces.

Een tweede verschil met vorige studies is dat, bij gegeven jaarlijkse productie van zwevend stof door algen en door veenafslag verminderd met mineralisatie en verversing én met een (ideale) bodem die alles wat erop sedimenteert vasthoudt, er een minimale concentratie zwevend stof groter dan nul zal zijn. In deze erosieloze situatie is er evenwicht tussen de netto productie van zwevend stof met de flocculatiesnelheid volgens (2.3).

Tenslotte, volgens deze inzichten is het zelfs onwenselijk dat de putten worden gevuld met vloeibaar gemaakt bodemmateriaal, want dat verkleint hun volume. De plasbodem blijkt uit een metersdikke slappe en makkelijke erodeerbare laag te bestaan zodat de jaarlijkse afstroming van een verhoudingsgewijs klein deel van deze vloeibare gemaakte laag naar de putten de omliggende plasbodem niet minder erodeerbaar zal maken. Gebruikmakend van (3.2) geeft het vergroten van het plasvolume nu als bruto sedimentatieflux:

$$(V_{LP} + V_{put}) \dot{M}_{vlok} = (V_{LP} + V_{put}) \frac{C_{zwevend}}{T_{vlok}} \quad [kg s^{-1}] \quad (2.4)$$

Bij gelijkblijvende som van bronnen, waaronder erosie, en putten volgt uit (2.4) een lagere concentratie zwevend stof met putten dan zonder putten. Helaas is er een tegenwerkend mechanisme en dat is bij de lage concentratie aan zwevend stof (ca. 4-5 mgC/l) de flocculatietijd T_{vlok} omgekeerd evenredig is met de concentratie door de afnemende kans op botsen van fijne deeltjes bij geringere concentraties. Hierdoor zal de concentratie zwevend stof niet lineair zijn met met de som van bronnen en putten maar met de wortel daarvan.

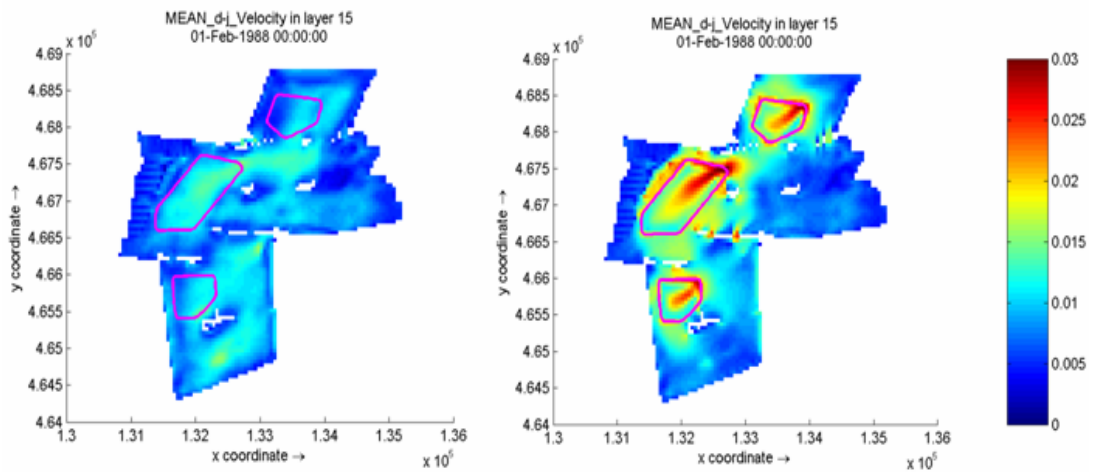
Uit analyses van de bronnen en putten en onder veronderstelling van evenwicht in zwevend stof blijkt dat een beperkt deel van deze sedimentatieflux, bestaande uit vlokken, leidt tot een blijvende depositie terwijl het merendeel weer in suspensie komt door golven en stroming over het oppervlak ($A_{LP} - A_{put} - A_{nero}$) (zie Figuur 2.5). Voor putbodems dieper dan ca. 4m zal de stroming nog wel eens een vloeibare fluffly laag produceren maar de agitatie van deze laag blijft bescheiden door de afwezigheid van de invloed van golven. Zodoende verwachten we dat de putbodem geen zwevend stof in de hogere gelegen waterkolom terug zal leveren. In onze modelvorming veronderstellen we daarom de putbodem geen producent zal zijn van zwevend stof dat hoger in de waterkolom wordt gevonden.

2.4.2 Effecten van stroming op gedrag zwevend stof

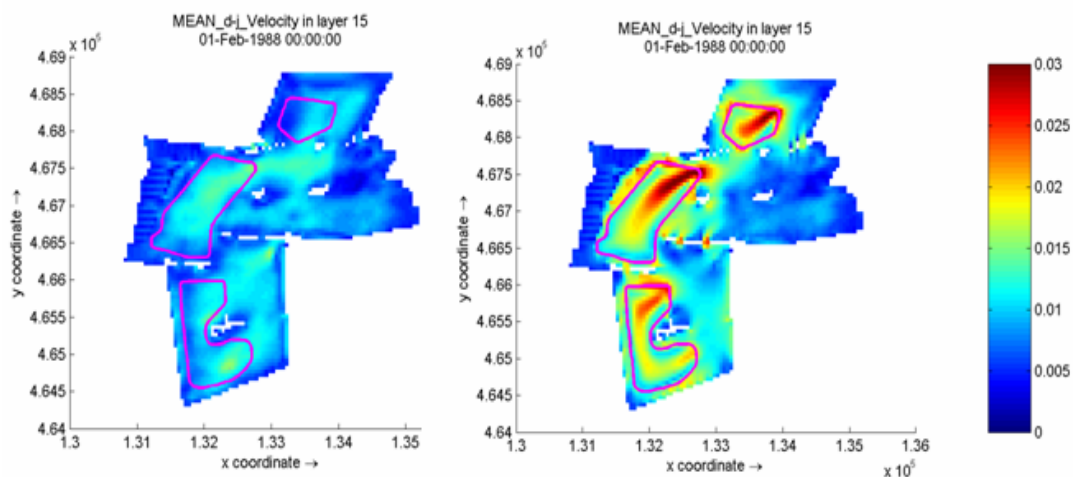
De putten zelf zorgen voor een stroomaantrekkende werking d.w.z. de putten veroorzaken extra circulatiepatronen in de Loosdrechtse Plassen. De aandrijvende kracht is het verschil in evenwicht van de windkracht met het verhang in waterstand over ondiepe delen of diepe delen: in diepere delen is een kleiner verhang nodig zodat het verhang over de ondiepe delen een retourstroming in de diepere delen veroorzaakt. Deze conclusie is alleen geldig voor verdiepingen die een klein deel van het plasoppervlak beslaan. Door de stroomaantrekkende werking wordt de erosie van de oorspronkelijke plasbodem groter hoewel golfwerking de erosie van de oorspronkelijke plasbodem blijft domineren. De circulatiepatronen veroorzaken ook een stroming in de putten maar deze blijft dermate beperkt dat de fluffly laag daar geen zwevend stof hoger in de waterkolom zal terug leveren. Verder schatten we dat de bodemschuifspanning in de putten voldoende laag blijft zodat deze de eventueel vloeibaar gemaakte slappe putbodem niet tegen een redelijke helling de put uit kan stuwen. Figuren 2.6 en 2.7 tonen de resultaten van onze 3D-stromingsimulaties met golven. Door de sterkere wind uit zuidwestelijke richting ontstaat er in de putten een stroming tegen deze windrichting in.

In dit verband merken we vast op dat de putvolumina in de AGV en WM varianten weinig verschillen. En tevens zal blijken dat de extra erosie door stroomaantrekkende werking voor beide varianten evenmin veel verschillen. Weliswaar zijn de AGV-putten dieper waardoor

hun stroomaantrekkende werking groter is dan in WM-variant maar in de WM-variant is de totale putomtrek weer groter dan in de AGV-variant.

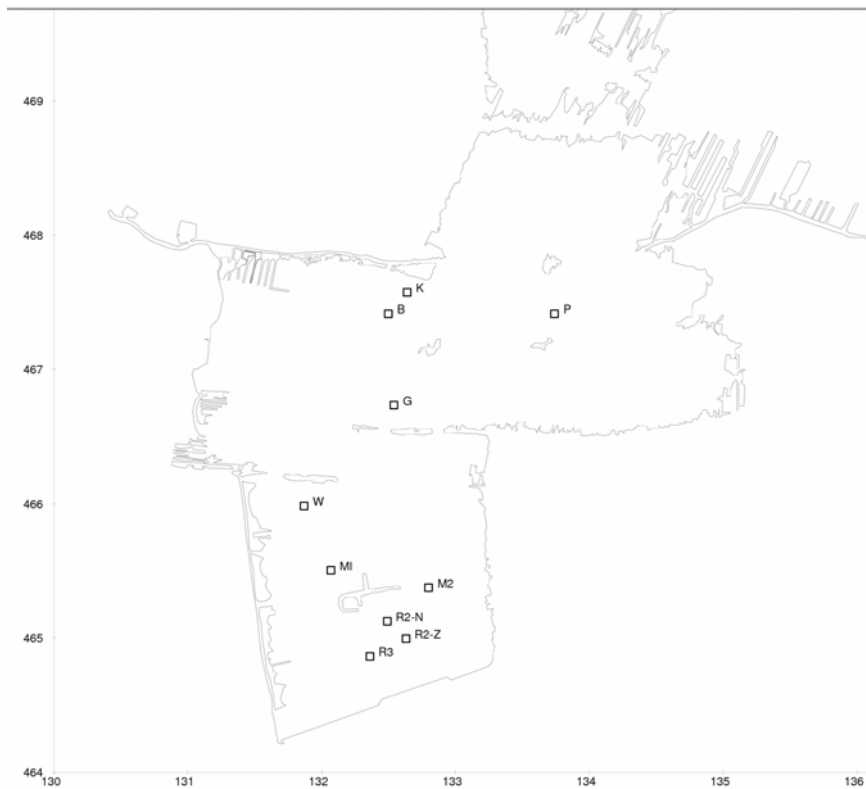


Figuur 2.6 Over 1 dec. tot 1 febr. '88 gemiddelde bodemsnelheid in onverdiepte (links) en verdiepte (rechts) Loosdrechtse Plassen voor de AGV variant. Voor referentie zijn in de linker figuur de contouren van de verdiepingen volgens de rechter figuur overgenomen

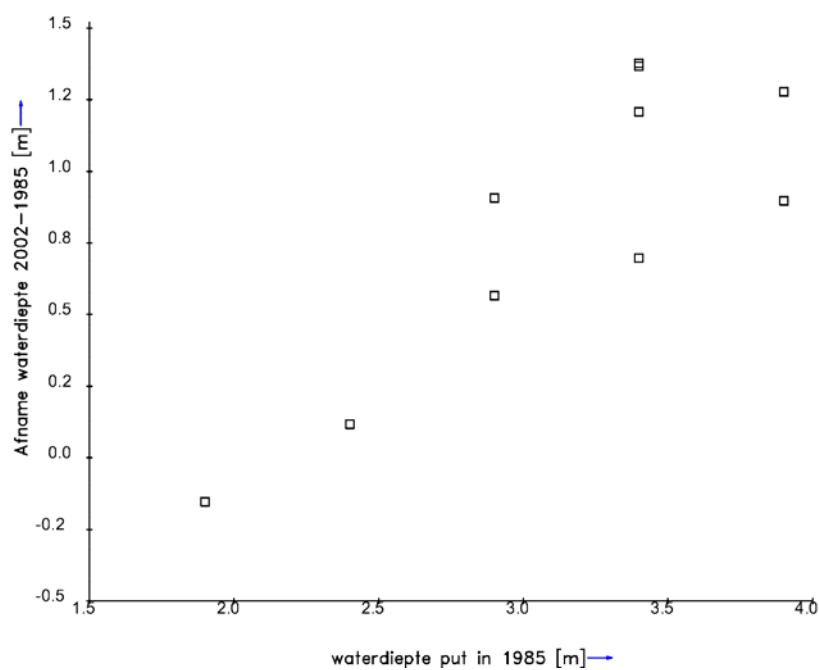


Figuur 2.7 Over 1 dec. tot 1 febr. '88 gemiddelde bodemsnelheid in onverdiepte (links) en verdiepte (rechts) Loosdrechtse Plassen voor de Wijde Meren variant. Voor referentie zijn in de linker figuur de contouren van de verdiepingen volgens de rechter figuur overgenomen

In de '60er en '70er jaren zijn er totaal 10 putten in de Loosdrechtse Plassen gegraven (Figuur 2.8) waarvan hun diepten in 1985 (Nieuwenhuijze et al., 1986) en in 2002 (Medusa, 2003) zijn bepaald. Door de verschillende diepten van de putten in 1985 (Figuur 2.9) kunnen we een schatting maken van de snelheid waarmee deze putten ondieper zijn geworden. Deze snelheid blijkt groter te zijn voor diepere putten en bedraagt ca. 5 cm/jaar voor 4m diepe putten wat wordt onderbouwd met Cesium-datering door Medusa (2007).



Figuur 2.8 Locatie zandwinputten volgens (Nieuwenhuyze et al., 1986) gegraven in de periode 1959-1977, zie ook Appendix B, de assen zijn gebaseerd op Parijse coördinaten



Figuur 2.9 Afname van de diepte van 10 putten (Figuur 2.8) in de Loosdrechtse Plassen na ca. 17 jaar

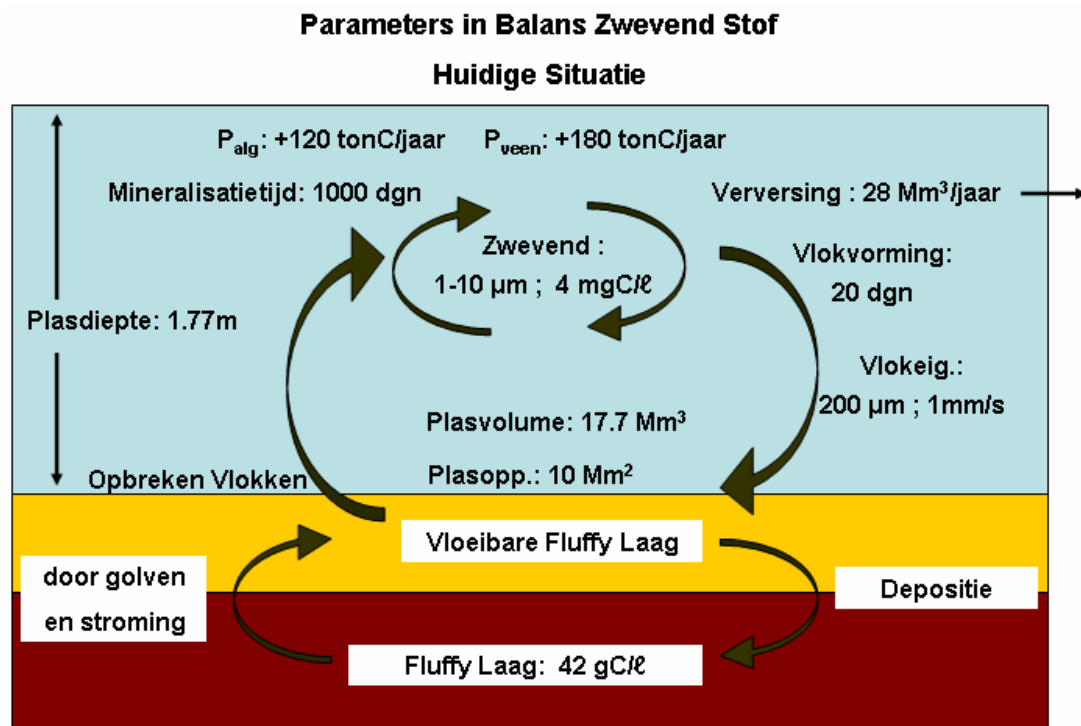
Bij een snelheid van 5 cm/jaar en met 42 gC/l in de toplaag van de putbodem (Cornelisse en Grootenboer, 2007) zal er ca. 2500 tonC/jaar in een put van 120 ha (AGV-variant) stromen. Uitgaande van de geschatte netto depositie (zie onder) van zwevend stof concluderen we dat voor de AGV- en WM-putten depositie van zwevend stof een marginale invloed heeft: de putten zullen voornamelijk worden gevuld met de vloeibaar gemaakte fluffy laag rond de putten.

2.4.3 Zwevend stof balans in cijfers

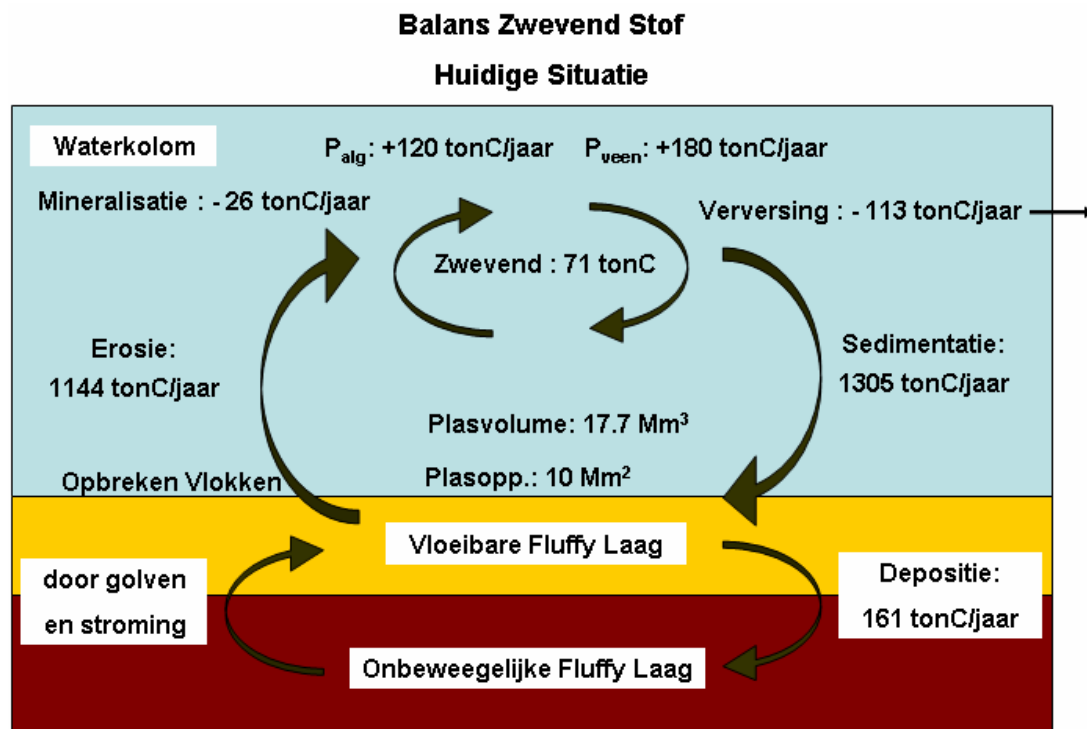
Voorgaande experimenten en analyse leiden, samen met de studies (Los et al., 1997) en (Ouboter et al., 1999), tot de kenmerkende grootheden in de balans van zwevend stof voor de huidige situatie, zie Figuur 2.10. In deze balans berekenen we de erosie van de plasbodem als sluitpost hoewel procesmatig gezien erosie de oorzaak van het zwevende stof is. De resultaten van deze balans staan schematisch in Figuur 2.11.

Uit Figuur 2.11 blijkt dat de balans van fijn zwevend stof in de waterkolom van de Loosdrechtse Plassen grotendeels wordt bepaald door de snelheid waarmee de massa zwevende oude algencellen en veendeeltjes van slechts enkele μm grootte tot bijna millimeter grote en sneller zinkende vlokken wordt omgezet. Met een flocculatiesnelheid van eens per ca. 20 dagen wordt in de Loosdrechtse Plassen de massa zwevende deeltjes van ca. 71 tonC in vlokken omgezet, dus 1615 tonC/jaar. Deze vlokken bezinken sneller dan turbulentie ze opwaarts mengt. Een klein deel van de vlokken verdwijnt uit de waterkolom (depositie 155 tonC/jaar) terwijl de rest door de turbulentie boven de bodem wordt opgebroken en weer als fijne deeltjes opwaarts wordt gemengd. De bruto flocculerende en dus sedimenterende massaflux van 1615 tonC/jaar overtreft alle andere deeltjes-producerende en -eliminierende processen in de waterkolom.

Figuren 2.11 tot 2.15 tonen de balansen waarop de oorspronkelijke erosie is gekalibreerd op een verondersteld jaargemiddeld evenwicht van 4 mgC/l zwevend stof. Deze erosie per eenheid van oorspronkelijk plasoppervlak is in de AGV- en WM-varianten overgenomen maar wel verhoogd door de stroomaantrekkende werking buiten de putten, zie ook Figuren 2.6 en 2.7. Het resultaat is dat de erosie over het plasoppervlak buiten de putten niet noemenswaardig geringer is t.o.v. de huidige situatie. De verlaging van de concentratie zwevend stof komt vooral door de vergroting van het plasvolume in de bruto sedimentatieflux (2.4). Er is netto wel meer depositie omdat verondersteld is dat de productie van zwevend stof door algen en veenafslag onafhankelijk is van het zwevend stof. Echter, mineralisatie en de afvoer door verversing zijn wel evenredig met de concentratie zwevend stof en die nemen af bij lager concentratie zodat er meer depositie is bij een nieuw evenwicht in concentratie zwevend stof. In sommige situaties kan minder zwevend stof wel leiden tot een grotere productie van algen. Voor de Loosdrechtse Plassen zal dit echter niet gelden, omdat de algenproductie meer bepaald wordt door de beschikbaarheid van nutriënten dan door de beschikbaarheid van licht.

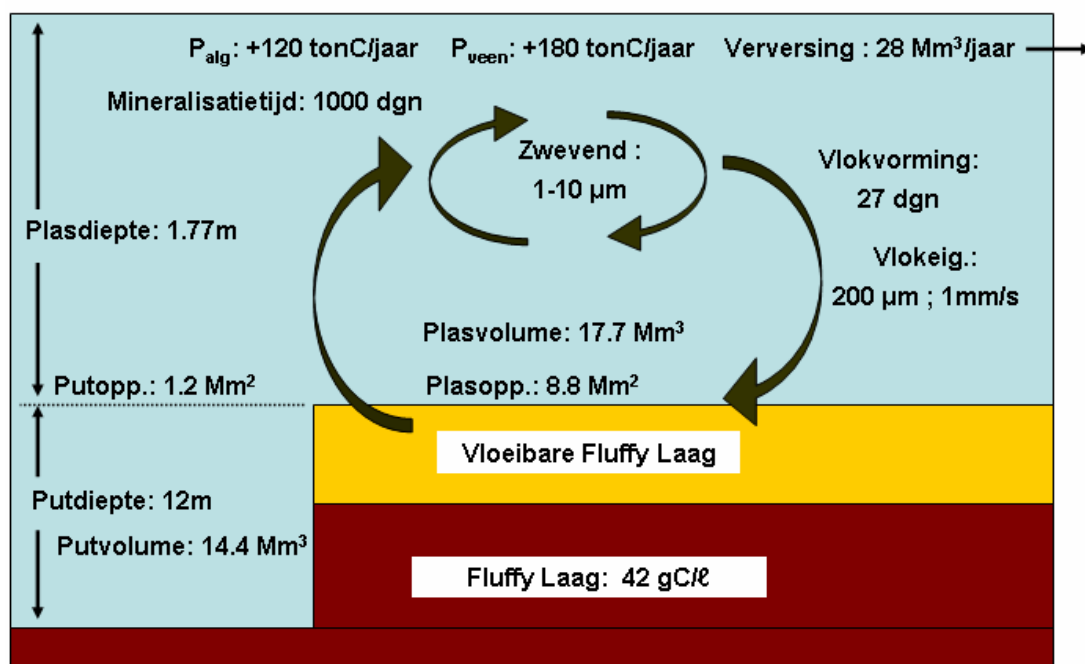


Figuur 2.10 Grootheden en processen in de balans van zwevend stof; huidige situatie



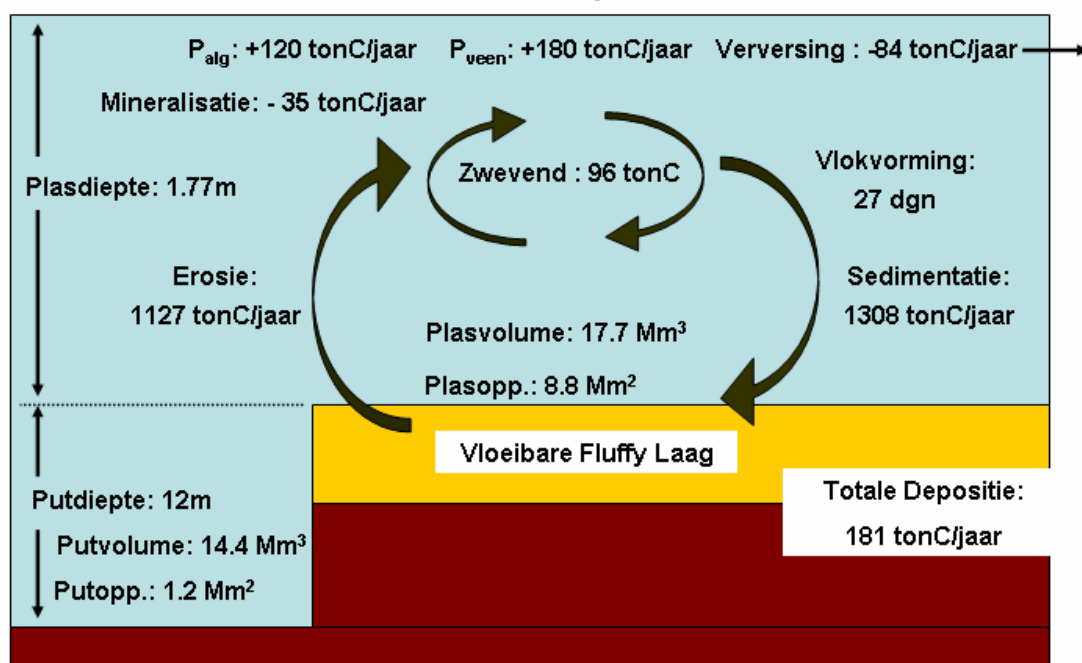
Figuur 2.11 De fluxen in de balans van zwevend stof; huidige situatie

Parameters in Balans Zwevend Stof AGV-Variant Verdiepte Situatie



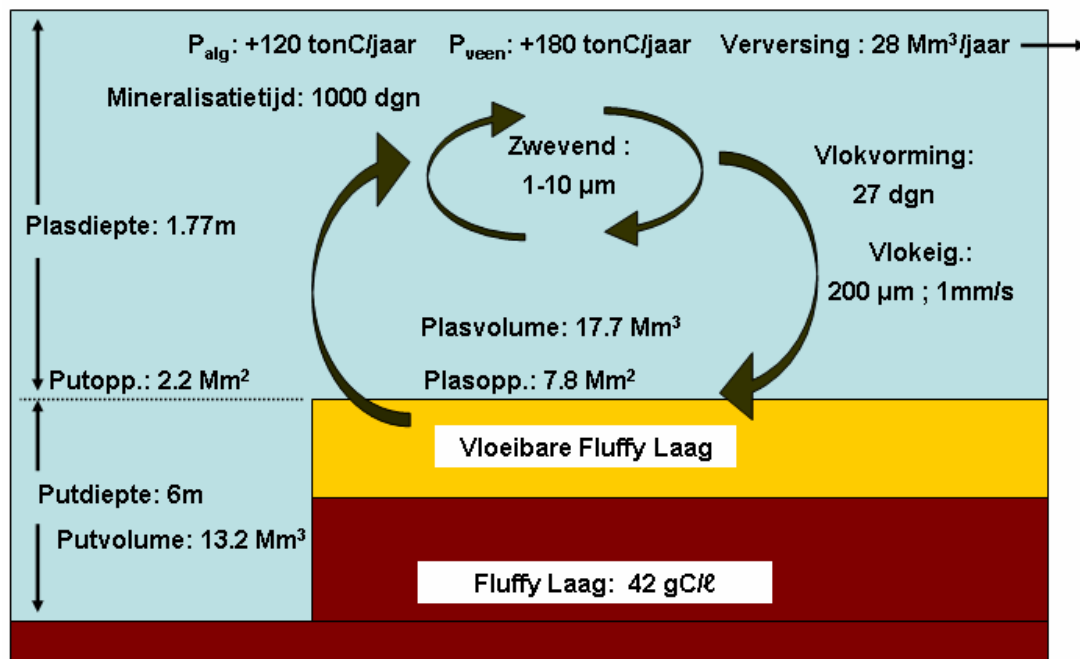
Figuur 2.12 Grootheden en processen in de balans van zwevend stof; AGV variant. De concentratie zwevend stof en de flocculatietijd zijn uitkomsten

Balans Zwevend Stof AGV-Variant Verdiepte Situatie



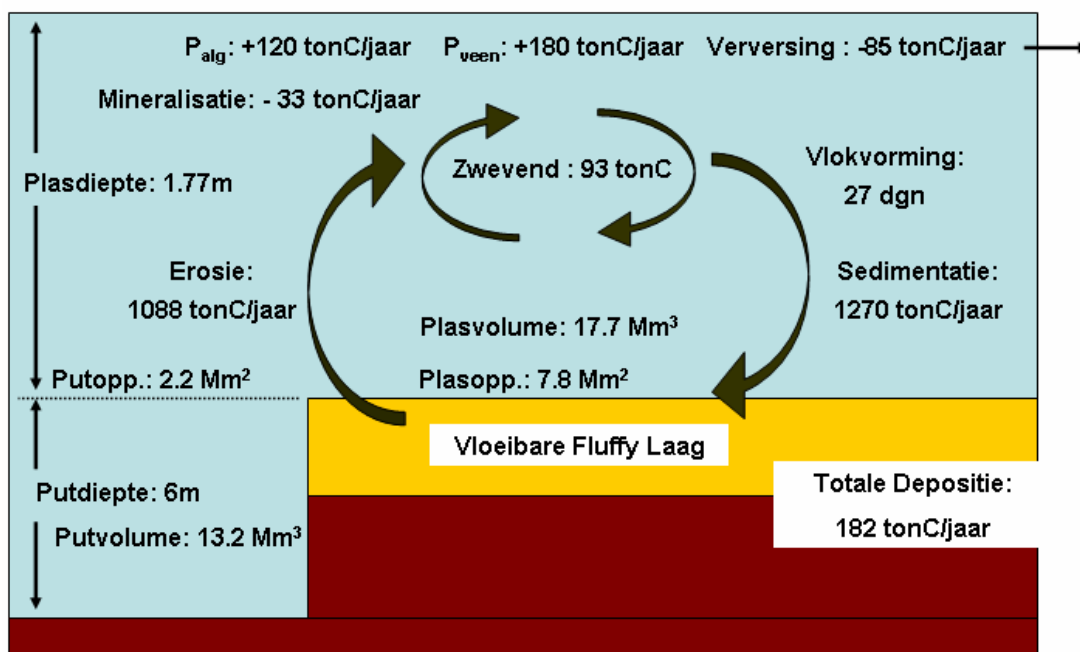
Figuur 2.13 De fluxen in de balans van zwevend stof; AGV-variant

Parameters in Balans zwevend stof WM-Variant Verdiepte Situatie



Figuur 2.14 Grootheden en processen in de balans van zwevend stof; WM variant. De concentratie zwevend stof en de flocculatietijd zijn uitkomsten

Balans zwevend stof WM-Variant Verdiepte Situatie



Figuur 2.15 De fluxen in de balans van zwevend stof; WM-variant

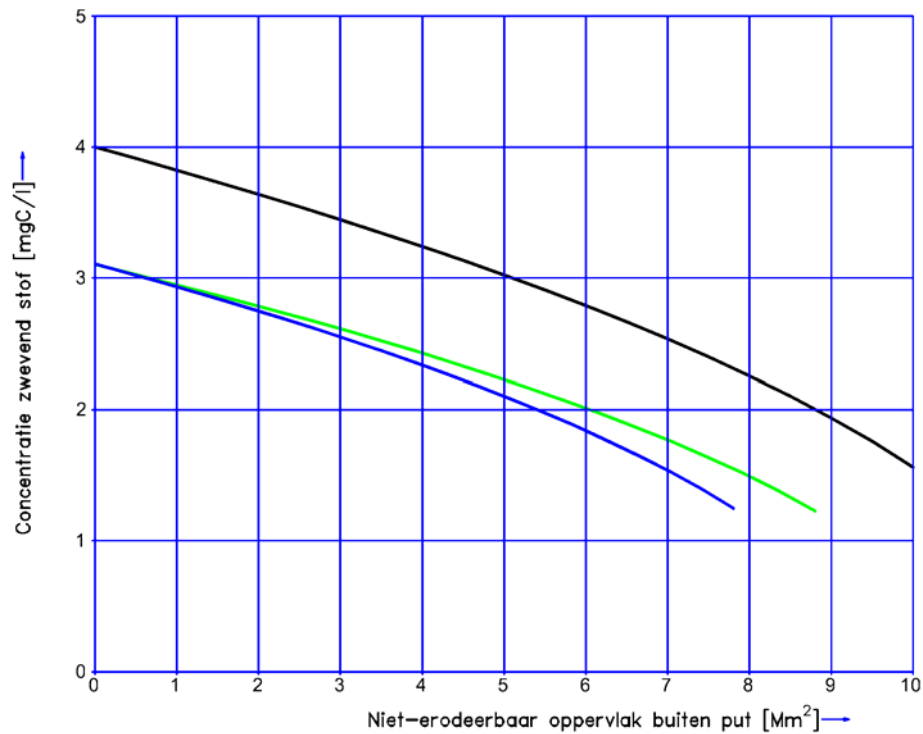
Aannemende dat de massa zwevend stof in de huidige Loosdrechtse Plassen en in de afgelopen jaren weinig is veranderd moet de sedimenterende massa vlokken bijna gelijk blijven aan de erosie van de ijle en zwakke toplaag van de Loosdrechtse Plassen bodem; het kleine verschil is gelijk aan de som van alle overige deeltjes-producerende en -eliminerende processen in de waterkolom. Erosie en sedimentatie door flocculatie zijn nagenoeg in balans.

Op basis van deze evenredigheden schatten we dat de concentratie fijne zwevende deeltjes van 4 mgC/l tot 3.0 mg/l afneemt zowel voor 12m diepere putten van 120 ha (AGV-variant) als voor 6m diepere putten met 220 ha (WM-variant). In het ideale geval dat de huidige Loosdrechtse Plassen plasbodem geen zwevend stof meer teruglevert d.w.z. al het gesedimenteerde materiaal vasthoudt bedraagt de minimale concentratie 1.56 mgC/l en 1.24 mgC/l voor de AGV- en WM-varianten, zie Figuur 2.16. Volgens (2.4), is deze minimale concentratie nodig om evenveel massa aan zwevend stof te flocculeren als er netto wordt geproduceerd door algen en veenafslag, verminderd met mineralisatie en door verversing. De minimale concentratie met de AGV- en WM-varianten is lager dan de huidige situatie doordat het plasvolume groter is.

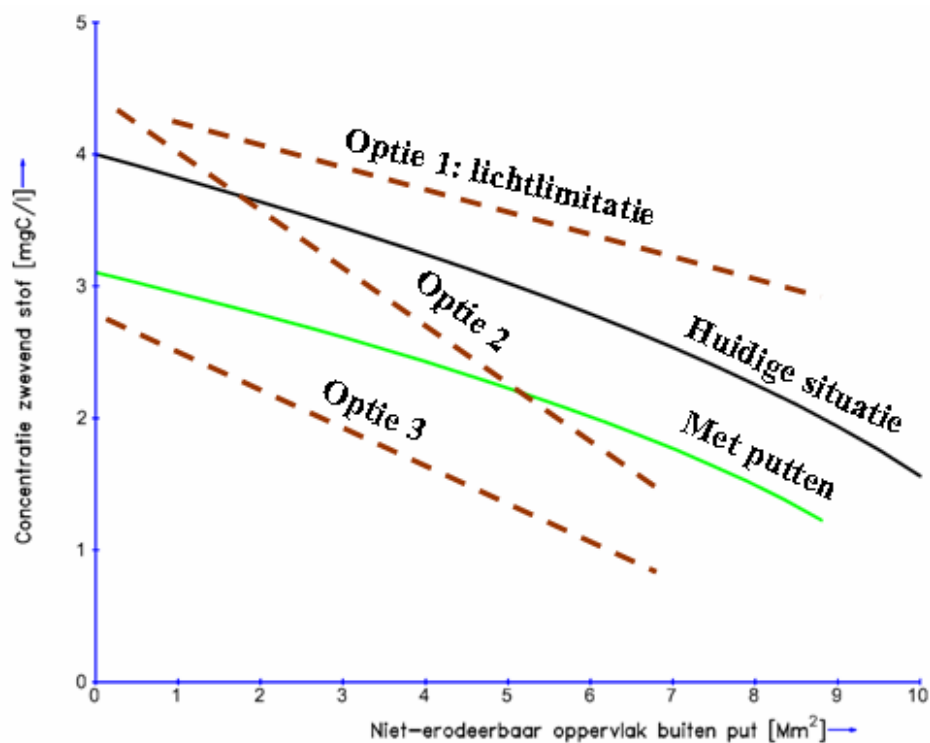
2.4.4 Effecten van niet-erodeerbare bodems op de balans

Het afdekken van de erodeerbare bodem door het opbrengen van zand of door de vestiging van waterplanten leidt tot een verminderde resuspensie van zwevend stof en daardoor tot een afname van de concentratie zwevend stof. Dit verband wordt weergegeven in Figuur 2.16. Deze figuur blijkt cruciaal te zijn om te bepalen of er evenwicht kan ontstaan met een plasbodem ten dele begroeid met waterplanten waarvan we nu veronderstellen dat dit deel geen zwevend stof meer zal terug leveren aan de waterkolom. In dit verband illustreert Figuur 2.17 drie mogelijke toestanden (hier opties genoemd) van de relatie tussen het oppervlak van de plasbodem dat minimaal 4% van het daglicht ontvangt na extinctie door een concentratie zwevend stof. Naarmate de concentratie zwevend stof afneemt zal het bodemoppervlak dat voldoende licht (meer dan 4%) ontvangt voor plantengroei toenemen. We stellen nu dat het oppervlak begroeid met planten geen zwevend stof terug zal leveren. In de eerste optie zal de plasbodem volledig met planten zijn begroeid, immers bij gegeven concentratie zwevend stof wordt meer oppervlak voldoende belicht dan volgens de zwevend-stof balans niet-erodeerbaar is verondersteld. In de derde optie in Figuur 2.17 groeien er geen planten omdat gegeven een concentratie zwevend stof minder oppervlak met planten begroeid kan worden dan verlangd wordt voor niet-erodeerbaar oppervlak met het bijbehorende zwevend-stof gehalte.

In de tweede optie wordt een evenwicht gevonden op het snijpunt met de curve van de balans van zwevend stof met niet-erodeerbaar oppervlak. In hoofdstuk 3 worden de curves voor de lichtlimitatie voor plantengroei geschat en dan zal blijken dat de tweede optie van toepassing is.



Figuur 2.16 De afnemende concentratie fijn zwevend stof voor de huidige situatie (zwarte lijn), en voor de AGV-variant (groene lijn) en de WM-variant (blauwe lijn) bij toenemende oppervlak van de plasbodem buiten de putten dat geen fijn zwevend stof zal produceren (100 ha is gelijk aan 1 Mm^2)



Figuur 2.17 De gestippelde lijnen zijn drie mogelijke toestanden (opties) voor de relatie tussen zwevend stof en oppervlak dat minimaal 4% van het daglicht ontvangt. De getrokken lijnen zijn de concentratie van zwevend stof voor de huidige situatie (zwarte lijn) en een voorbeeld met putten (groene lijn) volgens de balans

2.5 Samenvattende conclusies slibbalans

De resultaten in Figuren 2.11, 2.13 en 2.15 kunnen worden benaderd met de volgende formule. De afleiding van de formule wordt beschreven in Hoofdstuk 4.6. De formule wordt op de volgende pagina in woorden beschreven. De formule drukt de nieuwe concentratie c_1 uit in de concentratie c_0 van zwevend stof in de onverdiepte situatie, met plasoppervlak A_{LP} , putoppervlak A_{put} , plasvolume V_{LP} en putvolume V_{put} :

$$\frac{c_1}{c_0} \approx \sqrt{\chi_{1,0} \frac{\eta_1}{\eta_0} \left(1 - \frac{A_{put}}{A_{LP}}\right) \left(\frac{V_{LP}}{\left(1 - \frac{A_{put}}{A_{LP}}\right) V_{LP} + V_{put}} \right) \frac{\alpha_0}{\alpha_1}} \quad \text{mits} \quad \frac{A_{put}}{A_{LP}} \ll 1 \quad (2.5)$$

met extra putvolume

$$V_{put} = (h_{put} - h_{LP}) A_{put} \quad (2.6)$$

beneden het oorspronkelijke plasvolume h_{LP} . In (2.5) is $\chi_{1,0}$ is de fractie in toename van erosie buiten de putten door de stroomaantrekkende werking. Een ruwe schatting luidt:

$$\chi_{1,0} \approx 1 + \frac{A_{put}}{A_{LP}} \quad (2.7)$$

maar deze kan beter met hydrodynamische berekeningen worden geschat. Door $\chi_{1,0} > 1$ wordt de reductie in erosieoppervlak, via factor $\left(1 - A_{put}/A_{LP}\right)$, tegengewerkt. De verhouding η_1/η_0 geeft weer de fracties niet-erodeerbare oppervlakken buiten de putten in de nieuwe situatie tegen de niet-erodeerbare oppervlak/plasbodem in de huidige situatie door bezanden en/of waterplanten. Met de grootheden uit Figuur 2.1 is η gedefinieerd als:

$$\eta = \frac{A_{LP} - A_{put} - A_{nero}}{A_{LP} - A_{put}} \quad (2.8)$$

Hiermee maken we een onderscheid in de invloed van de stroming (χ) en door andere onafhankelijke invloedsfactoren zoals de groei van waterplanten die de bodem verstevigen en afschermen van de eroderende werking van de stroming/golven of bedekken met zand.

Volgens voorgaande theorie en evenredigheidsrelaties zal de concentratievermindering door verdiepen vooral door het putvolume ontstaan d.w.z. door de vergroting van de gemiddelde plasdiepte. De putten dienen louter voor de volumevergroting: de netto sedimentatie, ca. 10% van de erosieflux, neemt nauwelijks merkbaar toe.

Tenslotte bevat (2.5) een verhoudingsgetal tussen de flocculatie-efficiëntie α_0 voor de huidige en α_1 voor de nieuwe situatie. In de huidige situatie schatten we voor α_0 ca. 0.1

d.w.z. 10% van de botsingen van deeltjes leidt tot vlokvorming. Door het toevoegen van b.v. een flocculant (b.v. bentoniet klei) of de verlaging van de pH-waarde van het Loosrechtse Plassen water kan α_1 in principe worden verhoogd, de maximale waarde is 1 (100%) d.w.z. alle botsingen leiden tot vlokken.

Samenvattend biedt (2.5) de volgende afwegingen:

- Het wortelteken in formule (2.5) toont dat de hierna genoemde invloeden niet lineair de concentratie reduceren. De reden is dat bij gelijkblijvende erosie weliswaar de concentratie fijn zwevend stof afneemt door de toevoeging van het putvolume maar ook de snelheid van vlokvorming (kans op botsen deeltjes) afneemt door de lagere concentratie.
- Door het graven van putten ontstaat er een verhoogde erosie buiten de putten door hun stroomaantrekkende werking waardoor het verhoudingsgetal $\chi_{1,0} > 1$ zal worden.
- Het afdekken van een deel van de plasbodem buiten de putten, zodat op dat deel geen erosie meer optreedt, wordt weergegeven door het verhoudingsgetal η met subscript 0 voor de huidige en subscript 1 voor de nieuwe situatie. Een voorbeeld voor de toepassingen van η is het bedekken met zand en/of de vestiging van waterplanten die de bodem versterken en tegen erosie afschermen waardoor $\eta < 1$ zal gelden volgens formule (2.8) waarin het niet-erodeerbare oppervlak A_{nero} voorkomt. In dit rapport wordt oppervlak A_{nero} gelijk gesteld aan het oppervlak van de plasbodem dat voldoende licht ontvangt voor de vestiging van waterplanten.
- Door het graven van voldoende diepe putten neemt het door de golven en stroming veroorzaakte erodeerbare oppervlak met het verhoudingsgetal $(1 - A_{\text{put}} / A_{\text{LP}})$ af. Door de stroomaantrekkende werking van de putten, zal de erosie buiten de putten toenemen, zie het eerste punt hierboven en de ruwe schatting (2.7).
- Door het vergroten van het plasvolume V_{LP} met putvolume V_{put} neemt de verhouding $V_{\text{LP}} / (V_{\text{LP}} + V_{\text{put}})$ af. Bij gelijke concentratie geeft deze volumevergroting meer flocculatie en daarmee meer bezinking van fijn zwevend stof dan in de huidige situatie.
- De efficiëntie waarmee vlokken worden gevormd na botsen van fijn zwevend stof wordt weergegeven in het verhoudingsgetal α . Door toevoeging van een flocculant of andere maatregelen zoals pH-verlaging neemt α toe tot maximaal 1. In de huidige situatie is α_0 ca. 0.1.

Voorgaande variaties laten diverse mogelijke maatregelen zien om de verhouding c_1/c_0 tijdelijk of blijvend te verlagen. Volgens deze balans is de belangrijkste maatregel het vergroten van het plasvolume van 17.7 Mm³ met het putvolume van de AGV-variant (14.4 Mm³) of van de Wijdmeren-variant (13.2 Mm³). Locale verdieping roept beperkt tegengestelde effecten op doordat putten een stroomaantrekkende werking hebben en de erosie rondom de putten zal vergroten. Wanneer tenminste tijdelijk de concentratie van fijn zwevend stof wordt verlaagd zal ook de extinctie afnemen en zodoende de vestiging van waterplanten op de ondiepe plasbodem toenemen. Deze vestiging geeft een verlaging van het erodeerbaar oppervlak van de plasbodem wat de factor η_1 verkleint t.o.v. de huidige situatie (η_0) met weinig oppervlak aan waterplanten, lees niet-erodeerbaar oppervlak. Door de vergroting van het niet-erodeerbare oppervlak zal de concentratie fijn zwevend stof nog verder afnemen waardoor weer een groter areaal beschikbaar komt voor de vestiging van waterplanten. In termen van concentratie fijn zwevend stof wordt het nieuwe evenwicht

bepaald door de relatie tussen concentratie fijn zwevend stof en voldoende belicht oppervlak wat weer als niet-erodeerbaar oppervlak terug komt via η_1 in de concentratie-formule. Kortom de verlaging van de concentratie fijn zwevend stof, zoals door de aanleg van putten, vormt een noodzakelijke maatregel. Deze verlaging in concentratie kan worden versterkt door de vestiging van waterplanten, waardoor erosie van de bodem afneemt, wat een verder verlagend effect heeft op de concentratie zwevend stof. Deze terugkoppeling wordt in het volgende hoofdstuk verder besproken.

3 Lichtklimaat

3.1 Berekening lichtklimaat

De reductie in zwevende stof door het aanbrengen van verdiepingen is vertaald naar een verandering in het onderwaterlichtklimaat met behulp van de extinctie module UITZICHT (Buiteveld, 1990) die beschikbaar is binnen de DELWAQ processenbibliotheek. Deze module berekent de extinctie (m^{-1}), een maat voor de uitdoving van licht, specifiek voor alle golflengtes tussen de 400 nm en 700 nm. Dit deel van het lichtspectrum vormt het PAR ‘*Photosynthetic Active Radiation*’, oftewel dat deel van het licht dat beschikbaar is voor fotosynthese. Gebruikmakend van de wet van Lambert-Beer voor de uitdoving van inkomend licht van een golflengte λ op diepte z geldt dat de straling op diepte z gelijk is aan:

$$I_z = I_0 \exp(-k z) \quad (3.1)$$

waarin

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

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

k = extinctiecoëfficiënt (m^{-1})

z = diepte (m)

De extinctiecoëfficiënt in deze formule is afhankelijk van de samenstelling van het water. De fracties die bijdragen aan de totale extinctie van licht door absorptie en verstrooiing van licht zijn te onderscheiden in:

- humus (verkleuring van het water door humuszuren)
- anorganische slibdeeltjes
- algen (weergegeven als chlorophyl-a concentratie)
- actief detritus (dood algenmateriaal dat snel afbreekbaar is)
- refractair detritus (het fijne zwevend stof: kleine minder snel afbrekende deeltjes van algen en veenresten)
- het water zelf

De hoeveelheid refractair detritus komt overeen met de gestelde constant aanwezige bron van 4 mgC/l fijn zwevend stof zoals benoemd in hoofdstuk 2. De hoeveelheid actief detritus wordt hierbij opgeteld om tot een totale uitdoving vanuit organische zwevend stof deeltjes te komen, omdat deze deeltjes dezelfde absorptie- en verstrooiingseigenschappen hebben. Omdat de mineralisatie van het actief detritus in verhouding snel gaat (orde 0.1 à 0.2/dag) ten opzichte van refractair detritus ($\leq 0.001/\text{dag}$) is deze in de zwevend stof balans in hoofdstuk 2 niet expliciet benoemd. We hanteren in dit hoofdstuk de terminologie actief en refractair detritus om onderscheid te maken tussen de bijdrage aan extinctie door dood algenmateriaal en constant aanwezig fijn zwevend stof.

Voor KRW doelstellingen voor potentieel areaal geschikt voor de vestiging van waterplanten geldt de vuistregel dat 4% van het invallende licht de bodem moet bereiken (Penning et al, 2006), al is dit wel een gemiddelde geschatte waarde gebaseerd op een grote variatie die in de internationale literatuur wordt gevonden voor dit percentage variërend van 1% tot 30%

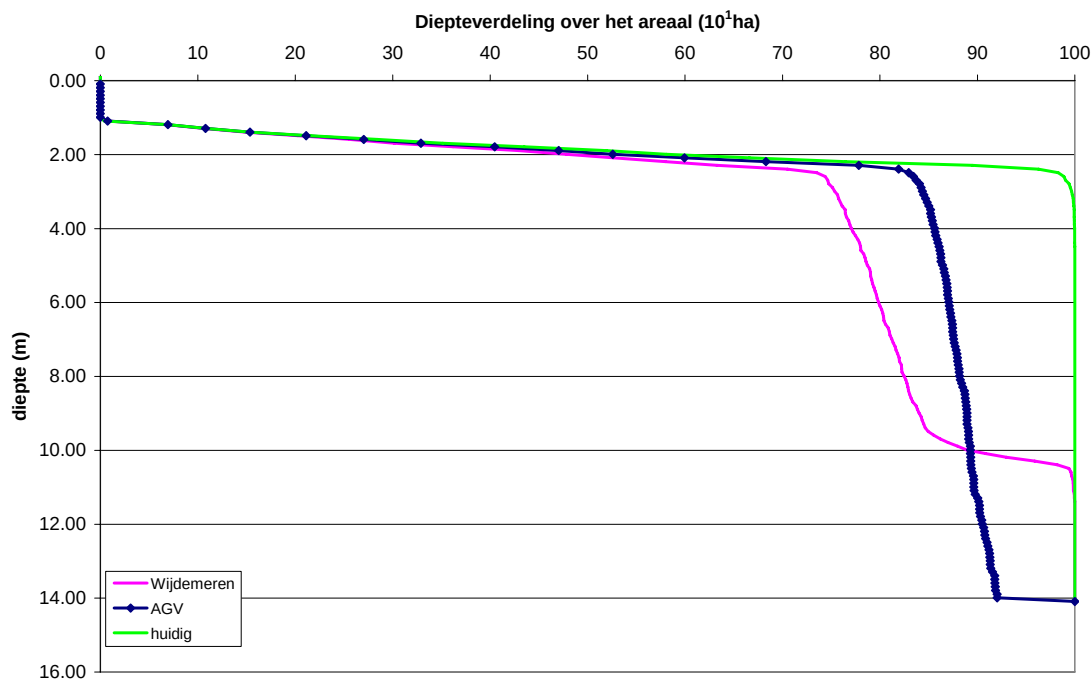
afhankelijk van de soortsgroepen (Penning et al, 2006). Andere randvoorwaarden (golfslag, graas, bodemtype, soortspecifieke lichtvereisten) kunnen een additionele limiterende rol spelen in de uiteindelijke vestigingskansen. Het percentage licht op de bodem wordt gezien als een eerste randvoorwaarde om een potentieel geschikt vestigingsareaal aan te geven.

Kader 1. Over doorzicht en extinctie

De begrippen 'doorzicht' en 'extinctie' of 'uitdoving' worden vaak door elkaar gebruikt. Dat is niet juist: het zijn twee verschillende begrippen, die op een verschillende manier gemeten worden en ook een verschillende betekenis hebben. Doorzicht wordt gemeten met een Secchi schijf, extinctie met een lichtmeter (ook wel extinctiemeter genoemd). Er zijn een aantal redenen waarom die twee metingen niet altijd goed in elkaar zijn om te zetten: een lichtmeter 'kijkt' omhoog, het doorzicht daarentegen is de resultante van lichtuitdoving (maar ook reflectie) in twee richtingen (naar beneden en naar boven); ook de spectrale gevoeligheid is niet hetzelfde. Bijvoorbeeld in humusrijk, geel-bruin water kun je tot op de bodem kijken, maar de extinctie is hoog en er groeien dan ook vaak geen planten.

De extinctiemeter is afgestemd op het voor fytoplankton en waterplanten gevoelige spectrum (PAR: Photosynthetic Active Radiation 400-700 nm). Daarom levert de extinctiemeter een betrouwbaardere maat voor de mogelijkheden van primaire productie dan het doorzicht. Dat desondanks veel empirische relaties over primaire productie en kieming van zaden uitgaan van doorzicht komt enerzijds door het gebrek aan extinctiemetingen en anderzijds door het feit dat Secchi-schijfmetingen gemakkelijk uitgevoerd kunnen worden. Er zijn een aantal duidelijke rapporten en publicaties over lichtklimaat verschenen, die meer achtergrondinformatie verschaffen (Bakema, 1988; Kirk, 1994; Van Duin et al, 2001; Scheffer, 1998).

Gebaseerd op de berekende extinctiecoëfficiënt is een omrekening gemaakt naar de maximale diepte waarop waterplanten zich nog kunnen vestigen gebaseerd op een voldoende goed lichtklimaat (tabel 3.1.a). Deze diepte is via de hypsometrie data (diepte-oppeervlak verdeling) omgerekend naar een potentieel beschikbaar areaal voor waterplanten. De diepteverdeling van Loosdrechtse Plassen voor de huidige situatie en de twee put-varianten AGV en Wijde Meren zijn weergegeven in figuur 3.1. Reeds in de ondiepere delen (vanaf ongeveer 1.75 m diepte) gaan de arealen per diepteklasse voor de verschillende variant uit elkaar lopen (tabel 3.1b): het verschil tussen de variant Wijdemeren en de huidige diepte bij 1.70m bedraagt 50 ha; bij 2 m diepte bedraagt dit verschil 94 ha en bij 2.2 m diepte 187 ha. We schatten de nauwkeurigheid van de hypsometrie gegevens op ± 5 cm.



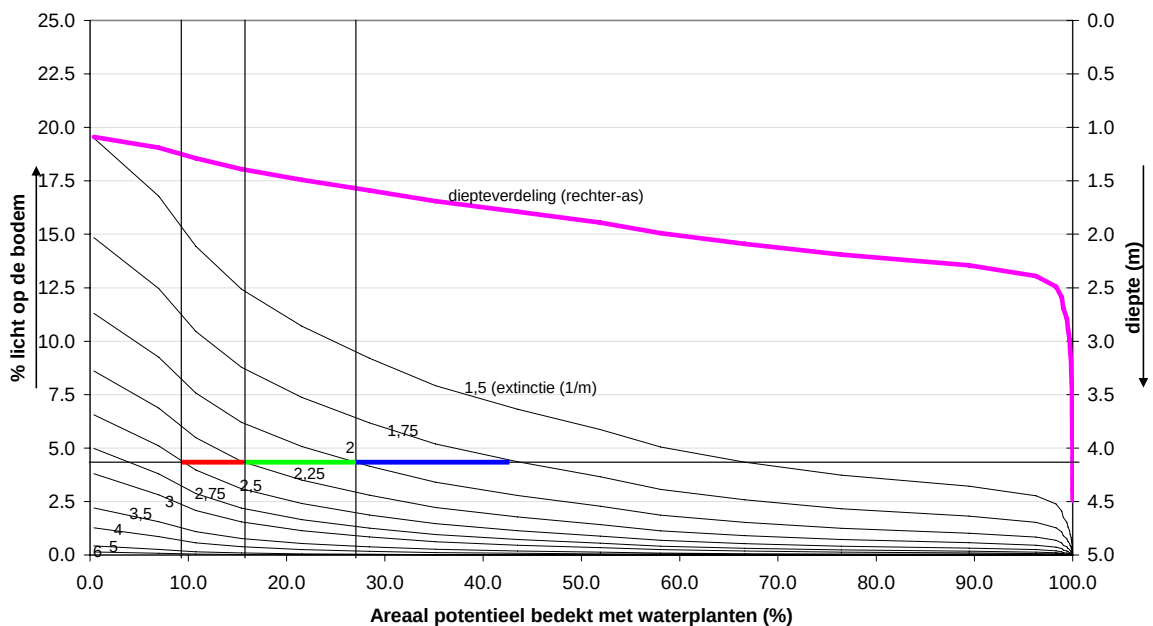
Figuur 3.1 Diepteverdeling van de alternatieven AGV en Wijdemeren en het huidige areaal

Tabel 3.1a Diepte en de bijbehorende extinctie waarbij 4% licht de bodem bereikt
Tabel 3.1b Areaal ondieper dan diepte x voor de drie varianten

Diepte (m)	extinctiecoëfficiënt bij 4%
1.3	2.5
1.4	2.3
1.5	2.2
1.6	2.0
1.7	1.9
1.8	1.8
1.9	1.7
2.0	1.6
2.1	1.5
2.2	1.5
2.3	1.4

Diepte (m)	Huidig	AGV	Wijdmeren
1.3	109	109	106
1.4	156	156	151
1.5	218	214	205
1.6	288	274	259
1.7	356	333	306
1.8	441	410	367
1.9	526	476	435
2.0	588	533	484
2.1	675	607	533
2.2	774	692	587
2.3	906	788	641

Relatie diepteverdeling, lichtklimaat en potentieel areaal waterplanten



Figuur 3.2 Relatie tussen diepteverdeling, lichtklimaat en potentieel areaal geschikt voor waterplanten ontwikkeling

Figuur 3.2 geeft de relatie tussen de diepteverdeling van de Loosdrechtse Plassen en het areaal potentieel geschikt voor waterplanten in relatie tot het lichtklimaat voor het volledige spectrum van percentages en extincties. Bij een gegeven % licht op de bodem en een gegeven extinctie kan uit figuur 3.2. worden afgelezen hoeveel areaal van de Loosdrechtse Plassen potentieel geschikt is voor waterplantenvestiging omdat aan het criterium 'voldoende licht op de bodem' wordt voldaan. Uitgaande van de vuistregel van 4% licht voor kieming van waterplanten kan worden afgelezen dat bij een extinctie tussen de 2.5 en

2.25 tussen de 9% en 17% van het totale areaal geschikt is voor vestiging (rode deel van de horizontale lijn). Dit zijn de delen van de Loosdrechtse Plassen ondieper dan 1.4 m. Bij een extinctie tussen de 2.25 en 2 loopt dit areaal op tot 27% (groen, alle delen ondieper dan 1.55m) en bij extinctiecoëfficiënten tussen 2 en 1.75 kan dit areaal oplopen tot 43% (blauw). Waterplanten zullen zich in dat geval tot 1.8 m. diepte kunnen vestigen. De diepere delen van de plas blijven te donker voor kieming van waterplanten onder invloed van licht.

Figuur 3.2 laat ook zien dat rond de 1.8-2.2m. diepte een klein verschil in extinctie een substantieel verschil in potentieel areaal geschikt voor waterplanten veroorzaakt. Het is bekend dat de Loosdrechtse plassen voor de eutrofiering in de jaren '70-'80 een helder, waterplanten gedomineerd ecosysteem was. De gevoeligheid van deze plas, door de gegeven bathymetrie maakt dat een kleine verandering in extinctie (bijv. door meer fosfaatbelasting en dus meer algen) een drastisch gevolg kan hebben gehad omdat juist bij de karakteristieke diepte (ca. 1.8 m) de gevoeligheid voor de waarde van de extinctiecoëfficiënt erg groot is.

3.2 Waterplantenontwikkeling in relatie tot waterkwaliteit

Als de waterplanten-ontwikkeling in voldoende mate op gang komt, kan dat bijdragen aan een stabiel helder watersysteem. Zodra een deel van de waterbodem bedekt is met waterplanten zal de erosie van dat deel van de waterbodem sterk afnemen (zie ook paragraaf 2.3.4). Hierdoor neemt de concentratie refractair detritus in de waterkolom op die locatie verder af en de helderheid toe. Dit is een zichzelf versterkend effect dat gekoppeld is aan de grootte van een mogelijk waterplantenveld. Er is aangenomen dat de erosie van een met waterplanten bedekte waterbodem kan worden verwaarloosd. Vervolgens zijn zwevend stof berekeningen gemaakt, waarbij de erosie van de plasbodem (buiten de putten) is gevarieerd. Dit geeft de concentratie fijn zwevend stof als een functie van het niet erodeerbaar plasoppervlak (zie ook paragraaf 2.3.4).

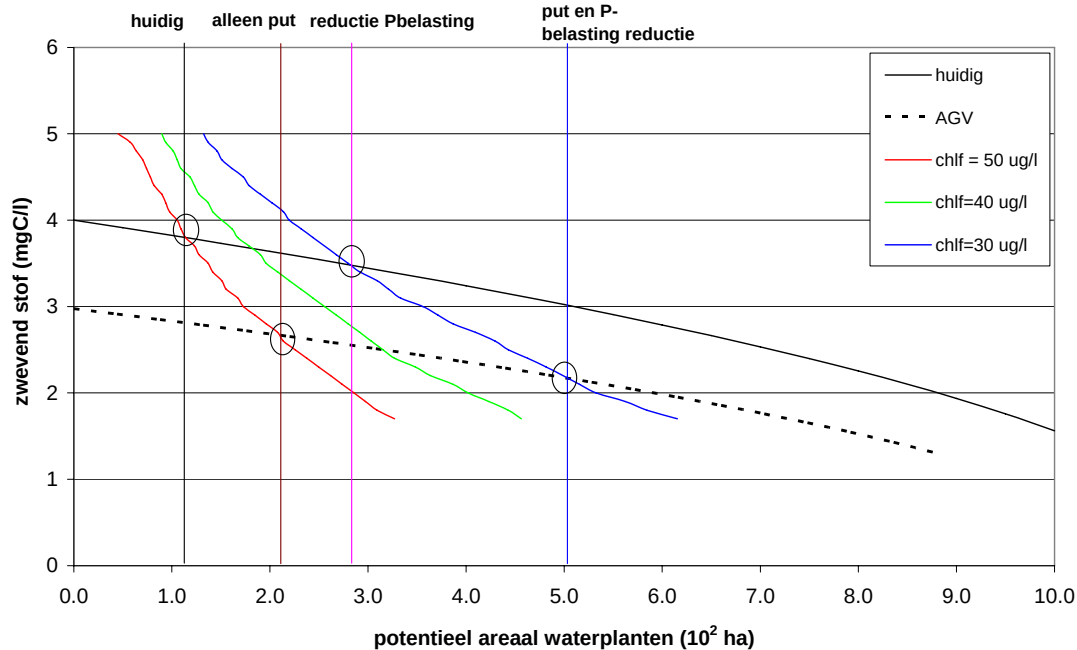
Met UITZICHT is, in combinatie met het diepteprofiel van de plassen, voor verschillende concentraties refractair detritus (en gegeven data over chlorofyl-a, actief detritus, anorganisch slib en humuszuren) berekend op welk plasoppervlak meer dan 4% licht doordringt. Dit geeft het plasoppervlak met meer dan 4% licht als functie van de concentratie fijn organisch zwevend stof. Of anders gezegd: het plasoppervlak waar plantengroei mogelijk is als functie van de concentratie refractair detritus.

In één grafiek plotten we de verbanden tussen het oppervlak waar geen erosie optreedt tegen de bijbehorende evenwichtsconcentratie refractair detritus enerzijds en de extinctie vertaald als diezelfde concentratie refractair detritus tegen het oppervlak waar voldoende licht op de bodem komt anderzijds. Hiermee ontstaat een beeld van het evenwicht tussen de zwevend stof fysica en de lichtfysica (Figuur 3.3). De lichtextinctie curves geven bij een gegeven concentratie chlorofyl (50, 40 of 30 $\mu\text{g/l}$) aan hoe refractair detritus reductie zich uit in beschikbaar areaal met voldoende licht. De 50 $\mu\text{g/l}$ geeft een geschatte gemiddelde chlorofylwaarde in de huidige voorjaarsituatie weer (gebaseerd op monitoring data van de jaren 2003-2006). Reductie van nutriëntenbelasting kan deze hoeveelheid chlorofyl verminderen, hier weergegeven met de concentraties 40 $\mu\text{g/l}$ of zelfs 30 $\mu\text{g/l}$ onder gunstige omstandigheden. De verminderde hoeveelheid chlorofyl-a heeft een positief effect op het

lichtklimaat en draagt als zodanig ook bij aan het vergroten van het potentieel areaal voor waterplantenvestiging. Een mogelijk evenwicht wordt bereikt daar waar de curves voor de concentraties refractair detritus voor een gekozen gemiddelde chlorofylwaarde en het plasoppervlak elkaar snijden. Tabel 3.2 geeft de relatie tussen de daadwerkelijke extinctie en de hoeveelheid refractair detritus bij verschillende chlorofylwaarden als uitgezet in figuur 3.3 en 3.4

Tabel 3.2 Relatie tussen concentratie refractair detritus (mgC/l) en de extinctiecoëfficiënt (m^{-1}) bij verschillende chlorofylwaarden ($\mu g/l$) berekend met UITZICHT

refractair detritus (mgC/l)	extinctie bij 50 $\mu g/l$ chl-a	extinctie bij 40 $\mu g/l$ chl-a	extinctie bij 30 $\mu g/l$ chl-a
4	2.5	2.3	2.2
3.9	2.5	2.3	2.1
3.8	2.5	2.3	2.1
3.7	2.5	2.3	2.1
3.6	2.4	2.2	2.0
3.5	2.4	2.2	2.0
3.4	2.4	2.2	2.0
3.3	2.4	2.2	2.0
3.2	2.3	2.1	1.9
3.1	2.3	2.1	1.9
3	2.3	2.1	1.9
2.9	2.2	2.1	1.9
2.8	2.2	2.0	1.8
2.7	2.2	2.0	1.8
2.6	2.2	2.0	1.8
2.5	2.1	1.9	1.8
2.4	2.1	1.9	1.7
2.3	2.1	1.9	1.7
2.2	2.1	1.9	1.7
2.1	2.0	1.8	1.6
2	2.0	1.8	1.6
1.9	2.0	1.8	1.6
1.8	2.0	1.8	1.6
1.7	1.9	1.7	1.5

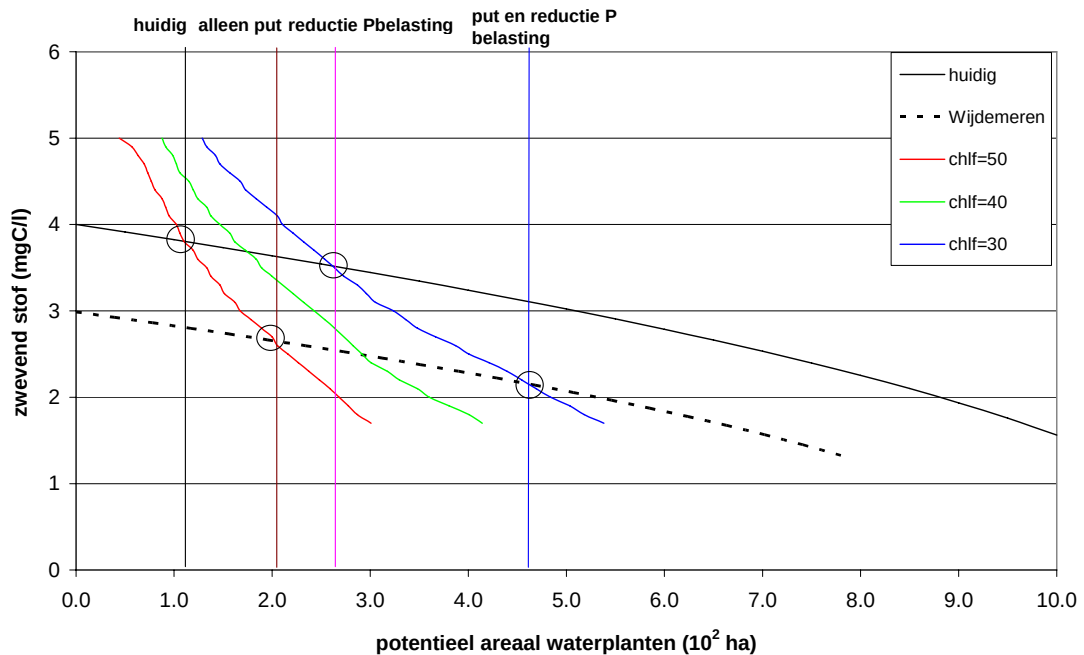


Figuur 3.3 Relatie tussen extincties uitgedrukt als een maat van concentraties refractair detritus en potentieel areaal bedekking gekoppeld aan de effecten van mogelijke maatregelen die reductie van refractair detritus of chlorofyl-a weergeven als een reductie in extinctie voor de AGV variant

Het evenwicht in de huidige situatie, d.w.z. het snijpunt tussen de zwarte getrokken lijn en de rode kromme lijn in figuur 3.3, ligt bij 111 ha potentieel areaal geschikt voor waterplantenbedekking. Dit areaal is ondieper dan 1.30 m en ligt aan de randen van de plas. We veronderstellen dat in de huidige situatie de waterplantenontwikkeling in deze gebieden nog niet goed ontwikkeld is als gevolg van additionele habitatlimitaties zoals ongeschikte bodem (te veel slib) en te grote golfwerking. Door de verdiepingen (AGV-variant) ontstaat een lichtklimaat geschikt voor een potentieel areaal waterplantenbedekking van 210 ha. Door fosfaat-reducerende maatregelen te nemen die leiden tot een vermindering van 50 $\mu\text{g chl/l}$ tot 30 $\mu\text{g chl/l}$ wordt het potentieel areaal bedekking 282 ha. De combinatie van beide maatregelen levert de grootste kans op een voldoende groot potentieel geschikt areaal voor waterplanten op van 502 ha. Er is geen verdere inschatting gemaakt wat de benodigde inspanningen zijn om de benodigde fosfaatreductie te realiseren, noch om de daadwerkelijke respons van de algenpopulatie op veranderingen in nutriëntenbelasting in detail in beeld te brengen. We raden aan om met behulp van gedetailleerdere analyses de algendynamiek in Loosdrechtse Plassen in beeld te brengen bij veranderingen in refractair detritus concentraties, zoals ook is gedaan in Los et al (1997).

De genoemde waarden uit Figuur 3.3 zijn vanzelfsprekend niet exact maar geven aan dat zowel de verdiepingen als verdergaande fosfaat-reducerende maatregelen essentieel zijn om ruimte te geven aan het creëren van voldoende mogelijkheden voor een substantiële bedekking met waterplanten. Belangrijke delen van de plassen zullen nog steeds onbegroeid blijven als gevolg van de resttroebelheid die blijft o.a. door de netto productie van algen, veenafslag, mineralisatie en verversing dat sedimenteert door en na vlokvorming bij een zekere concentratie aan zwevend stof.

In de Wijdmeren variant is eenzelfde patroon te zien als bij de AGV variant (figuur 3.4). Door de verschillen in areaal met een diepte rond de 2 m. diep is het uiteindelijke areaal dat potentieel geschikt is voor waterplantenbedekking echter kleiner dan in de AGV variant. Bij de gecombineerde uitvoering van verdieping en fosfaatreductie verschilt dit oppervlak zo'n 42 ha. De onnauwkeurigheden die ten grondslag liggen aan de vertaling van bathymetrie data naar de hypsometrie (oppervlakte-diepteverdeling) zijn van invloed op de exacte waarde van dit getal, omdat de hypsometrie per stap van 10 cm diepte is gegeven en interpolatie daarvan noodzakelijk is om tot de extinctielijnen in figuur 3.3. en 3.4 te komen. In tabel 3.3 is een overzicht gegeven van de hectares potentieel beschikbaar areaal voor de verschillende varianten en de bijbehorende extincties.



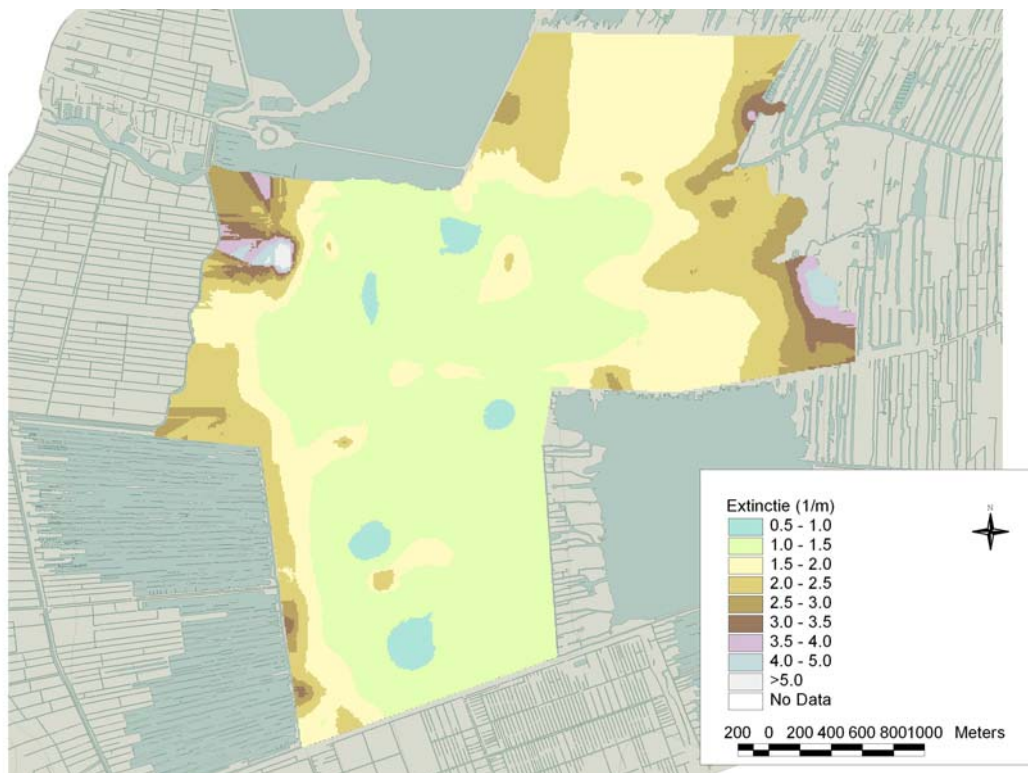
Figuur 3.4 Relatie tussen extincties uitgedrukt als een maat van concentraties refractair detritus en potentieel areaal bedekking gekoppeld aan de effecten van mogelijke maatregelen die reductie van refractair detritus of chlorofyl-a weergeven als een reductie in extinctie voor de Wijdmeren variant

Tabel 3.3 Overzicht van de hectares potentieel beschikbaar areaal voor waterplanten en de extinctie voor de verschillende varianten

	huidig	alleen P reductie	AGV	WM	AGV + P reductie	WM + P reductie
potentieel areaal waterplanten (ha)	111	282	210	205	502	460
evenwichtsconcentratie fijn zwevend stof (mgC/l)	3.8	3.5	2.7	2.7	2.2	2.2
extinctie coëfficiënt (m^{-1})	2.5	2.0	2.2	2.2	1.6	1.6
max. diepte voor vestiging (m)	1.3	1.6	1.5	1.5	2.0	2.0

3.3 Locaties voor mogelijk herstel plantengroei

Figuur 3.5 laat zien tot welke waarde de extinctie moet worden verlaagd om op een plaats 4 % licht op de bodem te krijgen (Jaarsma en Penning, 2007). Dit plaatje laat zien dat de west- en ooststrand van het gebied bij een verlaging van de extinctie als eerste voldoende goed lichtklimaat hebben voor mogelijke waterplantenvestiging. Golfslag (met name aan de oostkant) en een ongeschikt bodemtype (met name aan de westkant, waar veel slib ligt) kunnen de daadwerkelijke vestiging van waterplanten bemoeilijken en het daadwerkelijke areaal van vestiging sterk verkleinen ten opzichte van het areaal dat nu genoemd wordt gebaseerd op de lichtklimaat analyses. Ook mogelijke effecten als de aan/afwezigheid van een zaadbank en potentiële begrazing door vogels kunnen een rol spelen bij de uiteindelijke waterplantenbedekking. De mogelijke afwezigheid van een zaadbank in de bovenste laag van de bodem (door bedekking met slib) kan mogelijk vanuit onder andere het aangrenzende, waterplantrijke Ster-gebied (oostelijk deel) worden aangevuld.



Figuur 3.5 Ruimtelijk overzicht van extinctiewaardes waarbij 4% van het licht de bodem bereikt

3.4 Berekeningswijze UITZICHT

Deze paragraaf is bedoeld als verdiepende registratie van de werkwijze met betrekking tot de berekening van het lichtklimaat met de module UITZICHT. Een uitgebreide beschrijving van UITZICHT en de gebruikte coëfficiënten is beschikbaar in (Buiteveld 1990) en ook in Los et al (1997) waar UITZICHT specifiek voor de Loosdrechtse Plassen is gebruikt.

Lichtklimaatberekeningen zijn uitgevoerd met behulp van de module UITZICHT binnen de waterkwaliteitsprocessenbibliotheek DELWAQ. Gebruikmakend van gegevens over de concentraties Chl-a, Detritus, anorganisch zwevend stof en humuszuren als invoer, geeft het model als uitvoer de totale extinctie, de extinctiecoëfficiënt voor de individuele factoren en drie manieren om de totale extinctie om te rekenen naar Secchi-diepte (via de zogeheten Buiteveld, Pool-Atkins en Preisendorf methoden). Omdat de omrekening naar Secchi-diepte afhankelijk is van een arbitraire keuze van omrekeningsmethode zal verder niet naar Secchi-diepte als zodanig worden gerefereerd en zullen we ons richten op de extinctie zelf.

Chlorofyl-bijdrage

Voor de berekening van de bijdrage aan totale extinctie door algen wordt de hoeveelheid gemeten chlorofyl omgerekend naar een biomassa alg die via de module BLOOM (Los et al., 1991) een specifieke extinctie van algen teruggeeft aan de UITZICHT module voor verdere verwerking. De specifieke extinctie van de alg is afhankelijk van het soort alg. Voor Loosdrechtse Plassen maken we gebruik van een nutriëntgelimiteerde blauwalg die karakteristiek wordt verondersteld voor Loosdrechtse Plassen (*Prochlorothrix hollandica*) met een specifieke extinctiecoëfficiënt van $0.28 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$. Deze coëfficiënt ligt in de buurt van mogelijke andere soorten die een voorjaarsdominantie kunnen hebben zoals lichtgelimiteerde diatomeeën of lichtgelimiteerde groenalgen. De range van specifieke coëfficiënten voor verschillende algensoorten ligt tussen de 0.18 (nutriëntgelimiteerde groenalgen en diatomeeën) en $0.4 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ voor lichtgelimiteerde blauwalgen.

Humuszuren-bijdrage

Humuszuren zijn opgegeven als een gemiddelde van de beschikbare metingen voor extinctie bij 380 nm in 2004 (2.88 m^{-1}). Dit betreft alleen de extinctie bij deze specifieke golflengte en is dus niet vergelijkbaar met de totale extinctie van PAR.

Anorganisch materiaal

Er is een inschatting gemaakt van de hoeveelheid anorganisch zwevend stof omdat gemeten asgewichten niet zijn bepaald in Loosdrechtse Plassen. Hierbij is aangenomen dat 1% van het totale zwevend stof (uit de monitoringsdata) van anorganische oorsprong is. De redenering hiervoor is dat in Loosdrechtse Plassen een klein deel van het gebied een grove zandbodem heeft en kleibodem afwezig is. De mogelijke opwerveling van de (fijnste) zandfractie gebeurt alleen onder invloed van sterke stroming en golven, die niet vaak optreedt. Omdat we uitgaan van een evenwichtssituatie verwaarlozen we dan ook deze hoeveelheid. In de berekening is daarom een waarde van 0.2 mg/l anorganisch materiaal opgenomen.

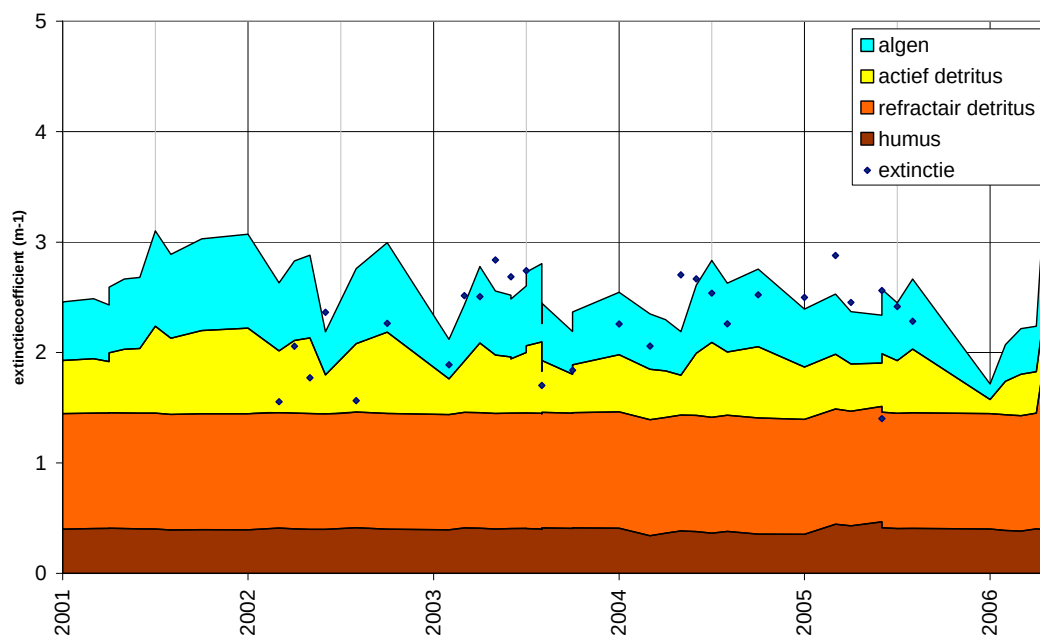
Organisch zwevend stof - detritus

Organisch zwevend stof of detritus bestaat voor een deel uit dood algenmateriaal dat snel afbreekbaar is en waarvan de nutriënten op seizoensbasis meerdere keren kunnen worden opgenomen door de algen (**actief detritus**) en voor een deel uit **refractair detritus** (langzaam afbreekbaar organisch materiaal dat constant aanwezig is). Detritus is niet als directe meetwaarde beschikbaar en wordt daarom bepaald via omrekening van chlorofyl en gerelateerd aan de hoeveelheid gemeten totaal zwevend stof. Gemeten zwevend stof bestaat uit alle zwevend stof deeltjes in de waterkolom: algen, actief detritus, refractair detritus en anorganisch zwevend stof. De omrekening is mede gebaseerd op de ervaringen uit de studie uit 1997 (Los et al.). Om goede omrekeningsfactoren te bepalen is gebruikt gemaakt van calibratie op de extinctiewaarden die met deze meetwaarden werden verkregen in de

UITZICHT berekeningen. Er is gekozen voor calibratie op extinctie waarden omdat het doel van de UITZICHT berekening is een goede reproductie te geven van het te verwachten lichtklimaat bij de aanleg van de verdiepingen.

In de jaren tachtig is in het WOL-onderzoek gemeten aan de hoeveelheid organisch koolstof in het zwevende materiaal. Uit die metingen bleek dat op ieder moment een concentratie van 5 mgC/l refractair detritus aanwezig was (Gons en Van Keulen, 1989, en Los et al., 1997). In de recente jaren zijn geen data van koolstof meer beschikbaar. Rekenend met de waarde van 5 mgC/l wordt de extinctie in recente jaren overschat. Berekeningen op basis van 4 mgC/l reproduceren de extinctiedata beter (figuur 3.6). Hierbij is gebruik gemaakt van coëfficiënten in de UITZICHT module specifiek voor Loosdrecht welke in de jaren negentig zijn bepaald voor veenplassen (Los et al, 1997). Met deze coëfficiënten (tabel 3.2) is UITZICHT toegepast op beschikbare meetgegevens voor Loosdrechtse Plassen uit de periode 2001 – 2007 (figuur 3.6).

Samenvattend is de fractie actief detritus gelijk gesteld aan de hoeveelheid biomassa alg (chlorofyl*0.035) per monster. De hoeveelheid refractair detritus is gelijk gesteld aan 4 mgC/l.



Figuur 3.6 Gemeten extinctie in de jaren 2001 tot en met 2006 gerelateerd aan de berekende extinctiewaarden, met refractair detritus op 4 mgC/l

Tabel 3.4 Gebruikte coëfficiënten UITZICHT berekening

Waarde	Omschrijving
0.2	Z1 (diepte) [m]
0.5	Z2 (diepte) [m]
1.6	CORa correctie faktor [-]
0.10	C3 koef. absorptie gloeirest + detritus [-]
0.32	C1 koef. bundelverzwakking gloeirest + detritus
1.132	C2 koef. bundelverzwakking gloeirest + detritus
0.014	Hel_h konstant voor spektrum [nm-1]
8.14	Tau konstante berekenig zichtdiepte [-]
30	UitZangle: instalingshoek
13	SpecStat
0.28	ExtVLA1g01 – extinctie BLOOMalg 1
2.50	Konversie factor detr C -> detr Droog gewicht [m]

3.5 Gevoeligheden analyse

De vertaling van fijn zwevend stof naar lichtklimaat en potentieel areaal geschikt voor waterplantenontwikkeling is gebaseerd op een aantal vuistregels en aannames. In deze paragraaf brengen we deze in meer detail in beeld en leggen we de link naar andere ecosysteemprocessen die mogelijk een rol spelen bij de vorming van het uiteindelijke aquatische ecosysteem in de Loosdrechtse Plassen.

Internationale literatuur geeft een grote spreiding aan in het waargenomen percentage licht dat de bodem bereikt gerelateerd aan de maximale diepte van voorkomen van waterplanten. Hierbij worden ook percentages van 20%-30% genoemd als noodzaak voor vestigen afhankelijk van de soortsgroep (Penning et al, 2006). Wanneer waterplanten gevestigd zijn, kunnen zij lokaal het lichtklimaat positief beïnvloeden en zo hun eigen habitat verbeteren. Ook kan het percentage benodigd licht kleiner worden doordat dan voor de voorjaarsontwikkeling gedeeltelijk gebruik kan worden gemaakt van reserves uit wortelstelsels (o.a. waterlelies, schedefonteinkruid, riet).

In deze analyse is alleen gekeken naar de basale fysische processen die een rol spelen bij het bepalen van het uiteindelijke lichtklimaat in de plas: sedimentatie/erosie van zwevend stof onder invloed van hydrodynamische processen. De bijdrage aan extinctie door chlorofyl concentratie is echter gerelateerd aan de hoeveelheid fosfaatbelasting in het gebied. Dit is nu meegenomen in het effect van chlorofyl op de uitdoving van licht door de concentratie chlorofyl direct te verminderen zonder verdere inzicht te hebben in algendynamiek onder veranderende zwevend stof niveaus. Het verdient aanbeveling hier een uitgebreidere analyse voor te maken gekoppeld aan de water- en stoffenbalans van de Loosdrechtse Plassen om zo de seizoensmatige wisselingen beter in beeld te krijgen, vergelijkbaar met de aanpak in (Los et al 1997).

Ook hogere trofische niveaus kunnen een belangrijke invloed op de extinctie hebben. Zooplankton beïnvloedt de hoeveelheid chlorofyl door graas en het fourageergedrag van de dominante groepen vis heeft effect op onder andere de interne nutriëntenkringloop in het water. Er zijn verschillende terugkoppingsmechanismen die uiteindelijk kunnen leiden tot

het ontstaan van een helder of troebel systeem bij verschillende nutriëntenconcentraties (Scheffer, 1998). Er wordt in dit kader gesproken over ‘alternatieve evenwichten’ geldend bij gelijkwaardige abiotische randvoorwaarden, veelal uitgedrukt in de concentratie nutriënten in het water. Door ingrepen in de vispopulatie (reductie benthivore vis via Actief Biologisch Beheer) kunnen interne nutriëntencycli sterk veranderen en leiden tot het omklappen van een systeem (Meijer, 2000). De huidige analyse heeft geen rekening gehouden met deze interacties met hogere trofische niveaus in het voedselweb. De onzekerheden die ten grondslag liggen aan de uitwerking van deze processen op de uiteindelijke helderheid van het water zijn dusdanig groot dat zij niet direct gekoppeld kunnen worden aan de gekwantificeerde detailbepalingen die in dit rapport zijn beschreven. Wel kan worden aangegeven dat een additionele ingreep in het voedselweb het proces tot helder worden in sommige situaties kan versnellen.

We geven in dit rapport aan dat op grond van de fysica een reductie in zwevend stof ten alle tijden zal optreden bij aanleg van de verdiepingen en dat deze reductie tot een verminderde uitdoving van licht door zwevend stof leidt, wat op zijn beurt tot een verbetering van het algehele lichtklimaat zal leiden, mits de algenconcentraties niet stijgen. Door deze maatregel van de aanleg van verdiepingen te koppelen aan verdergaande reductie van de fosfaatbelasting op de plas zal naar verwachting ook de concentratie chlorofyl worden teruggedrongen waardoor de verbetering van het lichtklimaat verder wordt bevorderd. Het gezamenlijk uitvoeren van deze maatregelen levert naar alle waarschijnlijkheid een hogere kans op helder water dan het uitvoeren van slechts één van deze maatregelen apart.

3.6 Samenvattende conclusie lichtklimaat

- De aanleg van de verdiepingen draagt bij aan een beter lichtklimaat doordat de hoeveelheid refractair detritus wordt gereduceerd. In geval van de verdieping gaat de refractair detritus van 4 mgC/l naar 3.0 mgC/l, wat overeenkomt met een verandering in extinctiecoëfficiënt van 2.5 m⁻¹ naar 2.3 m⁻¹ bij gelijkblijvende chlorofyl concentratie (50 µg/l als gemiddelde voorjaarsconcentratie)
- Hierdoor neemt het areaal dat potentieel geschikt is voor vestiging van waterplanten toe van 111 ha naar 210 ha.
- Omdat de extinctie van licht niet alleen door zwevend stof, maar ook door algenbiomassa en humuszuren wordt beïnvloedt, verdient het aanbeveling ook een reductie van algenbiomassa na te streven. Bij een reductie van chlorofyl-a van 50 µg/l naar 30 µg/l gaat de extinctie van 2.5 m⁻¹ naar 2.0 m⁻¹. Hierdoor neemt het areaal dat potentieel geschikt is voor vestiging van waterplanten toe van 111 ha naar 282 ha.
- De gecombineerde effecten van reductie in zowel refractair detritus als chlorofyl zullen een groter effect hebben dan de losse maatregel. Het gecombineerde effect geeft een reductie van extinctie van 2.5 m⁻¹ naar 1.6 m⁻¹. Bij een extinctie van 1.6 m⁻¹ ontvangt al het areaal ondieper dan 1.9 m voldoende licht voor potentiële vestiging van waterplanten. Dit areaal is in variant van AGV verdiepingen 502 ha en voor de variant Wijdemeren 460 ha.

4 De samenstelling van de totale balans zwevend stof

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk presenteren we de volledige uitwerking van de balans van fijn zwevend stof in de Loosdrechtse Plassen. Figuur 4.1 en 4.2 aan het eind van dit hoofdstuk tonen de resultaten en de belangrijkste invloedsfactoren op de uitkomsten van de gemiddelde concentratie kleine zwevende deeltjes. Voor 120 ha putoppervlak en 12m diepere putten (14m waterdiepte) is de nieuwe concentratie 3.0 mg/l en voor 220 ha en 6 meter diepere putten bedraagt deze ook 3.0 mg/l uitgaande van 4 mgC/l in de huidige situatie. De belangrijkste invloedsfactor is die door de verhoogde erosie van de oorspronkelijke bodem buiten de putten als gevolg van de stroomaantrekkende werking van de diepe putten. Eenvoudig gesteld neemt de oorspronkelijke bodem de schuifkracht over die heerste ter plaatse van de putten. Vergroten en verdiepen van de putten leidt tot geringere concentratie zwevende deeltjes. Met andere woorden niet alleen het putoppervlak speelt een rol maar ook het putvolume, of bij gelijk putoppervlak, de putdiepte.

De gevoeligheid van de concentratie zwevend stof voor het putvolume komt door de totale, volume-geïntegreerde, massa zwevend stof dat tot vlokken kan worden gevormd in verhouding tot het bodemoppervlak dat wordt geërodeerd. Dit hoofdstuk bespreekt deze invloeden.

In dit rapport spreken we over zwevend stof en niet over slib. Het onderscheid is dat slib betrekking heeft op anorganische deeltjes en hun eigenschappen, terwijl de gesuspendeerde deeltjes in de waterkolom van de Loosdrechtse Plassen vnl. uit organische materiaal zoals detritus blijkt te bestaan en voor een beperkt deel uit anorganisch materiaal.

Verder beperken we ons tot de balans van dat deel van gesuspendeerd zwevend stof dat het doorzicht beperkt en de lichtextinctie vergroot. Deze deeltjes hebben afmetingen van 1-10 μm . We sluiten niet uit dat er grotere deeltjes in de Loosdrechtse Plassen in suspensie kunnen zijn, maar in dermate geringe concentratie dat deze niet noemenswaardig het lichtklimaat in de Loosdrechtse Plassen bepalen.

In de volgende paragrafen wordt de totale balans van de massa van zwevende deeltjes in kaart gebracht. Hoewel de formules en getallen een wiskundige nauwkeurigheid suggereren wijzen we op hun getalsmatige onzekerheid maar wél op de globale maar correcte evenredigheidsrelaties, gebaseerd op fysica en chemie. Het zijn vooral deze laatste zekerheden die, door gebruik te maken van kennis over de huidige situatie van de plassen, een schatting opleveren voor de verdiepte situatie. Een veronderstelling daarbij is dat de plassen in de huidige situatie in evenwicht zijn d.w.z. de jaargemiddelde concentratie zwevend stof wijzigt weinig in de loop der jaren. Dit is een uiterst moeilijk toetsbaar uitgangspunt omdat het kleine veranderingen over lange perioden betreft van een moeilijk meetbaar want plasgemiddelde grootheid.

4.2 Flocculatie en bruto sedimentatieflux

In de Loosdrechtse Plassen (LP) wordt het doorzicht voornamelijk bepaald door kleine deeltjes van enkele μm groot met valsnelheden van ca. 10 cm/dag. Deze deeltjes zijn met name de slecht afbreekbare restanten van dode cellen (detritus) van algen en van afgeslagen veen. Deze deeltjes worden in de zeer zachte toplaag van de Loosdrechtse Plassen bodem aangetroffen ondanks dat hun uiterst geringe valsnelheid verre van voldoende is om zelfs in het milde turbulentieklimaat van de Loosdrechtse Plassen te kunnen bezinken. Zoals al eerder vermoed (Los et al., 1997) kunnen deze kleine deeltjes de bodem bereiken na flocculatie waardoor ze sneller bezinken dan turbulentie de deeltjes opwaarts mengt. Inmiddels hebben we gemeten dat deze deeltjes kunnen flocculeren. De theorie hierover geeft voor de massaflux waarmee vlokken worden gevormd:

$$\dot{M}_{\text{vlok}} = \frac{C_{\text{zwevend}}}{T_{\text{vlok}}} \quad (4.1)$$

In (4.1) is $\dot{M}_{\text{vlok}}$ de massaflux, per eenheid van watervolume, van de vlokvorming van zwevend stof concentratie C_{zwevend} en T_{vlok} de flocculatietijd. De onderliggende theorie (van Leussen, 1994) leidt tot de volgende evenredigheidsrelatie voor de flocculatietijd:

$$T_{\text{vlok}}^{-1} \propto \alpha \phi G \quad [s^{-1}] \quad ; \quad \phi = \frac{C_{\text{zwevend}}}{\rho_{\text{det}}} \quad (4.2^a)$$

In (4.2^a) is α de flocculatie-efficiëntie die uitdrukt welke fractie van de deeltjesbotsingen werkelijk tot vlokken leidt. Deze α is dus gerelateerd aan de flocculatie-bereidheid van de detritus en veendeeltjes. De gemeten zeta-potentiaal toont een, weliswaar geringe, flocculatie-bereidheid van anorganisch materiaal, mogelijk dat bacteriën het kleven van organisch materiaal bevorderen. Uit analyses van onze centrifuge experimenten volgt dat α ca. 0.1 bedraagt wat een aannemelijke waarde blijkt te zijn (Van Leussen, 1994).

Uit (4.2^a) blijkt dat de flocculatiesnelheid T_{vlok}^{-1} evenredig is met de deeltjesconcentratie (ρ_{det} is de soortelijke dichtheid), des te meer deeltjes des te groter de kans op botsen en vlokvorming. Verder komt in (4.2^a) de botsingsterm G voor. In stagnant water wordt G vnl. bepaald door verschillende valsnelheden (differentieel bezinken) waardoor deeltjes elkaar ontmoeten, zoals in een centrifuge experiment, en in turbulent water door chaotische paden. Voor beide processen geeft de theorie (Saffman & Turner, 1956):

$$G_{\text{dif}} = \frac{\pi \Delta w_s}{d} \quad ; \quad G_{\text{tur}} = \sqrt{\frac{8\pi}{15} \frac{\varepsilon}{\nu}} \quad (4.2^b)$$

Hierin is ε de energiedissipatie van turbulentie (Watt kg^{-1} of $\text{m}^2 \text{s}^{-3}$) en ν de kinematische viscositeit ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). Met een valsnelheidsvariatie Δw_s van 0.1m/dag tussen de deeltjes onderling en deeltjesdiameter d van 3 μm volgt $G_{\text{dif}} = 1 \text{s}^{-1}$ door differentieel bezinken (centrifuge proef) en in de Loosdrechtse Plassen blijkt $G_{\text{tur}} \leq 1 \text{s}^{-1}$ in het merendeel van de waterkolom te zijn. Zodoende is de snelheid van vlokvorming in de centrifuge proeven, na reductie voor de verhoogde zwaartekracht op Δw_s , direct te vertalen naar de Loosdrechtse

Plassen. Uit stromingsanalyse blijkt dat in het merendeel van de waterkolom het turbulentieklimate dermate mild is dat de vlokken niet opbreken. Echter direct boven de ondiepe bodem wordt een deel van de vlokken vnl. door golfwerking opgebroken waarna de resulterende fijnere deeltjes weer opwervelen. Dit is een intense cyclus van sedimentatie en erosie waarvan we schatten dat slechts 10% netto sedimenteert.

We concluderen dat uit het zwevende stof vlokken ontstaan én dat de gevormde vlokken voldoende groot kunnen worden om sneller te bezinken dan turbulentie ze opwaarts mengt én dat vlokken alleen juist boven de bodem worden opgebroken. Dit houdt tevens in dat de bruto sedimentatieflux gelijk gesteld mag worden aan de massaflux van vlokvorming. Dit is is de belangrijkste conclusie in onze analyse. Deze conclusie legt een onderbouwd causaal verband onder de waarneming dat detritus in de bodem wordt gevonden volgens de koolstof-stikstof analyses (Medusa, 2007) van de toplaag van de bodem.

Voor de zwevend stofbalans definiëren we de flocculatieparameter

$$\tau_{vlok} = c_{zwevend} T_{vlok} \quad (4.3)$$

die zodoende onafhankelijk van de concentratie zwevend stof is geworden (zie 4.2). Met (4.3) wordt de totale bruto sedimentatieflux in de huidige situatie:

$$V_{LP} \dot{M}_{vlok} = \frac{V_{LP}}{\tau_{vlok,0}} c_0^2 \quad [kg \, s^{-1}] \quad (4.4)$$

In (4.4) is V_{LP} het oorspronkelijke volume van de Loosdrechtse Plassen en c_0 de concentratie van zwevend stof die we op basis van hoofdstuk 4 op 4 mgC/l stellen. Het plasvolume bedraagt 17.7 Mm³ zodat er ca. 71 tonC zwevend stof is. Uit de vertaling van de centrifuge-proeven naar de Loosdrechtse Plassen volgt dat de flocculatietijd T_{vlok} ca. 20 dagen bedraagt. Hieruit volgt met (4.1) dat de sedimentatieflux ca. 1305 tonC/jaar. Tenslotte, de flocculatieparameter $\tau_{vlok,0}$ in (4.4) heeft het label “0” gekregen om eventueel een verschil in b.v. flocculatie-efficiëntie (α , zie (4.2)) zichtbaar te maken. Deze schatting leidt tot de volgende conclusies.

De grote sedimentatieflux van 1305 tonC/jaar overstijgt met een orde-grootte alle overige deeltjes- producerende of –eliminerende bronnen en putten in de slibbalans met de productie door algen (+120 tonC/jaar) en door veenafslag (+180 tonC/jaar) maar met verwijdering door verversing (-113 tonC/jaar) en afbraak door mineralisatie (-26 tonC/jaar). Ten tweede, aannemende dat jaargemiddeld het zwevend stofgehalte in de waterkolom van de Loosdrechtse Plassen constant blijft, moet de grote sedimentatieflux worden gecompenseerd met een bijna even grote erosieflux. Dit past goed in het beeld van de 1.8m (on)diepe Loosdrechtse Plassen waarin golven en stroming de bodem vaak kunnen eroderen. Voor de erosieflux leiden we af uit de balans ca. 1144 tonC/jaar (figuur 2.11). Bij een concentratie van ca. 42 gC/l van de bovenste bodemlaag betekent deze netto depositie van 161 tonC/jaar een bodemstijging van 0.4 mm/jaar, zonder consolidatie.

Voor de verdiepte situatie wordt (4.4) gewijzigd met het bijkomende putvolume V_{put} en met de gewijzigde concentratie c_1 en een eventueel gewijzigde flocculatie-efficiëntie:

$$(V_{LP} + V_{put}) \dot{M}_{vlok} = \frac{V_{LP} + V_{put}}{\tau_{vlok,1}} c_1^2 \quad [kg \, s^{-1}] \quad (4.5)$$

Direct introduceert (4.5) twee tegengestelde effecten. Enerzijds neemt de sedimentatieflux (in tonC/jaar) kwadratisch af met de gewenste verlaging in concentratie. Anderzijds neemt de sedimentatieflux toe doordat een groter (put)volume beschikbaar komt. In nieuw evenwicht na aanleg van putten blijkt (4.5), nog steeds veel groter dan de overige bronnen en putten, vnl. in balans met de erosieflux. Deze erosieflux kan door de verdieping worden gewijzigd en dit is het onderwerp van de volgende paragraaf.

We wijzen erop dat voorgaande schattingen weliswaar de basis voor de balans van zwevend stof vormen maar veeleer de getoonde evenredigheid met diverse invloedsfactoren wordt gebruikt in een vergelijking tussen de huidige en nieuwe situatie. Het belang van de geschatte getallen wordt in een gevoeligheidsonderzoek onderzocht, zoals met Figuur 4.1 en 4.2.

4.3 De erosieflux

We definiëren de plaats- en tijdsafhankelijke specifieke erosieflux als E in $[kgC.m^{-2}.s^{-1}]$ en integreren deze over het bodemoppervlak A_{LP} van ca. 1000 ha van de oorspronkelijke Loosrechtse Plassen. De oppervlakte-integratie noteren we symbolisch als:

$$\eta_0 \overline{E A_{LP}}^0 \quad (4.6)$$

waar superscript “0” duidt op de huidige onverdiepte situatie. In (4.6) introduceren we η als de fractie van de plasbodem die niet erodeert door niet aan stroming gerelateerde eigenschappen zoals door bedekking met zand of vegetatie. Voor stroming gerelateerde veranderingen in erosie zullen we nl. het rendement χ noteren.

We zullen (4.6) ook erosieflux noemen en deze is geïntegreerd over de plasbodem. Op basis van evenwicht zal $\eta_0 \overline{E A_{LP}}^0$ worden uitgedrukt in de overige bronnen en putten. Dit is een calibratie van wat *de facto* de belangrijkste bron van zwevend stof is.

Voor de situatie met putten splitsen we (4.6) op in een integratie over de putbodem met oppervlak A_{put} en over de oorspronkelijke bodem buiten de putten. We noteren voorgaand als volgt:

$$\overline{E A_{LP}}^1 \equiv \eta_1 \overline{E (A_{LP} - A_{put})}^1 + \overline{E A_{put}}^1 \quad (4.7)$$

waar superscript “1” duidt op de nieuwe, verdiepte situatie.

In het vervolg zullen we aannemen dat de erosieflux vanuit de putbodem verwaarloosbaar is. Deze veronderstelling is alleen juist als de putten (diepte h_{put}) voldoende diep zijn zodat vooral golven de bodem niet opwoelen. We noteren dus:

$$\overline{E A_{put}}^{-1} = 0 \quad \text{mits } h_{put} \geq 4m \quad (4.8)$$

Verder kunnen we schatten dat met redelijke hellingshoek van de putwanden naar de oorspronkelijke plasbodem de eventueel vloeibaar gemaakte fluffy bodem niet tegen deze helling kan worden opgestuwd.

Echter, buiten de putten kan de erosie toenemen door de stroomaantrekkende werking van de putten. Met andere woorden: de erosie geïntegreerd over het oppervlak buiten de putten kan groter zijn dan de verhouding tussen gereduceerd oppervlak en oorspronkelijk plasoppervlak. Deze overwegingen in combinatie met (4.8) leiden tot de uitdrukking:

$$\overline{E A_{LP}}^{-1} = \eta_1 \overline{E (A_{LP} - A_{put})}^{-1} = \frac{\eta_1}{\eta_0} \chi_{1,0} \left\{ \eta_0 \overline{E A_{LP}}^{-0} \right\} \left(1 - \frac{A_{put}}{A_{LP}} \right) \quad (4.9)$$

waarbij $\chi_{1,0}$ de toename in erosie is door de stroomaantrekkende invloed van de putten en de dientengevolge verhoogde erosieflux. Vanwege de calibratie van de term tussen accolades tegen de huidige situatie zien we in (4.9) de verhouding tussen fracties van niet-erodeerbare oppervlakken buiten de putten en in de huidige situatie.

Enerzijds bevat (4.9) een reductie van de totale erosieflux door de verkleining van plasbodem buiten de putten met het putoppervlak A_{put} . Anderzijds is er de versterking van erosie buiten de putten door de stroomaantrekkende werking van de putten. Voor kleine putoppervlakken t.o.v. plasoppervlak kan betoogd worden dat de totale schuifkracht op de bodem volgende uit het verhang door de wind nu door de bodem buiten de diepe putten wordt opgenomen zodat een schatting voor $\chi_{1,0}$ luidt:

$$\chi_{1,0} \approx 1 + \frac{A_{put}}{A_{LP}} \quad ; \quad \frac{A_{put}}{A_{LP}} \ll 1 \quad (4.10)$$

Deze benadering is beperkt voor kleine verhouding putoppervlak/plasoppervlak, voor grote verhoudingen is het ondiepe gedeelte niet meer bepalend voor het door de wind opgestuwde verhang.

Overigens, de uitdrukking (4.9) biedt de mogelijkheid het afdekken van een deel van de plasbodem als middel tegen erosie te beschouwen. Als buiten de putten 25% van de plasbodem wordt afgedekt met zand en niet meer erodeert zal η_1 ca. 0.75 bedragen hoewel de oorspronkelijke erosie ter plaatse van de afdekking moet worden gewogen: afdekken op locaties waar geen erosie optreedt heeft nl. geen invloed op η_1 .

Combineren van (4.10) met (4.9), zonder b.v. afdekken met zand, geeft een kwadratische relatie:

$$\overline{E (A_{LP} - A_{put})}^{-1} \approx \overline{E A_{LP}}^{-0} \left\{ 1 - \left(\frac{A_{put}}{A_{LP}} \right)^2 \right\} \quad (4.11)$$

waardoor een reductie met 12 of 22 % (120 ha of 220 ha put) erodeerbaar oppervlak slechts leidt tot een afname van de erosie met respectievelijk 1.5 en 11% afneemt.

We wijzen erop dat voorgaande schattingen weliswaar de basis voor de balans van zwevend stof vormen maar veeleer de getoonde evenredigheid met diverse invloedsfactoren wordt gebruikt in een vergelijking tussen de huidige en nieuwe situatie. Het belang van de geschatte getallen wordt in een gevoeligheidsonderzoek onderzocht, zoals met Figuur 4.1 en 4.2.

4.4 Depositie in de put

Door het elimineren van de erosie over het putoppervlak, zie (4.8), zal daar louter sedimentatie optreden en wat er sedimenteert zal niet als een sporadisch opgewoelde fluffy laag tegen de puthelling op de put kunnen verlaten. Als er in de zomer een temperatuurspronglaag ontstaat boven de put zal zwevend stof in de waterlaag onder de temperatuurspronglaag (hypolimnion) sedimenteren. Dit gebeurt ruwweg in de periode mei/juni tot oktober (4-5 maanden), buiten deze periode is er geen significante temperatuurspronglaag. Zwevend stof dat eenmaal door flocculatie uit de waterlaag boven de temperatuursprong (epilimnion) in het hypolimnion komt zal daar ook sedimenteren. Buiten de periode van temperatuurstratificatie communiceert het gehele putvolume met het resterende plasvolume. Gezien de stroom- en bezinksnelheden is er een kans A_{put} / A_{LP} dat zwevend stof dat boven de plasdiepte (2m) begint met flocculeren in de put sedimenteert.

Voor zowel de periode van temperatuurstratificatie als daar buiten stellen we dat zwevend stof in de fractie A_{put} / A_{LP} van het oorspronkelijk plasvolume dat boven de put ligt in de put zal sedimenteren en er in zal blijven zodat de depositie in de put wordt geschat op:

$$Dep_{put} = \frac{A_{put}}{A_{LP}} \frac{V_{LP}}{\tau_{vlok,1}} c_1^2 \quad [kg \ s^{-1}] \quad (4.12)$$

Deze schatting voor de depositie in de put zal niet in de slibbalans voorkomen: de totale sedimentatie (4.5) blijft in de slibbalans terwijl de erosie volgens (4.8) en (4.9) is aangepast. Wel kunnen we achteraf controleren of de verhoogde netto depositie met de schatting (4.12) overeenkomt wat eerder een controle op de formule is dan een bewijs van de werking van de slibbalans. De depositie in de put wordt voor de AGV variant geschat op 175 tonC/jaar en voor de Wijde Meren variant op 280 tonC/jaar.

4.5 De resterende termen in de totale balans van zwevend stof

Het aanleggen van verdiepingen kan invloed hebben op de productie van algen en verder kunnen de verdiepingen door de wat hogere en langere golven de veenafslag van onbeschermde oevers vergroten. Daarom maken we hierna onderscheid tussen de twee situaties en ook deze termen zijn onderwerp van het gevoeligheidsonderzoek; we noteren voor de huidige “0” en verdiepte “1” situatie:

$$(P_{\text{alg}} + P_{\text{veen}})_0 ; (P_{\text{alg}} + P_{\text{veen}})_1 \quad (4.13)$$

Er wordt uitgegaan van 120 tonC/jaar voor de algenproductie en 180 tonC/jaar voor de veenafslag.

De Loosdrechtse Plassen worden ververst met $Q=28 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ water uit omliggende gebieden. De daarin eventueel meegevoerde deeltjes worden in de veenafslag bronterm opgenomen. Bij het uitslaan van dit volume wordt de zwevende stof ook afgevoerd zodat er een putterm is voor de respectievelijke slibbalansen van de huidige en nieuwe situatie van:

$$Qc_0 ; Qc_1 \quad (4.14)$$

In verhouding tot de factor V_{LP} / T_{vlok} van $400 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ in de sedimentatieflux met T_{vlok} van ca. 20 dagen is de invloed van de verversing (4.14) gering.

Tenslotte is er mineralisatie van de zwevende deeltjes zowel in het volume van de huidige plassen als in het door putten vergrote volume. Dit onderscheid noteren we als volgt in de balansen voor de huidige “0” en verdiepte “1” situatie:

$$\frac{V_{LP}}{T_M} c_0 ; \frac{V_{LP} + V_{\text{put}}}{T_M} c_1 \quad \text{met} \quad T_M = M^{-1} \quad (4.15)$$

Voor M wordt 0.001 [1/dag] gekozen oftewel $T_M = 1000$ dagen (2.7 jaar) wat 32 tonC/jaar geeft bij 4 mgC/l en dit is in verhouding tot de sedimentatieflux (4.1) met T_{vlok} van ca. 20 dagen verwaarloosbaar.

We wijzen erop dat voorgaande schattingen weliswaar de basis voor de balans van zwevend stof vormen maar veeleer de getoonde evenredigheid met diverse invloedsfactoren wordt gebruikt in een vergelijking tussen de huidige en nieuwe situatie. Het belang van de geschatte getallen wordt in een gevoeligheidsonderzoek onderzocht, zoals met Figuur 4.1 en 4.2. In de volgende paragraaf worden deze en voorgaande bronnen en putten in de respectievelijke balansen ingevoerd.

4.6 De totale zwevend stof balans

Op basis van voorgaande bespreking luidt de balans van gesuspendeerde massa in de huidige situatie als volgt:

$$V_{LP} \frac{dc_0}{dt} = (P_{alg} + P_{veen})_0 - Qc_0 - \frac{V_{LP}}{T_M} c_0 - \frac{V_{LP}}{\tau_{vlok,0}} c_0^2 + \eta_0 \overline{EA_{LP}}^0 \quad (4.16)$$

En voor de verdiepte situatie:

$$(V_{LP} + V_{put}) \frac{dc_1}{dt} = (P_{alg} + P_{veen})_1 - Qc_1 - \frac{V_{LP} + V_{put}}{T_M} c_1 - \frac{V_{LP} + V_{put}}{\tau_{vlok,1}} c_1^2 + \eta_1 \overline{E(A_{LP} - A_{put})}^1 + \overline{EA_{put}}^1 \quad (4.17)$$

Ten opzichte van (4.16) is in (4.17) het plasvolume met het gegraven putvolume uitgebreid. De laatste term in (4.17) verdwijnt onder aanname dat de putten voldoende diep zijn. Merk op dat de depositie in de put (4.12) geen rol in de slibbalans speelt, of anders gezegd het effect daarvan is geïntroduceerd door de erosie over de putbodem (4.8) uit te schakelen.

De voorlaatste term in (4.17) wordt via (4.9) uitgedrukt in de eveneens onbekende erosieflux $\eta_0 \overline{EA_{LP}}^0$ van de huidige situatie. Hierin is η_0 de reductie in plasoppervlak door niet-erodeerbaar oppervlak (A_{nero}) zoals door voldoende dichte bezetting en voldoende hoge waterplanten en we definiëren:

$$\eta = \frac{A_{LP} - A_{put} - A_{nero}}{A_{LP} - A_{put}} \quad (4.18)$$

De verhouding η_1 / η_0 geeft weer de fracties niet-erodeerbare oppervlakken buiten de putten in de nieuwe situatie tegen de niet-erodeerbare oppervlak/plasbodem in de huidige situatie door bezanden en/of bedekking met waterplanten.

Hiermee maken we een onderscheid in de invloed van de stroming (χ) en door andere onafhankelijke invloedsfactoren zoals de groei van waterplanten die de bodem verstevigen en afschermen van de eroderende werking van de stroming/golven of bedekken met zand.

Onder aanname dat de huidige plassen in evenwicht zijn d.w.z. de massa zwevende stof in de waterkolom is gemiddeld over een jaar constant, volgt uit (4.16):

$$\eta_0 \overline{EA_{LP}}^0 = Qc_0 + \frac{V_{LP}}{T_M} c_0 + \frac{V_{LP}}{\tau_{vlok,0}} c_0^2 - (P_{alg} + P_{veen})_0 \quad (4.19)$$

Met (4.19) is het probleem gesloten. Onder aanname van nieuw evenwicht voor de verdiepte situatie kan uit (4.17) met (4.19) de nieuwe concentratie c_1 worden berekend uit:

$$\left(\frac{V_{LP} + V_{put}}{\tau_{vlok,1}} \right) c_1^2 + \left(Q + \frac{V_{LP} + V_{put}}{T_M} \right) c_1 = \chi_{1,0} \left(1 - \frac{A_{put}}{A_{LP}} \right) \left\{ \frac{V_{LP}}{\tau_{vlok,0}} c_0^2 + \left(Q + \frac{V_{LP}}{T_M} \right) c_0 \right\} + \left\{ (P_{alg} + P_{veen})_1 - \chi_{1,0} \frac{\eta_1}{\eta_0} \left(1 - \frac{A_{put}}{A_{LP}} \right) (P_{alg} + P_{veen})_0 \right\} \quad (4.20)$$

We zien in (4.20) dat, wanneer de putten geen oppervlak en geen (extra) volume hebben en $\chi_{1,0} = 1$ geldt en verder de veenafslag en algenproductie gelijk zijn, de nieuwe concentratie gelijk is aan de huidige concentratie.

Hoewel de kwadratische vergelijking (4.20) voor concentratie c_1 op het eerste gezicht onoverzichtelijk lijkt bevat deze veel aanknopingspunten voor een gevoeligheidsanalyse van de nieuwe concentratie c_1 . Deze biedt de mogelijkheid te variëren met het putoppervlak A_{put} en de putdiepte die leidt tot putvolume V_{put} . Verder is de flocculatieparameter τ_{vlok} , zie (4.3), afhankelijk van de flocculatie-bereidheid welke kwalitatief wordt bepaald door o.a. de gemeten zeta-potentiaal met invloed van pH-grad. Verder is van τ_{vlok} bekend hoe deze te vertalen van de flocculatie in centrifuge proeven naar turbulent water in de plassen. Vervolgens is er een aanknopingspunt voor het invoeren van een verhoogde erosiegraad buiten de putten via de parameter $\chi_{1,0}$ en door eventueel verhoogde veenafslag via het verschil $(P_{veen})_1 - (P_{veen})_0$. Waarden voor $\chi_{1,0}$ kunnen uit hydrodynamische berekeningen worden geschat. Vooralsnog hanteren we (4.11) en variëren daarop. En de bedekking van de oorspronkelijke plasbodem met vegetatie of met zand zodat dit deel (η) geen zwevend stof in suspensie zal brengen.

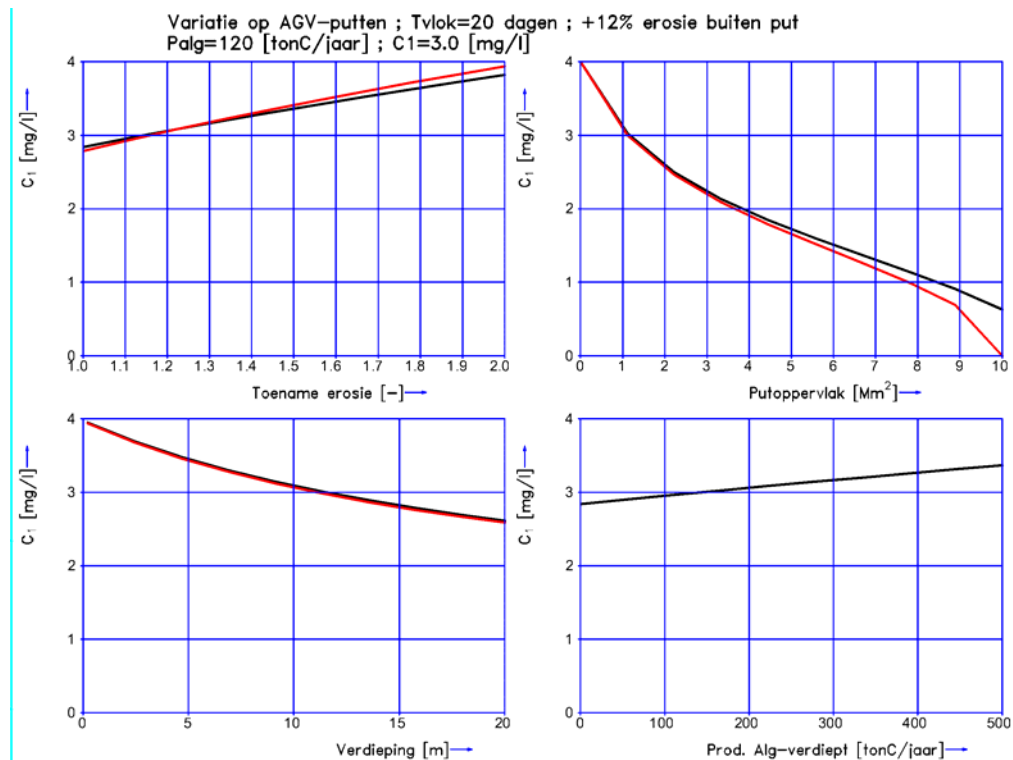
Figuren 4.1 en 4.2 illustreren deze afhankelijkheden uitgaande van twee prominente verdiepte situaties en deze figuren vatten veel van het gevraagde onderzoek samen.

In de balans (4.20) staan zijn de volgende twee dominante termen met elkaar in evenwicht:

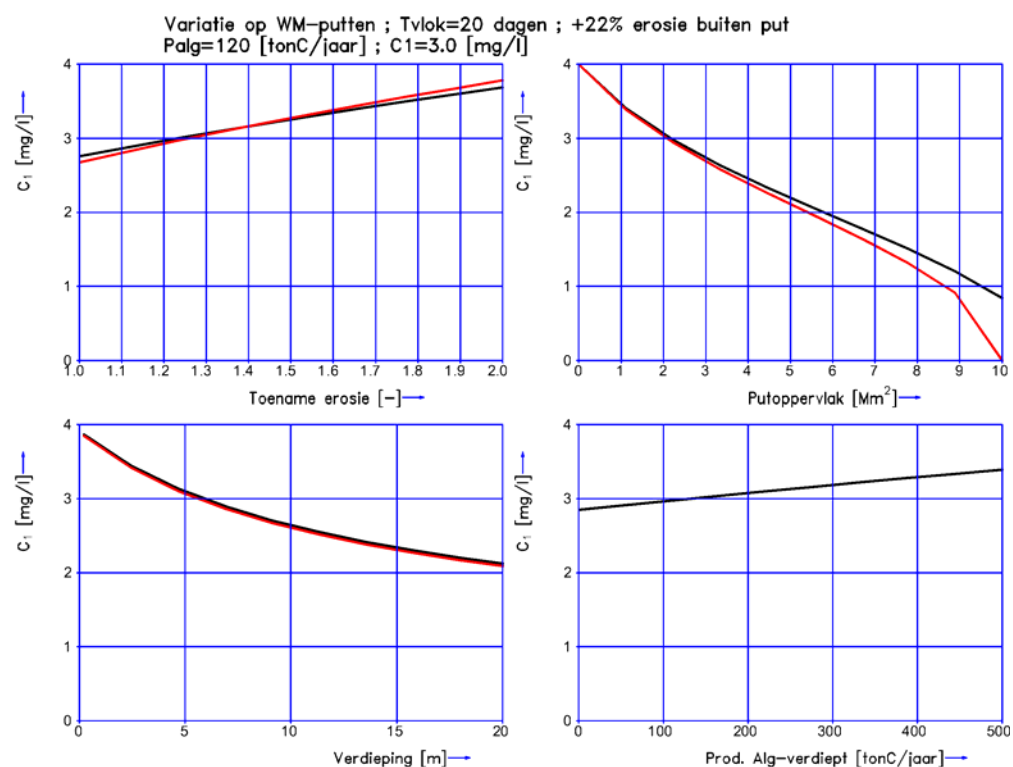
$$\left\{ \left(1 - \frac{A_{put}}{A_{LP}} \right) V_{LP} + V_{put} \right\} \frac{c_1^2}{\tau_{vlok,1}} \approx \chi_{1,0} \frac{\eta_1}{\eta_0} \left(1 - \frac{A_{put}}{A_{LP}} \right) \frac{V_{LP}}{\tau_{vlok,0}} c_0^2 \quad (4.21)$$

waaruit volgt:

$$\frac{c_1}{c_0} \approx \sqrt{\chi_{1,0} \frac{\eta_1}{\eta_0} \left(1 - \frac{A_{put}}{A_{LP}} \right) \left(\frac{V_{LP}}{\left(1 - \frac{A_{put}}{A_{LP}} \right) V_{LP} + V_{put}} \right) \frac{\tau_{vlok,1}}{\tau_{vlok,0}}} \quad \text{mits} \quad \frac{A_{put}}{A_{LP}} \ll 1 \quad (4.22)$$



Figuur 4.1 Invloedsfactoren op de concentratie c_1 voor de AGV variant; de rode lijn is de eenvoudige benadering (4.21)



Figuur 4.2 Invloedsfactoren op de concentratie c_1 voor de WM variant; de rode lijn is de eenvoudige benadering (4.21)

Deze benadering bevat uitsluitend de geometrische variaties en de eventueel verhoogde erosie buiten de putten, verwaarloosd zijn de overige geringere invloeden door veenafslag, algenproductie en nog onbelangrijker verversing en mineralisatie. Wel is in (4.22) een eventuele wijziging in de flocculatie efficiëntie betrokken. Voor extreme variaties zoals een putoppervlak (bijna) gelijk aan het plasoppervlak zal (4.22) gaan afwijken omdat dan de geringere bijdragen in (4.20) wel een rol gaan spelen. Overigens, voor grote verhoudingen putoppervlak/plasoppervlak zal ook de ruwe benadering (4.11) niet meer gelden. Verder valt op dat in (4.22), bij gelijkblijvende flocculatie-efficiëntie, de flocculatietijd geen rol speelt, de veronderstelling is wel dat flocculatie optreedt. De geringe invloed van de flocculatietijd komt door de calibratie van de erosie in de huidige situatie bij (gegeven) flocculatietijd.

4.7 Gevoeligheidsonderzoek balans fijn zwevend stof

Tabellen 4.1 en 4.2 tonen in volgorde van afnemende invloed de verandering in concentratie in de verdiepte situatie door een verandering in de procesgrootheden. Zoals verwacht komt de belangrijkste invloed/gevoeligheid door $\chi_{1,0}$: de toename van erosie buiten de putten. Wanneer deze erosie met 10% toeneemt stijgt de concentratie met ca. 0.12 mg/l. Een toename van het putoppervlak of putdiepte met eveneens 10% geeft ca. 0.08 - 0.1 mg/l afname van de concentratie.

Tabel 4.1 Gevoeligheidsonderzoek, uitgaande van putbodem 12m onder gemiddelde plasbodem over 120 ha (AGV variant); per fractie van procesvariabele vermeldt de laatste kolom de verandering in concentratie zwevend stof

prioriteit	proces (12m ; 120 ha)	mg/l
1	toename erosieflux buiten put	1.22
2	toename putoppervlak	-0.82
3	toename putdiepte	-0.75
4	toename algenprod. verdiept	0.13
5	toename veenprod. verdiept	0.20
6	verversingsvolume/jaar	0.03
7	flocculatietijd (nieuw-oud)	0.03

Tabel 4.2 Gevoeligheidsonderzoek, uitgaande van putbodem 6m onder plasbodem over 220 ha (WM variant); per fractie van procesvariabele vermeldt de laatste kolom de verandering in concentratie zwevend stof

prioriteit	proces (6m ; 220 ha)	mg/l
1	toename erosieflux buiten put	1.22
2	toename putoppervlak	-0.97
3	toename putdiepte	-0.81
4	toename algenprod. verdiept	0.14
5	toename veenprod. verdiept	0.20
6	verversingsvolume/jaar	0.03
7	flocculatietijd	0.04

De volgende rekenvoorbeelden illustreren het gebruik van deze tabellen. Tabel 4.1 vermeldt voor de toename van putoppervlak -1.2 mg/l per fractie van putoppervlak. Stel dat het putoppervlak met 10% wordt vergroot dus met 12 ha t.o.v. de AGV variant (Tabel 4.1) dan bedraagt de afname in concentratie zwevend stof 0.12 mg/l.

Gevoeligheidsonderzoek toont dat de uitkomsten zeer weinig gevoelig zijn voor de flocculatietijd mits deze in de nieuwe situatie gelijk blijft aan de huidige flocculatietijd totdat deze extreem langer dan 20 dagen wordt pas dan gaan de andere processen wél domineren.

Uitgaande van 4 mgC/ℓ fijn zwevend stof in de huidige situatie van de Loosdrechtse Plassen, geeft Tabel 4.3 de nieuwe concentraties in mgC/ℓ voor putoppervlak in [ha] en putdiepte t.o.v. wateroppervlak, dus een put van 6m diepte is ca. $6 - 1.8 = 4.2$ m dieper dan de gemiddelde plasbodem. Tabel 4.3 is niet bedoeld voor interpolatie van de concentraties fijn zwevend stof.

Tabel 4.3 Variatie concentratie fijn zwevend stof uitgaande van 4 mgC/ℓ bij gegeven putoppervlak en putdiepte t.o.v. wateroppervlak uitgaande van 1.77m waterdiepte

	80 ha	120 ha	160 ha	220 ha	280 ha
6m	3.55	3.37	3.20	2.99	2.79
8m	3.43	3.22	3.04	2.80	2.59
10m	3.33	3.09	2.89	2.64	2.43
12m	3.23	2.97	2.76	2.51	2.30
14m	3.14	2.87	2.65	2.39	2.18
16m	3.06	2.77	2.55	2.29	2.08
20m	2.91	2.61	2.39	2.12	1.92

Deze tabel is niet bedoeld om door interpolatie de concentraties fijn zwevend stof te schatten.

5 De onderbouwing van de dominante termen in de balans

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk presenteert o.i. de causale verbanden die tot de argumentatie en conclusies van vorige hoofdstukken hebben geleid. Bij de uitleg in deze hoofdstukken en in dit hoofdstuk kan op diverse punten met de bewijsvoering worden begonnen. De reden is dat het allemaal onderdelen zijn van een grotendeels gesloten depositie-erosie cyclus of erosie-depositie cyclus. We lichten dit als volgt toe.

We zouden kunnen beginnen met de erosie van de slappe bodem op ca. 1.8m waterdiepte waarvoor we argumenten aandragen dat deze veelal tenminste licht wordt geërodeerd door vnl. golven en er een vloeibare fluffy laag ontstaat waaruit tenminste fijne deeltjes weer in suspensie in de waterkolom kunnen worden gebracht. Echter, getallen voor de (erosie)flux van deze opgewervelde deeltjes, uit de fluffy laag, zijn niet voldoende nauwkeurig te geven. Daarom beginnen we bij de fijne zwevende deeltjes in de waterkolom. En we vragen ons af waarom deze daar niet accumuleren met ca. 155 tonC/jaar, zijnde het verschil van de bronnen algen en veenafslag (120+180 tonC/jaar) en de putten: afvoer door verversing en mineralisatie (113 + 32 tonC/jaar). Dergelijke fijne deeltjes van orde-grootte enkele μm kunnen nl. niet sedimenteren, zelfs niet in het milde turbulentiële klimaat in de Loosdrechtse Plassen. Wel treffen we die deeltjes in de bodem aan op basis van de gemeten C:N verhouding van bodemmonsters (Medusa, 2007).

De sleutel ligt o.i. in vlokvorming van deze zwevende deeltjes zoals blijkt uit centrifuge-experimenten bij 500g waar binnen een uur vlokvorming optreedt, wat ca. 20 dagen bij de heersende zwaartekracht betekent. Hoewel dit een traag proces is volgt hieruit de schatting dat ca. 71 tonC zwevend stof in de Loosdrechtse Plassen (4 mgC/l) in 20 dagen tot voldoende grote en snel zinkende vlokken wordt omgezet wat leidt tot sedimentatie met ca. 1305 tonC/jaar (Figuur 2.11). Deze 71 tonC in de waterkolom verdwijnt niet na 20 dagen maar is er permanent. Tevens kan de som van bronnen-putten van 161 tonC/jaar de bezinking van 1305 tonC/jaar niet verklaren. De balans wordt kennelijk gesloten door de erosie van $1305 - 161 = 1144$ tonC/jaar. Hieruit concluderen we dat de balans van zwevend stof in de Loosdrechtse Plassen wordt gedomineerd door vlokvorming en erosie. Dat is de rode draad in dit hoofdstuk en we beginnen bij de condities voor sedimentatie en vervolgen met de processen die vlokvorming bevorderen of hinderen en we komen vervolgens bij de inschatting dat er zeer vaak erosie van de plasbodem op 1.8m waterdiepte optreedt. Tenslotte blijkt uit bodemmonsters dat een dergelijke erosie goed mogelijk is omdat er een vloeibare fluffy laag ontstaat bij golf- en stromingscondities in de 1.8m diepe Loosdrechtse Plassen. Hiermee hebben we voorgaand in causale verbanden omschreven en onderbouwd.

Op diverse plaatsen wordt gebruikt gemaakt van 1DV simulaties. Hierin is gegeven de strijklengte de golfen en golfhoogte afhankelijk van de windsnelheid volgens de formules in (Hurdle & Stive, 1989). Tevens wordt in de 1DV simulaties altijd de temperatuurstratificatie meegenomen maar deze is alleen voor grotere waterdiepte zoals in 14m diepe putten (AGV-variant) relevant maar nauwelijks in de 8m diepe putten van de WijdeMeren-variant. De diepte-gemiddelde stroomsnelheid is overgenomen uit een markante locatie van de Loosdrechtse Plassen en deze snelheid blijkt evenredig met de

windsnelheid en is groter in de diepe putten dan boven de oorspronkelijke plasbodem (stroomaantrekkende werking).

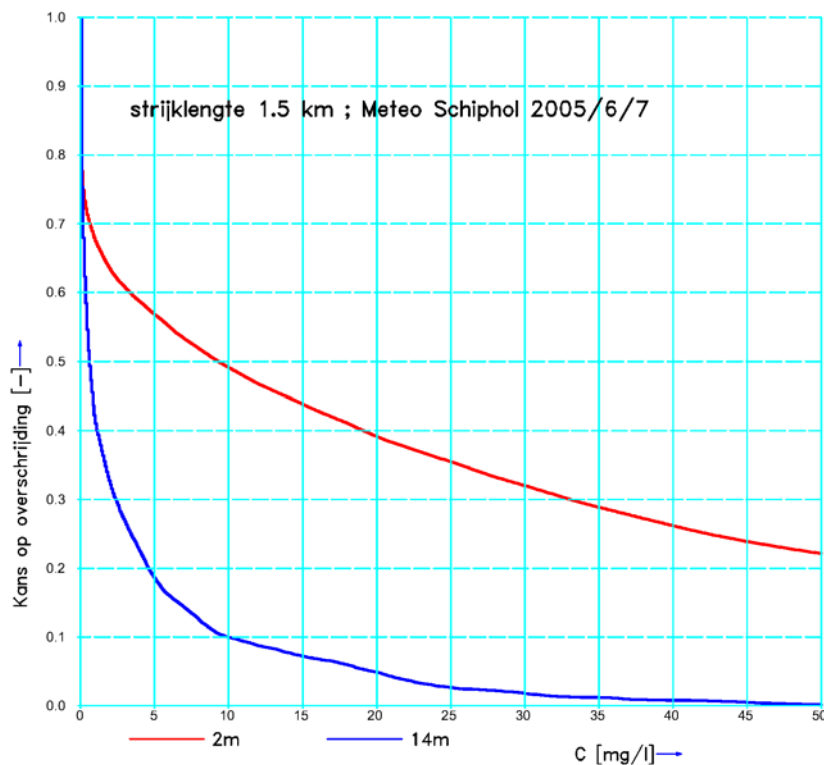
5.2 De benodigde valsnelheid

De wind creëert stroming en golven die het turbulentieklimaat in de Loosdrechtse Plassen bepalen. Gegeven dit turbulentieklimaat dient zwevend stof over een minimale valsnelheid te beschikken om voor hoge bodemconcentraties te zorgen. Wanneer het zwevend stof minder snel bezinkt zal de turbulente menging deze in suspensie houden en het zwevende stof zal geen deel uitmaken van de depositie-erosie cyclus.

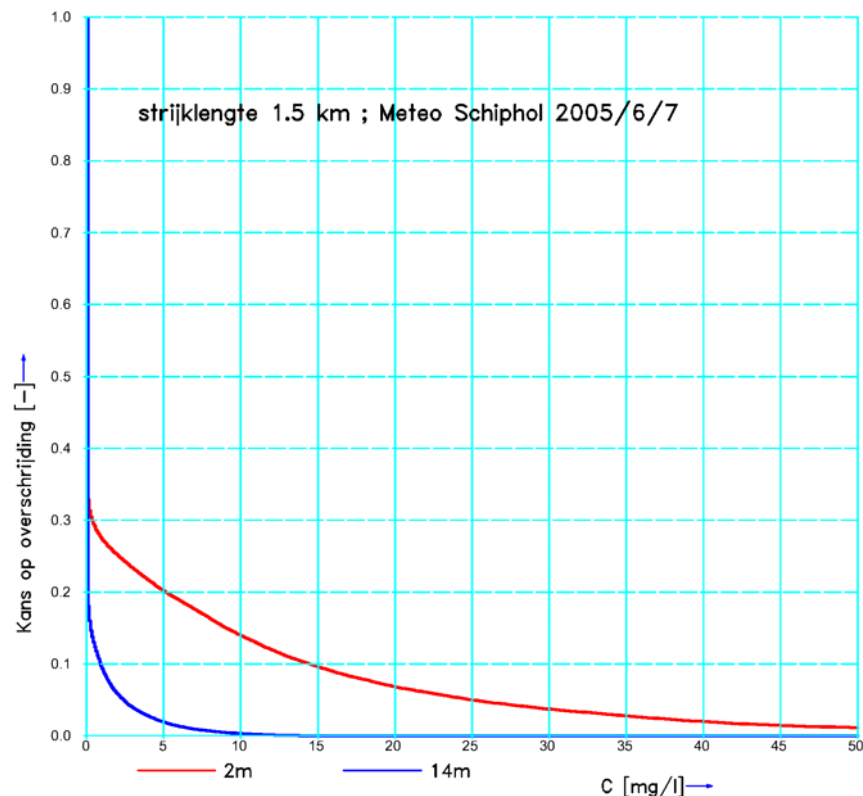
Met 1DV simulaties voor een lange periode en bij gegeven referentieconcentratie van 1 g/l juist boven de bodem vinden we dat voor een valsnelheid van ca. 1 mm/s de concentratie in de resterende waterkolom orde-grootte 100 kleiner is en orde-grootte 30 maal kleiner bij 0.1 mm/s valsnelheid (Figuren 5.1 en 5.2). De bijbehorende kleine diameter van de deeltjes met een veronderstelde dichtheid ρ_{vlok} volgt uit de Stokes wet

$$d = \left\{ \frac{18\rho_w \nu w_s}{g(\rho_{\text{vlok}} - \rho_w)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

en bedraagt voor $\rho_{\text{vlok}}=1035 \text{ kg/m}^3$ ca. 230 μm en ca. 70 μm voor resp. 1 mm/s en 0.1 mm/s valsnelheid w_s . We achten een valsnelheid van orde-grootte 1mm/s nodig voor zwevende deeltjes die aan de depositie-erosie cyclus meedoen en de bodem kunnen bereiken.



Figuur 5.1 Kansverdeling concentratie zwevend stof halverwege de waterkolom voor 0.1 mm/s valsnelheid en 1 g/l juist boven de bodem

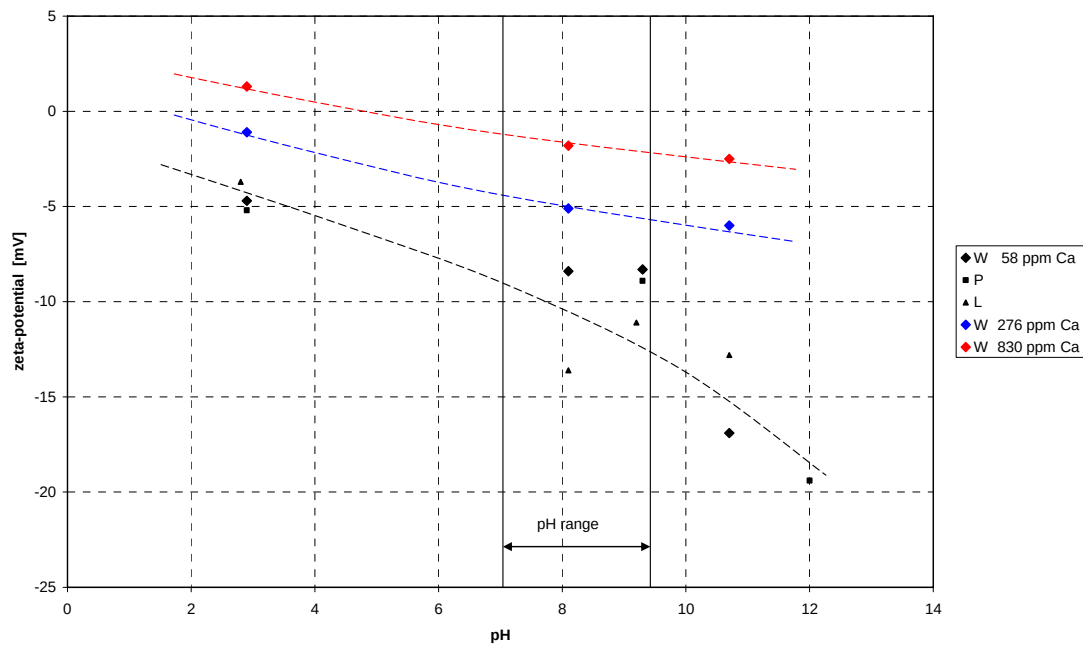


Figuur 5.2 Kansverdeling concentratie zwevend stof halverwege de waterkolom voor 1 mm/s valsnelheid en 1 g/l juist boven de bodem

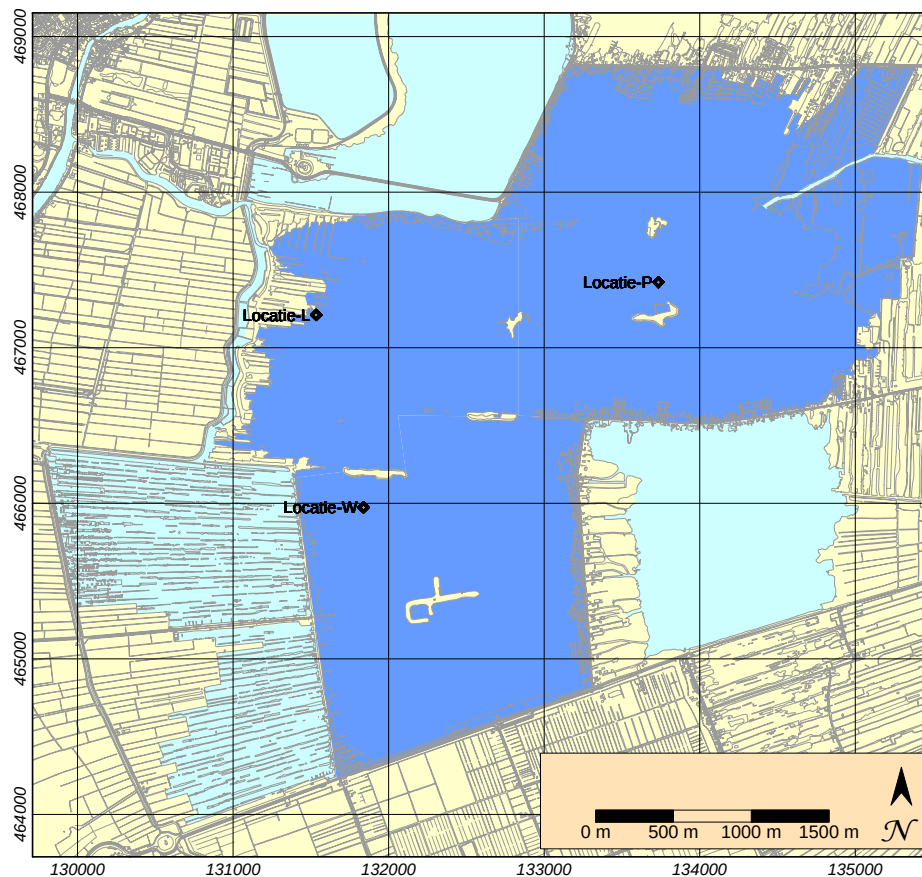
Gegeven de oorspronkelijke diameter van de deeltjes van orde-grootte 1-10 μm dienen deze te kunnen flocculeren om afmetingen van orde-grootte 220 μm te bereiken. In de volgende paragraaf wordt getoond dat de zwevende deeltjes in de Loosdrechtse Plassen inderdaad over een beperkte bereidheid tot flocculatie beschikken.

5.3 Flocculatie-bereidheid

Figuur 5.3 toont de zeta-potentiaal van verschillende watermonsters uit de Loosdrechtse plassen op 27 september 2007 (locaties in Figuur 5.4) als functie van de pH en voor verschillende concentraties kationen. Deze maat voor de flocculatie-bereidheid wordt waarschijnlijk gestuurd door biologische en chemische processen zoals binding door bacteriële werking en door de vorming van amorfe Fe^{+++} verbindingen. Dit laatste kon in dit stadium niet verder in detail worden uitgezocht. Biologische en chemische processen bepalen mede de pH en de flocculatie-bereidheid. Wanneer deze processen veranderen kunnen ze een invloed hebben op de vlokvorming. De metingen tonen aan dat het zwevend stof in de Loosdrechtse Plassen voldoende flocculatie-bereidheid vertonen om dit een significant proces te maken, maar dat de snelheden niet heel groot zijn.



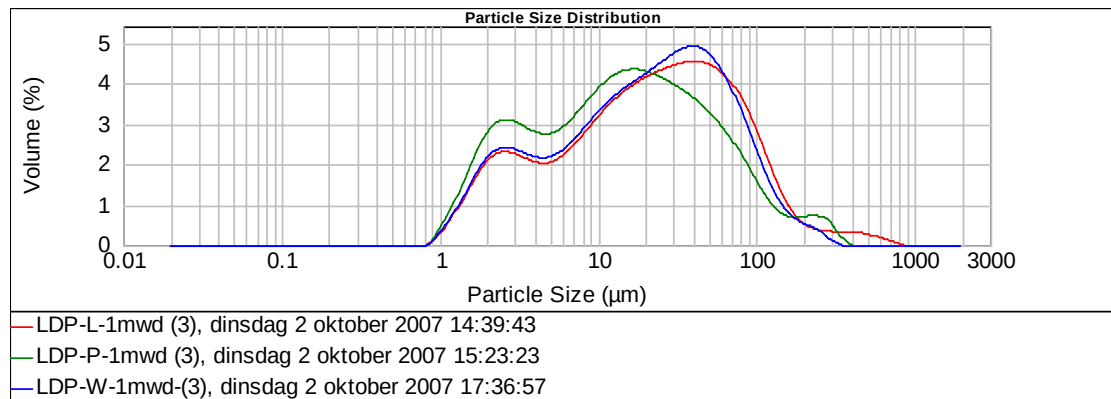
Figuur 5.3 Zeta-potentiaal van verschillende monsters genomen in de waterkolom van de Loosdrechtse plassen (Figuur 5.4) als functie van de pH en voor verschillende concentraties kationen (de zwarte lijn en punten betreffen de huidige kationsamenstelling van het water)



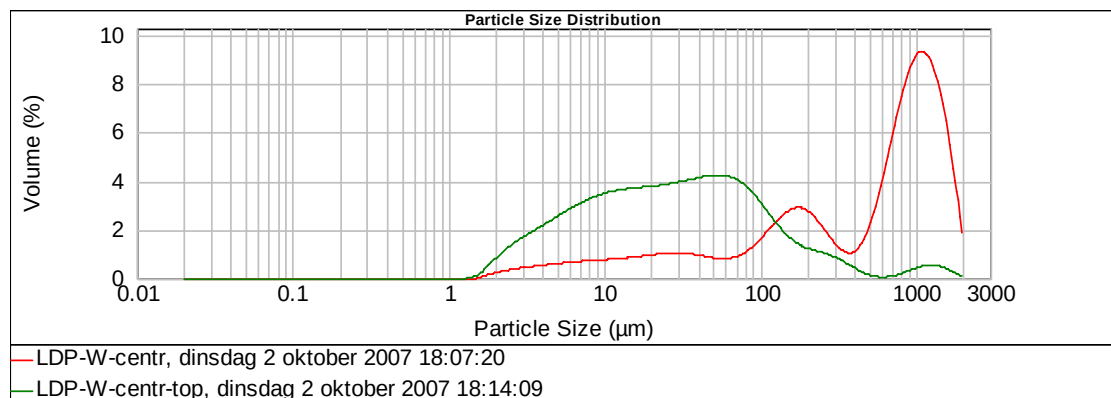
Figuur 5.4 Locatie van de monsternamen van water en bodem, op 27 september 2007 (Medusa, 2007)

5.4 Flocculatie-experimenten

Figuur 5.5 toont de verdeling van de deeltjesgrootte uit enkele watermonsters in de Loosdrechtse Plassen. Deeltjes met afmetingen van orde-grootte 200 μm zijn hierin schaars. Wanneer de deeltjesgrootte wordt gemeten na 1 uur centrifugeren van deze watermonsters bij een equivalente zwaartekracht van 500g blijken er aanmerkelijke grotere deeltjes te zijn gevormd (Figuur 5.6).



Figuur 5.5 Verdeling deeltjesgrootte in watermonsters genomen op 27 september 2007 in locaties L, P en W, zie (Figuur 2)



Figuur 5.6 Toename deeltjesgrootte in watermonster genomen op 27 september 2007 in locatie W (Figuur 5.4) na ca. één uur centrifugeren bij 500g, vergelijk met Figuur 5.5. De rode lijn refereert naar een deel onderin de testbuis waarheen de grotere deeltjes bezinken

Gezien de oorspronkelijke deeltjesgrootte is in dit centrifuge-experiment vlokvorming ontstaan door het botsen van deeltjes bij verschillende valsnelheden, differentieel bezinken genoemd. Hierover is theorie ontwikkeld, zie o.a. (Van Leussen, 1994) terwijl in Wang et al. (1998a en 1998b) de botsingskansen van deeltjes door differentieel bezinken nauwkeuriger is afgeleid en met simulaties geverifieerd.

Hierna vatten we de essentie van de theorie samen voor differentieel bezinken en voor botsingen in turbulent water waaruit we een vertaling van de centrifuge-experimenten naar de omstandigheden in de Loosdrechtse Plassen maken.

Per volume-eenheid en per tijdseenheid luidt het gemiddelde aantal botsingen $\dot{N}_{12}$ tussen twee deeltjesconcentraties n_1 en n_2 [deeltjes/m³]:

$$\dot{N}_{12} = n_1 n_2 \Gamma_{12} \quad [m^{-3} s^{-1}] \quad (5.2a)$$

waarin Γ_{12} de zg. botsingkernel als maat voor de waarschijnlijkheid dat twee deeltjes botsen. Deze botsingkernel definiëren we als

$$\Gamma_{12} = R^3 G \quad (5.2b)$$

met R de som van de radii van de botsende deeltjes uit klassen deeltjesconcentraties n_1 en n_2 . Zonder turbulentie ontmoeten de deeltjes elkaar door verschilsnelheden zoals door verschillen in valsnelheid ter grootte van Δw_s en de botsingsterm G in (5.2b) luidt dan:

$$G_{dif} = \frac{\pi \Delta w_s}{R} \quad [s^{-1}] \quad (5.3)$$

En de botsingsterm voor botsingen door chaotische paden in turbulent water luidt:

$$G_{tur} = \sqrt{\frac{8\pi}{15}} \frac{\varepsilon}{\nu} \quad (5.4)$$

Hierin is ε de energiedissipatie van turbulentie (Watt kg⁻¹ of m² s⁻³) en ν de kinematische viscositeit (m² s⁻¹).

Van Leussen (1994, p. 158/9) gebruikt de formulering uit (Friedlander, 1977) voor de groei van deeltjes in een zekere klasse k . Hij maakt de wel erg sterke veronderstelling dat terwijl de deeltjes botsen en groeien dat alle deeltjes in grootte toenemen d.w.z. de deeltjesradius over alle oorspronkelijke klassen toeneemt. Deze aanname geeft Van Leussen de mogelijkheid een afnamesnelheid van het aantal flocculerende deeltjes af te leiden. Van Leussen (1994, vgl. 9.25) schrijft:

$$\begin{aligned} \frac{dn_k}{dt} &= \frac{1}{2} \sum_{i+j=k} N_{ij} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} N_{ik} = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i+j=k} n_i n_j (r_i + r_j)^3 G - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} n_i n_k (r_i + r_k)^3 G \end{aligned} \quad (5.5)$$

De eerste term in het rechterlid is de snelheid van de vorming van deeltjes uit klasse i met klasse j tot klasse k terwijl de tweede term het verlies voorstelt van de deeltjes uit klasse k door botsing met alle andere deeltjes. Hierbij wordt verondersteld dat elke botsing effectief is in de zin van de vorming van een groter deeltje of de afbraak van een deeltje. Deze efficiency drukt Van Leussen uit in de flocculatie-efficiëntie coëfficiënt α waarmee de botsingstermen in (5.5) evenredig worden gereduceerd. Vervolgens sommeert Van Leussen over alle klassen k d.w.z. het totale aantal deeltjes waarvan na de netto botsing er steeds minder aanwezig zijn bij vaste massa in het experiment. Op basis van voornoemde

veronderstellingen, luidt Van Leussen's of Friedlander's resultaat dan voor de afname van de totale deeltjesconcentratie N :

$$\frac{dN}{dt} = -4\alpha Gr^3 N^2 \quad ; \quad N = \sum_{i=1}^{\infty} n_i \quad (5.6)$$

Deze uitdrukking omwerken naar een volume-fractie ϕ geeft:

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = -3\alpha \phi G \quad ; \quad \phi = \frac{c}{\rho_{vlok}} \quad (5.7)$$

waarin de verhouding c/ρ_{vlok} de volume fractie is van het slib. Uit (5.7) volgt als tijdschaal T_{vlok} voor flocculatie:

$$T_{vlok} = \frac{\pi \rho_{vlok}}{3\alpha c G} \quad (5.8)$$

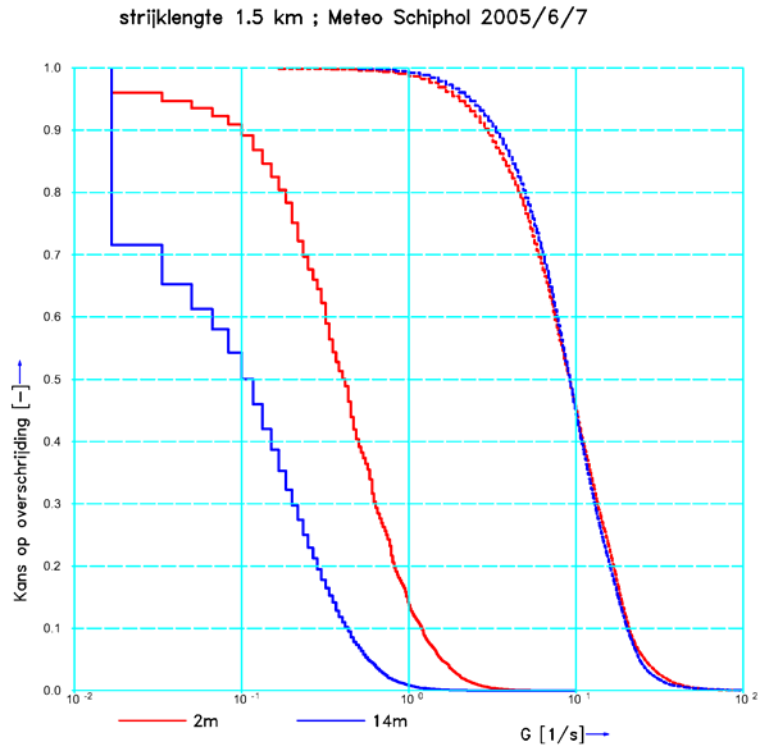
Voor de centrifuge proeven in stagnant water geldt met differentieel bezinken van deeltjes van 3 μm diameter en maximaal verschil in valsneheid van 0.1m/dag :

$$G_{dif} = \frac{\pi w_s}{d} \approx 1 \quad [s^{-1}] \quad (5.9)$$

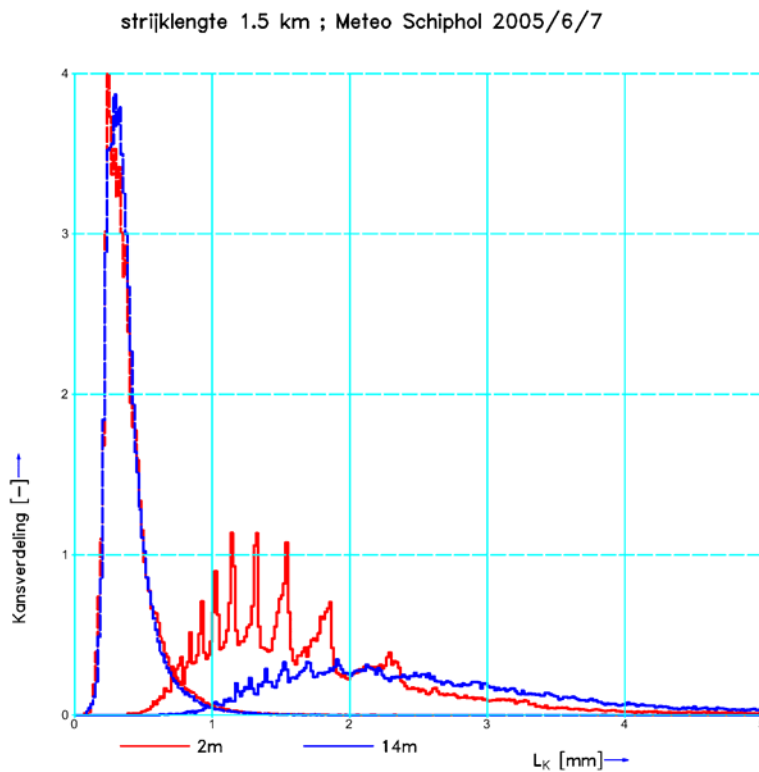
Substitutie van (5.9) in (5.8) met een flocculatietijd van 20 dagen volgens de centrifuge-experimenten geeft dan een kleine flocculatie-efficiëntie $\alpha \approx 0.1$ wat volgens Van Leussen (1994, fig. 9.21) een aannemelijke waarde is.

5.5 Vertaling flocculatie-experimenten naar de Loosdrechtse Plassen

De vertaling naar omstandigheden in de Loosdrechtse Plassen vindt plaats via 1DV simulaties en Figuur 5.7 toont de kansverdeling van de botsingsterm G_{tur} uit (5.4).



Figuur 5.7 De verdeling van de overschrijding van de botsingsterm G_{tur} halverwege de waterkolom en op 0.7% van de waterdiepte boven de bodem. De gestippelde lijnen (grote G -waarden) zijn voor de bodemgrenslaag op 0.7% van de waterdiepte boven de bodem



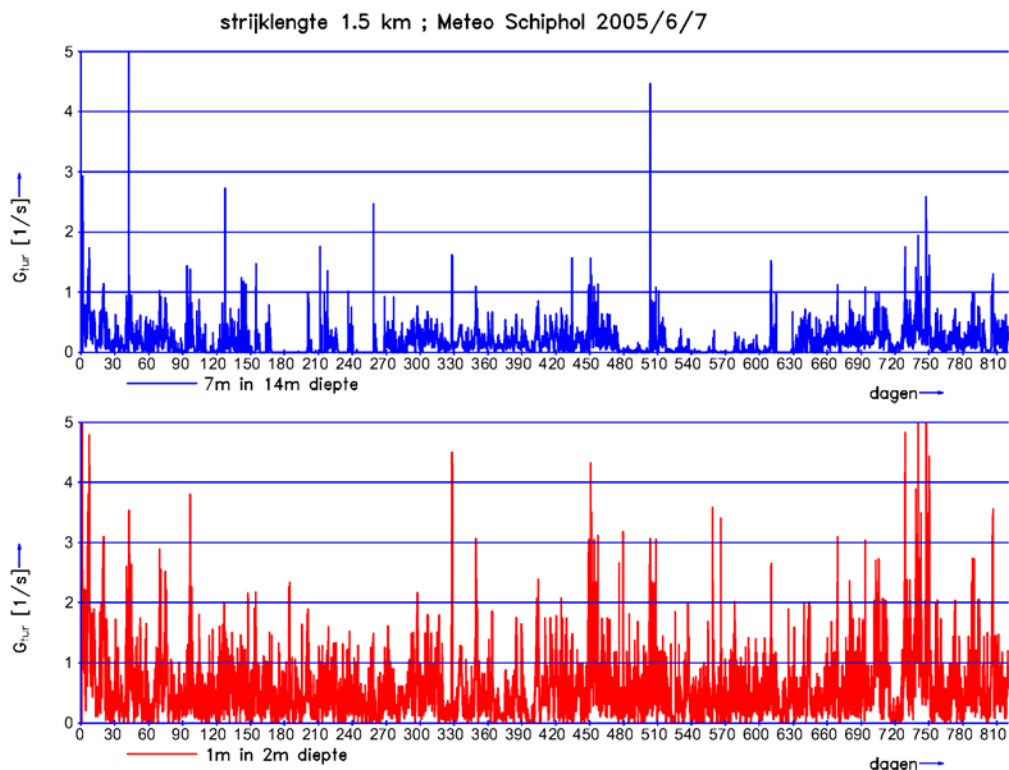
Figuur 5.8 De verdeling van de Kolmogorov lengteschaal als indicatie voor de maximale vlok grootte. De gestippelde lijnen (kleine L_K) zijn voor de bodemgrenslaag op 0.7% van de waterdiepte boven de bodem

In plaats van de wat abstracte botsingsterm G gebruikt Van Leussen (1994) ook wel de Kolmogorov-lengteschaal L_K waarop de grootste deformatiesnelheden in turbulent water optreden. Deze lengteschaal wordt gedefinieerd als

$$L_K = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad [m] \quad (5.10)$$

en bevat *de facto* dezelfde informatie als de botsingsterm in turbulent water, zie (5.4). Deeltjes groter dan L_K worden verondersteld zo zeer onderhevig te zijn aan drukvariaties en/of deformaties dat ze opbreken tot afmetingen kleiner dan L_K . Figuur 5.8 toont de kansverdeling van L_K halverwege de waterdiepte van 2m en 14m en dichtbij de bodem. Deze figuur herhaalt wat Figuur 5.7 al toonde nl. dat vlokken van millimeter grootte halverwege de waterkolom kunnen ontstaan maar bij de bodem kunnen worden afgebroken.

Figuur 5.9 presenteert de botsingsterm voor vlokvorming in het midden van de waterkolom in 2m en 14m diep water. De simulatie begint op 1 januari 2005 en voor de botsingsterm zijn de rustige perioden in de zomer (dagnr's 150-210 en 510-600) mede door de turbulentiedempende vorming van een temperatuurspronglaag bij 14m diepte herkenbaar.



Figuur 5.9 Tijdreeks waarop Figuur 5.7 is gebaseerd van de botsingsterm G_{tur} halverwege de waterkolom. Gedurende de zomers (dagnr's 150-210 en 510-600) treedt bij 14m een temperatuurspronglaag op wat de turbulentie dempt en de botsingsterm reduceert

5.6 Conclusies en discussie en aanbevelingen

Conclusies

Aan de hand van 1DV simulaties met wind aandrijving, stroming, golven en ev. temperatuurstratificatie schatten we dat vlokken met een valsnelheid van orde-grootte 1 mm/s met een ca. 100 maal hoger concentratie dan halverwege de waterkolom in de bodemgrenslaag kunnen komen. De daarvoor benodigde vloggrootte bedraagt orde-grootte 200 μm .

Buiten de turbulente grenslaag boven de bodem van de Loosdrechtse Plassen is het turbulentieklimaat dermate mild dat vlokken niet noemenswaardig zullen worden opgebroken. De vlokvorming lijkt voornamelijk door differentieel bezinken op te treden waarbij met grotere afstand tot de bodem meer botsingen optreden, eerst tussen individuele deeltjes en daarna tussen sneller bezinkende vlokken en kleine deeltjes en andere vlokken.

De flocculatietijd in het merendeel van de waterkolom in de Loosdrechtse Plassen is in orde-grootte gelijk aan de flocculatietijd afgeleid watermonsters in centrifuge-experimenten, na correctie voor de verhoogde zwaartekrachtsversnelling in deze experimenten. De flocculatietijd bedraagt ca. 20 dagen.

In eerdere studies werd een uiterst geringe valsnelheid van ca. 0.1 m/dag gebruikt die nu een grondslag heeft door de volgende omzetting van sedimentatie na flocculatie (4.4) in sedimentatie met een equivalente valsnelheid volgens:

$$V_{LP} \dot{M}_{vlok} = \frac{V_{LP} C}{T_{vlok}} \equiv A_{LP} \frac{H_{LP}}{T_{vlok}} C = A_{LP} w_{eq} C$$

Uitgaande van 20 dagen flocculatietijd en 2m waterdiepte volgt voor de equivalente valsnelheid $w_{eq}=0.1$ m/dag. Deze equivalente valsnelheid heeft niets met de valsnelheid van de vlokken te maken, deze moeten orde-grootte 1 mm/s zijn.

Uit de centrifuge-experimenten met watermonsters uit de Loosdrechtse Plassen en de theoretisch geschatte tijden voor vlokvorming leiden we af dat de efficiëntie α van de vorming van een vlok uit botsen van deeltjes ca. 10% bedraagt ($\alpha \approx 0.1$). Het toevoegen van een flocculant en/of het verlagen van de pH waarde zou deze efficiëntie kunnen vergroten.

Voorgaande schattingen tonen dat gegeven het turbulentieklimaat in de Loosdrechtse Plassen alleen vlokken van orde-grootte 200 μm samengesteld uit orde-grootte μm kleine deeltjes kunnen bezinken en in 100 maal hogere concentratie boven de bodem aankomen en in de bodemgrenslaag kunnen opbreken of op de bodem bezinken.

Discussie

In voorgaande analyse is de rol van de grootte van de waterkolom, waarin de vlokvorming optreedt, onderbelicht gebleven. In de formuleringen speelt nu alleen het volume water een rol. Voorgaande analyses tonen dat vlokvorming in de Loosdrechtse Plassen voornamelijk door differentieel bezinken komt en weinig door turbulentie wordt gestimuleerd omdat het turbulentieklimaat in het merendeel van de waterkolom mild is, zie b.v. Figuur 5.9. De verticale afstand waarover zinkende deeltjes elkaar inhalen en mogelijk botsen is van belang voor de grootte van de vlokken die de bodem bereiken. We verwachten dat in een 14m diepe put de vlokken die de bodemgrenslaag bereiken groter zullen zijn dan in de

oorspronkelijke plasdiepte van ca. 1.8m. De grotere vlokken gevormd in de 14m diepe put en die bodem bereiken zullen naar verwachting een grotere kans hebben tot de bodem te gaan behoren dan in 1.8m diep water. Deze overwegingen zijn niet verwerkt in de totale balans noch in de schatting voor de depositie in de putten, zie (4.12). Hoewel wat gekunsteld kan de totale balans nog wat worden verfijnd door de flocculatietijd over het volume boven de verdiepte delen te verkorten, maar dit plan stukt bij de getalsmatige invulling.

Aanbevelingen

Wij hebben slechts enkele watermonsters uit de Loosdrechtse Plassen onderzocht op deeltjesgrootteverdeling en in centrifuge-bezinking experimenten. De schattingen over flocculatietijden en –efficiëntie moeten dan ook zeer voorzichtig gehanteerd worden en in onzekerheidsanalyse worden onderzocht op hun invloed op de concentratie zwevend stof.

Aanbevolen wordt om deze experimenten te herhalen op meerdere watermonsters uit meerdere locaties in de Loosdrechtse Plassen en tevens de valsnelheidsverdeling van de zwevende deeltjes als functie van de bezinktijd te meten.

5.7 De plasbodem

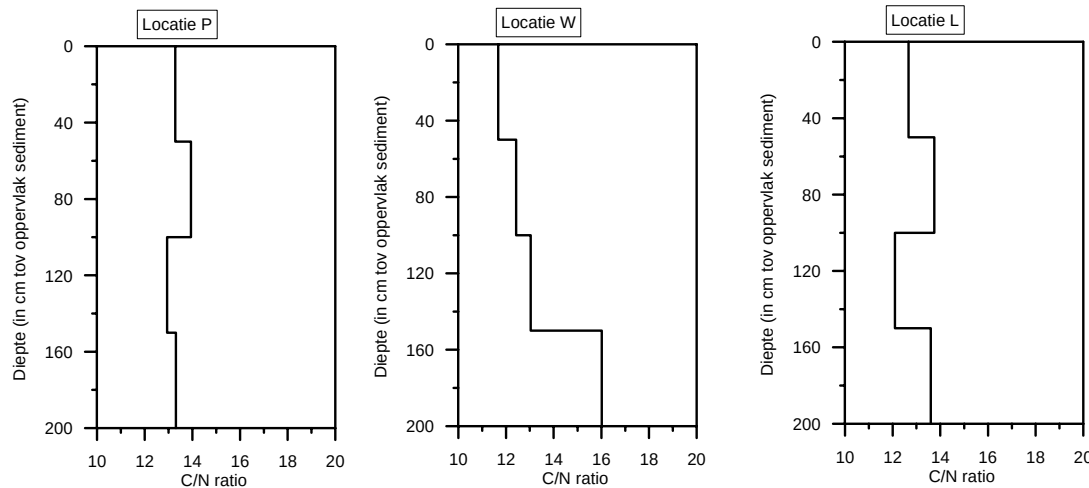
De schatting van de 1600 tonC fijn zwevend stof dat per jaar tot vlokken wordt gevormd terwijl de concentratie zwevend stof over de jaren gemiddeld 4 mgC/l blijft én de som van bronnen en putten ca. 155 tonC per jaar is toont dat opwerveling vanaf de bodem de belangrijkste bronterm in de balans moet zijn. Volgens deze balans moet er een dominante erosie-depositie cyclus gaande zijn in de Loosdrechtse Plassen waarbij veel zwevend stof slechts tijdelijk deel uitmaakt van de bodem om vervolgens weer tot hoog in de waterkolom op te wervelen.

Figuur 5.4 toont de locaties P en W van oude zandwinputten die ten dele weer zijn gevuld. Bij onze veldmetingen en door Medusa (2007) is aandacht besteed aan de samenstelling van de bodem in oude zandwinputten waarvan er 10 zijn gegraven (zie Figuur 5.13) in de periode 1959-1977 (Nieuwenhuyze et al., 1986). Zie voor de gegevens Appendix B.

Op deze locaties en locatie L heeft Medusa op 27 sept. 2007 (Medusa, 2007) bodemonsters genomen en deze geanalyseerd op hun C/N verdeling en datering via Cesium verdeling.

C/N verdeling over de diepte

De diepte verdeling van de C/N ratio geeft mogelijk inzicht in de herkomst van het gesedimenteerde materiaal in de diepte. In Figuur 5.10 duidelijk te zien dat de C/N verdeling op locaties P en L niet veranderen met de diepte. Op locatie W is de C/N ratio lager in de toplaag van het sediment dan in diepere lagen: het meer recente materiaal lijkt meer algen te bevatten.



Figuur 5.10 Verdeling van de C/N ratio over de diepte van de kernen (Medusa, 2007)

Uit de gemiddelde C/N verhouding van algen/seston (8) en van veen (19), en de C/N verhouding van het sediment, kan een indicatief algenpercentage worden berekend. Voor locaties P en L lijkt ongeveer 50% van het sediment uit algen te bestaan (en 50% uit veen); op locatie W bestaat het sediment op 2m diepte voor ongeveer 30% uit algen, aan het oppervlak bestaat het sediment voor ongeveer 65% uit algen.

Cesium verdeling en de ouderdom van sediment

Het nuclide ^{137}Cs (cesium) is een radioactief element dat vaak wordt gebruikt om de ouderdom van sediment te bepalen. Cesium is tijdens de bovengrondse kernproeven in de jaren 50/60 en tijdens het Chernobyl ongeval (1986) in het milieu terecht gekomen (Figuur 5.11)¹. Als gevolg van de grote bindingscapaciteit van klei (fractie $<63\ \mu\text{m}$) wordt cesium sterk aan slib gebonden. Deze binding is sterk: resorptie experimenten van Cs aan sedimenten hebben aangetoond dat minder dan 10% in de waterfase gemobiliseerd kan worden (Facchinelli et al., 2001; Sanada et al., 2002).

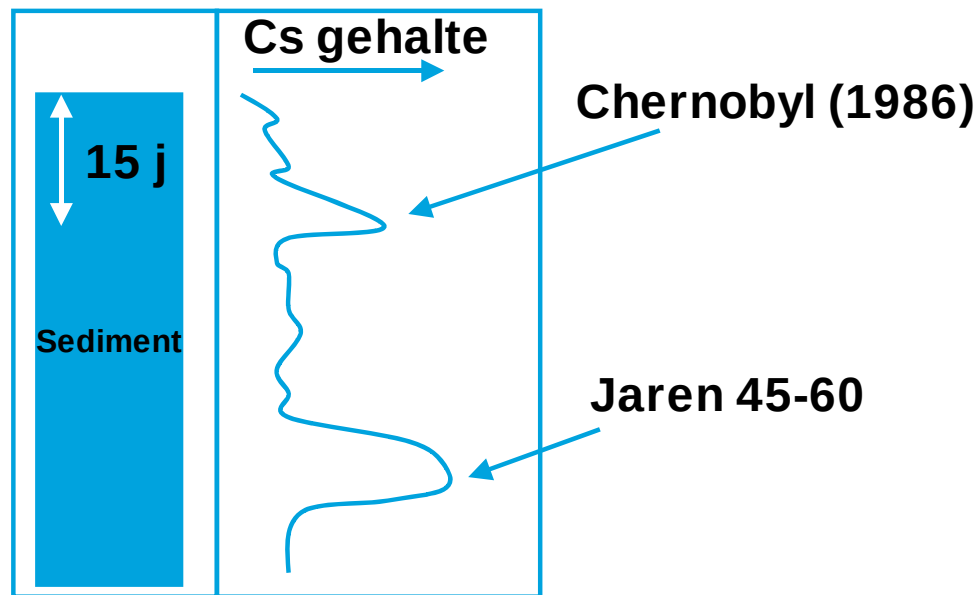
Sedimenten die accumuleren kunnen op verschillende manieren geproduceerd zijn:

- uit veenafslag
- uit algengroei
- uit resuspensie van (oud) slib

Sedimenten die na 1986 zijn geproduceerd uit veen en uit algen zullen geen ^{137}Cs bevatten². Ook slib dat afkomstig is van vóór 1945 (het begin van de bovengrondse kernproeven) bevat geen ^{137}Cs . Slib dat tussen 1945 en 1986 geproduceerd is, zal wél ^{137}Cs bevatten. In een ideale situatie waar continue sedimentatie plaatsvindt en de bodem niet wordt omgewoeld door wind en golven of wordt verstoord door organismen, zullen in een kern twee pieken zichtbaar zijn. In Figuur 5.11 is dit meer schematisch weergegeven.

¹ De gehalten ^{137}Cs zijn laag en vormen geen gezondheidsrisico.

² Deze aanname doet geen uitspraak over de werkelijke ouderdom van het slib. Veenslib zal immers oud (>100 jaar) zijn, maar kan recent *schoon* zijn afgezet.



Figuur 5.11 Schematische weergave van de ^{137}Cs verdeling in een sedimentkern met continue sedimentatie en een geringe omwoeling van sediment door organismen (Medusa, 2007)

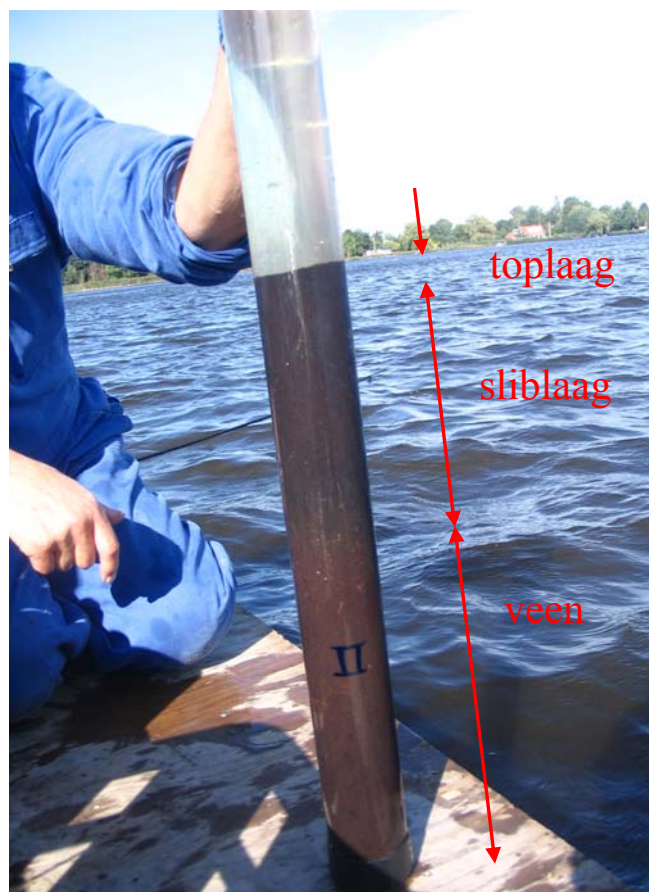
Omdat cesium sterk bindt aan minerale delen, is het cesium gehalte hiervoor gecorrigeerd door de concentratie cesium te delen door de concentraties van uranium en thorium. Uranium en thorium zijn radioactieve elementen die beiden vooral in de minerale fractie van sediment voorkomen (Van Wijngaarden et al., 2002).

We concluderen als volgt. Uit analyse van de C/N verhouding van diverse bodemmonsters uit de Loosdrechtse Plassen blijkt dat deze inderdaad veel detritus bevatten wat onderbouwt dat veel zwevend stof, waarvan detritus het hoofdbestanddeel is, slechts tijdelijk deel uitmaakt van de bodem om vervolgens weer op te wervelen tot hoog in de waterkolom.

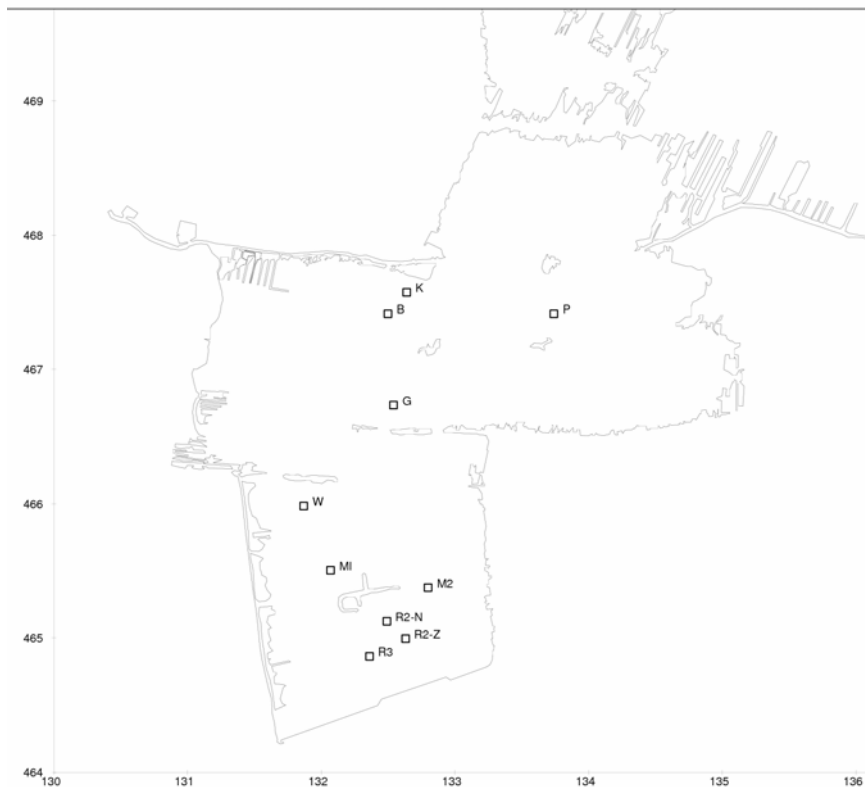
De volgende paragrafen onderzoeken of deze erosie inderdaad zo sterk kan zijn. Daartoe tonen we aan dat de plasbodem makkelijk in vloeibare toestand is te brengen doordat de toplaag bestaat uit een ijle en zwakke, zeg fluffy (water-sediment) laag bestaat.

5.8 De erodeerbaarheid van de toplaag van de plasbodem

De aanwezigheid van de fluffy laag is aangetoond tijdens veldonderzoek op 6 september 2007, (zie de foto in Figuur 5.12). De fluffy laag bestaat uit een sterk verhoogde concentratie stof ten opzichte van de waterkolom o.a. doordat vlokken fijn zwevend stof uit de waterkolom sedimenteren. De fluffy laag heeft een grotere dichtheid dan het water en volgens metingen aan monsters genomen op 6 september 2007 bedraagt het dichtheidsverschil met het water ongeveer $30\text{-}40\text{ kg/m}^3$ (Cornelisse en Grootenboer, 2007).



Figuur 5.12 Bodemonster met water, fluffy(top)-laag en bodem, 6 sept. 2007, Loosdrechtse Plassen (Cornelisse en Grootenboer, 2007)



Figuur 5.13 Locatie zandwinputten volgens (Nieuwenhuyze, 1986) gegraven in de periode 1959-1977, de assen zijn gebaseerd op Parijse coördinaten

De veldmetingen van 6 sept. 2007 leverden diverse nagenoeg ongestoorde monsters op van de bodem in put M1 (Figuur 5.13) en dichtbij put B en een ondiepe locatie ten westen van put B. In ons laboratorium zijn erosie-experimenten verricht met een roterende *vane* (samenstel van rechthoekige bladen) waaruit volgde dat bij een omtreksnelheid van ca. 3 cm/s de eerste vlokken uit het monsteroppervlak in suspensie kwamen. In het snelheidstraject van 3 naar 10 cm/s kwamen steeds meer vlokken in suspensie en was er bij ca. 10 cm/s een zichtbaar dichte moddernevel over 10-20 cm boven de bodem.

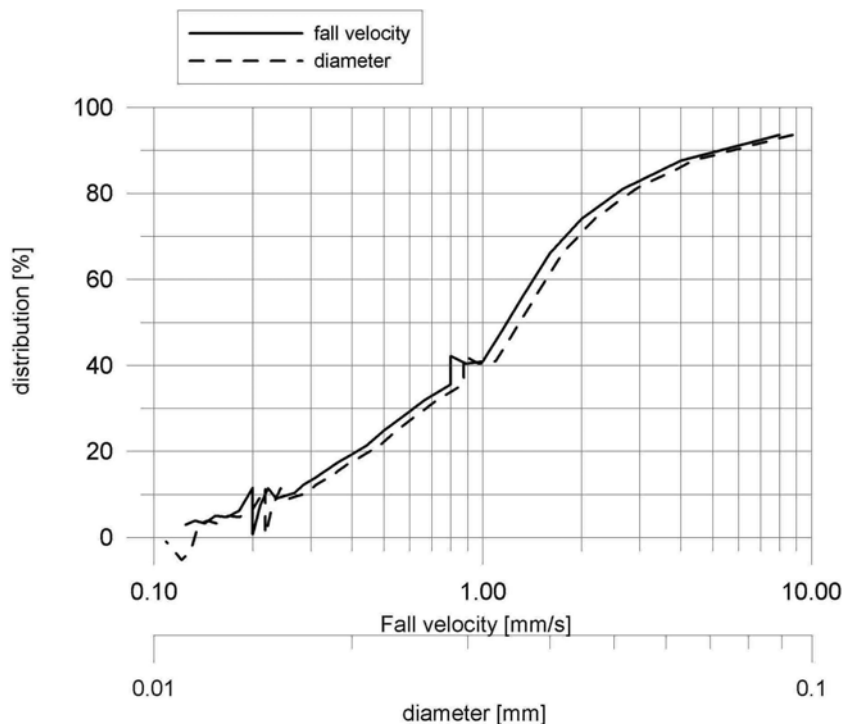
Deze fluffy laag zal worden verdund met het water via turbulente menging, veroorzaakt door stroming en golven. Laboratoriumproeven met bodemonsters (genomen op 6 sept. 2007) tonen dat, na opwerveling met een speciale roerder (een *vane*) en daarna rust, de verdunde fluffy laag zich binnen enkele uren weer concentreert.

Hoewel de fluffy-laag zich dus bij rust weer concentreert, tonen visuele waarnemingen dat tijdens de daaraan voorafgaande menging de fijnste deeltjes uit deze laag wel hoger in de waterkolom komt. Door flocculatie bij deze hoge concentratie zal dit fijne stof weer snel vlokken vormen en alsnog sedimenteren.

Dit is belangrijke informatie omdat stroomsnelheden van 3 cm/s tot 10 cm/s de fluffy-laag in vloeibare toestand brengen maar deze laag nog niet geheel over de waterkolom opmengt.

Deze erosie-experimenten tonen dat veel van het eerder opgewervelde slib weer binnen een uur terugvalt op de bodem doordat 50% een valsnelheid heeft van minimaal 1 mm/s, zie

Figuur 5.14. De fijnste fractie kan echter (veel) hoger in de waterkolom komen en lang in suspensie blijven en het doorzicht belemmeren. Deze eenvoudige waarnemingen zijn van belang om te vergelijken met de gesimuleerde snelheden boven de bodem.



Figuur 5.14 Valsnelheid van gedefloccureerde topaag van de bodem op locatie M1 bodemonmonster van 6 sept. 2007

In rust blijkt de oorspronkelijke fluffy-laag een sterkte van 20–40 Pa te hebben zodat deze fluffy laag zonder verstoringen/menging op een niet te steile helling blijft liggen en dus niet zo maar in locale verdiepingen kan komen. De onderbouwing wordt in paragraaf 5.12 gegeven. In de volgende paragraaf vertalen we de erosieproeven in een equivalente bodemschuifspanning voor onderzoek aan de hand van simulaties met windgedreven stroming en golven.

5.9 Bodemsnelheid voor begin van erosie

In de recente 3D simulaties (aug.-okt. 2007) met Delft3D-Flow bestaat de (sigma-) laagverdeling uit 15 lagen waarvan de dikte van de bodemlaag 1.43% van de locale waterdiepte bedraagt. Dit houdt in een laagdikte van 20 cm in 14m diepe locaties en van 2.9 cm in 2m waterdiepte. De bodemsnelheid wordt halverwege de bodemlaag berekend d.w.z. 10 cm boven de bodem bij 14m waterdiepte en 1.5cm bij 2m waterdiepte. Deze laagdikte achten we voldoende klein om een goede schatting van de bodemsnelheid te leveren.

Voor deze simulaties zetten we deze stadia in erosiesnelheden als volgt om in een bodemschuifspanning.

In Delft3D-Flow wordt de Chézy coëfficiënt $C=60 \sqrt{m}/s$ als volgt omgezet in de equivalent hydraulische ruwheidshoogte z_0 bij waterdiepte h :

$$z_0 = h \exp \left\{ -1 - \frac{\kappa C}{\sqrt{g}} \right\} \quad (5.11)$$

met Von Kármán constant $\kappa=0.4$ en zwaartekrachtversnelling $g=9.8 \text{ m/s}^2$. Deze ruwheidshoogte wordt in Delft3D-Flow gebruikt om de bodemschuifspanning τ_b uit te rekenen volgens:

$$\tau_b = \rho_w u_*^2 \quad (5.12)$$

met ρ_w de dichtheid van water. Vervolgens wordt de schuifspanningsnelheid u_* gerelateerd aan de snelheid op de helft van de bodemlaag met een dikte van 1.43% van de waterdiepte in het σ -coördinaten stelsel volgens:

$$\frac{U\left(\frac{1}{2}\Delta\sigma\right)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left\{ 1 + \frac{1}{2} \Delta\sigma \exp \left(1 + \frac{\kappa C}{\sqrt{g}} \right) \right\} = 9.4 \quad (5.13)$$

Voor een gesimuleerde bodemsnelheid van 3cm/s geldt dan een bodemschuifspanning van:

$$\tau_b = \rho_w \left(\frac{0.03}{9.4} \right)^2 \approx 0.01 [\text{Pa}] \quad (5.14)$$

Voor 10 cm/s geeft (5.15) een equivalente schuifspanning van ca. 0.1 [Pa].

Overigens onderbouwt deze analyse het in eerdere studies gehanteerde criterium voor overschrijding van een bodemschuifspanning van 0.01 [Pa]. Met meer zekerheid kunnen we nu de schuifspanning van 0.01 [Pa] als begin van erosie stellen en 0.1 [Pa] als het bestaan van een fluffy water-sediment laag. Wanneer golven geen rol spelen dan is voorgaande equivalent met 3 cm/s en 10 cm/s gesimuleerde bodemsnelheid.

5.10 De stroomsnelheden juist boven de verdiepte bodem ; 3D simulaties

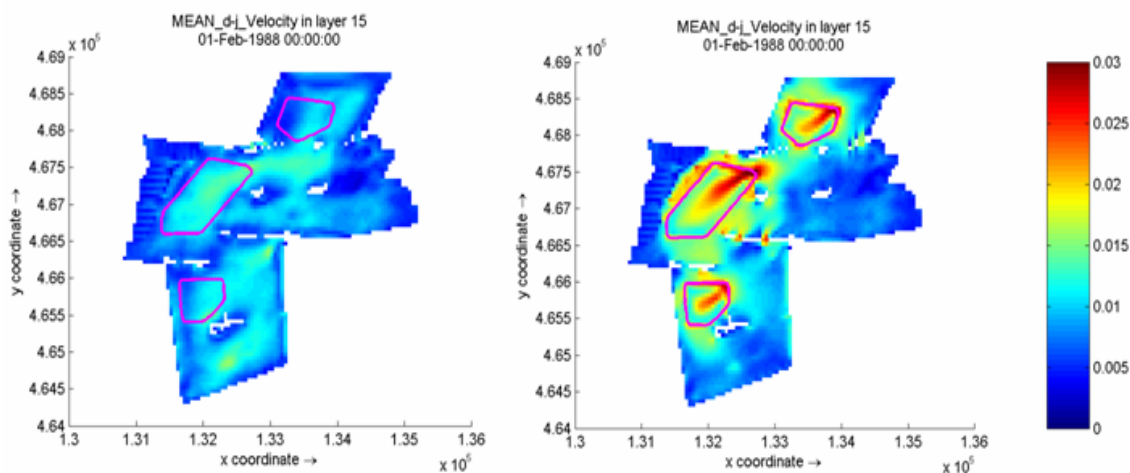
Zonder gebruik te maken van onze simulaties in 2007 was en is al duidelijk dat in de lokale verdiepingen met diepten van 8-14m de orbitaalbewegingen van de wind gegenereerde golven in de Loosdrechtse Plassen verwaarloosbaar zijn. In Appendix A wordt de verdwijnende invloed van golven en de toenemende stroming bij het lokaal verdiepen van de Loosdrechtse Plassen verder onderbouwd.

De vraag is dan of de gemiddelde stroomsnelheid in de lokale verdiepingen voldoende beperkt blijft opdat sedimentatie de erosie kan overheersen. In de eerdere rapportages is men ook van dit standpunt uitgegaan. Echter, in de eerdere rapportages is zonder experimentele onderbouwing een kleine bodemschuifspanning van 0.01 Pa als erosiecriterium gehanteerd. Door voornoemde erosie-experimenten kunnen we dit criterium vervangen door en preciseren tot een bodemsnelheid en we gebruiken 3 cm/s als grens voor het begin van erosie.

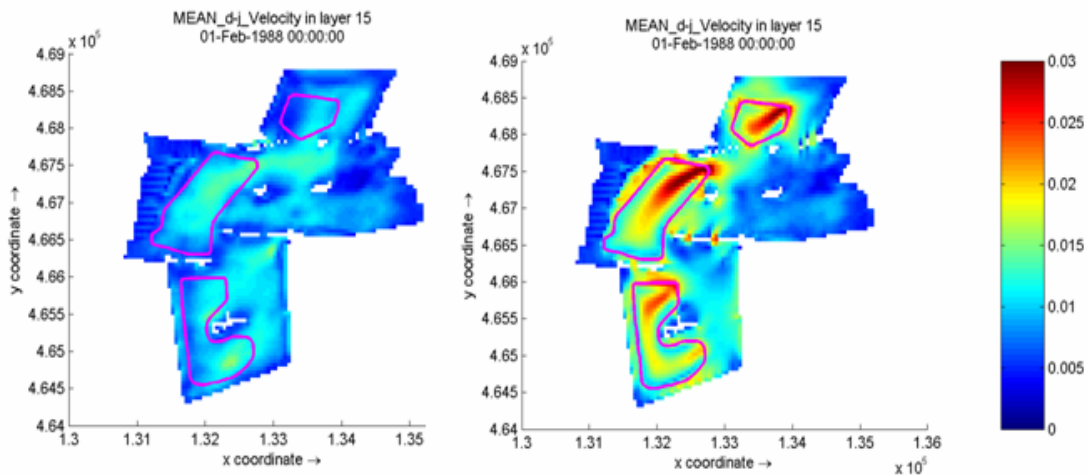
Figuren 5.15 en 5.16 tonen de tijdsgemiddelde snelheid halverwege de onderste rekenlaag voor de onverdiepte en voor beide varianten van de verdiepte situatie. De golf-stroom interactie en alle in A.3 genoemde golfbijdragen aan de stroming en turbulentie zijn hierin toegepast. Zoals in hoofdstuk A.2 met Figuur A.2 is gedemonstreerd neemt in Figuren 5.15 en 5.16 de gemiddelde snelheid in de verdieping toe ter plaatse van en in vergelijking met de onverdiepte situatie. Louter gebaseerd op stroomsnelheid is verdiepen derhalve niet gunstig, zoals besproken in hoofdstuk A.2.

In de verdiepte situaties zijn duidelijk zichtbaar de rode vegen van gemiddelde bodemsnelheden van 3cm/s of meer. Kwalitatief komt dit overeen met het patroon in de demonstratie van de stroomaantrekkende werking van een put, zie Figuur A.2. De indruk bestaat dat ten eerste de dominant sterke wind uit ZW en de lengte van de verdieping in ZW-NO richting de afmetingen en de grootte van de zones van bodemsnelheden van min. 3 cm/s bepalen.

Gezien de stroomaantrekkende werking van de putten en de orientatie van de stroming in de putten tegen de heersende windrichting in is de locatie van de putten tegen de westelijke oevers gunstig gekozen. Door deze locaties wordt de stroming in de putten wat gesmoord omdat deze niet vrij uit de put in ZW-richting kan divergeren. Anderzijds zullen de westelijke randen van de putten een minder gunstiger stromingsklimaat voor de vestiging van waterplanten bieden, maar daarvoor is elders voldoende plasbodem beschikbaar.



Figuur 5.15 Over 1 dec. tot 1 febr. '88 gemiddelde bodemsnelheid in onverdiepte (links) en verdiepte (rechts) Loosdrechtse Plassen voor het AGV alternatief. Voor referentie zijn in de linker figuur de contouren van de verdiepingen volgens de rechter figuur overgenomen



Figuur 5.16 Over 1 dec. tot 1 febr. '88 gemiddelde bodemsnelheid in onverdiepte (links) en verdiepte (rechts) Loosdrechtse Plassen voor het Wijde Meren alternatief. Voor referentie zijn in de linker figuur de contouren van de verdiepingen volgens de rechter figuur overgenomen

De erosie-experimenten tonen dat veel van het eerder opgewerkte slib weer binnen een uur sedimenteert doordat 50% een valsnelheid heeft van minimaal 1 mm/s wat bij de heersende turbulentie waarschijnlijk een dunne fluffy water-sediment laag boven de bodem geeft. Wanneer de bodemsnelheid, gemiddelde over maanden, onder de 3 cm/s ligt zal er door variaties in wind en –richting zeker eens een hogere snelheid optreden, waarbij de bodem erodeert, er een fluffy water-sediment laag ontstaat waarvan tenminste 50% weer snel zal bezinken.

Op basis van de huidige stand van de simulaties waarbij statistische overwegingen en kansverdelingen nog niet zijn betrokken concluderen we dat in de verdiepingen er een stromingstoestand heerst die de locale bodem nog in kritieke toestand houdt voor erosie.

De tijdsgemiddelde snelheid is overigens een beperkt hanteerbaar criterium en het is beter de kansverdeling van snelheidsvariaties te beschouwen. Dit kan met de huidige simulaties verder worden geanalyseerd waarbij de rekentijd ons nu in het gegeven tijdsbestek voor dit rapport parten speelt. Vanwege de rekentijd blijft de periode van analyse met 3D stromingssimulaties met Delft3D-Flow per uur gekoppeld aan 2D golfsimulaties met SWAN beperkt tot slechts 3 maanden. Er is gekozen voor 1 dec. tot 1 febr. '88 als de winterse periode zonder eventuele thermocline vorming en met kans op hogere windsnelheden dan in de zomer. De volgende paragraaf heft deze beperkingen ten dele op.

5.11 Stroming en golven over ondiepe en verdiepte bodem met IDV simulaties

Gezien het beperkte tijdsbestek is getracht de voorgaande conclusies verder te onderbouwen met zg. 1DV simulaties. Hierbij worden in één horizontale positie de windgedreven stroming en de golven berekend onder willekeurige stroming- en golfrichtingen en de daaruit resulterende bodemschuifspanning. In tegenstelling tot de 3D-berekeningen moet er in de 1DV-simulaties een recept voor de golfhoogte en golfperiode worden toegepast en voor

de diepte-gemiddelde stroming. Immers het 1DV model is blind voor de ruimtelijke variaties in windgedreven stroming en ruimtelijke variaties in golfopwekking.

Schatting golfhoogte/golperiode voor 1DV simulaties

Voor het laatste vertrouwen we de recepten uit de Shore Protection Manual zoals die in (Hurdle & Stive, 1989) zijn samengevat tot een vloeiende overgang tussen korte en lange golven, of anders gezegd golven op resp. diep of ondiep water. De nauwkeurige waarnemingen en overeenkomsten in de Breukeleveense Plas (Los et al., 1995) vormen hier nu de referentie voor de kwaliteit. De strijklengte is 1.5 km als kenmerkende afstand tot hoger wal t.o.v. de verdiepingen.

De meest kritieke situatie treedt op als de golven zich parallel aan de stroming voortplanten en deze keuze is in het 1DV-model gemaakt omdat de richting van de golven en van de stroming op diverse locaties in de complexe geometrie van de Loosdrechtse Plassen met eilandjes, legakkers en nauwe openingen niet volgens de windrichting zal zijn.

Schatting diepte-gemiddelde snelheid voor 1DV simulaties

Voor de diepte-gemiddelde stroming kan theoretisch worden getoond dat deze evenredig is met de windsnelheid. Immers het kwadraat van de windsnelheid geeft de aandrijvende windschuifspanning die voor een verhang zorgt, zie Hoofdstuk A.2. Vervolgens treden er in quasi-stationaire condities er horizontale circulaties op waarbij het verhang als aandrijving weer in evenwicht raakt met de bodemschuifspanning. De wortel uit deze bodemschuifspanning is weer evenredig met de windsnelheid waaruit dus het evenredige verband tussen wind en diepte-gemiddelde snelheid volgt. In werkelijkheid spelen dynamische instellingen op de veranderlijke wind een rol in de respons tot diepte-gemiddelde snelheid.

Uit 3D simulaties volgt inderdaad een evenredig verband tussen diepte-gemiddelde stroming en wind, dit verband is plaatsafhankelijk t.g.v. de horizontale stromingspatronen, zie b.v. Figuur A.2. De evenredigheidscoëfficiënt tussen diepte-gemiddelde stroming en wind is dus plaats- en diepteafhankelijk. Aan de hand van de 3D-simulaties is op enkele locaties van de verdiepingen deze evenredigheidscoëfficiënt voor de huidige/onverdiepte en verdiepte situatie vastgesteld. Voor 14m diepte besloten we tot de factor 0.008 oftewel 8 cm/s bij 10m/s windsnelheid en bij 2m diepte de factor 0.00533 oftewel 5.33 cm/s diepte-gemiddelde snelheid bij 10m/s windsnelheid. Dit geeft 50% hogere snelheid in verdiepte delen. Overigens is in Figuur A.2 de rechte lijn voor de daarin genoemde situatie “alleen stroming” gebaseerd op de evenredigheidscoëfficiënt 0.00533 voor 2m waterdiepte.

De uitkomsten van 1DV-simulaties

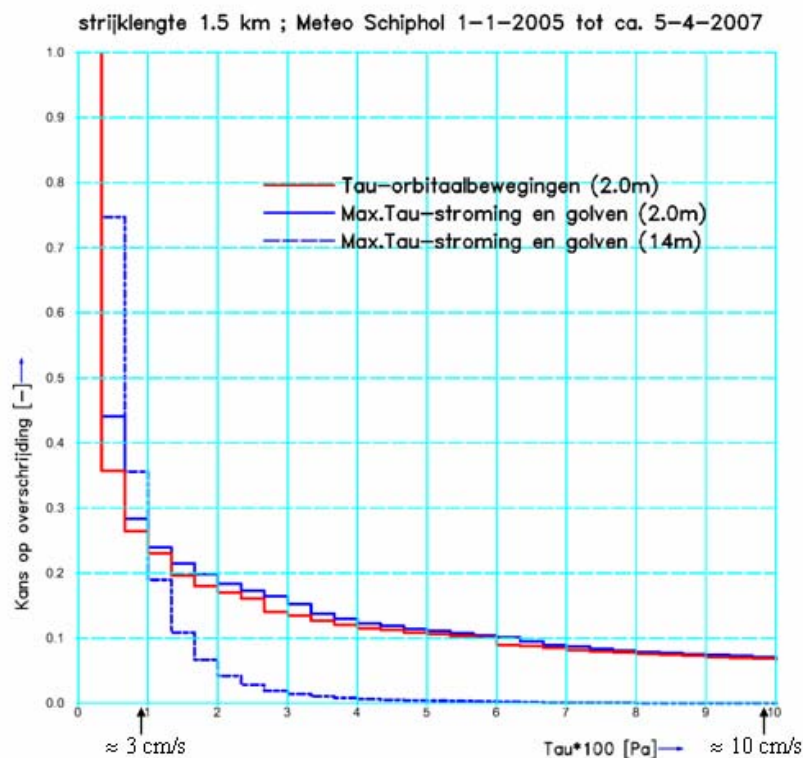
Aan de hand van voorgaande instellingen zijn de 1DV simulaties uitgevoerd. Voor een statistisch meer betrouwbare analyse is een periode van ca. 820 dagen genomen met de atmosferische condities van Schiphol. Inherent aan het 1DV model wordt de eventuele vorming van een temperatuurspronglaag (thermocline) berekend. In principe kan deze code ook de vorming van ijs berekenen maar er is ons nu niets bekend over de invloed van een berekende fractie van ijsbedekking op het golfklimaat, daarom besloten we ijsvorming niet in te schakelen.

De berekening van de golf-gemiddelde bodemschuifspanning voor de stromingsweerstand en de maximale bodemschuifspanning die tijdens de gecombineerde stroming en golfbewegingen optreedt is conform die in het gekoppelde SWAN - Delft3D-Flow systeem.

Ook hier is gekozen voor de formuleringen volgens het model van Fredsøe-1984 (invoer parameter: FR84).

Figuur 5.17 toont de resultaten van deze 1DV berekeningen uitgedrukt in de overschrijding van de bodemschuifspanning en voor de huidige ondiepe situatie (2m) en verdiepte (14m) situatie. De rode lijn toont de bijdrage van alleen de golven op 2m diepte en deze bijdrage verdwijnt, zoals voorspeld, bij 14m diepte. De blauwe lijn is de totale en maximale bodemschuifspanning. Als referentie is langs de horizontale as de equivalente eroderende bodemsnelheid aangegeven die correspondeert met de erosie-experimenten op de bodemmonsters die op 6 sept. 2007 zijn gestoken.

Gezien de verschillende keuze van evenredigheidscoëfficiënten en golven parallel aan stroming, bevelen we aan om deze 1DV-model resultaten eerder kwalitatief dan strikt kwantitatief te beoordelen. Figuur 5.17 onderstreept de marginaal verbeterde situatie in de lokale verdieping voor sedimentatie. In de huidige en verdiepte situatie is er nagenoeg dezelfde kans dat er een begin van erosie optreedt (refererend aan 3 cm/s). Echter, de kans op de vorming van een fluffy water-sediment laag is in de verdiepte situatie geringer dan in de huidige toestand. In de huidige situatie is het mogelijk dat zelfs de fluffy laag volledig in suspensie wordt gebracht terwijl in de verdiepte situatie dit zeer zeldzaam kan voorkomen.



Figuur 5.17 Kans op overschrijding van de maximale bodemschuifspanning, gebaseerd op golven parallel aan de stroming bij verschillende waterdiepten, volgens 1DV-simulaties. Ter vergelijking is het begin van erosie bij een bodemsnelheid van 3 cm/s en het optreden van een fluffy water-sediment laag bij 10 cm/s aangegeven

We concluderen dat voor de balans van zwevend stof de erosie in voldoende diepe putten verwaarloosd mag worden wat in hoofdstuk 4 leidde tot de formule:

$$\overline{EA_{put}}^{-1} = 0 \quad \text{mits } h_{put} \geq 4m \quad (4.8)$$

Figuren 5.15 en 5.16 tonen dat buiten de putten de erosie kan toenemen door de stroomaantrekkende werking van de putten. Deze constatering leidde in Hoofdstuk 4 tot de introductie de factor $\chi_{1,0}$ (>1) voor de toename in erosie is door de stroomaantrekkende invloed van de putten en de dientengevolge verhoogde erosieflux:

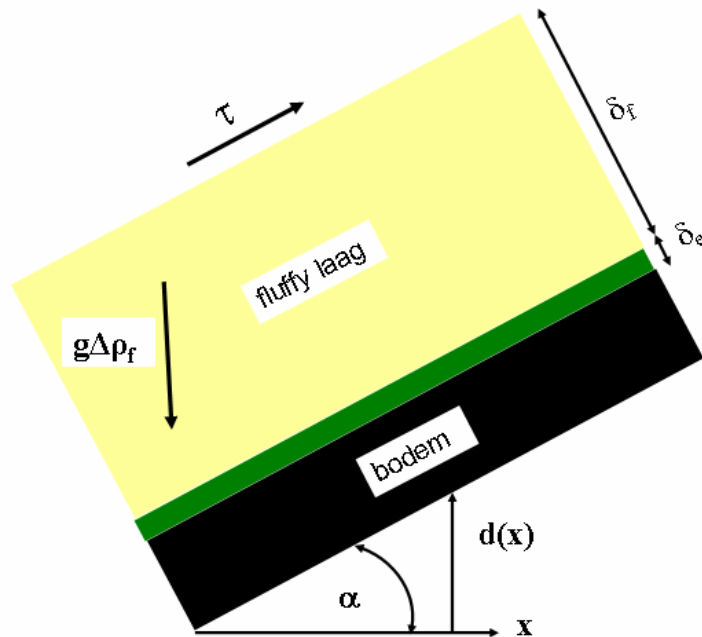
$$\overline{EA_{LP}}^{-1} = \overline{E(A_{LP} - A_{put})}^{-1} = \chi_{1,0} \overline{EA_{LP}}^{-1} \left(1 - \frac{A_{put}}{A_{LP}} \right) \quad (4.9)$$

Met voorgaande analyse hebben we aangetoond dat in de putten de slappe bodem weliswaar in een toestand van milde erosie wordt gebracht maar dat er een veel geringere kans is op het opwervelen van fijne deeltjes uit de moddernevel van de geërodeerde bodem.

In de volgende paragraaf wordt onderzocht of de moddernevel, zo die al ontstaat boven de putbodem, door de stroming de put kan worden uitgestuwd.

5.12 Stroming van fluffy laag tegen helling

Beschouw een bodem met diepte d en met hellingshoek α t.o.v. de horizontale x -richting met een fluffy sediment-water laag met verhoogde dichtheid $\Delta\rho_f$ t.o.v. het schone water erboven en met dikte δ_f die onderhevig is aan een schuifspanning τ .



Figuur 5.18 Fluffy-bodem-laag (groen) geërodeerd tot fluffy-laag (geel) onderhevig aan schuifspanning τ tegen helling

Uit statisch evenwicht volgt dan het verband:

$$I = \sin \alpha = \frac{\partial d}{\partial x} = \frac{\tau}{g \delta_f \Delta \rho_f} \quad (5.15)$$

Massabehoud van de erosie over dikte δ_e van de toplaag van de bodem met dichtheidsverschil $\Delta \rho_{toplaag}$ en de daaruit ontstane fluffy-laag met dikte δ_f verlangt:

$$\delta_f \Delta \rho_f = \delta_e \Delta \rho_{toplaag}$$

Substitutie van dit massabehoud in de vergelijking voor statisch evenwicht van de fluffy-laag op een hellende bodem geeft:

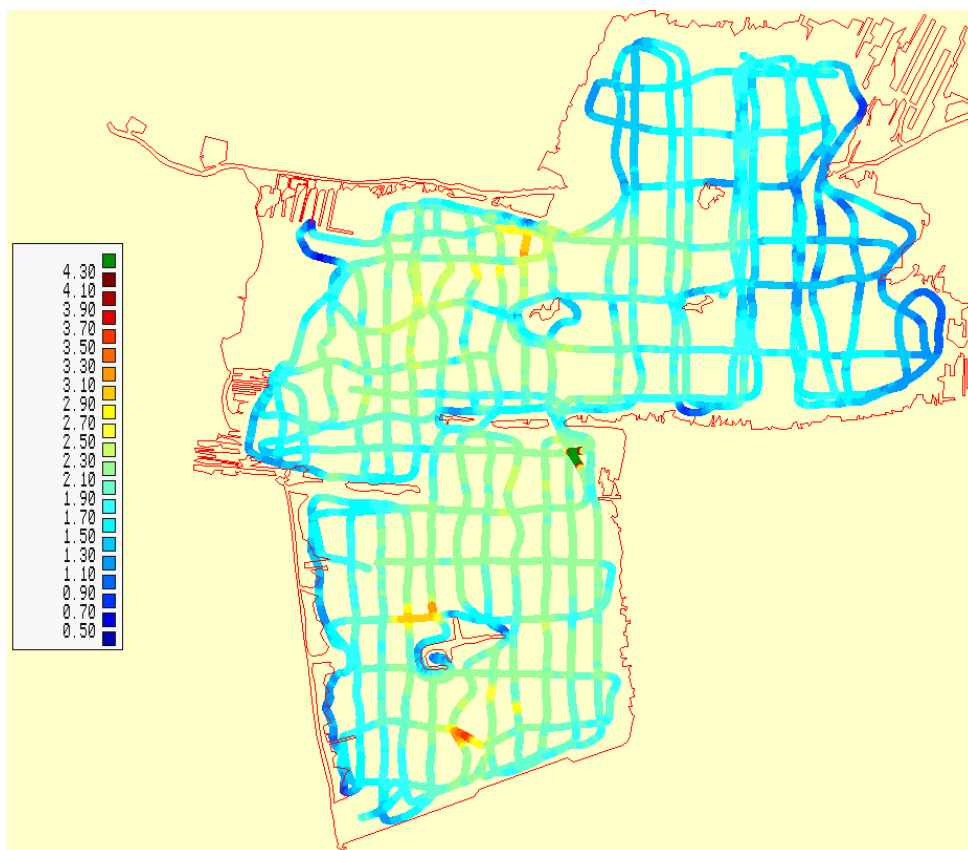
$$I = \sin \alpha = \frac{\partial d}{\partial x} = \frac{\tau}{g \delta_e \Delta \rho_{toplaag}} \quad (5.16)$$

Schattingen zijn dat de concentratie van slib/veen in de toplaag van de waterbodem ca. 35 kg/m³ bedraagt (Cornelisse en Grootenboer, 2007). Wanneer er 1cm van deze bodemlaag wordt opgewerveld bij een daarvoor kenmerkende schuifspanning van 0.1 Pa geeft dit voor een 1:34 helling statisch evenwicht. Des te meer erosie optreedt, des te geringer de helling van statisch evenwicht. Omgekeerd gesteld: gegeven een helling van 1:7 en 35 kg/m³ dichtheid van de toplaag dan kan bij 0.1 Pa schuifspanning slechts een 2 mm dunne toplaag als fluffy-laag deze helling worden opgestuwd. Zodra de geërodeerde toplaag groeit kan de dan zwaarder geworden fluffy-laag een verdieping met hellingen van 1:7 niet meer uitstromen.

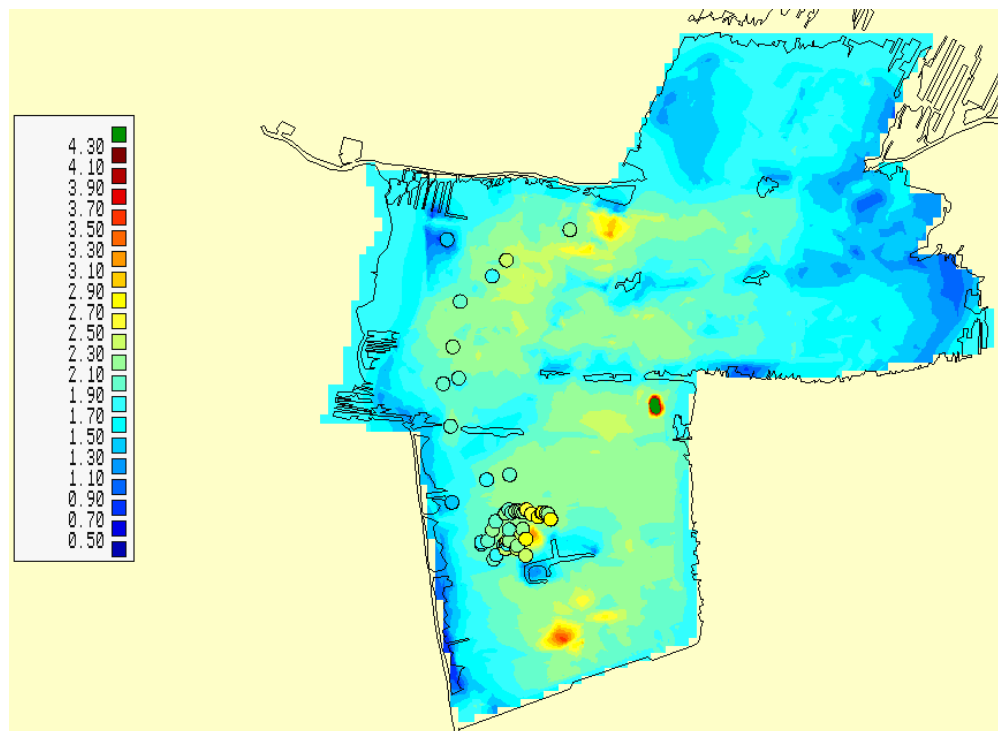
Uit voorgaande concluderen we dat wanneer een moddernevel boven de putbodestroming ontstaat deze in de put zal blijven. Het omgekeerde is dus zeker mogelijk nl. dat een vloeibaar gemaakte fluffy laag (moddernevel) buiten de putten de put in zal stromen. De stroomaantrekkende werking buiten de putten (zie Figuur 5.15 en 5.16) zal het ontstaan van een dergelijke moddernevel bevorderen. Aanvullend bewijs daarvoor vinden we in de analyse van de verandering van de diepte van 10 oude zandwinputten en dat is het onderwerp van de volgende paragraaf.

5.13 Het vollopen van de putten

Volgens (Nieuwenhuyze, 1986) zijn er in de Loosdrechtse Plassen in de periode 1959-1977 tien zandwinputten gegraven waarvan sommigen tot mei 1985 zijn aangevuld. In Tabel A.1 zijn de gegevens uit echolood en handmetingen in mei 1985 volgens (Nieuwenhuyze, 1986) overgenomen. Figuur 5.13 toont de locaties van deze putten. In 2002 is middels sleepproeven van een buis met drukopnemer de diepte van de Loosdrechtse Plassen gemeten, zie Figuur 5.19. De hieruit geïnterpoleerde diepte is in Figuur 5.20 weergegeven samen met enkele aanvullende dieptemetingen tijdens onze veldmetingen (cirkels met kleur conform diepte in Figuur 5.20).



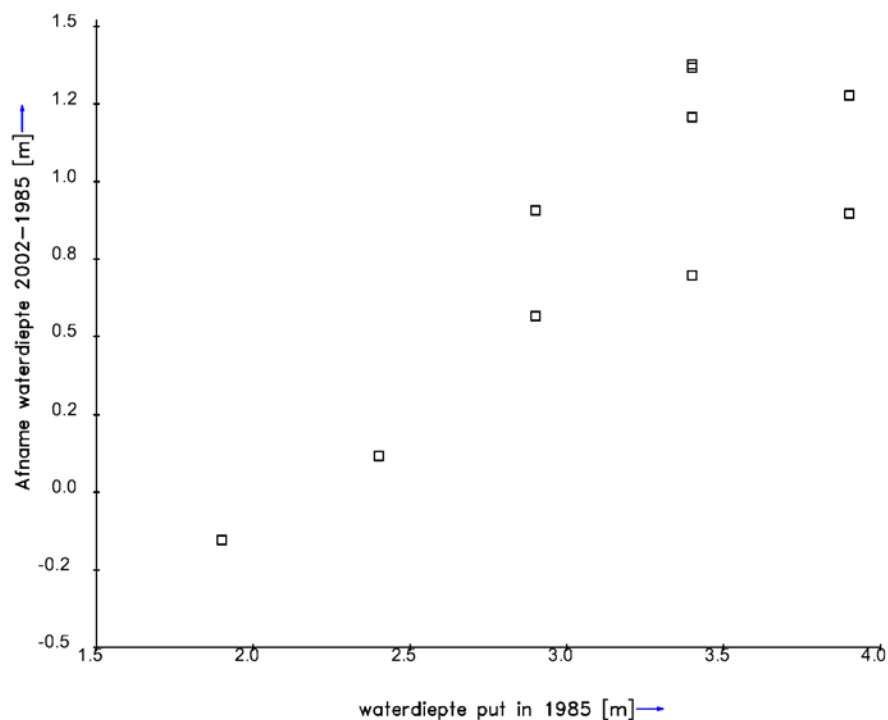
Figuur 5.19 Waterdiepte volgens sleepproeven door Medusa in 2002



Figuur 5.20 Door WL geïnterpoleerde waterdieptemetingen uit Figuur 5.19 vergeleken met metingen op 6 sept. 2007 (Cornelisse en Grootenboer, 2007); de kleur in de cirkels is de gemeten diepte

Vergelijken van deze dieptemetingen uit 1985 met die van Medusa in 2002 toont onmiddellijk dat deze putten ondieper zijn geworden. Het is Waternet noch WL bekend of er sindsdien slibdeposities hebben plaatsgevonden. Vooralsnog veronderstellen we dat de zandwinputten sinds mei 1985 tot 2002 door natuurlijke processen zijn dichtgeslibd. De datering op basis van Cesium (Medusa, 2007) weerlegt deze aanname niet.

In Figuur 5.21 wordt het verschil tussen de Medusa-2002 waterdieptemetingen en die in mei 1985 vergeleken met de waterdiepte in de zandwinputten dd. mei 1985. Vooral de diepe putten dd. mei 1985 lijken aanmerkelijk te zijn dichtgeslibd, aannemende dat er sindsdien geen slib in is gedumpt. Deze bevindingen leverden aanknopingspunten om de samenstelling en herkomst van de bovenste 2m van deze zandwinputten te onderzoeken, zie paragraaf 5.7.



Figuur 5.21 Verschil in waterdiepte ter plekke van de zandwinputten (Figuur 5.13) zoals gemeten in 2002 (Figuur 5.20) en in mei 1985

Figuur 5.21 toont een afname van de putdiepte over een periode van ca. 17 jaar die evenredig is met de putdiepte. In de limiet als de putdiepte gelijk is aan de omringende plasbodem zal de afname stoppen d.w.z. de aantrekkende werking op de vloeibaar gemaakte fluffy laag door verschillen in diepte is dan verdwenen. We benaderen voorgaande met een exponentieel afnemende diepte volgens

$$h_{put}(t) - h_{LP} = (h_{put,0} - h_{LP}) e^{-\alpha t} \quad (5.17)$$

waarbij $h_{put,0}$ de putdiepte is in mei 1985. De snelheid waarmee de putdiepte afneemt luidt dan:

$$\dot{h}_{put}(t) = -\alpha \{h_{put}(t) - h_{LP}\} \quad (5.18)$$

waarbij uit Figuur 5.21 wordt geschat $\alpha \approx 0.06/\text{jaar}$. In hoeverre Figuur 5.21 mag worden geëxtrapoleerd naar grotere putdiepte is niet bekend. Een onderschatting van de snelheid waarmee de waterdiepte boven een put afneemt is ca. 5 cm/jaar voor een oorspronkelijk diepte van 4m. Deze aangroeisnelheid is vele malen groter dan uit depositie volgt. Voor de AGV-variant met 120 ha putten en een concentratie van 42 gC/l in de putbodem is deze aangroeisnelheid equivalent met een flux van ca. 2500 tonC/jaar. Een dergelijk flux is vele malen groter dan de netto depositie van orde-grootte 160-180 tonC/jaar (Figuur 2.11-2.15).

We concluderen dat de putten zullen volstromen met de vloeibaar gemaakte fluffy laag rond de omtrek van de putten en dat daarmee ook de vloeibaar gemaakte fluffy laag op grotere afstanden tot de putranden langzaam naar de putten zullen stromen. Echter, de plasbodem bestaat uit meters dikke veenlagen die volgens de bodemonsters (Cornelisse en Grootenboer, 2007) ook erodeerbaar is. We verwachten daarom dat de afstroming van deze vloeibaar gemaakte bodem naar de putten niet leidt tot vermindering van de resuspensie van fijn zwevend stof

Zonder aanvullende maatregelen zal het volume van de putten in de loop der jaren afnemen waarmee het totale plasvolume afneemt en de concentratie zwevend stof zal toenemen bij gelijkblijvende erosie buiten de putten. Echter, gegeven de putdiepten in de AGV- en WM-varianten verstrijken er voldoende jaren waarin waterplanten zich zouden kunnen vestigen, aannemende dat aan overige condities voor vestiging van planten wordt voldaan. In deze periode wordt de rol van de putten nl. het verlagen van de concentratie zwevend stof in de waterkolom overgenomen door de afnemende resuspensie van zwevend stof op locaties waar planten zich hebben gevestigd.

6 Aanbevelingen

Het doel van een mogelijk vervolgonderzoek is om de sedimentbalans meer gedetailleerd en ruimtelijk onderscheidend op te zetten, waarmee dan de onzekerheidsmarges kunnen worden verkleind. Dit impliceert nieuwe berekeningen van de hydrodynamica, sedimenthuishouding en waterkwaliteit (productie van algen) en de invloed daarvan op het doorzicht en de extinctie in de Plassen. Voor een daadwerkelijk betere modelering en analyse van de resultaten is de beschikbaarheid van aanvullende, gedetailleerde meetgegevens een belangrijk aandachtspunt:

1. De grootste onzekerheden in de bovengenoemde zwevend stof balans zitten in de beschrijving van de bruto sedimentatiesnelheden, de flocculatieprocessen, de resuspensieflux vanuit de fluffy-laag en de ontmenging tijdens resuspensie, en de invloed van chemische en biologische processen hierop. Hieraan zou tijdens eventueel vervolgonderzoek dan ook een verdiepingsslag kunnen worden gemaakt.
2. We bevelen aan de sterkte van de zwevend stofafzettingen in de bestaande putten te volgen om vast te stellen of de in deze putten geaccumuleerde afzettingen stabiel zijn, i.e. niet meer eroderen. Dichtheidsmetingen in de putten helpen om na te gaan of er sprake is van consolidatie van het zwevende stof in de putten.
3. Het fysisch gedrag van de fluffy-laag verdient nadere aandacht, d.w.z. meer sterktebepalingen om het erosiegedrag te bepalen, de vlokvorming en korrelgrootteverdeling, segregatie en eventuele opbreken van de vlokken tijdens resuspensie, enz. Pas wanneer hierover in kwantitatieve zin informatie is kunnen verbeteringen in berekeningen met zwevend stoftransport en de beweging van de fluffy-laag over de bodem worden uitgevoerd.
4. De variatie van de zwevend stof eigenschappen over het jaar (seizoensvariaties in temperatuur, verhouding dood en levend algenmateriaal) is slechts zeer beperkt bekend. Ook het effect van variaties in pH, dat over het seizoen kan variëren met de concentratie levende algen verdient nader onderzoek.
5. Gezien de discussie en onzekerheden ten aanzien van de invloed van golven in de Plassen is het aanbevelenswaardig om langdurig golfmetingen vanaf vaste meetpalen uit te voeren. Op zo'n meetpaal zou ook een instrument kunnen worden bevestigd (ADV) om lage stroomsnelheden, en het energiespectrum van deze snelheden, te meten.
6. Nadere verdieping om de respons van de algenpopulatie op een vermindering van zwevend stof in relatie tot de fosfaatbelasting te kwantificeren op een wijze vergelijkbaar met die in Los et al, 1997 wordt aanbevolen. In aanvulling daarop zal ook meer aandacht moeten worden besteed aan het effect van hogere trofische niveaus.
7. De beschrijving van het lichtklimaat kan verbeterd worden door het gelijktijdig en in dezelfde waterkolom meten van de extinctie en de concentraties chlorophyl, organisch zwevend stof en gloeirest. Deze metingen zouden geconcentreerd kunnen worden in het voorjaar, de periode van het jaar die bepalend is voor de vestiging van waterplanten.

7 Referenties

- Bakema, A.H. 1988. Empirische lichtmodellering voor een aantal Nederlandse meren. WL | Delft Hydraulics report T387, Delft.
- Buiteveld, H. 1990. UITZICHT model voor berekening van doorzicht en extinktie. RIZA rapport 90.058, Lelystad.
- Cornelisse J.M. & M. Grootenboer 2007 Veldmeting Loosdrecht ; karakterisering toplaag. WL|Delft Hydraulics, meetverslag Q4461.02.
- Facchinelli, A., Gallini, L., Barberis, E., Magnoni, M. & A.S. Hursthouse 2001 The influence of clay mineralogy on the mobility of radiocesium in upland soils of NW Italy. *Journal of Environmental Radioactivity*, 56, 299-307.
- Friedlander, S.K. 1977 Smoke, dust and haze. Fundamentals of aerosol behavior. Wiley, New York, 317 pp.
- Gons, H.J. & R. van Keulen 1989 De relatie tussen doorzicht en slib in de Loosdrechtse Plassen in verband met de zwemwaternorm: afsluitend onderzoek. Limnologisch Instituut, intern rapport nr. 1989-10. W.O.L. rapport 1989-4.
- Gons, H.J., R. Veeningen & R. van Keulen 1986 Effects of wind on a shallow lake ecosystem: redistribution of particles in the Loosdrecht Lakes. *Hydrobiol. Bull.*, 20, 109-120.
- Hurdle D.P. & R.J.H. Stive 1989 Revision of SPM 1984 wave hindcast model to avoid inconsistencies in engineering applications. *Coastal Engineering* (12), pp. 339-351.
- Jaarsma N.G. en Penning W.E., 2007. Watersysteemanalyse Loosdrechtse Plassen. Witteveen & Bos rapportcode Loos20-1, WL | Delft Hydraulics project code Q4121
- Kirk, J. T. O. 1983. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge Univ. Press, Cambridge and New York. 401 p. (second edition 1993)
- Leussen, Van, W. 1994 Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport. Dissertatie Universiteit Utrecht, ISBN 90-393-0410-6
- Los F.J., 1991. Mathematical simulation of algae blooms by the model BLOOM II Version 2. WL | Delft Hydraulics report R1310/T0068
- Los F.J., Fokkink R.J., Ouboter M.R.L., Winterwerp, 1995. Onderzoek naar de slibdynamiek van de Breukeleveense Plas: evaluatie van beheersmaatregelen ter verbetering van het doorzicht. WL | Delft Hydraulics rapport T1267/Z0667
- Los F.J., Ouboter M., Fokkink R.J., 1997 Onderzoek naar de slibdynamiek van de Loosdrechtse Plassen met behulp van mathematische modellen. WL | Delft Hydraulics rapport T1571, Delft
- Medusa 2003 Digitaal bestand ruwe gegevens sleepproeven/dieptemetingen in 2003 in Loosdrechtse Plassen, ontvangen van Medusa (R. Koomans) per oktober 2007.
- Medusa 2007 Loosdrechtse Plassen. Analyse van 3 kernen. Medusa rapport, rapp.nr. 2007-185R1.
- Meijer ML, 2000. Biomanipulation in the Netherlands. 15 years of experience. PhD thesis Wageningen University
- Nieuwenhuize, R.F. van, J.C. van Dam, K.A. de Kruijk en A.A., Siebers, 1986. Oriënterend onderzoek naar oorzaken en bestrijding van de slibproblematiek in de Loosdrechtse Plassen. Provinciale Waterstaat Utrecht, Afdeling Natte waterstaat en recreatie, Bureau waterhuishouding en Technische Hogeschool Delft, Afdeling Civiele Techniek, Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing.
- Ouboter M.R.L., Vonk M., Los F.J., 1999. Bijdrage MER aanleg verdiepingen Loosdrechtse Plassen. WL | Delft Hydraulics rapport T2313, Delft
- Penning, W. E., Haasnoot, M., Kuijper, M., Van Buren, R. (2006). Rekenregels voor macrofyten in meren ten behoeve van de KRW. WL | Delft Hydraulics rapport Q4058.00, Delft
- Saffman, P.G. & J.s. Turner 1956 On the collision of drops in turbulent clouds. *J. Fluid Mech.*, 1, 16-30.
- Sanada, Y., T. Matsunaga, N. Yanase, S. Nagao, H. Amano, H. Takada en Y. Tkachenko, 2002. Accumulation and potential dissolution of Chernobyl-derived radionuclides in river bottom sediment. *Applied Radiation and Isotopes*, 56, 751-760.
- Scheffer M, 1998. The Ecology of Shallow Lakes. Elsevier Publishers

- Van Duin, E.H.S., Blom, G., Los, F.J., Maffione, R., Zimmerman, R., Cerco, C.F., Dorth, M. and Best, E.P.H., 2001. Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth, *Hydrobiologia*, 444, 25-42.
- Wang, L.-P., A.S. Wexler & Y. Zhou 1998a On the collision rate of small particles in isotropic turbulence. Part 1: Zero-inertia case. *Phys. Fluids*, 10, 266-276.
- Wang, L.-P., A.S. Wexler & Y. Zhou 1998b Statistical mechanical description of turbulent coagulation. *Phys. Fluids*, 10, 2647-2651.
- Wijngaarden, Van, M., L.B. Venema en R.J. de Meijer, 2002. Radiometric sand-mud characterisation in the Rhine-Meuse estuary Part A. Fingerprinting. *Geomorphology*, 43: 87-101.

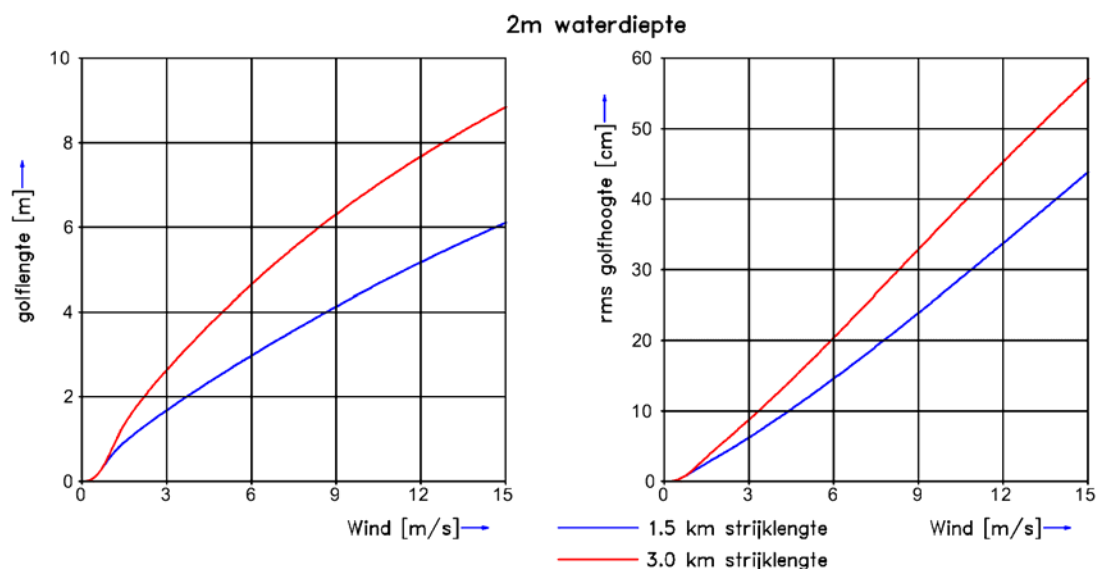
A Aanvullende informatie over de simulatie van golven en stroming

Inleiding

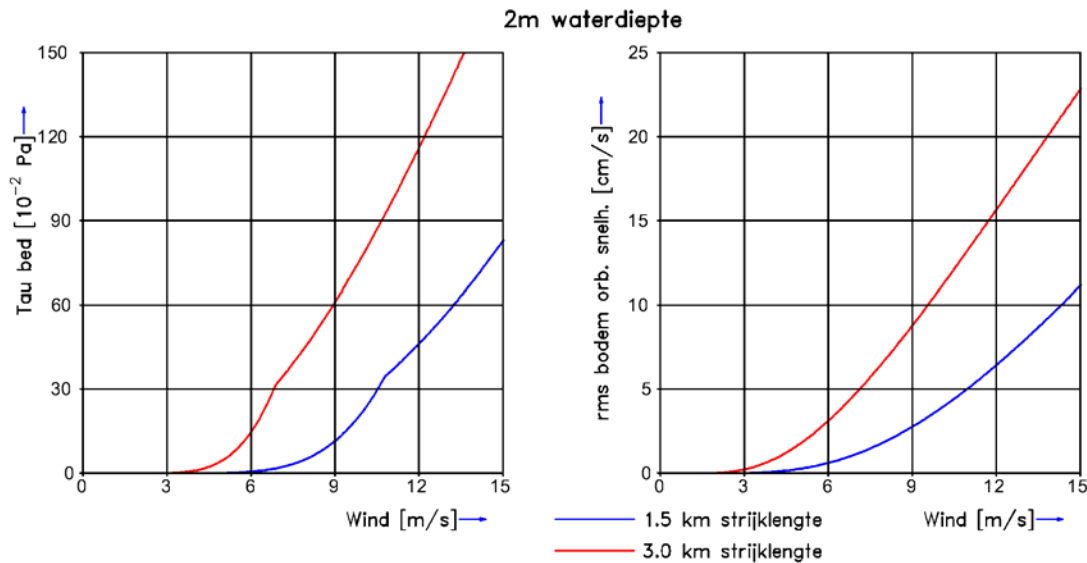
In de Loosdrechtse Plassen creëert de wind oppervlaktegolven en drijft direct een stroming aan en de golven wijzigen deze stroming. Kortom in de Loosdrechtse Plassen hebben golven en stroming dezelfde fysische bron en beiden worden door ijsvorming onderdrukt. Echter, golven en stroming hebben onderscheidende fysische eigenschappen die gebruikt kunnen worden om bodemerrosie te verminderen door lokaal te verdiepen. Dit wordt hierna kortweg toegelicht omdat het van belang is voor de verdere analyses en simulaties.

Golven en verdiepen

Bij gegeven golfhoogte en golflengte of golfperiode neemt de zg. orbitaalsnelheid (oscillerende snelheid) door golven vanaf het wateroppervlak exponentieel af met de diepte. Golflengte en golfperiode zijn uitwisselbare begrippen, langer golven hebben grotere golfperiodes.



Figuur A.1^a Toename van golflengte en rms golfhoogte met windsnelheid op 2m diep water en bij verschillende strijklengten van wind over water



Figuur A.1^b Toename van bodemschuifspanning (Tau-bed) door toename rms orbitaalsnelheid bij de bodem door toenemende windsnelheid, zie ook Figuur A.1^a

Figuur A.1^a toont de toenemende golfhoogte en golflengte bij toenemende wind voor twee kenmerkende strijklengte van wind over de Loosdrechtse Plassen bij 2m waterdiepte. Figuur A.1^b presenteert de amplitude van de orbitaalsnelheid en de daaruit resulterende amplitude van de bodemschuifspanning voor 2m waterdiepte. Echter, voor 8m en 14m waterdiepte verdwijnt de invloed van de golven bij de bodem.

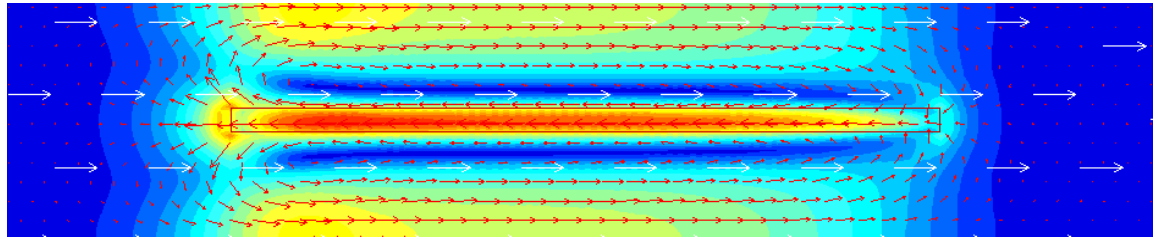
Het ligt dus voor de hand om de plassen te verdiepen zodat de eroderende werking van de golven verdwijnt. Het verdiepen van de plassen geeft wel wat hogere golven bij dezelfde windcondities maar deze groei weegt in het geheel niet op tegen de exponentiele afname door de verdieping.

Door ruimtelijke variaties in de bodem veranderen de golfpatronen en deze wijzigingen resulteren in een golf-stroom-interactie (GSI) kracht op de stroming en het gevolg heet golfgedreven stroming.

Stroming en lokaal verdiepen

De wind drijft ook de stroming direct aan en wel in twee dominante richtingen. In het verticale vlak een recirculatie als betrof het een transportband met de toplaag met de wind meebewegend. De tweede bijdrage komt door horizontale circulatiepatronen die vooral door bodemvariaties ontstaan.

Wanneer nl. de wind overal dezelfde sterkte en de bodem vlak is ontstaat er een door de wind opgestuwde verhanglijn die in statisch evenwicht is met de windschuifspanning, d.w.z. zonder enige horizontale stromingspatronen. Zonder stroming is de helling van het door wind opgestuwde wateroppervlak omgekeerd evenredig met de waterdiepte, dus tweemaal dieper halveert de opstuwing. Wanneer nu een locale sleuf in de bodem wordt aangebracht zal over deze verdieping de opstuwing bepaald door de dominerende ondiepere delen groter zijn dan nodig is voor statisch evenwicht en het surplus aan opstuwing drijft dan een stroming aan en wel tegengesteld aan de wind, zie Figuur A.2.

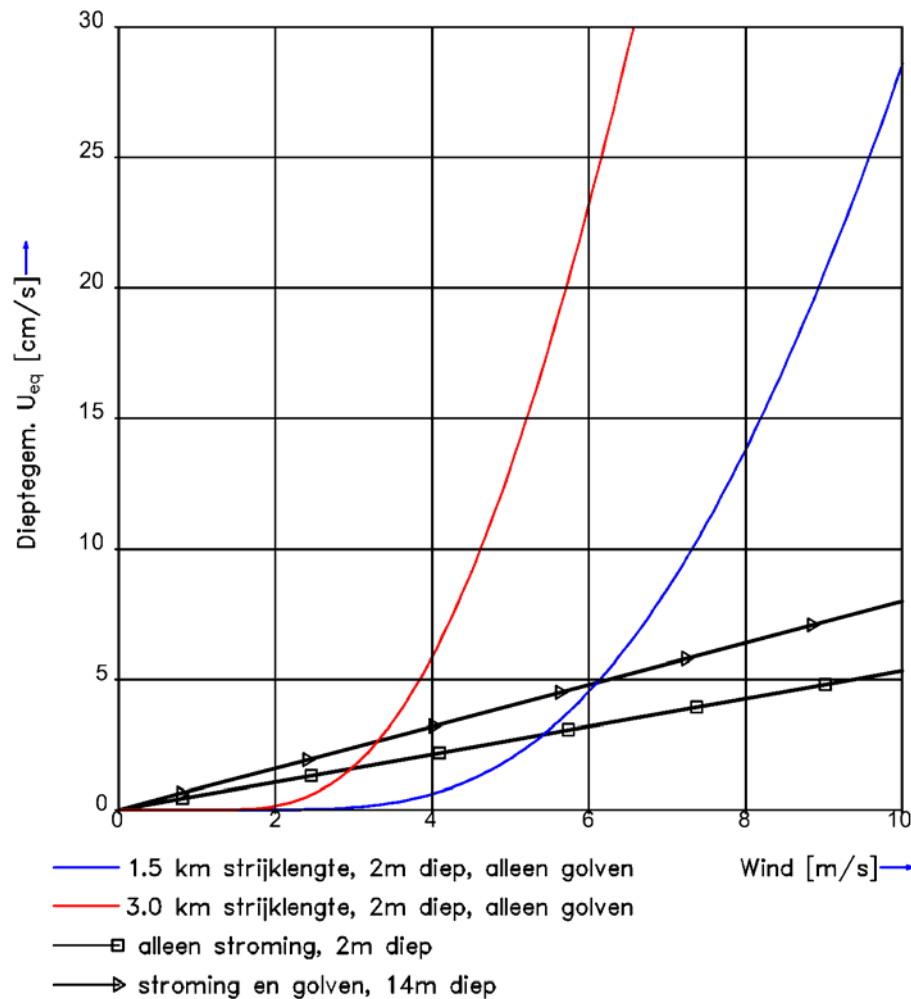


Figuur A.2 Retourstroming (gekleurde pijlen) in 10m diepe sleuf van 100m breedte en 3 km lengte, centraal gelegen in een bassin van 3m diepte, 5 km lengte en 1 km breedte bij 10m/s wind (witte pijlen)

Golven én stroming én lokaal verdiepen

Uit voorgaande volgt dat voor het verminderen van erosie door golven verdiepen gunstig is maar dat door lokaal verdiepen de erosie door stroming toeneemt. De essentiële vraag luidt dus of eroderende werking van golven dermate dominant is in de onverdiepte situatie dat bij lokaal verdiepen de toenemende eroderende werking van de stroming in de verdieping ondergeschikt blijft aan het wegvallen van de eroderende werking van golven in de verdiepingen?

Pas in onze studie in 2007 kan deze vraag op een consistente en veel-omvattende wijze worden beantwoord. Eerder stelde Gons et al. (1986) dat door oppervlaktegolven de bodem van de Loosdrechtse Plassen wordt geërodeerd en het doorzicht wordt beperkt. Gons bewees dat niet maar refereerde naar een andere publicatie voor een prairie-meer waar evenmin over lokaal verdiepen wordt gesproken. Uit de correlaties (Gons et al., 1986) tussen concentraties zwevend slib en wind kan niet het onderscheid tussen golven of stroming worden opgemaakt, evenmin wanneer door ijsvorming zowel stroming als golven worden uitgeschakeld. In het afstudeerverslag (Nieuwenhuyze et al., 1986) wordt wél een poging gedaan om analytisch de bijdragen van stroming en golven op de bodemschuifspanning te kwantificeren, waaruit de twijfel kwam of de eroderende bijdrage van de stroming t.o.v. van golven verwaarloosbaar is? In de studies (Los et al., 1997) en (Ouboter et al., 1999) zijn separaat berekeningen voor stroming en schattingen voor de golfeigenschappen en eroderende werking gemaakt maar niet in één samenhangend golf-stroming-interactie concept.



Figuur A.3 De maximale bodemschuifspanning door windgolven bij verschillende strijklengten (zie Figuur A.1) op 2m waterdiepte vertaald in een equivalente diepte-gemiddelde snelheid ter vergelijking met de diepte-gemiddelde snelheid door alleen de windgedreven stroming in een locatie

Wat ontbrak in voorgaande studies is wat Figuur A.3 samenvat: een vergelijking tussen de bodemschuifspanning door windgegenereerde golven en die door de windgedreven stroming maar vertaald in een diepte-gemiddelde snelheid, gebaseerd op Chézy-coëfficiënt $C=60$. De rechte lijnen in dit figuur vormen de vereenvoudigde weergave van de respons van de windgedreven stroming op een 2m en 14m diepe locatie in de Loosdrechtse Plassen. Deze respons volgt uit simulaties waarin de wisselwerking tussen golven en stroming is meegenomen, zoals beschreven in Hoofdstuk A.2. Deze lijnen vatten de nieuwe bijdragen van complexe simulaties samen.

Figuur A.3 toont dat zodra de windgedreven diepte-gemiddelde snelheid van enig belang voor bodemerosie wordt, de golven op 2m waterdiepte de bodemschuifspanning zullen domineren maar niet op 14m waterdiepte. Gezien Figuur A.2 resteert de vraag of op de grote waterdiepten van 14m de bodemschuifspanning van alleen de windgedreven stroming voldoende beperkt blijft om sedimentatie te laten overheersen boven erosie. Deze vraag wordt in dit rapport voor de Loosdrechtse Plassen beantwoord.

B Gegevens zandwinputten

Meting diepte in zandwinputten volgens (Nieuwenhuyze et al., 1986) en vergeleken met dieptemetingen van Medusa in 2002.

 alle diepten positief

kolom - 1 : X-coördinaat
 kolom - 2 : Y-coördinaat
 kolom - 3 : ontgronding
 kolom - 4 : max. huidige diepte (NAP)
 kolom - 5 : huidige diepte vaste ondergrond(m)
 kolom - 6 : max. dikte sliblaag (kolom 5 - kolom 4)
 kolom - 7 : verschil (m)
 kolom - 8 : max. huidige diepte (NAP) - 1.2 (kolom 4 - 1.2)
 kolom - 9 : diepte (m) in de WL-bodem (tegeltjes aanpak)
 kolom - 10 : verschil (m) (kolom 8 - kolom 9)
 kolom - 11 : referentie locatie in Figuur A.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
132500.	467420.	6.50	4.60	4.85	0.25	1.65	3.4	2.19	1.21	'B '
132640.	467580.	6.50	4.60	4.85	0.25	1.65	3.4	2.70	0.70	'K '
133740.	467420.	5.80	4.60	4.80	0.20	1.00	3.4	2.02	1.38	'P '
132540.	466740.	7.50	3.10	3.60	0.50	3.90	1.9	2.05	-0.15	'G '
131870.	465990.	7.50	4.60	5.05	0.45	2.45	3.4	2.03	1.37	'W '
132070.	465510.	7.50	5.10	5.50	0.40	2.00	3.9	2.62	1.28	'M1 '
132800.	465380.	7.50	3.60	3.80	0.20	3.70	2.4	2.28	0.12	'M2 '
132490.	465130.	6.50	4.10	4.35	0.25	2.15	2.9	2.33	0.57	'R2-N'
132630.	465000.	6.50	4.10	4.35	0.25	1.15	2.9	1.99	0.91	'R2-Z'
132360.	464870.	6.50	5.10	5.50	0.40	1.00	3.9	3.00	0.90	'R3 '