

opdrachtgever:

Dienst Waterbeheer en Riolering (DWR)

Bijdrage MER aanleg verdiepingen Loosdrechtse Plassen

M.R.L. Ouboter

M. Vonk

F.J. Los

Verslag

oktober 1999



OPDRACHTGEVER: Dienst Waterbeheer en Riolering (DWR)

TITEL: Bijdrage MER aanleg verdiepingen Loosdrechtse Plassen

SAMENVATTING:

Het rapport beschrijft de antwoorden van WL|DELFT HYDRAULICS op een aantal vragen die betrekking hebben op de aanleg van slibvangen in de Loosdrechtse Plassen. Deze verdiepingen worden aangelegd ter bestrijding van de troebelheid, om zo de ontwikkeling van waterplanten mogelijk te maken.

Voor het aanleggen van de slibvangen is een MER-traject gestart. In het kader van de MER is een aantal vragen gesteld over de huidige situatie. De water- en nutriëntenhuishouding, de waterbeweging en de dynamica van het slib worden beschreven. Ook de gevolgen van de verdiepingen op het stromingspatroon, het slibtransport en de slibbalans worden gegeven. Tevens worden de kans op stratificatie, de veranderingen in golfcondities en de consequenties hiervan en een aanvullende vraag over de capaciteit van de slibvang behandeld.

De verwachting is dat de slibconcentratie van 5 gC/m^3 na de aanleg zal dalen tot onder de 3 gC/m^3 , de streefwaarde; het streefbeeld voor de groei van waterplanten. Hierbij is ervan uitgegaan dat het huidig effectief accumulatieoppervlak kleiner is dan 100 ha (de meest waarschijnlijke schatting) en de productie uit algen 120 tonC/jaar bedraagt.

In de verdiepingen zal in de periode juli tot medio september stratificatie optreden. De effecten hiervan zijn echter gering. De verdiepingen hebben nadelige gevolgen voor de ijsvorming. IJsvorming boven de diepe put zal aanmerkelijk worden onderdrukt, maar ook voor enige vertraging in ijsvorming in het omliggende ondiepe gedeelte zorgen. Dit is een probleem voor de schaatsrecreatie, de verdiepingen moeten ruim worden afgezet en niet te dicht op de oever worden gesitueerd.

De golfcondities zullen in een situatie met verdiepingen aan de oevers met circa 10% toenemen ten opzichte van de huidige situatie voor een windsnelheid in de orde van grootte van 15 m/s. De effecten van de verdieping op de golfcondities voor lagere windsnelheden (5 m/s) zijn zeer beperkt tot enkele procenten. De gevolgen voor watersporters zijn gering. Afslaggevoelige veenoevers waar ook in de huidige situatie onder extreme omstandigheden terugschrijding wordt waargenomen, zullen ook na aanleg van de eventuele bezinkputten afslaan. De mate van afslag is evenredig met de toename van de golfhoogte.

Gezien de onzekerheid in de schattingen kan niet met zekerheid worden vastgesteld dat de verdiepingen over 80 jaar nog op diepte zijn. Overwogen moet worden de verdiepingen verder te verdiepen, tot maximaal 16 meter diep.

REFERENTIES:

VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1	M.R.L. Ouboter M. Vonk F.J. Los	oktober 1999		N.M. de Rooij b/a	P.C.G. Glas
PROJECTNUMMER:		T2313			
TREFWOORDEN:		Troebelheid, verdiepingen, slib			
INHOUD:	TEKST	TABELLEN	FIGUREN	APPENDICES	
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG	<input type="checkbox"/> CONCEPT	<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF		

Inhoud

1	Inleiding	1-1
2	Water- en nutriëntenhuishouding	2-1
	2.1 Waterhuishouding	2-1
	2.2 Nutriëntenhuishouding	2-3
3	Waterbeweging.....	3-1
	3.1 In- en uitstroming.....	3-1
	3.2 Wind.....	3-1
	3.3 Seiches	3-1
4	Slibtransport, slibhuishouding	4-1
	4.1 Slib.....	4-1
	4.2 Troebelheid, zeer fijn slib.....	4-4
	4.3 Totale hoeveelheid slib	4-8
	4.3.1 Huidige hoeveelheid	4-8
	4.3.2 Aangroei van slib.....	4-10
	4.4 Effecten van scheepvaart	4-11
5	Effecten van verdiepingen.....	5-1
	5.1 Stromingspatroon.....	5-1
	5.2 Slibhuishouding	5-2
	5.2.1 methode bepaling effect verdieping op concentratie zeer fijn slib.....	5-2
	5.2.2 Rendement	5-3
	5.2.3 Resultaten gevoeligheidsanalyse	5-5
	5.3 Stratificatie.....	5-5
	5.3.1 Voorkomen van stratificatie	5-5
	5.3.2 Effect stratificatie waterkwaliteit.....	5-8
	5.4 Golfcondities.....	5-11
	5.4.1 Aanpak.....	5-11

5.4.2	Modelresultaten.....	5-13
5.4.3	Gevolgen	5-14
6	Capaciteit van de put	6-1
7	Conclusies en Aanbevelingen	7-1
7.1	Conclusies	7-1
7.2	Aanbevelingen.....	7-3
8	Referenties.....	8-1

Lijst van figuren

Figuur 1 Waterbalansen 1982-1987. Uit Los *et al.*, 1997

Figuur 2 Belasting van ammonium, nitraat, orthofosfaat, totaalfosfaat, chloride en silicium in de tijd naar herkomst 1984-1987. Uit Los *et al.*, 1997

Figuur 3 Belasting naar herkomst voor totaal fosfaat in de 'huidige situatie' d.w.z. situatie 1984-1987 gecorrigeerd voor situatie 1999 met betrekking tot sluislekkage

Figuur 4 Berekend stroombeeld huidige situatie bij 5, 10 en 15 m/s zuidwesten wind.

Figuur 5 C-COD (mgC/l) (seston < 150 µm) Uit Ebert en van Liere, 1992
figuur in de tekst, blz 4-1

Figuur 6 Verloop van de turbiditeit in de Loosdrechtse Plassen (doorgetrokken lijn) windsnelheid en -richting gedurende juli. Uit Gons en van Keulen, 1988.
figuur in de tekst, blz 4-2

Figuur 7 Schema deeltjesgrootteverdeling slib
figuur in de tekst, blz 4-4

Figuur 8 Frequentie van resuspensie volgens relatie van Carper en Bachman (1984). Uit Los *et al.*, 1997

Figuur 9 Herkomst van zeer fijn slib bij verschillende accumulatieoppervlakten

Figuur 10 Slibbalans van het zeer fijne slib in de Loosdrechtse Plassen in de huidige situatie
figuur in de tekst, blz 4-7

Figuur 11 Dikte sliblaag langs de westoever van de Breukeleveense Plas.
figuur in de tekst, blz 4-9

Figuur 12 Schematisatie van de Loosdrechtse Plassen met verdiepingen
figuur in de tekst, blz 5-1

Figuur 13 Bodemschuifspanning door stroming en waterbeweging

Figuur 14 De resultaten van de analyse van de gevoeligheid van de concentratie zeer fijn slib onder invloed van slibvang in de huidige situatie en onder invloed van onzekerheden in andere sturende parameters.

Figuur 15 Simulatieresultaten stratificatiemodel, huidige situatie 2 meter diep, '94.

Figuur 16 Simulatieresultaten stratificatiemodel, huidige situatie 2 meter diep, '97.

Figuur 17 Simulatieresultaten stratificatiemodel verdiepte situatie 14 meter diep, '94.

Figuur 18 Simulatieresultaten stratificatiemodel verdiepte situatie 14 meter diep, '97.

Figuur 19 Berekende waarde van chlorofyl, zuurstof, ammonium, nitraat en orthofosfaat in het bovenste segment met stratificatie (STRAT), zonder stratificatie (NOSTRAT) en zonder verdieping (NOPUT).

Figuur 20 Berekende waarde van chlorofyl, zuurstof, ammonium, nitraat en orthofosfaat in het bodem segment met stratificatie (STRAT), zonder stratificatie (NOSTRAT) en zonder verdieping (NOPUT).

Figuur 21 De Oost-West raai
figuur in de tekst, blz 5-12

Figuur 22 De Zuidwest / Noordoost raai
figuur in de tekst, blz 5-13

Figuur 23 Berekende significante golfhoogte, gemiddelde periode, de piekperiode en de waterdiepte voor de huidige situatie en situatie met bezinkputten voor de relatief hoge windsnelheid van 15 m/s (Oost-West raai)

Figuur 24 Berekende significante golfhoogte, gemiddelde periode, de piekperiode en de waterdiepte voor de huidige situatie en situatie met bezinkputten voor de relatief hoge windsnelheid van 15 m/s (Zuidwest-Noordoost raai)

Figuur 25 Berekende significante golfhoogte, gemiddelde periode, de piekperiode en de waterdiepte voor de huidige situatie en situatie met bezinkputten voor de relatief hoge windsnelheid van 5 m/s (Oost-West raai)

Figuur 26 Berekende significante golfhoogte, gemiddelde periode, de piekperiode en de waterdiepte voor de huidige situatie en situatie met bezinkputten voor de relatief hoge windsnelheid van 5 m/s (Zuidwest-Noordoost raai)

I Inleiding

WL | DELFT HYDRAULICS heeft in opdracht van de Dienst Waterkwaliteitsbeheer van de Provincie Utrecht, thans DWR (Dienst Waterbeheer en Riolering, uitvoerend orgaan van het Hoogheemraadschap Amstel Gooi en Vecht), studies uitgevoerd naar de mogelijkheden tot bestrijding van de troebelheid van de Breukeleveense Plas (Los *et al.* 1995, Los *et al.* 1998) en de Loosdrechtse Plassen (Los *et al.* 1997). Eén van de maatregelen die is onderzocht is het aanleggen van slibvangen in aanvulling op beperking van de fosfaatbelasting. Voor het uitvoeren van deze maatregel voor de Loosdrechtse Plassen is een MER-traject gestart waarin thans een richtlijnennotitie is verschenen.

Op basis van deze notitie heeft DWR aan WL de opdracht verleend een aantal specifieke hoofdstukken van de MER in te vullen en een aantal aanvullende vragen te beantwoorden.

Vragen

Doelstelling van het project is een bijdrage te leveren aan bovenstaande MER op de volgende punten:

1. Bestaande milieutoestand en autonome ontwikkeling
 - a Abiotische aspecten
 - beschrijving water- en nutriëntenhuishouding
 - beschrijving dynamica van het slib
 - beschrijving waterbeweging t.g.v.
 - wind
 - in- en uitstroming
 - seiches
 - b Ruimtegebruik
 - effecten van motorvaart op slibopwerveling
2. Gevolgen voor het milieu
 - verandering in het stromingspatroon t.g.v. verdiepingen
 - de invloed van veranderingen in stromingen op slibtransport
 - beschrijving van de slibbalans
 - inzicht in de kans op stratificatie (bij welke diepte en strijklengte), wat zijn consequenties en welke maatregelen worden getroffen?

Daarnaast zijn de volgende aanvullende vragen gesteld:

- Het bepalen van de hoeveelheid slib die in de verdiepingen geborgen moet kunnen worden om voor vele decennia (80 jaar) geen last meer te hebben van zwevend slib op de plas.
- Bepalen van de invloed van de geplande verdiepingen op de golfslag en de gevolgen hier weer van op veiligheid van watersporters en oeverafslag.

Organisatie

De bijdrage van WL aan de MER 'aanleg verdiepingen in de Loosdrechtse Plassen' is begeleid door een groep, bestaande uit mensen met een uitgebreide ervaring in het studiegebied:

- ir. F.J. Bleeker (DWR)
- ir. G. Blom (RIZA)
- dr. P.C.M. Boers (RIZA)
- drs. J. J. Hofstra (DWR)
- drs. J.H. Janse (RIVM)
- ir. M.A. de Rooter (projectleider) (DWR)

De bijdrage van WL wordt geleverd door het projectteam dat gedeeltelijk ook de voorgaande studies heeft uitgevoerd:

- ir. R. Bakkum
- drs. F.J. Los
- drs. M.R.L. Ouboter (projectleider)
- drs. N.M. de Rooij (kwaliteitsbewaking)
- ir. M. Vonk

Betreffende het gedrag van slib is een bijdrage geleverd door ir. J.C. Winterwerp (WL) en dr. R.J. Fokkink (Technische Universiteit Delft).

De waterbeweging in de plassen ten gevolge van de in- en uitstroming is beschreven door ir. J.C. Winterwerp. De invloed van seiches is beschreven door ir. H.W.J. Kernkamp, de effecten van de motorvaart op slibopwerveling door ir. H.J. Verheij.

De vragen met betrekking tot het voorkomen van stratificatie zijn beantwoord door dr.ir. R.E. Uittenbogaard, de gevolgen hiervan op de waterkwaliteit door drs. F.J. Los.

Vragen rond het bepalen van de invloed van de geplande verdiepingen op de golfcondities zijn beantwoord door dr. ir. R. C. Ris en ir. A.C. Bijlsma. De gevolgen hier van op veiligheid van watersporters en oeverafslag zijn beschreven door ir. H.J. Verheij.

Leeswijzer

De indeling van het rapport is als volgt. De vragen m.b.t. de huidige situatie worden behandeld in de hoofdstukken 2 tot en met 4. In hoofdstuk 5 staan de positieve en negatieve effecten van de verdiepingen beschreven. De capaciteit van de verdiepingen over 80 jaar komt aan de orde in hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 bevat de conclusies en aanbevelingen. De meeste figuren staan in de tekst, enkele zijn om praktische redenen achterin toegevoegd.

Het rapport is niet een zelfstandig rapport over de bestrijding van troebelheid in de Loosdrechtse Plassen, maar eerder een compilatie van bijdragen aan de MER. Zo ontbreekt een beschrijving van de relatie tussen lichtklimaat en slib en de aanleiding tot het aanleggen van verdiepingen. Hiervoor wordt verwezen naar Los *et al.* (1997).

2 Water- en nutriëntenhuishouding

De water- en nutriëntenhuishouding is beschreven aan de hand van de gegevens uit 1984 - 1987 zoals eerder gepresenteerd in Los *et al.*, 1997. Van deze periode (WOL onderzoek) zijn de gegevens beschikbaar die nodig zijn voor het opstellen van een waterbalans en nutriëntenbalans. Sinds de tachtiger jaren zijn in het gebied een aantal maatregelen genomen die een effect hebben op de water- en nutriëntenhuishouding:

- Dichten sluislek. Het dichten van het sluislek heeft een klein effect op de waterhuishouding, maar een groot effect op de nutriëntenbalans.
- Verbetering van de waterkwaliteit van de Vecht. Dit heeft een klein effect op de nutriëntenbalans omdat de hoeveelheid Vechtwater dat de Loosdrechtse Plassen instroomt gering is. Er wordt sinds 1985 geen Vechtwater meer ingelaten, het Vechtwater komt alleen in de Loosdrechtse Plassen door sluislekkage en schutten.

2.1 Waterhuishouding

Figuur 1 geeft inzicht in de opbouw van de waterbalans. De figuur toont de waterbalans per maand. De waterbalans is ontleend aan Buyse (1988). Er zijn echter een paar aanpassingen gedaan (zie ook Los *et al.*, 1997). De door Buyse gegeven nettotermen van de uitwisselingen met het oostelijk achterland zijn de resultaten van in- en uitstroming. Zo is er bijvoorbeeld in de zomer van 1986 een watervraag in het achterland waarin wordt voorzien door de Loosdrechtse Plassen. Gedurende natte dagen is er echter in de zomer ook een wateroverschot in het achterland. Daarom is de balans bij de uitwisseling met het oostelijk achterland, de Breukeleveense Plas en de Vuntus uitgebreid met een extra in- en uitstroming van en naar deze gebieden.

Deze aanpassingen zijn gevalideerd met chloride concentraties (Los *et al.*, 1997).

De waterbalans van de Loosdrechtse Plassen (inclusief Breukeleveense Plas, Vuntus en Kievitsbuurt) wordt bepaald door een aantal factoren die ook door Engelen *et al.* (1992) zijn genoemd:

Wegzijging

Gedurende het hele jaar is er uitstroming door wegzijging in de plassen en naar de polders rond de Bethunepolder (Polder Tienhoven en de Polders Gansenhoef en Kraaienest); in de watervraag van deze polders wordt voorzien door de Loosdrechtse Plassen. De wegzijging in de Loosdrechtse Plassen is vrijwel constant in de tijd. De watervraag in de Polder Tienhoven en in de polders Gansenhoef en Kraaienest is door een verdampingsoverschot in de zomer groter dan in de winter. In de zomer is er een kleine watervraag in de Loenderveense Plas waarin door de Loosdrechtse Plassen voorzien wordt. De wegzijging vanuit de Loosdrechtse Plassen volgens Buyse is in overeenstemming met de wegzijging in recentere toepassing van grondwatermodellen (mondelijke mededeling Moorman, GWA, 1999).

Aan- en afvoer

Een aantal balansposten wordt bepaald door het neerslag- (winter) of verdampings- (zomer) overschot. De neerslag is (langjarig gemiddeld) homogeen verdeeld over het jaar, zij het dat het in de winter vaker maar minder intensief regent dan in de zomer. De verdamping is in de zomer groter dan in de winter. Het neerslagoverschot in de gebieden rond de Weersloot, de Drecht en de Kromme Rade wordt afgevoerd via de Loosdrechtse Plassen. Ditzelfde geldt voor de aanvoer naar deze gebieden in de zomer.

De jaarcyclus in het verschil tussen neerslag en verdamping leidt tot een transport van water naar de Vecht in de winter, ondanks de watervraag door wegzijging in de Plassen en de aanliggende polders. In de zomer vindt suppletie van water uit het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) plaats. Het ingelaten ARK-water is gedefosfateerd (sinds 1984). De uitwisselingen met (voornamelijk uitstromingen naar) de Nieuwe Polder Plas, de polder Mijnden en de Beringde Landen zijn verwaarloosbaar klein.

Gedurende het hele jaar is er instroming van Bethunewater via de overstort bij Fort Tienhoven. In de zomer is het overschot kleiner dan in de winter vanwege een grotere drinkwaterbehoefte en een grotere verdamping. Eveneens gedurende het hele jaar is er een aanvoer van Vechtwater door gebruik van sluizen. Het gebruik van sluizen is intensiever in mooie zomers. In 1986 was er echter een veel grotere aanvoerterm van Vechtwater door sluislek, die op basis van Buyse constant verondersteld is over het jaar.

Zoals uit Figuur 1 blijkt, werd het zomerse watertekort voor 1984 aangevuld via de inlaat van Vechtwater. Vanaf dit jaar werd gedefosfateerd ARK-water ingelaten. Een duidelijk verschil in ARK-waterinlaat is te zien tussen 1986 en de twee jaren ervoor, die een veel nattere zomer hadden. De grotere inlaat van ARK-water in 1986 compenseert de watervraag in de omliggende polders. In andere jaren is deze watervraag kleiner en is er in het oostelijk achterland zelfs een wateroverschot in de zomer.

Huidige situatie

Onlangs zijn maatregelen genomen die een effect hebben op de waterhuishouding, namelijk het dichtn van het sluislek. Door het dichtn van de sluizen is de hoeveelheid water dat via de sluizen de Loosdrechtse Plassen binnenkomt veel minder geworden. Er zijn drie sluizen: de Mijndense sluis, de Weersluis en de Kraaienestersluis. De laatste is de kleinste en wordt in de huidige situatie niet meer gebruikt. Bij de Mijndense sluis (de grootste) wordt het schutwater teruggepompt.

Wanneer aangenomen kan worden dat het sluislek na het dichtn zeer gering is zal de term sluizen op de waterbalans verminderen tot vrijwel nul, alleen door het schutten zal er nog wat Vechtwater de Plassen inkomen. Om toch het water op peil te houden, zal in de zomer iets meer ARK water worden ingelaten en in de winter iets minder worden afgevoerd naar de Vecht t.o.v. de situatie in de jaren 80.

2.2 Nutriëntenhuishouding

De belasting met nutriënten is een belangrijke factor bij het kwantificeren van de eutrofiëring van de plassen. Inzicht in de herkomst van nutriënten is essentieel bij het definiëren van maatregelen ter bestrijding van de eutrofiëring.

De belasting is te berekenen door de instromende termen in de waterbalans te vermenigvuldigen met de concentraties in het instromende water. Ook de belastingen zijn gebaseerd op de resultaten van de studie Los *et al* 1997 (gegevens 1982-1987), aangevuld met een analyse van de verschillen tussen de periode in deze studie (1982-1987) en de huidige situatie. De concentraties van het instromende water in de studie Los *et al*. 1997 zijn uit de datasets van Buyse (1988) en van het Limnologisch Instituut te Nieuwersluis (thans NIOO-CL).

Conclusies (uit Los *et al* 1997)

Bij het vaststellen van de belastingen van het Loosdrechtse Plassengebied is rekening gehouden met droge depositie van stikstof. Op grond van verschillende gegevens van Van Jaarsveld (1995) is een depositie aangenomen van 15 kg/ha/jaar NHx en 7.5 kg/ha/jaar NOx.

Tabel 1 geeft een indruk van de orde van grootte van de concentraties van een aantal stoffen in de belangrijkste aanvoerstromen. Het neerslagwater bevat ammonium en nitraat en heeft een laag chloridegehalte. Het Amsterdam-Rijnkanaal en de Vecht zijn rijk aan nutriënten en chloride. De fosfaatconcentratie na defosfatering van ARK-water is laag. Het water uit de Bethunepolder is, zij het in mindere mate, eveneens rijk aan nutriënten (fosfaat, ammonium en silicium), maar bevat minder chloride. Het water dat wordt aangevoerd uit het oostelijke achterland bevat weinig chloride en veel nutriënten.

Tabel 1: gemiddelde concentraties in aanstromend water (WOL-dataset Buyse) (1982-1987)

bron	KjN mgN/l	NH ₄ ⁺ [mgN/l]	NO ₃ ⁺ [mgN/l]	ortho-P [mgP/l]	totaal-P [mgP/l]	Cl ⁻ [mg/l]	Si [mg/l]
neerslag	1.68	1.68	0.9	0.02	0.02	4.3	0
Bethune	2.1	1.56	0.2	0.02	0.15	47	5.3
ARK	n.b.	0.40	3.2	n.b.	0.06	150	1.0
Vecht	4.3	3.30	4.0	1.25	1.50	119	n.b.
Weersloot	1.2	0.42	0.9	0.06	0.20	24	2.8
O.Drecht	1.4	0.32	0.8	0.03	0.17	38	2.0
Kromme Rade	1.6	0.25	0.5	0.02	0.13	36	0.8

n.b.= niet beschikbaar

Figuur 2 toont het verloop van de belastingen van ammonium, nitraat, orthofosfaat, totaalfosfaat, chloride en silicium in de tijd naar herkomst (voor de jaren 1984-1987). Uit de figuur blijkt dat een belangrijke bron voor stikstof ligt in de atmosfeer: de natte en droge depositie¹. De Bethunepolder levert met name ammonium, het oostelijke achterland levert nitraat in de winters. In de zomer is er een nitraatbelasting met de inlaat van ARK-water. Voor fosfaat zijn drie grote bronnen te onderscheiden. Het oostelijke achterland levert gedurende het hele jaar fosfaat aan. De Bethunepolder is een belangrijke fosfaatbron. Opmerkelijk is de grote belasting van fosfaat door Vechtwater dat door de sluizen binnenkomt, voor een groot deel door sluislek en voor een kleiner deel door schutverlies. Het gedefosfateerde ARK-water levert een beperkte hoeveelheid fosfaat. De belasting van chloride komt voornamelijk uit het ARK en de Vecht (via de sluizen).

Huidige situatie

Er zijn verschillen in de belastingen in de huidige situatie vergeleken met die in de tachtiger jaren (de geanalyseerde periode in de studie Los *et al.* 1997 en WOL). Deze verschillen zijn:

- Door het dichteren van het sluislek is de belasting aan nutriënten via de sluizen vrijwel tot nul gereduceerd.
- De fosfaatconcentratie van het Vechtwater in de huidige situatie is minder dan die in de tachtiger jaren. Ook ammonium en nitraat zijn (in mindere mate) afgenomen (Tabel 2).

Tabel 2 Gemiddelde concentraties in aanstromend water WOL-onderzoek 1982-1987 en metingen DWR (VLU01) 1996-1998

Vecht	ortho-P	totaal P	KjN	NH ₄ ⁺	NO ₃ NO ₂
1982-1987	1,25	1,5	4,3	3,3	4
1996	0,20	0,36	2,30	1,46	3,81
1997	0,24	0,38	1,79	0,85	3,84
1998	0,20	0,36	2,39	1,05	2,85

De gevolgen van deze maatregelen kunnen worden afgeleid uit Figuur 2. Het dichteren van het sluislek is vooral van belang voor de fosfaatbelasting. De aanvoer van nutriënten via de sluizen wordt na het dichteren van het sluislek (vrijwel) tot nul gereduceerd. Voor de meeste andere nutriënten zijn de gevolgen gering omdat de belasting via de sluizen gering is, voor de fosfaatbelasting heeft deze maatregel wel grote gevolgen.

¹ Er is discussie over de rol van droge depositie op wateroppervlakken (pers. comm. Janse 1999). Uit recente studies (o.a. Wortelboer 1998) blijkt dat dit geen grote rol speelt, wel de natte depositie.

Figuur 3 laat zien wat de belasting is van totaalfosfaat in de 'huidige situatie' d.w.z. zonder sluislek, maar gebaseerd op de waterbalans van 1984-1987. De fosfaatbelasting in de Loosdrechtse Plassen is in deze situatie 60 % van de fosfaatbelasting in de tachtiger jaren. Door deze reductie in fosfaatbelasting van 40 % zal de algenproductie en daarmee de slibproductie afnemen. Volgens de modelberekeningen (Los *et al*, 1997) zal als gevolg van deze maatregel het doorzicht in de zomer, wanneer er geen verdere maatregelen worden genomen 5 tot 10 cm toenemen.

Het Vechtwater komt de Loosdrechtse Plassen binnen via de sluizen, de reductie van de fosfaatconcentratie is na het dichten van de sluizen van ondergeschikt belang.

3 Waterbeweging

3.1 In- en uitstroming

In- en uitstroming genereren alleen lokaal enige significante stroming. Op de schaal van de Plassen wordt de waterbeweging gedomineerd door wind geïnduceerde stroming; de bijdrage van de in- en uitstroming is verwaarloosbaar.

3.2 Wind

De waterbeweging in de Loosdrechtse Plassen wordt aangedreven door de wind. Afhankelijk van de windrichting, zowel de richting op dat moment als de windhistorie, ontstaan er ronddraaiende stromingen, ofwel neren. Er ontstaan grootschalige neerpatronen die ronddraaien met een snelheid in de orde van grootte van centimeters per seconde, afhankelijk van de windsnelheid (Figuur 4).

Golven

Vanwege de grillige vorm van de kustlijn en de vele eilanden is er een grote ruimtelijke variatie van golven op de Loosdrechtse Plassen.

De windgolven op een gegeven punt zijn afhankelijk van windsnelheid en strijklengte. De strijklengte is de afstand van het punt tot de oever voor een gegeven richting. De windrichting varieert in korte tijd echter enkele graden in verschillende richtingen. Voor een meer met een regelmatige kustlijn zoals de Breukeleveense Plas heeft deze richtingsvariatie weinig gevolgen: de windgolven worden bepaald door de strijklengte die hoort bij de windrichting. Voor een onregelmatige kustlijn zoals die in de Loosdrechtse Plassen is dit verband ingewikkelder. De strijklengte varieert sterk met de richting, en de variatie moet dus worden meegewogen. Hiervoor hebben Brettschneider en Munk het begrip *effectieve strijklengte* ingevoerd (zie b.v. C.E.R.C., 1974 of Gons, 1986). Voor de effectieve strijklengte wordt de strijklengte aan weerszijden meegewogen (tot 45°) via een cosinusfunctie. Hier is gewogen met een stapgrootte van 3°.

3.3 Seiches

Seiches zijn resonerende lange golven waarvan de golflengte 'past' bij de lengte van het bekken waarin zij voorkomen. Als er een forcering aanwezig is, waarvan de frequentie hoort bij die golflengte, en die voldoende lang aanhoudt, dan kan er resonantie optreden. Bij resonantie groeit de amplitude van seiches onder stationaire omstandigheden totdat de bodemwrijving of andere seiche-dempende mechanismen evenveel energie dissiperen of afvoeren als er door de forcering wordt aangevoerd.

De forcering van seiches is meestal van meteorologische aard; zij kunnen echter ook door aardshokken worden opgewekt (tsunami's). Als meteorologische forcering valt te denken aan fluctuaties in wind en drukvelden en buistoten. Deze kunnen intern in het bekken aangrijpen, zoals bij meren, of ver weg op open zee, zoals b.v. in de haven van Rotterdam. Daar zijn seiches waargenomen met een amplitude van meer dan 0.75 m. In de Nederlandse meren zijn dergelijke seiche-amplituden nog niet gerapporteerd.

In meren kunnen seiches voorkomen als vrije oppervlaktegolven of als interne seiches in gestratificeerde systemen, zoals b.v. waargenomen in Zweedse meren (Bengtsson 1978).

In het geval van interne seiches is er temperatuurstratificatie en wordt de thermocline in het meer met de wind mee gekanteld. Bij windstilte kantelt de thermocline terug, waardoor er horizontale snelheden geïnduceerd worden, ook onder de spronglaag. Aangezien directe windgeïnduceerde snelheden nauwelijks door de spronglaag heendringen, overheerst in dat deel van de waterkolom de door het kantelen geïnduceerde snelheid.

De slingerperiode van interne seiches is groter dan die van de oppervlakteseiches doordat het drukverschil over interne golven vele malen kleiner is dan die over oppervlaktegolven.

In het in Bengtsson (1978) geanalyseerde voorbeeld bedroegen de windgeïnduceerde snelheden aan het oppervlak 6 cm/s en die onder de thermocline 2 cm/s. Bij een sterke toename van windsnelheden neemt de seiche-intensiteit enerzijds toe door een sterkere kanteling van de thermocline, anderzijds wordt er meer gemengd, waardoor de thermocline diffuser wordt en het interne seiche-effect afneemt.

In principe kunnen in alle meren oppervlakte seiches of interne seiches ontstaan, mits de forcering maar de juiste periode heeft en voldoende lang aanhoudt. Of voor een bepaald meer deze juiste periode in de forcering voorkomt, valt het best waar te nemen aan de hand van geregistreerde seiches uit het verleden. Voor de Loosdrechtse Plassen hebben wij geen registraties gevonden in de literatuur, de kans op seiches in de huidige situatie wordt dan ook zeer gering geacht.

Door het aanbrengen van een bodemverdieping in de plassen zouden er bij stratificatie interne seiches kunnen ontstaan. De kans hierop is echter zeer klein: maximaal 1/6 van de kans op oppervlakteseiches. De kans is 1/6 van de kans op oppervlakteseiches omdat de interne seiches alleen kunnen optreden bij stratificatie, ca. 2 maanden in het jaar. De kans dat in deze zomermaanden een stevige storm optreedt, de forcering van seiches, is zeer gering.

Als het meer in de winter niet gestratificeerd is, dan leidt de bodemverdieping tot een verschuiving van de gevoeligheid naar de kortere periodes. Daarvoor geldt dezelfde onzekerheid m.b.t. de forcering als voor de langere periodes. Er is bij een bodemverdieping afname van de snelheden die worden geïnduceerd door eventuele oppervlakteseiches. Enerzijds doordat snelheden bij gelijkblijvende waterstandsamplitude lager zijn, anderzijds doordat de forcering langer moet aanhouden om dezelfde waterstandsamplitude mogelijk te maken.

Interne seiches kunnen bodemslib opwerpen, wat lokaal, onder de temperatuurspronglaag, zuurstofloosheid kan bevorderen. Tevens kunnen interne seiches koud bodemwater plaatselijk en tijdelijk tot dichtbij het wateroppervlak brengen wat zwemmers kan doen schrikken. Korte oppervlaktegolven worden altijd, maar seiches slechts bij toeval door wind aangeslagen. De effecten van seiches zullen in de Loosdrechtse Plassen gering zijn, vanwege de veelal geringe kans op het optreden van oppervlakteseiches en de nog geringere kans op interne seiches (alleen bij stratificatie, dus alleen in warme zomermaand(-en)).

Conclusies

- De kans op seiches is in de huidige situatie zeer gering. Er zijn geen historische gegevens van 'oppervlakteseiches' en er treedt geen stratificatie op waardoor 'interne seiches' kunnen ontstaan.
- Na verdiepen kan er thermische stratificatie ontstaan. In het geval dat stratificatie ontstaat zouden er met juiste forcering 'interne seiches' kunnen ontstaan. De kans op interne seiches is echter zeer gering.

4 Slibtransport, slibhuishouding

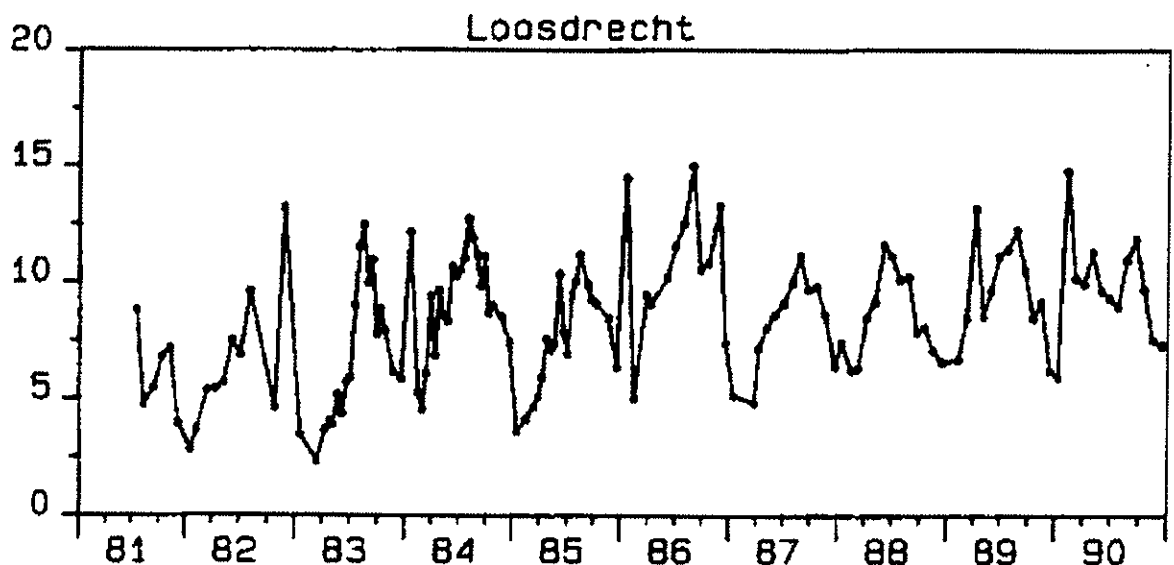
4.1 Slib

Slib bestaat uit kleine deeltjes tot zo'n 60 μm . Deze deeltjes kunnen zowel een organische als een anorganische oorsprong hebben. De anorganische deeltjes bestaan voornamelijk uit kleimineralen, terwijl de organische deeltjes een biologische oorsprong hebben zoals: humus, veen en detritus.

Door de geringe deeltjesgrootte onderscheiden de eigenschappen van slib zich sterk van die van zand. Zo is de doorlatendheid van een slibbed erg klein en verloopt de consolidatie en de sterkte-ontwikkeling van vers gesedimenteerde sliblagen langzaam.

Uit metingen van slib uit de Loosdrechtse Plassen (Los *et al.*, 1997) blijkt dat de fijne fractie (kleiner dan 10 μm) hoofdzakelijk bestaat uit fijn organisch materiaal. Ook het gewicht van de anorganische fractie wordt voornamelijk bepaald (75%) door de deeltjesfractie kleiner dan 10 μm .

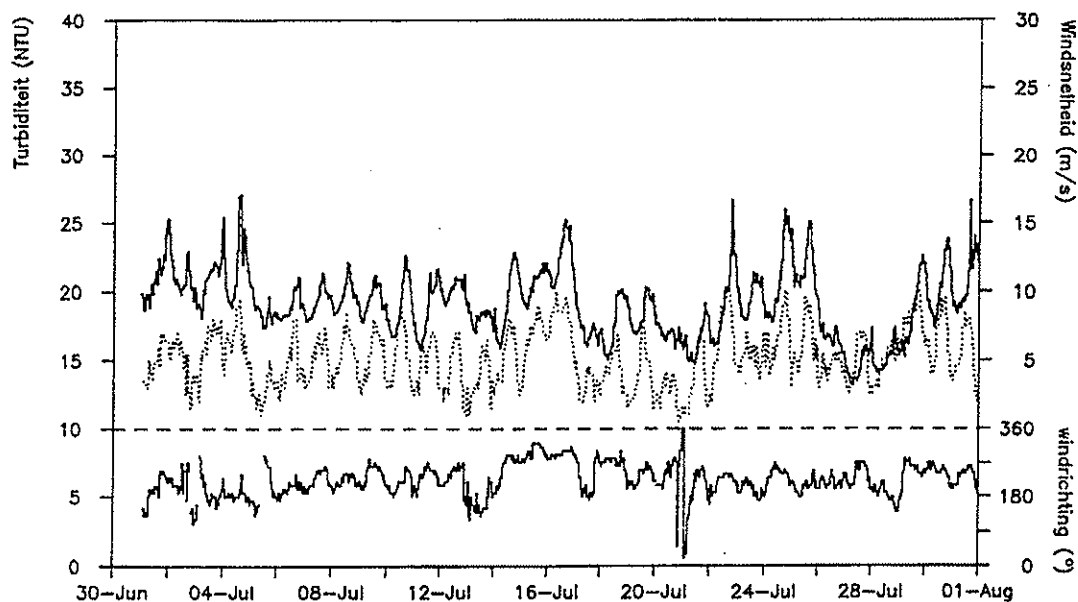
Figuur 5 toont het verloop van de concentratie particulier koolstof in de waterkolom (Ebert en van Liere, 1992). De concentratie is maandelijks gemeten, in principe bij de toevallige windcondities van de meetdag, zij het dat bij storm de bemonstering waarschijnlijk werd uitgesteld. In de figuur is de seizoensvariatie te zien die is terug te voeren op het voorkomen van algenbloei in de zomer. Direct aan de algen gerelateerd is het voorkomen van afbreekbaar detritus (dode alg), dat ook een bijdrage levert aan gesuspendeerd particulier koolstof.



Figuur 5 C-COD (mgC/l) (seston < 150 μm) Uit Ebert en van Liere, 1992

Uit Figuur 5 blijkt dat een deel van het slib *altijd* in suspensie is, oftewel in de waterkolom verblijft. Er bestaan geen heldere dagen, ook niet in de winter, wanneer er minder algen in het water zitten. Uit laboratoriummetingen (Los *et al*, 1997) blijkt dat het hele fijne slib, dat ook bij weinig wind in de waterkolom zit, een valsnelheid heeft in de orde van 10 cm per dag. Het is ook bekend dat het water in de Loosdrechtse Plassen bij ijsbedekking na verloop van tijd (d.w.z. 1-2 weken) helder wordt. Deze twee constatering zijn belangrijk omdat ze aantonen dat, uitgaande van het juiste ontwerp, een verdieping in principe kan functioneren als slibvang.

Uit eerder onderzoek van Gons en van Keulen (1989) is gebleken dat er op een tijdschaal van uren een directe relatie is tussen de windsnelheid en de turbiditeit en dus de slibconcentratie (Figuur 6). Onder invloed van wind werfelt materiaal van de bodem op. Op de tijdschaal van Figuur 5 is deze dynamiek van de slibconcentratie te zien als uitschieters. Uit het relatief weinig voorkomen van grote uitschieters - het seizoensverloop wordt immers niet gemaskeerd door uitschieters - kan voorzichtig geconcludeerd worden dat het opgewerkte materiaal meer op de bodem ligt dan in de waterkolom verblijft. De voorzichtigheid rond deze conclusie komt voort uit het feit dat er geen metingen verricht zijn bij storm.



Figuur 6 Verloop van de turbiditeit in de Loosdrechtse Plassen (doorgetrokken lijn), windsnelheid en -richting gedurende juli. Uit Gons en van Keulen, 1988.

De hoeveelheden van de verschillende soorten slib zijn te schatten op basis van kentallen en concentraties van andere stoffen (Tabel 3). De tabel geeft een schatting van de totale massa slib, die behandeld wordt in 4.3, dit om aan te geven dat de totale massa slib op de bodem ca. 200 keer zo groot is als de hoeveelheid die maximaal in de waterkolom zit.

Tabel 3 Indeling slib (+ algen) en schatting van hoeveelheden

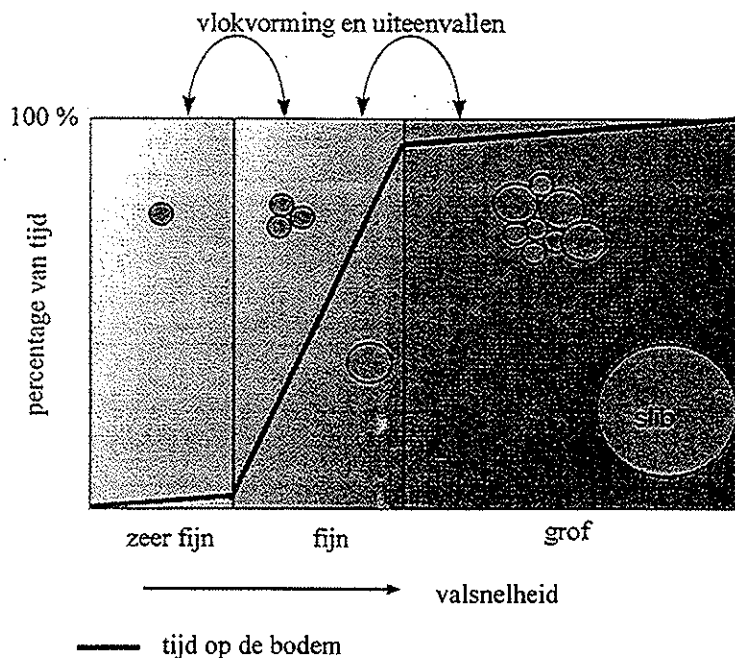
slib / algen	berekening / schatting	hoeveelheid
algen (vooral zomer)	100 µg/l chlorofyl * 0.025 mgC/µg = 2.5 mgC/l	ca. 50 tonC
afbreekbaar detritus (vooral zomer)	modeltoepassingen gelijk aan algen: 2.5 mgC/l	50 tonC
overig materiaal, vrijwel altijd in de waterkolom	winterwaarden gecorrigeerd voor bijdrage van algen: ca. 5 mgC/l (uit Figuur 5)	ca. 100 tonC
overig materiaal, opwervelbaar, meestal op de bodem	uitschieters 10 mgC/l tot 17.5 mgC/l bij storm (Aquasense, Los <i>et al.</i> , 1995)	ca. 200 - 350 tonC
totaal slib op de bodem (vooral in dekens op de bodem, met name in het westen)		ca. 150.000 tonC

Van de beschreven categorieën slib nemen de algen en het detritus een speciale plaats in. De concentraties hiervan worden met name bepaald door de beschikbaarheid van nutriënten. Hun bijdrage aan de troebelheid moet bestreden worden door de belasting van nutriënten en met name van fosfaat, te reduceren (Los *et al.*, 1997). Voor de rest van het slib zijn de eigenschappen nog eens weergegeven in Figuur 7. Op de x-as van de figuur staat een toenemende deeltjesgrootte, op de y-as het percentage van de tijd dat deze deeltjes zich op de bodem bevinden. Van belang is om onder ogen te zien dat zelfs het grofste materiaal nog fijn is. Het bevindt zich immers vooral in slibdekens in het westen van de plassen. Alleen fijn materiaal kan over een zodanige afstand getransporteerd worden dat het accumuleert in een bepaalde hoek.

De verdiepingen worden aangelegd om de troebelheid van de plassen te bestrijden en de ontwikkeling van waterplanten mogelijk te maken. Centraal staat het verbeteren van het lichtklimaat, of preciezer: het verlagen van de extinctie van licht. Van de drie in Figuur 7 onderscheiden slibcategorieën draagt vooral de fijnste categorie bij aan de extinctie. De grote massa op de bodem bevindt zich immers niet in de waterkolom en kan hooguit indirect als bron van het fijnste slib fungeren bij erosie. Uit metingen van Blom (LUW, thans RIZA Dordrecht, mondelinge mededeling) is gebleken dat alhoewel de slibconcentratie varieert met de wind, de extinctie dit in veel mindere mate doet². Het slib dat vaak sedimenteert en resuspendeert (middelste categorie uit Figuur 7) draagt in beperkte mate bij aan de extinctie. De grootste bijdrage komt van het fijnste slib, dat vrijwel voortdurend in de waterkolom zit, hetgeen ook consistent is met de relatief geringe variatie in extinctie. Sterker nog: hoe fijner hoe groter de specifieke extinctie. De extinctie vertoont wel pieken, als bij storm een hoge concentratie slib het water gedurende korte tijd troebel maakt, maar deze pieken zijn te weinig frequent om de ontwikkeling van waterplanten te verhinderen.

² We gaan hier verder voorbij aan de grote variatie in doorzicht in de metingen van Blom. Voor de ontwikkeling van waterplanten is extinctie van groter belang dan doorzicht.

De volgende paragraaf (4.2) gaat, vanwege het belang van de extinctie, verder in op de fijnste categorie slib. Paragraaf 4.3 gaat vervolgens over de totale massa slib, die niet van belang is voor de extinctie, maar voor de extra capaciteit die de put bij aanleg moet krijgen (hoofdstuk 6). Uitgangspunt bij het ontwerp is namelijk dat de put na 80 jaar nog zoveel diepte heeft dat hij als slibvang functioneert.



Figuur 7 Schema deeltjesgrootteverdeling slib

4.2 Troebelheid, zeer fijn slib

Alhoewel de winterwaarden van particulier koolstof schommelen over een periode van 10 jaar (Figuur 5), is een werkbare aanname dat er evenwicht is tussen de termen die zeer fijn slib vormen en aanvoeren en de termen die dit slib afbreken of afvoeren (Tabel 4).

Tabel 4 Termen die zeer fijn slib vormen en aanvoeren en de termen die dit slib afbreken en afvoeren

aanvoer en vorming	afvoer en afbraak
<ul style="list-style-type: none"> - aanvoer - refractaire rest bij mortaliteit algen - vorming uit ander slib (grover (wel fijn) of geflocculeerd - vorming uit veen - overige (depositie, bladval aan oevers etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> - afvoer - afbraak - accumulatie in zeer luwe gebieden - flocculatie en vervolgens accumulatie in minder luwe gebieden

De positieve termen zijn niet afhankelijk van de slibconcentratie (nulde orde), de negatieve termen zijn dat wel (eerste orde). In vergelijking:

$$P_1 + P_2 + \dots = c_{stat} \cdot (Q + k_1 V + A w r + \dots)$$

met:	P_1, P_2 :	productietermen (M/T)
	Q :	uitstromend debiet (L ³ /T)
	k_1 :	afbraaksnelheid (T ⁻¹)
	V :	watervolume (L ³)
	A :	wateroppervlak (L ²)
	w :	valsnelheid (L/T)
	r :	rendement (-), de fractie van de tijd waarin sedimentatie niet beperkt wordt door turbulentie
	c_{stat} :	stationaire concentratie (M/L ³)

De meeste termen zijn goed te schatten. De grootste onzekerheid zit in de productie van zeer fijn slib uit veen en de overgang van fijn slib naar zeer fijn slib, waaraan we geen grenzen durven stellen. Een bovengrens moet volgen uit een schatting van de totale verwijdering van slib uit de plassen. Voor de overige termen is er de volgende schatting:

- Productie van zeer fijn slib uit algen wordt op basis van het algenmodel DBS geschat op 180 tonC/jaar (voor de jaren 1982-1987). DBS beschrijft de cyclus van groei, sterfte van algen en mineralisatie van detritus. Bij sterfte ontstaat een deel refractair detritus. De totale productie van dit refractaire materiaal is afhankelijk van de biomassa en de turnover. Het model reproduceert meetwaarden van meerdere waterkwaliteitsvariabelen die ook bepaald worden door biomassa en turnover (nutriënten, chlorofyl, zuurstof). Dit zou niet kunnen bij wezenlijk andere productiecijfers.

In de laatste jaren is de fosfaatbelasting sterk gereduceerd (zie paragraaf 2.2.1). DBS berekent bij deze fosfaatbelasting een productie van slib uit algen van 120 tonC/jaar.

- Uitstroming is af te leiden uit de waterbalans (die weer consistent is met chloride) en c_{stat} , die is af te leiden uit de winterwaarden van Figuur 5 en wordt geschat op 5 gC/m³. De totale uitstroming m.u.v. algen naar de Vecht en het achterland is gemiddeld 28 Mm³/jaar; de uitstroming van slib komt daarmee op 140 tonC/jaar.
- Afbraak is te schatten op basis van een orde van grootte van een afbraaksnelheid (0.001 per dag zoals gehanteerd in DBS (Los *et al.* 1997)), het volume van de plassen en c_{stat} . De orde van grootte van afbraak komt op 40 tonC/jaar.
- Accumulatie van zeer fijn slib is een moeilijk te bepalen term. Er is een aantal constatering op basis waarvan een schatting gemaakt kan worden van een bandbreedte. Bij het bepalen van de consequenties van de verdieping (hoofdstuk 5.2) wordt deze onzekerheid meegenomen. Een belangrijke constatering is dat het zeer fijne slib al bij een lage bodemschuifspanning wordt opgewerveld. Er zijn zeer luwe condities nodig om het slib te laten accumuleren, dat wil zeggen sedimenteren zonder later te resuspenderen. Een schatting van de accumulatie is gekoppeld aan een schatting van een luw oppervlak: accumulatie = $w * A * c_{stat} * r$ (zie boven). We onderscheiden drie categorieën luw oppervlak:
 - havens en het legakkergebied ten oosten van de Polder Mijnden, in totaal hoogstens 20 ha.

- de Kievitsbuurt (210 ha); het is onduidelijk of de Kievitsbuurt in de huidige situatie een efficiënte slibvang is. Dit wordt mede bepaald door de uitwisseling tussen de plassen en het gebied. Deze is groot genoeg om gelijke zoutconcentraties te vinden, maar is waarschijnlijk niet groot genoeg om uitvallend slib vanuit de plassen continu aan te voeren. Een worst case aanname is dat de Kievitsbuurt een slibvang is met rendement 1. Waarschijnlijker is dat het rendement veel beperkter is.
- relatief luwe delen van de plassen, met name aan de westkant. Op basis van een relatie tussen strijklengte van de wind, waterdiepte en de kritische wind waarbij resuspensie optreedt (Carper en Bachman, 1984) is voor de Loosdrechtse Plassen bepaald wat de frequentie van resuspensie is, uitgaande van een frequentieverdeling van de wind (snelheid en richting) bij Schiphol (data van het KNMI, Los *et al.*, 1997). De luwste delen van de plas kennen nog altijd een frequentie van resuspensie van 15 %. (Figuur 8). Zeer fijn slib dat hier zou kunnen sedimenteren wordt na korte tijd weer geresuspendeerd, tenzij het wellicht geïncorporeerd wordt met zwaarder slib. Een sterke overschatting van een effectief oppervlak (A^*r) is dat over een strook van 100 meter over de hele lengte van de westoever van 3 km (30 ha) het rendement 50 % is en over de volgende strook 25 %; het effectief oppervlak is dan ca 25 ha.

De spreiding in de schatting van het totaal oppervlak aan efficiënte slibvang voor zeer fijn slib (uitgezonderd algen) is weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5 Range in de onzekerheid van oppervlakte effectief accumulatiegebied en de totale produktie die in dat geval de totale afvoer compenseert.

Omschrijving	opp. (ha.)	totaal produktietermen tonC/j
havens en legakkergebied	20	217
havens, legakkergebieden en de westrand van de plassen	20 + 25 = 45	262
de Kievitsbuurt erbij met een beperkt rendement	45 + 55 = 100	363
alle genoemde oppervlakten	ca. 300	728

Uitgaande van evenwicht wordt de range in accumulatie (Tabel 5) in de balans gecompenseerd door een range in produktie uit veen en sliblagen. Deze heeft een grotere onzekerheid dan de onzekerheid in accumulatie. De onzekerheid in produktie uit veen en sliblagen wordt daarom beperkt door de schatting van accumulatie.

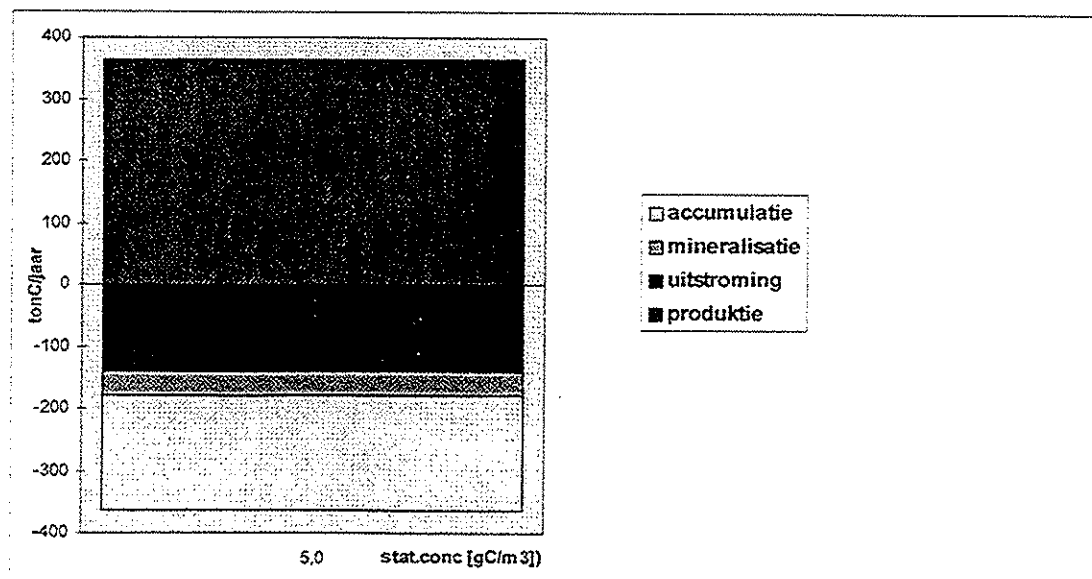
Redenerend vanuit de balansvergelijking kan het accumulatieoppervlak, en daarmee de accumulatie en tegelijkertijd de produktie eindeloos verhoogd worden. Een limiet zit hooguit in het totaaloppervlak van de plassen. Een verhoging van de produktie heeft echter wel direct consequenties voor de samenstelling van het zeer fijne slib. De verhouding tussen produktie uit veen en sliblagen en de produktie uit algen bepaalt de verhouding in herkomst van fijne slibdeeltjes. Figuur 9 toont de verhouding in herkomst bij verschillende accumulatiefluxen (uitgedrukt als effectief oppervlak). De verhouding is berekend door de uit veen en sliblagen en de uit algen voortkomende deeltjes exact dezelfde eigenschappen toe te kennen. De balanstermen zijn constant in de tijd verondersteld.

Alleen voor de produktie uit algen is de verdeling over het jaar ontleend aan het gemiddelde jaarverloop in DBS. De totale produktie uit algen is voor alle figuren gelijk. De stijgende accumulatie, met stijgend effectief oppervlak, wordt geheel gecompenseerd door een extra produktie uit veen en sliblagen. Door Boon en Boers (1988) is de verhouding in herkomst bepaald voor enkele monsters op verschillende tijdstippen in het jaar. De windcondities tijdens de monsternamen zijn onduidelijk, waardoor de bijdrage uit de middencategorie slib (Figuur 7) onzeker is. Hoe meer wind er is geweest, hoe meer de bijdrage vanuit deze categorie, die een herkomst heeft in veen en sliblagen (het algenslib wordt verondersteld hoofdzakelijk zeer fijn van textuur te zijn), wordt overschat. Boon en Boers rapporteren een dominantie van algendeeltjes in de zomer. In de winter prevaleren veendeeltjes. Op de basis van kwalitatieve beschrijvingen en een beperkt aantal monsters lijkt een effectief accumulatieoppervlak van minder dan 100 ha de beste schatting.

De balanst termen voor het zeer fijne slib in de Loosdrechtse Plassen zijn weergegeven in Tabel 6 en Figuur 10 onder de aanname van een effectieve accumulatieoppervlakte van 100 ha, de meest waarschijnlijke schatting. In Los *et al.* 1997 waren de accumulatie en de produktie uit veen niet in de balans opgenomen, zij waren op 0 gesteld.

Tabel 6 Termen van de slibbalans (tonC/jaar) van het zeer fijne slib m.u.v. algen voor de Loosdrechtse Plassen.

Balansterm	omvang [tonC/jaar]
produktie uit algen	180
produktie veen	183 (sluitpost)
afbraak	40
transport (netto afvoer)	140
accumulatie	183



Figuur 10 Slibbalans van het zeer fijne slib in de Loosdrechtse Plassen in de huidige situatie bij een aangenomen stationaire concentratie ontleend aan de winterwaarde van zeer fijn organisch slib

Verblijftijd

Uit de balans volgt verder een verblijftijd van het zeer fijne slib van ruim een half jaar voor de Loosdrechtse Plassen. De karakteristieke tijd voor aanpassing van de slibconcentratie aan nieuwe omstandigheden is ongeveer drie verblijftijden (volledig gemengd systeem). Dat betekent dat een reductie in de slibproductie al na een jaar of twee tot een bijpassende afname van slib moet leiden.

4.3 Totale hoeveelheid slib

Het is van belang te onderzoeken of de verdiepingen voldoende diep zijn om voor vele decennia (80 jaar) geen last meer te hebben van zwevend slib op de plassen. Hiervoor moet de hoeveelheid slib aanwezig in de Loosdrechtse Plassen bepaald worden, en de hoeveelheid die in de komende 80 jaar geproduceerd of aangevoerd wordt. Vooral het grove slib is van belang voor deze problematiek, de totale massa aan fijn slib is relatief gering.

4.3.1 Huidige hoeveelheid

Er zijn weinig gegevens voorhanden om de hoeveelheid slib op de bodem van de Plassen te bepalen. We hebben dit op twee manieren gedaan:

1. Aan de hand van de resultaten van het onderzoek aan de sliblaag aan de westzijde van de Breukeleveense Plas (NIOZ 1998 en Analytisch-Chemisch laboratorium Amsterdam 1997).
2. Aan de hand van de kaart van de dikte van de sliblaag in de Loosdrechtse Plassen van Van Nieuwenhuyze, (1986).

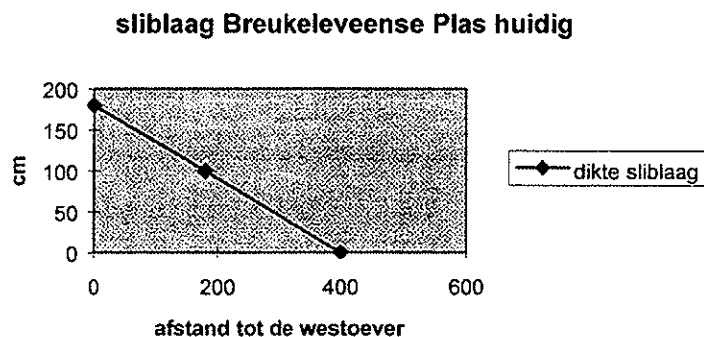
Bij 1 wordt aangenomen dat de relevante processen zoals o.a. resuspensie en sedimentatie, de belastingen in de Loosdrechtse Plassen nu en in het verleden vergelijkbaar zijn en zijn geweest met die in de Breukeleveense Plas. De windcondities tijdens de monsternamen zijn niet bekend, daarom wordt aangenomen dat alleen de zeer fijne fractie zich op dat moment in de waterkolom bevond en de fijne en grove fractie zich op de bodem bevonden.

Vergelijking met de Breukeleveense Plas

Er zijn metingen uitgevoerd aan monsters uit de bodem van de Breukeleveense Plas van twee lokaties. De metingen zijn gedaan aan de westzijde van de Plas, want vooral daar is slib geaccumuleerd. Aan de oostzijde ligt vrijwel geen slib op de bodem (pers. comm. de Ruiter). Een lokatie is zeer dicht op de oever (BRA), de ander op zo'n 200 meter van de westoever (BRB).

In het NIOZ-onderzoek (1998) zijn radionucliden metingen (^{137}Cs en ^{210}Pb) gedaan. Aan de hand hiervan wordt de sedimentatiesnelheid op lokatie BRA geschat op 65 cm/eeuw en op lokatie BRB op 35 cm/eeuw. Uit de resultaten van de metingen van het Analytisch-Chemisch laboratorium Amsterdam blijkt dat de sliblaag op de bodem 180 cm is bij BRA en 100 cm bij BRB. Ook is op deze lokaties het drogestofgehalte van het slib bepaald op verschillende diepte in de bodem.

Dichtbij de westoever is de sliblaag 180 cm, zo'n 180 m van de oever 100 cm (Figuur 11). Bij de berekeningen nemen we aan dat de sliblaag ongeveer lineair afneemt en er na 400 m dus geen slib meer op de bodem ligt. In de rest van de plas is de sliblaag ca 5 cm (De Ruiter, 1999).



Figuur 11 Dikte sliblaag langs de westoever van de Breukeleveense Plas.

De westoever is 1500 m lang, een grove schatting van het volume slib op de bodem langs de westoever van de Breukeleveense Plas is dus

$$1500 * 1.80 * 400 * 0.5 = 5.4 * 10^5 \text{ m}^3$$

In de rest van de Plas ligt ca. 5 cm slib op de bodem. De hoeveelheid is dus:

$$1500 * 0.05 * (1200-400) = 0.6 * 10^5 \text{ m}^3$$

Er is in de Breukeleveense Plas nog een slibput en er bevindt zich slib in omliggende wateren, maar de hoeveelheid daarvan is gering. Het totaal aan slib op de bodem van de Breukeleveense Plas is ca $6 * 10^5 \text{ m}^3$.

Loosdrechtse Plassen

Het oppervlak van de Loosdrechtse Plassen is ongeveer 5.5 x zo groot als dat van de Breukeleveense Plas.

De schatting van het volume slib op de bodem van de Loosdrechtse Plassen is dus volgens deze methode ca. $3.3 * 10^6 \text{ m}^3$.

Slibkaart Van Nieuwenhuyze

In Van Nieuwenhuyze (1986) wordt een kaart van de dikte van de sliblaag in de Loosdrechtse Plassen gepresenteerd. De kaart is samengesteld aan de hand van in mei 1985 uitgevoerde echopeilingen waarbij met twee verschillende frequenties is gemeten. Het verschil tussen de twee hiermee verkregen diepten zou overeenkomen met de slibdikte ter plaatse. Zie voor de uitwerking Tabel 7.

Tabel 7 Herleiding slibvolumes uit kaart van van Nieuwenhuyze

Klasse cm	gemiddeld m	% oppervlak	oppervlak m ²	volume m ³
0-15	0.075	33	3264030	244802
15-35	0.25	33	3264030	816007
35-65	0.50	32	3165120	1582560
65-100	0.825	2	197820	163201
totaal				2806571

Volgens deze methode is de hoeveelheid slib op de bodem van de Loosdrechtse Plassen: $2.8 * 10^6 \text{ m}^3$, in dezelfde orde grootte als de hoeveelheid geschat aan de hand van de metingen in de Breukeleveense Plas ($3.3 * 10^6 \text{ m}^3$).

De geschatte hoeveelheid volgens deze methode kan een onderschatting zijn: bij later uitgevoerde handpeilingen is gebleken dat langs de oevers en in de jachthavens meer slib accumuleert dan op de kaart is aangegeven (Van Nieuwenhuyze, 1986). In 1997 is gebleken dat vooral de tweede echo 'ergens' in de sliblaag refelecteerd.

Conclusie

De geschatte hoeveelheid bodemslib in de Loosdrechtse Plassen volgens de methode 'Breukeleveense Plas' is vergelijkbaar met de hoeveelheid volgens de methode kaart Nieuwenhuyze. Voor de verdere berekeningen gaan we voor de zekerheid uit van de hoogste schatting (Breukeleveense Plas): De hoeveelheid grof slib in de Loosdrechtse Plassen is $3.3 * 10^6 \text{ m}^3$.

4.3.2 Aangroei van slib

Niet alleen de hoeveelheid bodemslib is van belang, ook de aangroeisnelheid. Omdat de vraag gesteld wordt hoe de situatie van de verdiepingen zal zijn over 80 jaar, wordt hier de aangroei in de komende 80 jaar berekend op grond van metingen in de Breukeleveense Plas.

Aan de hand van radionuclidenmetingen (NIOZ) wordt de sedimentatiesnelheid op lokatie BRA geschat op 65 cm/eeuw en op lokatie BRB op 35 cm/eeuw. Op lokatie BRA zal er na 80 jaar 52 cm en op BRB 28 cm zijn bijgekomen.

Wanneer we de hoeveelheid slib berekenen die er in die 80 jaar in de Breukeleveense Plas is aangegroeid dan geldt:

Langs de westoever:

$$1500 * 0.52 * 400 * 0.5 = 1.56 * 10^5 \text{ m}^3.$$

In de rest van de plas (toename eeuw $1/3 * 5$) = 1.6 cm

$$1500 * 0.016 * (1200-400) = 0.19 * 10^5 \text{ m}^3.$$

In 80 jaar is de slibhoeveelheid in de Breukeleveense Plas met $1.75 * 10^5 \text{ m}^3$ toegenomen.

In 80 jaar zal de slibhoeveelheid in de Loosdrechtse Plassen volgens deze schatting met: $5.5 * 1.75 * 10^5 \text{ m}^3 = 0.96 * 10^6 \text{ m}^3$ toenemen.

Wanneer we aannemen dat het percentage droge stof van dit slib 10% is (zie De Ruiter, 1999), dan gaat het hier om $0.10 * 0.96 * 10^6 / 80 = 1203$ ton droge stof per jaar. Wanneer daarvan ca. 50% koolstof is (zie De Ruiter, 1999) dan is de netto sedimentatie van dit slib 600 ton C/jaar.

Deze hoeveelheid is minder dan de schattingen genoemd in de Ruiter 1999. Het is echter wel vergelijkbaar met de hoeveelheid in die de Ruiter berekent met de gegevens uit de Breukeleveense Plas. De Ruiter komt met deze methode op een netto sedimentatie van 750 ton C per jaar, hij neemt in de berekening echter ook het slib in een verdieping in de noordwesthoek van de Breukeleveense plas en slib in omliggende sloten mee (De Ruiter, 1999). Vervolgens verdubbelt de Ruiter deze waarde van 750 ton C/jaar met om rekening te houden met het feit dat de hoeveelheid land tussen de Herenweg en de plas is toegenomen.

Er blijft onzekerheid over de aangroeisnelheid van het slib. Schattingen lopen uiteen van 600 ton C/jaar tot 1550 ton C/jaar (Tabel 8).

Tabel 8 Aangroeisnelheden van slib volgens verschillende schattingen

schatter	op basis van	aangroeisnelheid ton C/jaar	bron
WL	metingen Breukeleveense Plas	600	dit rapport
lokaal	schatting n.a.v. gebiedskennis	1000	De Ruiter, 1999
de Ruiter	extrapolatie metingen Breukeleveense Plas 250 jaar + aanpassingen	1500	De Ruiter, 1999
de Ruiter	Cesium metingen Breukeleveense Plas	1550	De Ruiter, 1999
de Ruiter	fosfaatbalans	932	De Ruiter, 1999

4.4 Effecten van scheepvaart

Rondom een varend schip verplaatst water zich van de boeg naar het hek wat gepaard gaat met een waterspiegeldaling en een bijbehorende stroming ter weerszijden van en onder het schip. Daarnaast worden golven opgewekt bij boeg en hek. De stroming behorende bij de waterspiegeldaling en de golven kunnen zodanig zijn dat bodemmateriaal wordt opgewerveld. Dit is afhankelijk van factoren als scheepsgrootte, diepte van de vaarweg, vaarsnelheid en bodemmateriaal.

Bij motor-voortstuwning kunnen de stroomsnelheden die worden opgewekt in de schroefstraal zorgen voor opwerveling van bodemmateriaal. Bij zeilboten zorgt de kiel onder het schip voor turbulentie en is dit een mogelijke oorzaak voor het in suspensie komen van bodemmateriaal.

In hoeverre de scheepsgeïnduceerde waterbeweging een rol speelt bij de opwerveling van bodemmateriaal komt in het navolgende aan de orde.

Loosdrechtse Plassen

Op de Loosdrechtse Plassen is sprake van vrijwel uitsluitend recreatievaart en niet van beroepsvaart. Deze recreatievaart bestaat uit motorboten, zeilboten, en rondvaartboten. Deze vaartuigen zijn gemiddeld 10 à 15 m lang bij 2,5 à 4 m breed. De diepgang van de vaartuigen is, afgezien van een enkele uitzondering, maximaal in de orde van 1,25 m à 1,50 m, meestal echter minder dan 1,25 m. Alleen een gering aantal grotere zeilboten zal meer diepgang hebben vanwege de kiel. De geïnstalleerde motorvermogens zijn eveneens klein. Een uitzondering vormen open speedboten (ten behoeve van waterskiën).

Mogelijke effecten van schepen

Onderscheid wordt gemaakt tussen schepen op het meer en schepen in of dichtbij havens. In het laatste geval is de vaarsnelheid vrijwel nul en de mogelijke invloed van de stroomsnelheden in de schroefstraal relatief groter dan bij een varend schip.

Allereerst de situatie op het meer, waar de gemiddelde waterdiepte 2 m bedraagt. Dit betekent dat onder de kiel van motorboten en rondvaartboten meestal meer dan 0,75 m water staat. In studies naar effecten van scheepvaart in het Ketelmeer (Kappe *et al.*, 1989) en op de Hollandse IJssel (Houwing, 1998) blijkt dat de vertroebeling door scheepvaart bijna volledig verklaard kan worden met behulp van de bruto kielspeling. Onder bruto kielspeling wordt de afstand van de onderkant van een volgeladen schip (kiel) tot de toplaag van de waterbodem verstaan. Er treedt erosie van de bodem op indien de bruto kielspeling kleiner is dan 1 m. Het gaat hier echter niet over recreatievaartuigen. Bovendien is er sprake van ruim vaarwater (ruim in de zin van breed), wat een reducerend effect heeft op de stroomsnelheden naast en onder het schip. Als in de overwegingen verder wordt meegenomen dat het gaat om recreërende mensen, alsmede om beperkte motorvermogens die in de betreffende boten zijn geïnstalleerd, moet de conclusie zijn dat de vaarsnelheid gering zal zijn. Dit betekent dat de opgewekte waterbeweging, bestaande uit enerzijds stroomsnelheden onder en naast het schip als gevolg van de waterverplaatsing door het varende schip, en anderzijds stroomsnelheden in de schroefstraal, zeer gering zal zijn en waarschijnlijk nauwelijks bijdraagt aan de opwerveling van bodemmateriaal. Uit een steekproef door Veeningen bleek ook dat de effecten van recreatievaart op de slibconcentratie moeilijk aantoonbaar waren.

Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat deze conclusie ook geldt voor open speedboten, ondanks de vaak veel grotere motorvermogens die in dit bootype aanwezig zijn. Bij een hoge vaarsnelheid creëren speedboten voornamelijk oppervlaktegolven met beperkte golfhoogte en golflengte en deze dringen niet door tot de bodem.

Wanneer zeilboten op de motor varen zijn de omstandigheden vergelijkbaar met die van motorboten, dat wil zeggen: de veroorzaakte waterbeweging is te gering om bodemmateriaal te doen opwerpen. De aanwezige kiel onder de romp speelt geen rol. Zeilend zullen de kleine open zeilboten (type zestienkwadraat en valk) geen hinderlijke waterbeweging veroorzaken door de diepgang van maximaal 1,25 m. De grotere zeilboten veroorzaken bij aan de wind varen met hun kiel extra turbulentie in het water, maar door de beperkte diepgang van orde 1,5 m, zal ook dit geen invloed hebben op de slibopwerveling. Bij ruimere koersen dan aan de wind treedt nauwelijks extra turbulentie op.

In en nabij havens ligt de situatie anders. Schepen varen vaak zeer langzaam in verband met het manoeuvreren (de vaarsnelheid is dan bijna nul) en daardoor is de relatieve invloed van de stroomsnelheden in de schroefstraal groter. Bovendien wordt daarbij zo nu en dan het motorvermogen even volledig gebruikt. Niet onbelangrijk is voorts dat havens vaak in een luw gebied liggen; in ieder geval is in de haven zelf geen windinvloed aanwezig. De consequentie hiervan is dat in en nabij havens vaak aanslibbing optreedt en de waterdiepte dus beperkter is dan op het meer.

De geringere waterdiepte en de grotere invloed van de schroefstraalsnelheden betekent dat in en nabij havens vrijwel zeker slibopwerveling zal optreden. Echter, dit is ook in de huidige situatie het geval en de eventuele aanleg van slibvangen speelt daarbij geen enkele rol. Bovendien zal het opgewervelde slib ook in of nabij de havens weer bezinken, omdat deze in de luwte liggen. Eventueel opgewerveld slib in of nabij een haven zal dus niet bijdragen aan de slibbalans van het meer.

Conclusies

Op grond van bovenstaande analyse zijn de conclusies wat betreft de mogelijke effecten van recreatievaart op slibopwerveling als volgt:

- Recreatievaart draagt zeer waarschijnlijk niet bij aan de opwerveling van bodemmateriaal. De redenen hiervoor zijn de relatief lage vaarsnelheid en de geringe diepgang ten opzichte van de aanwezige waterdiepte.
- In en nabij havens die in de luwte liggen, is de recreatievaart verantwoordelijk voor slibopwerveling, maar dit slib bezinkt daar ook weer en gaat geen deel uitmaken van de slibbalans op het meer.

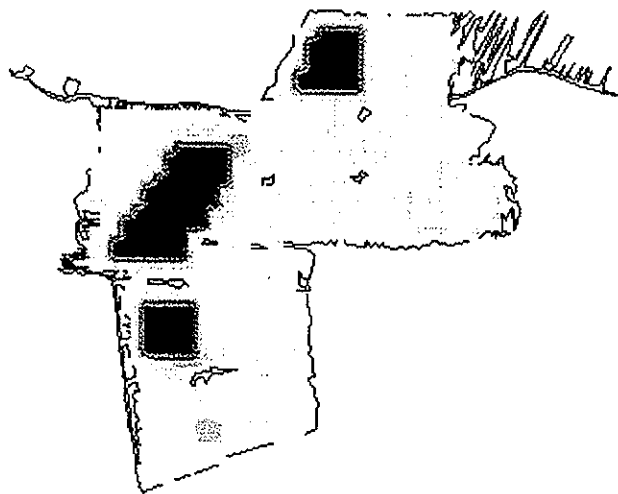
5 Effecten van verdiepingen

5.1 Stromingspatroon

Het voorstel van DWR in de startnotitie is om het westelijk deel van de eerste tot en met de vierde plas van de Loosdrechtse Plassen op enkele plaatsen te verdiepen. Het te ontgronden oppervlak bedraagt circa 120 ha, met een maximale diepte van 14 meter onder de waterspiegel en een talud met een helling van 1:5 (De Ruiter pers. comm.). De verdiepingen zijn op minimaal ca. 100 meter afstand van de oevers gesitueerd.

De methode om de waterbeweging en de dynamica van het slib te berekenen is ontwikkeld in de voorgaande studies (Los *et al.* 1997, Los *et al.* 1998).

De dynamische windgedreven waterbeweging en de daaraan gekoppelde bodemschuifspanning zijn gesimuleerd met de diepte-gemiddelde, tweedimensionale versie van het TRISULA modellensysteem. Hiervoor is een schematisatie van het Loosdrechtse Plassengebied gebruikt, die bestaat uit een rechthoekig grid met gridpuntafstanden van 100 meter (Los e.a. 1997, geringe aanpassingen). In de schematisatie zijn drie slibvangen aangebracht door aanpassing van de zogenaamde dieptekaart. De slibvangen zijn 14 meter diep, het talud heeft een helling van 1:5 en de totale oppervlakte van de drie slibvangen samen is 122 ha (Figuur 12).



Figuur 12 Schematisatie van de Loosdrechtse Plassen met donkergekleurde verdiepingen

De methode om de waterbeweging te berekenen is ontleend aan de studie voor de Breukeleveense Plas (Los *et al.* 1998). De waterbeweging is berekend bij stationaire windsituaties:

- Windsnelheden: 5, 10 en 15 m/s.
- Windrichtingen: zuidwest, zuidoost, noordwest, noordoost.

De waterbeweging bij de meest voorkomende windrichting namelijk zuidwest is te zien in Figuur 13 a, b, c.

In de huidige situatie zijn de stroomsnelheden in de Loosdrechtse Plassen in de orde van slechts enkele cm/s, zelfs bij zeer harde wind, maar door de aanleg van een slibvang verandert de stroming en daardoor kunnen de maximale snelheden lokaal wel oplopen tot een orde van 20 cm/s. Daartegenover stroomt het in de diepere delen van een meer minder hard dan in de ondiepere delen. Als de slibvang voldoende diep is, overheerst dit effect de verandering van het stroombeeld.

5.2 Slibhuishouding

5.2.1 methode bepaling effect verdieping op concentratie zeer fijn slib

In hoofdstuk 4.2 werd het verband tussen de termen uit de balans van zeer fijn slib en de stationaire concentratie van zeer fijn slib behandeld. De aanleg van verdiepingen zorgt ervoor dat de term sedimentatie (of accumulatie, als de sedimentatie niet gevolgd wordt door resuspensie) belangrijker wordt in de balans van het zeer fijne slib. Bij het gelijkblijven van de totale productie en van andere verwijderingssnelheden (uitstroming, afbraak) wordt hierdoor de stationaire concentratie lager

Op basis van een beschouwing over de opbouw van de extinctie is een streefbeeld vastgesteld waarbij de concentratie zeer fijn slib wordt teruggebracht van 5 naar 3 gC/m³ (Los *et al.* 1997). Deze waarde biedt een goede randvoorwaarde voor het weer helder worden van de plassen, mits ook de fosfaatbelastingen verder gereduceerd worden. Het gaat hierbij om de winterconcentratie van zeer fijn slib; deze is vergelijkbaar met de concentratie in het voorjaar, de kritische periode voor de ontwikkeling van waterplanten.

Of het effect van de verdiepingen op de stationaire concentratie fijn slib groot genoeg is, is berekend met de balansvergelijking. Daarbij is een uitgebreide analyse uitgevoerd van de gevoeligheid van het resultaat voor onzekerheden in de aannamen. De belangrijkste onzekerheden en het bereik waarbinnen de gevoeligheid bepaald is, zijn:

- het *effectieve oppervlak van accumulatie in de huidige situatie*. Hierop is uitgebreid ingegaan in hoofdstuk 4.2. Het belang van deze parameter is uit te leggen door na te gaan dat als het accumulatieoppervlak in de huidige situatie al groot is, een verdere vergroting weinig effect zal hebben. In de gevoeligheidsanalyse is het oppervlak gevarieerd van 0 tot 300 ha. In hoofdstuk 4.2 is al aangegeven dat het oppervlak waarschijnlijk tussen de 20 en 100 ha ligt.
- Het is onzeker hoe de productie van zeer fijn slib zich in de toekomst zal ontwikkelen. Als worst case blijft de productie gelijk ten opzichte van de situatie zoals onderzocht in Los *et al.* 1997 (WOL periode 1982-1987). Waarschijnlijk is het echter dat de productie van zeer fijn slib door algen, door vermindering van P-belasting zal afnemen. In een eerdere studie hebben we bepaald dat een afname van 180 tonC/jaar tot 120 tonC/jaar plausibel is, bij een afname van de totale P-belasting tot een kwart van de belasting in de jaren tachtig.

De produktie vanuit oude sliblagen (de in hoofdstuk 4.1, Figuur 7, beschreven tweede en derde categorie) neemt waarschijnlijk af op een langere termijn, doordat het opwervbare deel zich zal verzamelen in de put. Het grove slib zal in de verdiepingen gevangen worden zodat ook de produktie van fijn slib door uiteenvallen van grover materiaal minder wordt. In de gevoeligheidsanalyse zijn 4 stadia voor produktie beschouwd: 180 ton C/jaar uit lagen (Los *et al.*, 1997), het deel uit algen verminderd met 60 tonC/jaar, het deel uit veen en sliblagen verminderd tot 75 % (arbitraire waarde) en de combinatie van beide reducties.

- Een derde onzekerheid ligt in het rendement van de put, dat wil zeggen het percentage van de tijd dat stromingscondities de werking van de slibvang niet in de weg staan. De methode voor het bepalen van het rendement van de put is ontleend aan de studie voor de Breukeleveense Plas (Los *et al.*, 1998). Voor het rendement zijn in de onzekerheidsanalyse twee verschillende waarden beschouwd. Een waarde is gebaseerd op een kritische bodemschuifspanning die extreem laag is gekozen (0.01 Pa) en de ander is gebaseerd op een nog steeds lage, maar realistischer waarde van 0.04 Pa.

In de balansvergelijking is het effect van de verdieping op het oppervlak van resuspensie niet beschouwd. Hierdoor zijn de stationaire concentraties overschat. Er is een netto accumulatie die in feite de resultante is van sedimentatie en resuspensie. Een verdieping verhoogt de sedimentatie, hetgeen ook in de vergelijking is meegenomen, maar verlaagt ook het oppervlak waarover resuspensie kan plaatsvinden. Het effect is overigens minder groot nu de verdieping in het westen geplaatst wordt, waar de resuspensiefrequentie relatief laag is (zie Figuur 8).

5.2.2 Rendement

Methodie bepaling rendement

Het rendement van een slibvang hangt af van de stroming. De turbulentie in de slibvang kan toenemen en dit vertraagt de sedimentatie. Er is een drempelwaarde voor de schuifspanning aan de bodem, waarboven geen sedimentatie meer plaats kan vinden. Deze drempelwaarde is in de orde van een honderdste Pascal. Als tijdens harde wind de stroming in de Loosdrechtse Plassen oploopt tot een orde van 10 cm/s, dan kan de turbulentie aan de bodem deze schuifspanning opwekken waardoor de sedimentatie stopt. Het rendement hangt af van hoe vaak deze stroomsnelheid bereikt wordt.

De stroming in de Loosdrechtse Plassen wordt aangedreven door de wind. Het rendement van een slibvang hangt dus af van hoe vaak de windsnelheid wordt bereikt waarbij een stroomsnelheid van 10 cm/s (schuifspanning 0.01 Pa) optreedt. Onder die windsnelheid vindt sedimentatie plaats. Boven die windsnelheid stopt sedimentatie.

Om te bepalen welk deel van de putten sedimentatie plaatsvindt tot een windsnelheid van 15 m/s zijn bodemschuifspanningen door stroming bepaald (Figuur 12). Het rendement is nagenoeg 100% als de schuifspanning in de totale put kleiner blijft dan de kritische schuifspanning (bijv. 0.01 Pa) bij een windsnelheid van 15 m/s en er dus slib blijft sedimenteren. Blijft bijvoorbeeld in de helft van de put de bodemschuifspanning onder de 0.01 Pa dan is het rendement 50%. Als maatgevende windsnelheden zijn 5m/s, 10 m/s en 15 m/s aangehouden in de berekeningen van het rendement.

Een bodemschuifspanning door stroming kleiner 0.01 Pa in de ondiepe delen van de Plassen, wil niet zeggen in deze gebieden geen resuspensie zal optreden omdat buiten de verdiepingen golven de bodem opwoelen.

Worst case

Onder de 'worst case' aanname dat sedimentatie plaatsvindt tot een drempelwaarde van 0.01 Pa worden contourplotjes geproduceerd voor bovengenoemde condities. De verhouding tussen het oppervlak met een schuifspanning < 0.01 Pa en het totaal oppervlak van de put onder bepaalde windcondities is een maat voor de efficiëntie van de slibvang.

Voor elk van de drie verdiepingen is bovenstaand oppervlak bepaald voor 12 situaties: bij een windsnelheid van 5m/s, 10 m/s en 15 m/s en de windrichtingen Zuidwest, Zuidoost, Noordwest, Noordoost. Vervolgens is de frequentie van elk van deze situaties in een jaar bepaald (aan de hand van (uur) windgegevens van 1994 en 1997). Ook hierbij is uitgegaan van 'worst case', de windsnelheidssituaties werden als bovengrens van de klasse genomen: een windsnelheid 6 m/s valt in de klasse 10 m/s. Dit levert een onderschatting van het rendement op.

Vervolgens is voor alle drie de verdiepingen het percentage oppervlak met een bodemschuifspanning < 0.01 Pa voor alle 12 situaties vermenigvuldigd met de frequentie van die situatie om het rendement per verdieping te bepalen

Resultaten

Het rendement is niet gelijk voor de drie verdiepingen, de verdieping in de Eerste Plas heeft (bij een kritische bodemschuifspanning van 0.01 Pa), een rendement van 0.72, de verdieping in de Derde Plas 0.79 en de verdieping in de Vierde Plas heeft een rendement van 0.88. In totaal is het rendement van de drie verdiepingen (samen 120 ha) 79 procent, wat een effectieve slibvang oplevert van 95 ha. Wanneer 0.04 Pa als kritische bodemschuifspanning wordt genomen is het rendement 94 procent en daarmee wordt het effectieve oppervlak van de verdiepingen in deze situatie 113 ha.

5.2.3 Resultaten gevoeligheidsanalyse

De vraag is in welke situaties de achtergrondconcentratie van 5 gC/m^3 zal dalen onder de 3 gC/m^3 : het streefbeeld. Bij een achtergrondconcentratie van 3 gC/m^3 is de extinctie zo laag dat de ontwikkeling van waterplanten mogelijk wordt. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn weergegeven in Figuur 14. Dit is een figuur waar op grafische wijze een functie is weergegeven met meerdere onafhankelijke variabelen. Op basis van drie kentallen: (1) een aangenomen effectief accumulatie-oppervlak in de huidige situatie (2) een scenario voor de ontwikkeling van de produktie van zeer fijn slib en (3) een effectief oppervlak van een aangelegde slibvang wordt een lijn geselecteerd uit de grafiek en een punt op de lijn waarvoor de waarde op de y-as de resulterende concentratie zeer fijn slib is. De concentratie zeer fijn slib van 3 gC/m^3 uit het streefbeeld, is weergegeven met een zwarte lijn.

Uit de resultaten blijkt dat, als het huidig effectief accumulatieoppervlak kleiner is dan 50 ha., de resulterende concentratie voldoet aan het streefbeeld. Zou het huidig oppervlak meer zijn, maar niet hoger dan 100 ha., dan wordt de streefwaarde alleen bereikt als de produktie van zeer fijn slib uit de algencyclus 120 tonC/jaar bedraagt. Behalve dat de reductie van de fosfaatbelasting essentieel is om de directe bijdrage van levende algen aan de extinctie te verminderen, is zij ook van belang om de indirecte bijdrage, in de vorm van refractair detritus, te beperken. Dit is overigens met name het geval als de Kievitsbuurt een duidelijke bijdrage levert aan de accumulatie van zeer fijn slib in de huidige situatie.

5.3 Stratificatie

5.3.1 Voorkomen van stratificatie

Boven een voldoende diepe slibvang wordt de turbulentiegraad verminderd doordat korte oppervlaktegolven de bodem niet meer opwoelen. Door de verminderde turbulentiegraad zal derhalve bij een voldoende diepe en horizontaal uitgebreide slibvang slib bezinken. Dit is het beoogde doel van de aan te leggen slibvang.

Een bijkomend verschijnsel is dat bij de beoogde lage turbulentiegraad de kans op zg. thermische stratificatie (warme toplaat, koud bodemwater) juist toeneemt omdat de bij het oppervlak ontvangen warmte minder goed met dieper water gemengd wordt.

Het is daarom van belang inzicht te krijgen in de kans op stratificatie (bij welke diepte en strijklengte) na verdiepen; de consequenties van de stratificatie en mogelijke maatregelen die kunnen worden getroffen om stratificatie tegen te gaan. Ook de consequenties van de verdiepingen voor de vorming van ijs worden hier onderzocht.

Aanpak

Simulaties van de thermische stratificatie zijn uitgevoerd met een zg. 1DV 'stratificatiemodel' (Vos e.a., 1999) dat watersnelheid, turbulentie en verticaal warmtetransport berekend alsof de verdiepte plas overal 14 meter diep is. De laatste aanname zal o.i. tot een beperkte overschatting van thermische stratificatie leiden. In een lokaal verdiepte plas zal er in horizontale richting door wind en door horizontale temperatuurverschillen tussen diep en ondiep water warmte-transport plaats vinden die de thermische stratificatie in de slibvang reduceert.

De belangrijkste processen bij stratificatie zijn zoninstraling en convectief warmte-overdracht door wind. Bij ijsvorming is de afname van latente warmte van water zeer dominant.

Het gebruikte model beschrijft de volgende processen:

- korte-golf-straling;
- lange-golf-straling;
- absorptie van zoninstraling;
- warmteverlies door verdamping;
- warmteuitwisseling door convectie (wind);
- opslag latente warmte bij ijsvorming;
- diffusie van warmte in en uit de modderbodem.

De bodemwrijving en de lokaal opgewekte turbulentie mede door oppervlaktegolven is berekend met de formuleringen van Grant and Madsen (1979) en met wind- en strijklengte-afhankelijke golfcondities (Shore protection manual, 1984).

Voor twee kenmerkende jaren, een jaar met een mooie zomer (1994) en een met een minder mooie zomer (1997) zijn datasets samengesteld met daggemiddelde luchtdruk, bewolkingsgraad, luchttemperatuur en luchtvochtigheid. Tevens zijn er voor '94 en '97 datasets met één-uurs gemiddelde windsnelheid en -richting. Het model wordt met deze datasets aangestuurd, uit de windgegevens volgen ook de golfcondities en mede daaruit de bodemturbulentie en -wrijving. De zoninstraling varieert met het dag-nacht-ritme en ook met de veranderde seizoenen.

Er is gerekend met 40 equidistante lagen en met een tijdstap van 10 minuten. Beide instellingen staan garant voor een nauwkeurige numerieke oplossing.

Resultaten

Huidige situatie: twee meter diepe plas

De huidige situatie is te zien in Figuur 15 en Figuur 16. De bovenste grafiek toont het daggemiddelde verloop van de temperatuur van lucht, wateroppervlak (1,25% van diepte onder oppervlak) en bodemwater (1,25 % diepte boven bodem). De middelste grafiek geeft de windsnelheid weer. De onderste grafiek toont het verloop van de daggemiddelde watertemperatuur als functie van diepte en dag.

Voor de huidige situatie van een twee meter diepe plas tonen Figuur 15 en Figuur 16, resp. voor '94 en '97, eenzelfde patroon in temperatuurverloop en -verdeling. In '97 is er ijs in januari en in begin februari en ook in de tweede helft van december, in '94 is er geen ijsvorming. Er is geen significante thermische stratificatie: de bodemtemperatuur loopt gelijk op met de oppervlaktetemperatuur. Door zoninstraling en warmtecapaciteit is het water vanaf augustus (zeg na dag 210) warmer dan de luchttemperatuur.

Verdiepte situatie: 14 meter diepe plas

Vervolgens tonen Figuur 17 en Figuur 18 voor de verdiepte plas het temperatuurverloop. De bodemtemperatuur begint in '97 al vanaf eind mei (dag 150) onder de oppervlaktetemperatuur te lopen. Er is sprake van een significante stratificatie vanaf midden juli (dag 200) en deze duurt tot ca. midden september (dag 255). De hoogste temperatuurverschillen tussen bodem en oppervlak bedragen ca. 14^o C. De temperatuurspronglaag ligt in juli en augustus ca. zeven meter onder het wateroppervlak.

Analyse

Vergelijken we Figuur 15 met Figuur 17 en Figuur 16 met Figuur 18 dan zien we dat in juli en augustus de warme toplaat in de verdiepte situatie ruwweg dezelfde temperatuur heeft als in de huidige situatie. Dit betekent dat horizontaal transport geen bijzondere verandering kan geven in de zomerse situatie van de verdiepte plas.

De temperaturopbouw van de verdiepte plas in '94 en '97 is conform de verwachtingen. Kunstmatig aangebrachte variaties in windsnelheid, b.v. vergroten met 50%, tonen dat het in Figuur 17 en Figuur 18 getoonde verloop wel karakteristiek is voor het verdiepte gedeelte van de plas.

De grote diepte van de temperatuurspronglaag zal verhinderen dat in juli en augustus koud bodemwater van ca. 14^o C het oppervlak bereikt. Het koude bodemwater ligt namelijk dieper dan de onverdiepte plas en wind-aandrijving kan dan niet meer het bodemwater uit deze put naar de benedenwindse zijde opstuwten (zg. opwelling). Ten opzichte van eerdere schattingen voor de 14 meter diepe put zonder gelaagdheid, zijn er geen redenen om aan te nemen dat bij temperatuurstratificatie in juli en augustus slib uit de put opgewerveld of horizontaal getransporteerd zal worden.

In juli en augustus is de temperatuursprong dermate sterk dat verticale turbulente menging van slib, zuurstof en andere stoffen volledig wordt onderdrukt over een diepte van ca. 4-10 meter. De verticale turbulente menging in de niet-gelaagde perioden en ook na afbraak van de temperatuurspronglaag of ijslaag zijn gelijk aan die zonder temperatuurgelaagdheid. Ook hier geeft de afbraak van temperatuurstratificatie of van de ijslaag geen reden voor meer opwerveling van slib dan de eerdere schattingen zonder temperatuurgelaagdheid.

Ijsvorming

In de huidige situatie trad in '97 ijsvorming op, maar dat is niet meer het geval in de verdiepte situatie. Deze verschillen in ijsvorming voor diepe en ondiepe plas zullen enigszins gecompenseerd worden door horizontaal warmtetransport, maar ijsvorming in het verdiepte gedeelte zal zeker achterlopen op het ondiepe deel. Dit is een probleem voor de schaatsrecreatie, de verdiepingen moeten ruim worden afgezet.

Zonder ijs kunnen oppervlaktegolven wel bestaan maar in de diepe put zijn de orbitaalbewegingen (van de golven) bij de bodem toch al niet meer merkbaar. Daarom is het ontbreken van ijsvorming in de diepe put geen reden voor meer opwerveling van slib uit de put.

Conclusies

- In de geplande 14 meter verdiepingen in de Loosdrechtse Plassen zal in de periode juli tot medio september een aanmerkelijke temperatuurgelaagdheid optreden met temperatuurverschillen van ca. 10-15^o C.
- Gedurende deze periode is de temperatuursprong dermate sterk dat dan verticale turbulente menging over 4-10 meter diepte volledig afwezig is.
- Buiten deze periode treedt er geen verhoging van de turbulentie op t.o.v. de simulatie zonder temperatuurgelaagdheid.
- De temperatuurspronglaag ligt dermate diep dat het koude bodemwater en met eventueel slib door horizontale stroming niet uit de put gedreven kan worden en het wateroppervlak kan bereiken.
- Ijsvorming boven de diepe put zal aanmerkelijk worden onderdrukt, maar ook voor enige vertraging in ijsvorming in het omliggende ondiepe gedeelte zorgen. Dit is een probleem voor de schaatsrecreatie, de verdiepingen moeten ruim worden afgezet.
- Gezien de geringe effecten van stratificatie hoeven er geen maatregelen te worden getroffen om stratificatie tegen te gaan.

5.3.2 Effect stratificatie waterkwaliteit

In paragraaf 5.3.1 is aangegeven in welke mate thermische stratificatie kan optreden ten gevolge van de aanleg van een slibvang in de Loosdrechtse Plassen. In deze paragraaf zullen we aangeven wat de effecten hiervan zijn op de waterkwaliteit. Hiertoe hebben we gebruik gemaakt van een 1DV waterkwaliteitsmodel.

Schematisatie

Het model bestaat uit drie lagen: een toplaag met een diepte van 2 meter, een tussenlaag van 6 meter en een bodemlaag van 6 meter. Deze dieptes zijn gekozen op grond van de 1Dv berekeningen met het stratificatiemodel. Het bovenste segment heeft een 10 maal zo groot oppervlak als de overige segmenten, omdat het grootste deel van de plassen niet verdiept zal worden. In- en uitstroming van water en stof vindt uitsluitend plaats via het bovenste segment. Menging zorgt voor transport naar de andere twee segmenten.

Instraling vindt uitsluitend plaats in het bovenste segment, maar in theorie kan in de onderliggende segmenten ook productie plaats vinden omdat aan de hand van de lichtdoordringing de invallende licht intensiteit van elk segment wordt berekend. Directe invloed van wind is beperkt tot het bovenste segment. De temperaturen zijn overgenomen uit het stratificatie model, hetgeen inhoudt dat deze tijdens stratificatie in het middelste en het bodemsegment ongeveer 14 graden bedragen.

Afregeling model

Om ervoor te zorgen dat de modeluitkomsten realistisch zijn, is eerst een berekening uitgevoerd waarbij de uitwisseling met de put op nul is gezet, zodat we weer een goed gemengd meer met een diepte van 2 meter beschouwen ("NOPUT"). Vervolgens zijn de randen, initiële condities en coëfficiënten zodanig gekozen, dat de oorspronkelijke resultaten van het veel ingewikkelder DBS model (Los *et al*, 1997) op hoofdlijnen worden gereproduceerd.

Resultaten met slibvang

Vervolgens zijn twee situaties beschouwd met een slibvang. In de eerste berekening ("NOSTRAT") is aangenomen, dat er nooit stratificatie optreedt. Deze veronderstelling is niet erg realistisch, maar dient vooral als referentie. Vanwege de omvang en diepte van de slibvang zullen er overigens toch concentratiegradiënten optreden.

De laatste simulatie is gelijk aan de vorige, behalve dat nu is aangenomen dat er een temperatuurstratificatie optreedt van dag 140 tot dag 255 ("STRAT"). De verticale menging is tijdens deze periode gereduceerd met een factor 10. Wel vindt nog steeds sedimentatie plaats van organisch materiaal.

In Figuur 19 en Figuur 20 staan de resultaten van de drie simulaties voor de belangrijkste waterkwaliteitsparameters in respectievelijk het bovenste segment ("Top") en het onderste segment ("Bottom").

TOP segment

De berekende chlorofylconcentratie neemt iets af door de aanwezigheid van de put, ongeacht de vraag of deze wel of niet gestratificeerd is. Dit komt doordat de gemiddelde diepte toeneemt en de gemiddelde lichtintensiteit afneemt. De effecten op de overige waterkwaliteitsparameters zijn gering. Na opheffing van de stratificatie is er een klein dipje in de zuurstofconcentratie en een klein piekje in ammonium. Ook orthofosfaat neemt iets toe, maar de verschillen zijn zeer gering.

Bottom segment

Zonder stratificatie is het berekende chlorofylgehalte ongeveer half zo hoog als bovenin bij de aangenomen mate van menging. Met stratificatie neemt de menging sterk af en daalt het chlorofylgehalte tot een lage evenwichtswaarde. Ten gevolge van afbraak van detritus in het water en in de bodem daalt het zuurstofgehalte zeer snel naar nul; deze waarde wordt binnen tien dagen na het begin van de stratificatie al bereikt. Na opheffing van de stratificatie stijgt het zuurstofgehalte echter weer zeer snel ten gevolge van de toegenomen menging.

Opm. in het model rekenen we met negatieve zuurstofconcentraties omdat een aantal processen, die onder anaerobe condities optreden, niet in het model zijn opgenomen. De totale zuurstofconsumptie wordt echter correct beschreven met deze methode.

Door afbraak nemen de gehalten aan orthofosfaat en ammonium toe. Deze toename verloopt eerst heel snel doordat veel organisch materiaal aanwezig is, maar neemt later af doordat de hoeveelheid afbreekbaar materiaal uitgeput begint te raken door gebrek aan aanvoer. Na opheffing van stratificatie zorgt menging ervoor dat de gehalten weer zeer snel gelijk worden aan die, welke zonder stratificatie zijn berekend.

Verder kan nog worden opgemerkt dat het nitraat in de onderste laag niet toeneemt. Dit komt doordat de nitrificatie stopt zodra zuurstof naar nul gaat.

Gevoeligheid resultaten

Om de gevoeligheid van de resultaten te bepalen zijn een aantal extra berekeningen uitgevoerd met diverse waarden voor de menging, die diepte van de spronglaag en de sedimentatiesnelheid.

Hieruit bleek dat de resultaten voor het bovenste segment nauwelijks veranderen. Onderin zijn de verschillen groter, zonder dat dit echter tot wezenlijk andere conclusies leidt.

Conclusies

Op basis van de modelberekeningen zijn de volgende conclusies getrokken:

1. De hoeveelheid organisch materiaal in het water en in de bodem is zo groot, dat zeer snel (binnen 10 dagen) zuurstofloosheid zal optreden nadat de put gestratificeerd raakt.
2. Tevens vindt een sterke toename plaats van ammonium en orthofosfaat ten gevolge van afbraak en het optreden van anaerobe condities.

3. De afwijkende concentraties in de put verdwijnen zeer snel (binnen 10 dagen) na beëindiging van de stratificatie.
4. De effecten op de waterkwaliteit van de toplaag van de put zijn gering: de resultaten met en zonder stratificatie zijn sterk vergelijkbaar.
5. De effecten op de waterkwaliteit in de hele plassen zijn gering: in het najaar is er verhoging van orthofosfaat en ammonium, maar deze blijft beperkt omdat de omvang van de verdiepingen beperkt is (het hypolimnion is ongeveer 20% van het totaalvolume van de verdiepte plassen).

5.4 Golfcondities

5.4.1 Aanpak

In het gesloten systeem van de Loosdrechtse Plassen worden golven voornamelijk door de wind aangedreven. De golfcondities op de Loosdrechtse Plassen worden derhalve bepaald door de snelheid, de richting en de duur van de wind en de strijklengte en de (lokale) waterdiepte. Daarmee behoren deze golven tot de categorie van de zogenaamde windgolven.

De waterdiepte in de Loosdrechtse Plassen is rond de 1.5-2.0 meter. Op basis van deze waterdiepte en de gegeven windkarakteristieken nabij de Loosdrechtse Plassen, kan worden gesteld dat de (volgroeide) windgolven diepte-beperkt zijn. Dit betekent dat de golfcondities op een lokatie worden bepaald door het (complexe) evenwicht tussen golfvoortplanting (shoaling), golfgroei door windeffecten, niet-lineaire golfinteracties en whitecapping (breken op steilheid) en de sterk diepte-afhankelijke processen van bodemwrijving en diepte-geïnduceerd golfbreken.

Doordat de golven diepte-beperkt zijn kan een verandering in de bodemligging effecten hebben op de golfcondities (bijvoorbeeld de significante golfhoogte H_s en lengte, de gemiddelde golfperiode T_{m01} en de piekperiode T_p). Wanneer in een toekomstige situatie verdiepingen worden aangelegd, is derhalve te verwachten dat de golfcondities in de nabijheid van deze lokale verdiepingen zullen veranderen.

Het vaststellen van de effecten van een verandering van de bodemligging op de golfcondities is, gegeven de windcondities en de ondiepwater situatie (evenwicht tussen verschillende ondiepwaterprocessen), relatief complex. Voor het bepalen van de verschillen in de golfcondities in de huidige en de situatie met slibvang wordt in deze studie gebruik gemaakt van het numerieke golfmodel SWAN (Simulating Waves Nearshore).

Het SWAN model is een golfmodel ontwikkeld aan de Technische Universiteit Delft (TUD). Momenteel wordt SWAN door circa 150 instituten en universiteiten in binnen- en buitenland gebruikt.

Modelschematisatie SWAN

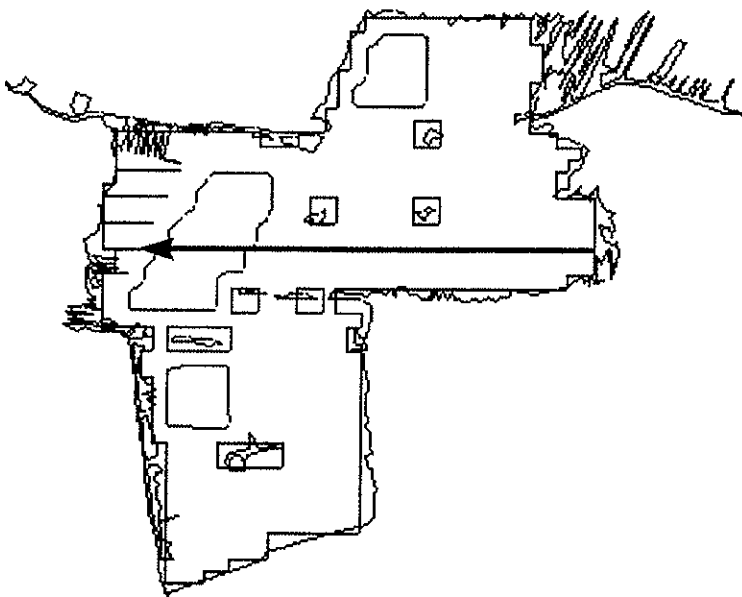
Om de orde van grootte van de effecten van de bezinkputten op de golfcondities vast te stellen, wordt in deze studie gebruik gemaakt van de één-dimensionale mode van SWAN. Deze één-dimensionale mode van SWAN kan gezien de geometrie van de Loosdrechtse Plassen (redelijk constante diepte) en afmetingen van de bezinkputten (ten opzichte van de te verwachten golflengte) efficiënt worden toegepast.

Doordat de Loosdrechtse plassen een gesloten systeem vormen, zijn geen golfrandvoorwaarden opgelegd aan de randen van het SWAN model. De waterstand in de berekeningen wordt als constant verondersteld (er is dus geen rekening gehouden met bijvoorbeeld windgeïnduceerde setup nabij de oevers).

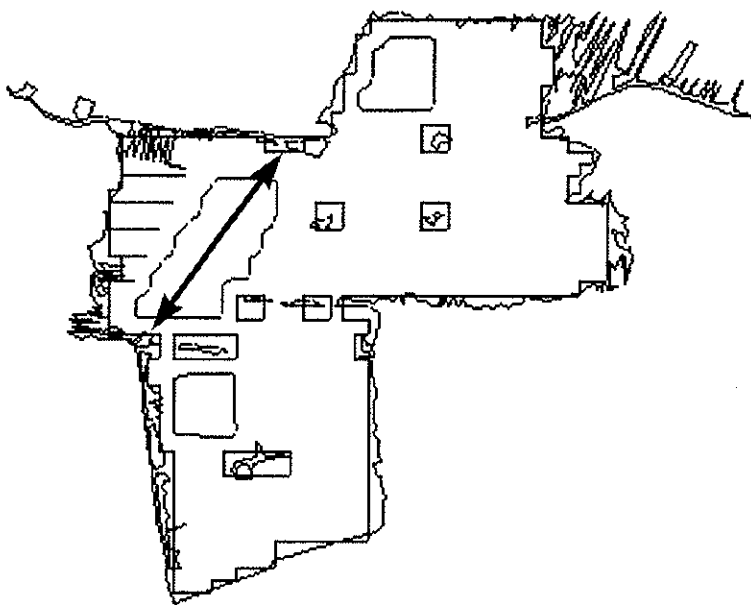
Op basis van de geometrie van de Loosdrechtse Plassen en de bezinkputten is een tweetal raaien gedefinieerd waarlangs de golfberekeningen zijn uitgevoerd.

1. De Oost-West raai representeert een situatie met een relatief lange strijklengte (Figuur 21).
2. De Zuidwest-Noordoost raai loopt parallel met de lengteas van de grootste bezinkput (zie Figuur 22).

Deze raaien zijn zodanig geselecteerd dat deze de verdiepingen doorkruisen en een 'worst case' situatie representeren (i.e. de verwachting is dat de effecten op de golfcondities voor deze twee geselecteerde situaties het grootst zal zijn). De SWAN-berekeningen zijn uitgevoerd voor een situatie met harde wind (windsnelheid = 15 m/s), een situatie onder dagelijkse omstandigheden (windsnelheid = 5 m/s) en een extreme situatie (windsnelheid = 30 m/s). In deze laatste situatie is de wind geïnduceerde set up niet te verwaarlozen zoals in de situaties met een windsnelheid van 5 en 15 m/s, daarom zijn in deze situatie de SWAN berekeningen gecombineerd met eenvoudige afschattingen van de opwaaiing.



Figuur 21 De Oost-West raai



Figuur 22 De Zuidwest / Noordoost raai

5.4.2 Modelresultaten

De door SWAN berekende significante golfhoogte, gemiddelde periode, de piekperiode en de waterdiepte voor de huidige situatie en situatie met bezinkputten voor de relatief hoge windsnelheid van 15 m/s zijn weergegeven in Figuur 23 (resultaten langs Oost-West raai) en Figuur 24 (resultaten langs Zuidwest-Noordoost raai). De effecten van de verdieping zijn duidelijk zichtbaar en leiden over het algemeen tot een grotere waarde voor de significante golfhoogte (circa 10% voor zowel de Oost-West raai als de Zuidwest-Noordoost raai) en de gemiddelde periode (circa 5%) nabij de oevers. De (discrete) piekperiode verandert niet significant door de verdieping. Uit de figuren kan worden opgemaakt dat vooral de diepte tussen verdieping en oever bepalend is voor de golfhoogte bij de oever en niet de afstand tussen de verdieping en de oever. Dit is te zien aan de gradiënt van de significante golfhoogte in het gebied tussen de put en de oever voor de huidige en toekomstige situatie, die weinig van elkaar verschillen. Dit betekent dat de golfcondities nabij de oever bijna volledig diepte-gelimiteerd zijn en dat de lokatie van de bezinkput ten opzichte van de oever weinig effect zal hebben op de golfcondities nabij de oever.

De modelresultaten voor de huidige situatie en de toekomstige situatie voor een windsnelheid van 5 m/s zijn weergegeven in Figuur 25 (resultaten langs Oost-West raai) en Figuur 26 (resultaten langs Zuidwest-Noordoost raai) in de bijlage. Het effect van de bezinkput op de golfcondities is voor een windsnelheid van 5 m/s zeer gering zoals is te zien in beide figuren. Ter plaatse van de verdieping is de verandering in de significante golfhoogte H_s en gemiddelde periode T_{m01} slechts enkele procenten.

Bij een situatie van extreem harde wind ($>>15$ m/s, bijvoorbeeld 30 m/s) moet er rekening gehouden worden met windgeïnduceerde setup nabij de oevers. Expert schattingen (zie mede eerder onderzoek Markermeer, WL | DELFT HYDRAULICS 1998) geven aan dat de opwaaiing bij de oevers langs de Oost-West raai in de huidige situatie ca. 30 cm bedraagt. De Zuidwest-Noordoost raai is korter waardoor de opwaaiing bij deze windrichting minder is. De verdiepingen hebben tot gevolg dat de opwaaiing minder wordt dan de opwaaiing in de huidige situatie. De waterstand bij de oever is daardoor lager na verdiepen waardoor golven (dieptegelimiteerd) breken en meer in hoogte afnemen dan in de huidige situatie. De combinatie van deze twee factoren (hoge golfhoogtes door verdiepen, maar minder opwaaiing) heeft tot gevolg dat aan de oever de golfhoogte na verdiepen gelijk is aan, of zelfs iets minder is dan in de huidige situatie bij deze windsnelheden. De golfhoogte boven de verdiepingen neemt bij deze extreme windsnelheden aanzienlijk toe; in de volgende paragraaf (5.4.3) wordt aangegeven dat kan worden aangenomen dat bij een dergelijke extreme wind geen watersporters meer op het water zijn.

Conclusies

Conclusies over golfhoogtes, op basis van modelresultaten van SWAN-berekeningen in een sterk geschematiseerde één-dimensionale situatie, zijn samengevat in Tabel 9.

Tabel 9 Effecten van verdieping op de golfhoogte bij verschillende windsnelheden ter hoogte van de put en ter hoogte van de oever (aan lager wal), op basis van een globale expert analyse en het gebruikte eindimensionale SWAN-model

windsnelheid m/s	effect ter hoogte van de verdieping	effect aan de oever
5	verwaarloosbaar	verwaarloosbaar
15	20% bij O-W wind (van 0.5 naar 0.6 m) 12.5% ZO->NW wind (van 0.4 naar 0.45 m)	toename golfslag maximaal 10 %
30	aanzienlijk	golfhoogte vermoedelijk kleiner bij verdieping door afname van de windopzet

5.4.3 Gevolgen

In het navolgende zal worden nagegaan of de toename in golfhoogte gevolgen heeft voor enerzijds de veiligheid van watersporters en anderzijds voor de oeverafslag. In het laatste geval zou dit eventueel een bijdrage kunnen leveren aan het in suspensie zijnde slib in het meer.

Veiligheid watersporters

Onder watersporters worden in dit verband verstaan allen die op en rond het water recreëren, dat wil zeggen: zeilers, motorbootvaarders, surfers, zwemmers, vissers, etc. Dat betekent dat hun veiligheid moet zijn gewaarborgd binnen redelijke grenzen. Met het laatste wordt bedoeld dat de individuele verantwoordelijkheid van ieder individu zo groot wordt verondersteld, dat hij of zij zich niet onnodig bloot stelt aan onverantwoorde risico's.

Op grond van de vooronderstellingen mag er van worden uit gegaan dat bij een extreme windsnelheid van 30 m/s (windkracht 11 Bf) er geen recreanten op of rond het meer zijn. De veiligheid van watersporters is onder dergelijke omstandigheden dan ook niet in het geding.

Bij een windsnelheid van 15 m/s (een windkracht van 7 Bf.: harde wind waarbij golven breken en witte schuimkoppen optreden) zijn er wel enige watersporters (zeilers, surfers) op de plassen. Bij deze windsnelheid neemt de golfhoogte boven de verdiepingen door de verdiepingen met maximaal 10 cm toe (Oost west-raai) De veiligheid van de aanwezige watersporters is hierdoor niet onacceptabel afgenomen.

Een windsnelheid van 5 m/s (windkracht 3 Bf.) is voor watersporters (uitgezonderd surfers) ideaal. De eventuele aanleg van de bezinkputten heeft een verwaarloosbaar effect op de golfhoogte en de golfperiode, en dus verandert er wat betreft de omstandigheden voor recreëren niets ten opzichte van de situatie voor een eventuele aanleg van de bezinkputten. Dit betekent dat de veiligheid van watersporters in deze situatie niet verandert.

Oeverafslag

Windgolven kunnen rond de waterlijn afslag of erosie veroorzaken, maar ook ontgroning aan de teen van verticale beschoeiingen. Het geërodeerde materiaal wordt elders afgezet of blijft in suspensie. Afslag en erosie van oevermateriaal wordt behalve door de belasting mede bepaald door de sterkte van de oever, die bij onvoldoende sterkte van het eigenlijke oevermateriaal vergroot kan worden door een beschermingsconstructie.

In het kader van deze studie wordt vooral gekeken naar onverdedigde oevers langs de Plas Voor verdedigde oevers wordt het aannemelijk geacht dat de grotere golfslag geen invloed heeft. Allereerst omdat wordt verondersteld dat de aanleghoogte boven het meerpeil voldoende hoog is om golfoverslag en erosie van de aangrenzende grond te voorkomen. Daarnaast omdat een verdere verdieping van de ontgroning aan de teen onder de huidige omstandigheden verwaarloosbaar wordt geacht gezien de geringe toename van de golfhoogte.

Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat als de aanleghoogte in de huidige situatie onvoldoende is en erosie bij golfoverslag optreedt omdat grasmat of bekleding onvoldoende bescherming biedt, dit ook in de toekomstige situatie het geval zal zijn. In die zin verandert er dan in zeer geringe mate iets.

Blijven over de onverdedigde oevers. Het materiaal waaruit de oevers zijn opgebouwd is veen met daarin zeer waarschijnlijk zand en kleideeltjes. Veenoevers worden gekenmerkt door een sterke structuur waarbij sprake is van een soort van vezelwapening die afzonderlijke, losse elementen bijeen houdt. Erosie van veen vertoont dan ook vaak het beeld van het plotseling verdwijnen van brokken onder invloed van wateroverspanningen, in plaats van het geleidelijk afslijpen door schuifspanningen zoals dat kan worden waargenomen bij niet-cohesieve materialen zoals zand. Zeer vaak ook zal bio-degradatie optreden, dat is het in de loop van de tijd veranderen van de grondeigenschappen door

contact met zuurstofrijk water. Binnen een week kan hierdoor de bovenste 0,10 m met een oppervlak van enkele decimeters alle samenhang verliezen.

In het kader van een CUR commissie is in de afgelopen jaren inventariserend onderzoek verricht naar afslag/erosie van onverdedigde oevers inclusief de mogelijkheden voor het modelleren daarvan (CUR, 1996)(Verheij *et al*, 1993). Recent is een samenwerkingsproject gestart tussen RWS-DWW en WL | DELFT HYDRAULICS om het modelleren fundamenteel aan te pakken.

Op grond van wat nu bekend is kan worden geconcludeerd dat afslag en dus achteruitgang van een veenoever een voortdurend proces is. De orde van grootte kan variëren van enkele meters tot 10 meter per jaar, hoofdzakelijk door bio-degradatie. Windgedreven stromingen zullen zorgdragen voor verwijdering van het gedegradeerde veen. De werkelijk optredende mate van afslag kan alleen worden aangegeven als grondmechanische informatie danwel historische gegevens beschikbaar zijn op basis waarvan de weerstand tegen afslag kan worden vastgesteld. Met een model op basis van het erosion-rate-concept (recent ook toegepast om de achteruitgang van onverdedigde oevers in het kader van de Maaswerken in te schatten) is een kwalitatieve indicatie te krijgen.

Gegeven is dat de golfhoogte bij harde wind (15 m/s) aan de oevers met maximaal 10 % toeneemt. Op basis van het erosion-rate-concept is dan te concluderen, dat als in de huidige situatie een oever achteruitgaat, in de toekomst de achteruitgang maximaal 10% groter zal zijn. Oevers waar nu geen afslag optreedt, zullen gezien de geringe toename van de golfslag waarschijnlijk ook in de toekomst niet afkalven, of in zeer geringe mate. Voor de condities zoals die van toepassing zijn onder dagelijkse omstandigheden (windsnelheid 5 m/s) zal niets veranderen. Immers, de toename van de golfhoogte ten opzichte van de huidige situatie is te verwaarlozen.

Opm.: Water- en oevervegetatie verminderen de oeversafslag. Stimulering van deze vegetatie is een vorm van oeversverdediging.

Conclusies

De gevolgen van de grotere golfslag door de eventuele aanleg van bezinkputten zijn nagegaan wat betreft de veiligheid van watersporters en wat betreft de oeverafslag. Voor de veiligheid van watersporters kan worden geconcludeerd dat:

- Bij harde wind (windsnelheid 15 m/s) neemt de golfhoogte boven de verdiepingen door de verdiepingen met maximaal 10 cm toe (Oost west-raai). De veiligheid van de aanwezige watersporters is bij deze toename van de golfhoogte niet in het geding, met dien verstande dat wordt verondersteld dat zij voldoende verantwoordelijkheidsgevoel hebben om geen onnodige risico's te nemen.

Wat betreft de gevolgen voor golfafslag, zijn door het ontbreken van gegevens, slechts conclusies te geven op basis van een kwalitatieve vergelijking gebruikmakend van een model op basis van het erosion-rate-concept. De conclusies luiden:

- Afslaggevoelige veenoevers waar ook in de huidige situatie onder extreme omstandigheden terugschrijding wordt waargenomen, zullen ook na aanleg van de eventuele bezinkputten afslaan. De mate van afslag is evenredig met de toename van de golfhoogte.
- Bij condities van 5 m/s en 30 m/s zal geen verandering in de mate van afslag optreden, omdat de golfslag bij de oever niet verandert t.o.v. de huidige situatie.
- Geërodeerd oevermateriaal zal door windgedreven stromingen worden verwijderd uit de oeverzone en in suspensie blijven danwel elders worden afgezet.

6 Capaciteit van de put

Is de verdieping voldoende diep om voor vele decennia (80 jaar) geen last meer te hebben van zwevend slib op de plassen? Om deze vraag te beantwoorden moet de hoeveelheid slib aanwezig in de Loosdrechtse Plassen bepaald worden, en de hoeveelheid die in de komende 80 jaar geproduceerd of aangevoerd wordt. Vooral het grove slib is van belang voor deze problematiek, de massa van fijn slib is slechts gering.

Om te bepalen hoe diep de put moet zijn om over 80 jaar nog voldoende slib te vangen wordt een 'worst case' scenario doorgerekend. Stel dat al het grove slib dat nu in de Loosdrechtse Plassen aanwezig is en dat wat de komende 80 jaar wordt geproduceerd, in de verdieping terecht komt. Wat is hiervan de consequentie? In Tabel 10 staat hoeveel meter slib dit in de verdiepingen oplevert. Hierbij is uitgegaan van de drie verdiepingen met een totaal oppervlak van 120 ha. Er is rekening gehouden met een talud van 1:4 (noord en westoever van de verdieping in de Eerste Plas 1:7, pers. comm. De Ruiters 22 april).

Tabel 10 Schatting van volume van het slib in 2080 en de verondieping van de verdiepingen tengevolge van dit slib

herkomst	volume m ³	in verdiepingen m
bodemslib 2000	3.3*10 ⁶	3.5
bodemslib 2000-2080	0.96*10 ⁶	1.0
totaal	4.26 *10 ⁶	4.5

In totaal kunnen volgens bovenstaande berekening de verdiepingen 4.5 m ondieper worden, als in die 80 jaar al het slib dat nu op de bodem ligt en al het slib dat in die tijd geproduceerd wordt in de verdiepingen terecht komt. Dit is echter een bovenschatting, een deel van het slib zal de verdiepingen niet bereiken en er treedt consolidatie op. Tevens zal, indien er zich waterplanten ontwikkelen in de plassen, de slibproductie afnemen en de resuspensie van het slib verminderen. Ook zal door fosfaatreducerende maatregelen, de algenproductie en dus de slibproductie afnemen. Echter, een deel van het zeer fijne slib wat in de komende 80 jaar geproduceerd wordt, accumuleert ook in de verdiepingen. Het volume van dit zeer fijne slib is echter zeer gering.

In bovenstaande berekening is uitgegaan van een aangroeisnelheid van 600 ton C/jaar. De aangroeisnelheid is echter onzeker (zie paragraaf 4.3.2). De hoogste schatting is 1550 ton C/jaar. In dat geval zullen de verdiepingen in 80 jaar 6.1 m ondieper worden, wanneer al het slib in de verdiepingen terecht zou komen, hetgeen onwaarschijnlijk is, omdat niet al dit materiaal getransporteerd zal kunnen worden over een grotere afstand.

De aanname dat al het slib dat nu op de bodem van de Loosdrechtse Plassen ligt in de verdiepingen terecht zal komen is niet erg realistisch. In Tabel 11 is te zien wat de gevolgen zijn voor de verdiepingen wanneer 50% van het slib in de verdiepingen terecht komt.

Tabel 11 Verondieping van de verdiepingen in 80 jaar bij verschillende aangroeisnelheden van slib en verschillende percentages van slib dat accumuleert in de put.

Aangroeisnelheid	% van slib wat in verdiepingen komt	
	100 %	50 %
600 ton C/jaar	4.5 m	2.25 m
1550 ton C jaar	6.1 m	3.05 m

Conclusie

In Los *et al.* 1997, is geconcludeerd dat de sedimentatie bijna maximaal is bij een verdieping van 10 meter. Het is waarschijnlijk dat de verdiepingen over 80 jaar nog voldoende diep zijn. Gezien de onzekerheid in de schattingen kan dit echter niet met zekerheid worden vastgesteld. Overwogen kan worden de verdiepingen 2 meter verder te verdiepen (tot maximaal 16 meter diepte overeenkomend met 14 meter vanaf de bodem). Nu is een verdieping van 12 meter vanaf de bodem voorzien.

7 Conclusies en Aanbevelingen

Voor de vragen over huidige situatie verwijzen we naar de conclusies in de desbetreffende hoofdstukken en naar de conclusies in Los *et al.* 1997.

Hieronder volgen de conclusies en aanbevelingen met betrekking tot de effecten van de verdiepingen.

7.1 Conclusies

Slibconcentratie

De vraag is of na het aanbrengen van de verdiepingen de achtergrondconcentratie van 5 gC/m³ zal dalen tot onder de 3 gC/m³, het streefbeeld.

De fosfaatbelasting is door maatregelen de laatste jaren minder geworden, de productie van zeer fijn slib uit de algencyclus bedraagt nu ongeveer 120 tonC/jaar. De streefwaarde (3 gC/m³) kan volgens deze studie bereikt worden. Voorwaarde is dat het huidig effectief accumulatieoppervlak niet groter is dan 100 ha³. In deze studie is dit oppervlak geschat op een waarde tussen 20 en 100 ha.

Stratificatie

Aan WL | DELFT HYDRAULICS is gevraagd inzicht te geven in de kans op stratificatie na verdiepen, de consequenties van stratificatie en de maatregelen die eventueel zouden moeten worden getroffen.

In de geplande verdiepingen in de Loosdrechtse Plassen zal in de periode juli tot medio september een aanmerkelijke temperatuurgelaagdheid optreden. De effecten zijn echter gering:

- De temperatuurspronglaag ligt dermate diep dat het koude bodemwater met eventueel slib door horizontale stroming niet uit de verdiepingen gedreven kan worden en het wateroppervlak kan bereiken.
- Stratificatie heeft effect op de waterkwaliteit in de verdiepingen maar de effecten op de waterkwaliteit in de gehele plas en in de toplaag van de verdiepingen zijn gering. In de verdiepingen zal zuurstofloosheid optreden nadat deze gestratificeerd raken. Tevens vindt een sterke toename plaats van ammonium en orthofosfaat ten gevolge van afbraak en het optreden van anaerobe condities. Deze afwijkende concentraties in de verdiepingen verdwijnen zeer snel (binnen 10 dagen) na beëindiging van de stratificatie.

³ De gedachte hierachter is dat hoe kleiner het accumulatieoppervlak is in de huidige situatie, hoe groter het effect zal zijn van de verdieping (uitgebreid beschreven in hoofdstuk 4.2).

Gezien de geringe effecten van stratificatie hoeven er geen maatregelen te worden getroffen om stratificatie tegen te gaan.

De verdiepingen hebben nadelige gevolgen voor de ijsvorming. Ijsvorming boven de diepe put zal aanmerkelijk worden onderdrukt, maar ook voor enige vertraging in ijsvorming in het omliggende ondiepe gedeelte zorgen. Dit is een probleem voor de schaatsrecreatie, de verdiepingen moeten ruim worden afgezet en niet te dicht op de oever worden gesitueerd.

Golfcondities

Hieronder staan de conclusies van het antwoord op de vraag om van de invloed van de geplande verdiepingen op de golfslag te bepalen en de gevolgen hier weer van op veiligheid van watersporters en oeverafslag.

Aangenomen mag worden op basis van een globale analyse door een expert (op basis van modelberekeningen) dat de golfhoogte aan de oevers niet in relevante mate toeneemt (met maximaal 10 % bij een windsnelheid van 15 m/s), sterker nog, door verlaging van de windopzet, als gevolg van de verdieping, kan de golfhoogte bij extreme wind aan de oever ook kleiner worden.

Boven de verdieping neemt de golfhoogte bij lage windsnelheden nauwelijks toe. Bij harde wind kan bij de langste fetch (bij oostenwind) de golfhoogte toenemen met 20 % (van 50 naar 60 cm). Bij extreme wind zal de toename van de golfhoogte aanzienlijk zijn.

De veiligheid van de watersporters is door de hogere golfslag niet onacceptabel afgenomen, met dien verstande dat wordt verondersteld dat zij voldoende verantwoordelijkheidsgevoel hebben om bij harde wind geen onnodige risico's te nemen; bij extreme wind mag verwacht worden dat geen watersporters meer op het water zijn.

Afslaggevoelige, onverdedigde veenoevers waar ook in de huidige situatie onder extreme omstandigheden terugschrijding wordt waargenomen, zullen ook na aanleg van de eventuele bezinkputten afslaan. De mate van afslag is evenredig met de toename van de golfhoogte. Deze is het grootst bij harde wind (15 m/s), namelijk maximaal 10 %. Bij lagere windsnelheden (5 m/s) is de toename van de golfhoogte verwaarloosbaar. Bij extreme wind (>> 15 m/s, bijvoorbeeld 30 m/s) resulteert verdieping in een verminderde opwaaiing, waardoor de golfhoogte aan de oever zelfs kan afnemen. Gedachte hierachter is dat de golfhoogte in belangrijke mate wordt bepaald door de waterdiepte. De waterdiepte aan de oever wordt door verminderde opwaaiing als gevolg van verdieping kleiner en daarmee de golfhoogte.

Capaciteit

Ook is het volume bepaald van de verdiepingen dat nodig is om te garanderen dat de put over 80 jaar nog op diepte (10 m) is.

In Los *et al.* 1997, is geconcludeerd dat de sedimentatie bijna maximaal is bij een verdieping van 10 meter. Het is waarschijnlijk dat de verdiepingen over 80 jaar nog voldoende diep zijn. Gezien de onzekerheid in de schattingen kan dit echter niet met zekerheid worden vastgesteld. Overwogen kan worden de verdiepingen verder te verdiepen, tot maximaal 16 meter diep.

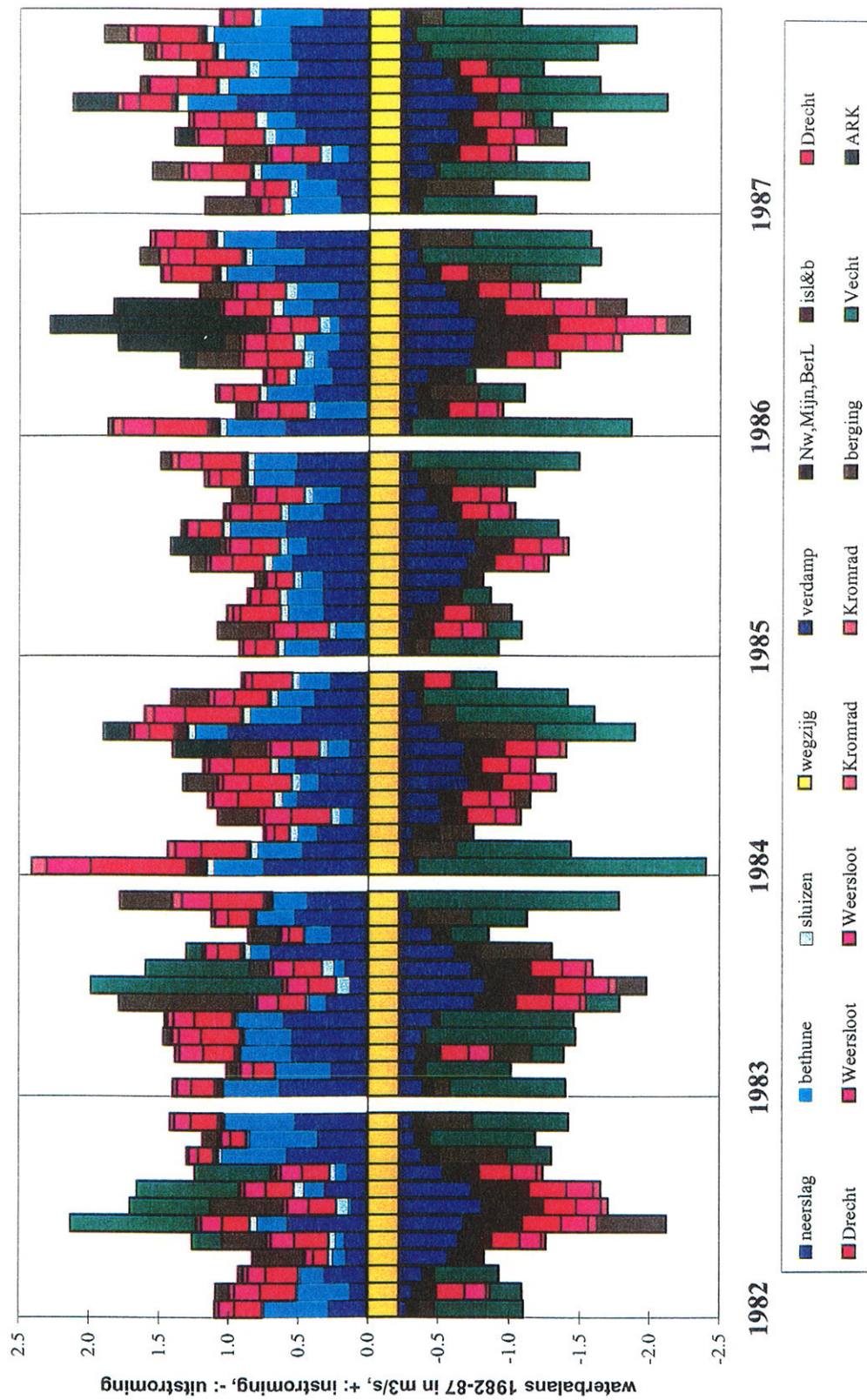
7.2 Aanbevelingen

Gezien het feit dat niet met zekerheid kan worden vastgesteld dat de verdiepingen over 80 jaar voldoende diep zijn moet overwogen worden de verdiepingen 2 meter verder te verdiepen tot maximaal 16 meter diepte (ten opzichte van de waterlijn), oftewel een verdieping van 14 meter ten opzichte van de bodem (bij een huidige waterdiepte van ongeveer 2 meter).

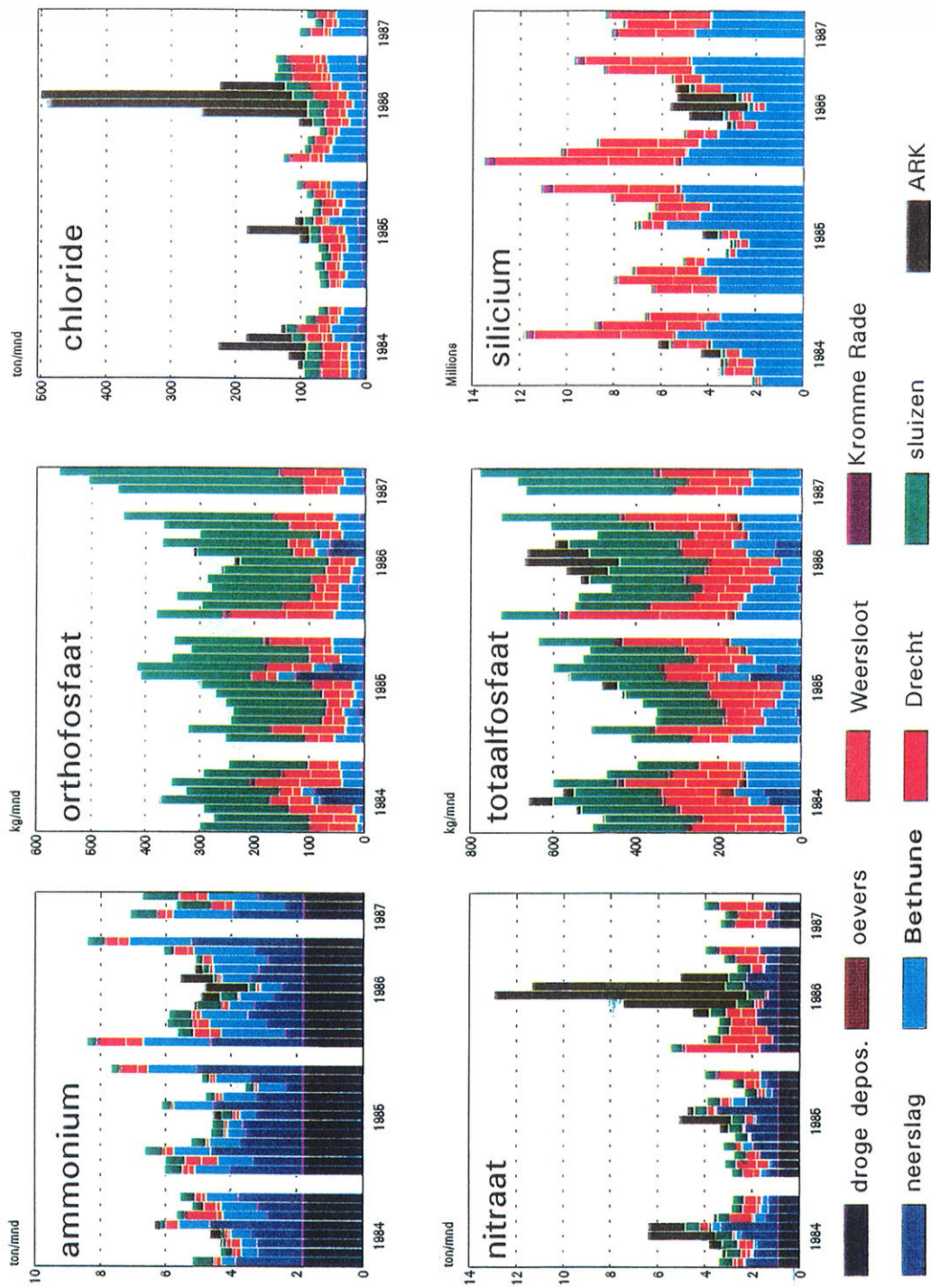
Het verdient aanbeveling de hoeveelheid slib op de bodem van de Loosdrechtse Plassen te meten, nu en eventueel na verdiepen.

8 Referenties

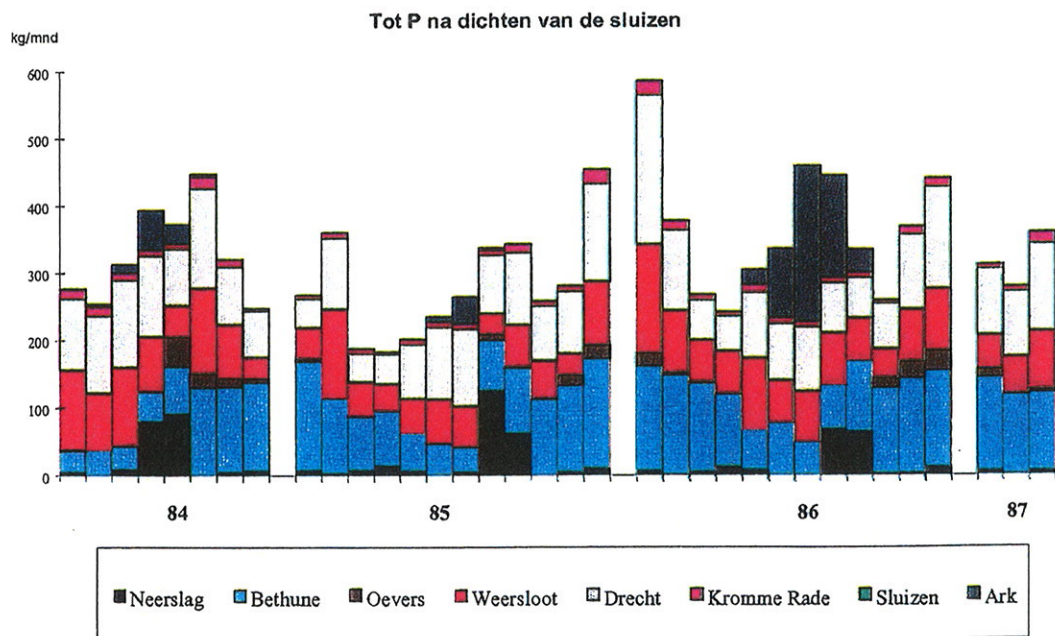
- Analystisch-Chemisch Laboratorium Amsterdam, 1997. Resultaten onderzoek naar de dikte en consolidatie van de sliblaag aan de westzijde van de Breukeleveense Plas
- Bengtsson, L. 1978. *Wind induced circulations in lakes*, Nordic Hydrology, 9, 75-94.
- Boers, P., Boon J. 1988. Unmasking the particulate organic matter in a lake ecosystem: Origin and fate of POM in the shallow eutrophic Loosdrecht Lakes (the Netherlands) Arch. Hydrobiol. Beih. 31: 27-34.
- Buyse, J.J. (1988) Water- en stofbalansmodellen voor de Loosdrechtse Plassen. VRIJE UNIVERSITEIT AMSTERDAM, WOL rapport 1988-7.
- Carper, G.L., A.G. Bachman 1984. Wind resuspension of sediments in a small prairie lake. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 41, pp. 1763-1767
- CERC (1974 en 1984) Shore Protection Manual, US Army Coastal Engineering Research Center, Corps of Engineers.
- CUR (1996): *Erosie van onverdedigde oevers*. Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, rapport 96-7, Gouda.
- Ebert J. en L. van Liere (1992) Waterkwaliteits Onderzoek Loosdrechtse Plassen, WOL-rapport 1992-1.
- Engelen, G.B. en B.F.M. Kal (1985) Hydrologisch onderzoek in W.O.L.-kader van het Loosdrechtse Plassen-gebied in verband met beleid en beheer voor waterkwaliteitsherstel, WOL.-rapport 1985-1, VU Amsterdam.
- Gons, H.J., R. Veeningen, R. van Keulen (1986) Effects of wind on a shallow lake ecosystem: redistribution of particles in Loosdrecht lakes, Hydr. Biol. Bull. 20, pp. 109-120.
- Gons, H.J., R. van Keulen 1989. De relatie tussen doorzicht en slib in de Loosdrechtse Plassen in verband met de zwemwaternorm, Limnologisch Instituut, WOL-rapport 1989-4
- Grant, W.D. & O.S. Madsen 1979 Combined wave and current interaction with a rough bottom. *J. Geophys. Res.*, vol. 84, no. C4, pp. 1797-1808.
- Jaarsveld, J.A. van (1995). Modelling the long-term atmospheric behaviour of pollutants on various spatial scales, Proefschrift, ISBN 90-393-050-7
- Kappe, B., Koningsbruggen, P. van en L. Voogt, 1989. Integraal waterbeheer Ketelmeer; erosie van slib ten gevolge van scheepvaart. RWS, directie Flevoland.
- Los, F.J., Fokkink, R.J., Ouboter, M. R.L. 1995. *Onderzoek naar de troebelheid in de Breukeleveense Plassen*, WL | DELFT HYDRAULICS.
- Los, F.J., Fokkink, R.J., Ouboter, M.R.L. 1997. *Onderzoek naar de slibdynamiek in de Loosdrechtse Plassen*, Rapport T1571, WL | DELFT HYDRAULICS.
- Los, F.J., Fokkink, R.J., Ouboter, M.R.L. 1998. *Troebelheid Breukeleveense Plas*, WL | DELFT HYDRAULICS.
- NIOZ 1998. Resultaten onderzoek naar de ouderdom van de sliblaag aan de westzijde van de Breukeleveense Plas.
- Nieuwenhuyze, R.F. van, 1986. Oriënterend onderzoek naar oorzaken en bestrijding van de slibproblematiek in de Loosdrechtse Plassen. Provinciale Waterstaat Utrecht
- Ris, R.C., N. Booij, L.H. Holthuisen and R. Padilla-Hernandez, 1997: *User manual for the program SWAN Cycle 2*, Technische Universiteit Delft, Nederland
- Houwing, E.J. 1998. Erosie van de waterbodem door scheepvaartbewegingen in de Hollandse IJssel. RIZA werkdocument 98.101x.
- Shore protection manual* 1994 Dept. of Army, Waterways experiment station of Engineers, Coastal Engineering Research Center. Vol. 1, 1984 (fourth edition).
- Ruiter de, M. 1999. Schattingen van de netto sedimentatie en de totale slibbalans in de Loosdrechtse Plassen in de huidige situatie. DWR 7 april 1999
- Verheij, H.J. et al (1993): *Modelleren gedrag onverdedigde oevers - inventarisatie studie*. WL|Delft Hydraulics, Grondmechanica Delft en FUGRO BV, WL rapport Q1556, Delft.
- Vos, R.J., E.D. de Goede & R.E. Uittenbogaard 1999 *Validation of a 3D temperature model for the North Sea with in-situ data and remote sensing data*. WL|DELFT HYDRAULICS, report Z2506.00, Febr..
- WL | DELFTHYDRAULICS, 1998. Onafhankelijk onderzoek Markermeer, H3211, mei 1998.
- Wortelboer, 1998. Modelling the effect of atmospheric deposition on shallow heathland lakes in the Netherlands. Env. Poll. 102, 539-546.



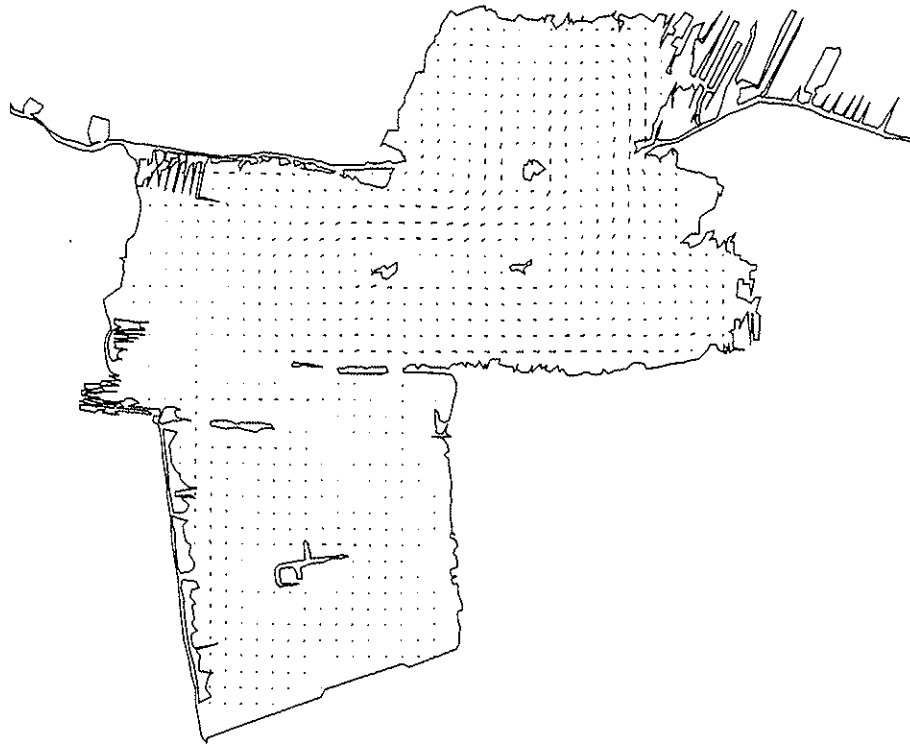
Figuur 1 Waterbalansen 1982-1987. Uit Los *et al.*, 1997



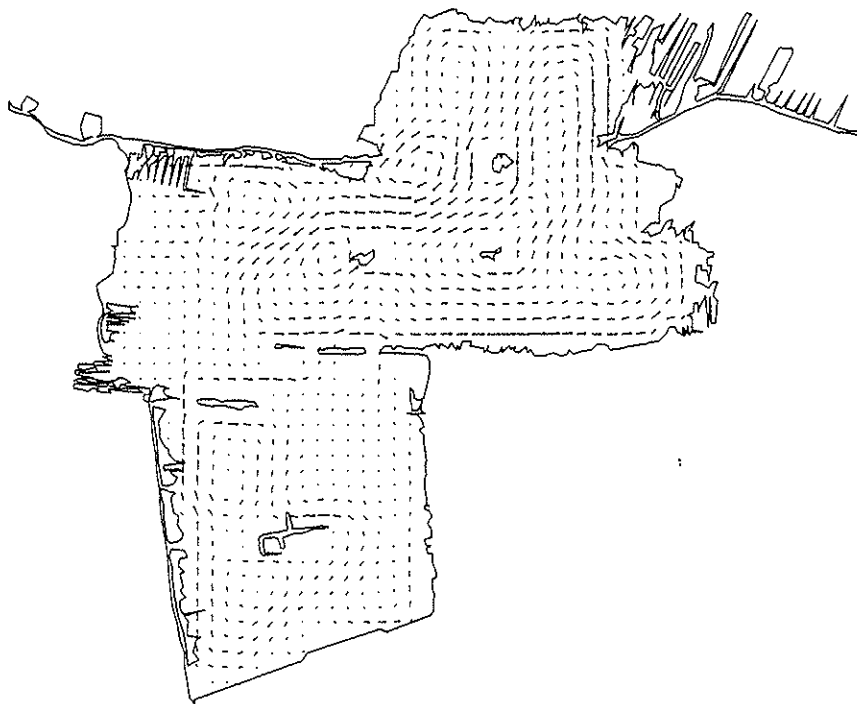
Figuur 2 Belasting van ammonium, nitraat, orthofosfaat, totaalfosfaat, chloride en silicium in de tijd naar herkomst 1984-1987. Uit Los *et al.*, 1997



Figuur 3 Belasting naar herkomst voor totaal fosfaat in de 'huidige situatie' d.w.z. situatie 1984-1987 gecorrigeerd voor situatie 1999 met betrekking tot sluislekkage



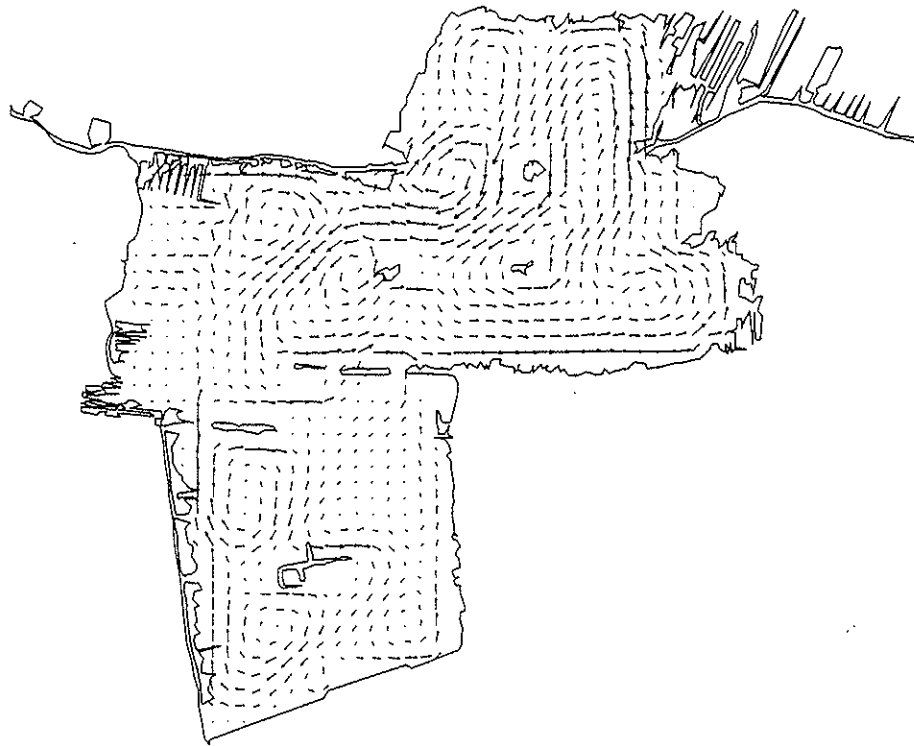
→ .200m/s



→ .200m/s

Huidige inrichting
 Zuidwesten wind 5 m/s (boven), 10 m/s (onder)
 Stroomsnelheids vector plot

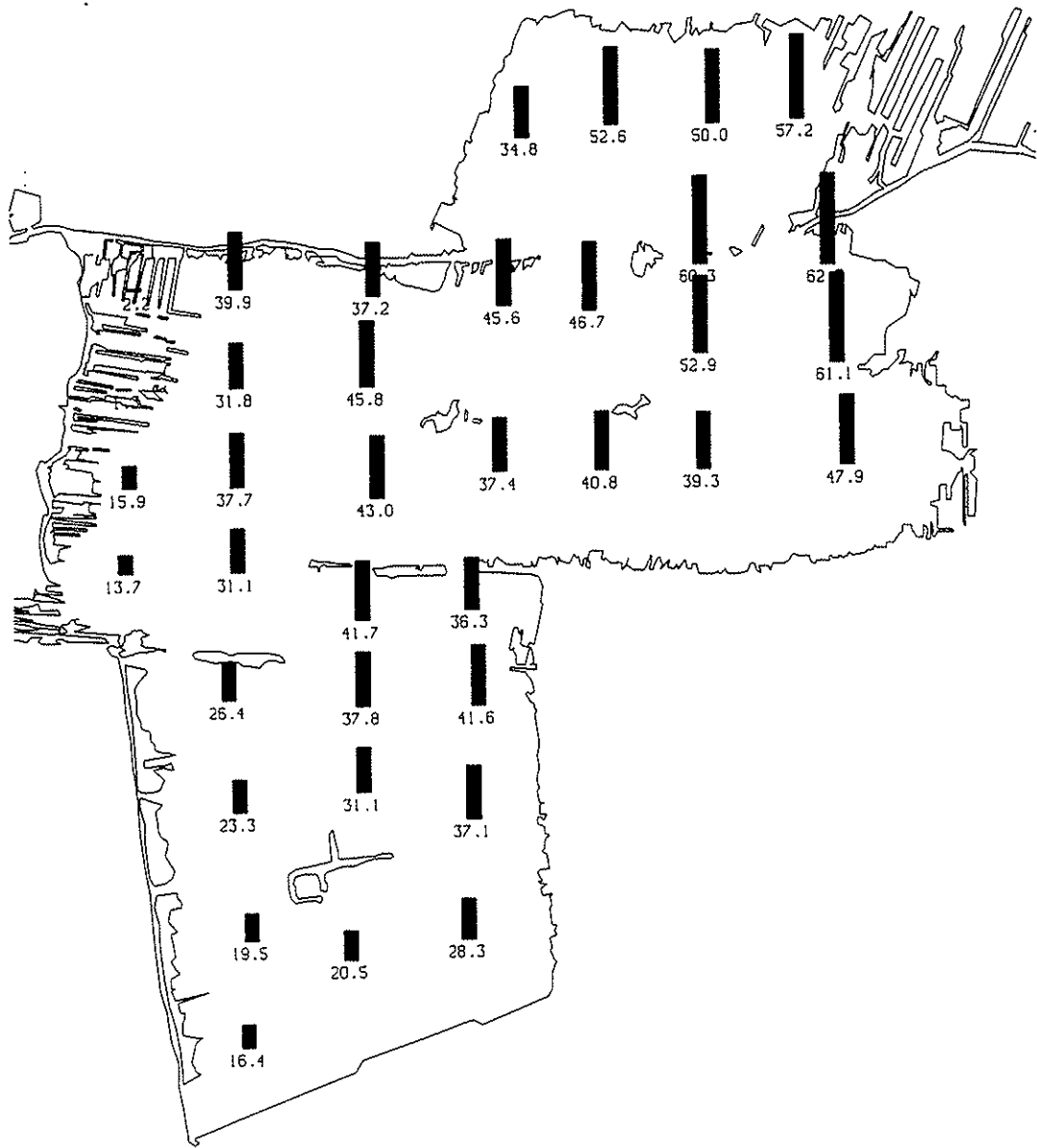
Fig. 4



→ .200m/s

Huidige inrichting
Zuidwesten wind 15 m/s
Stroomsnelheids vector plot

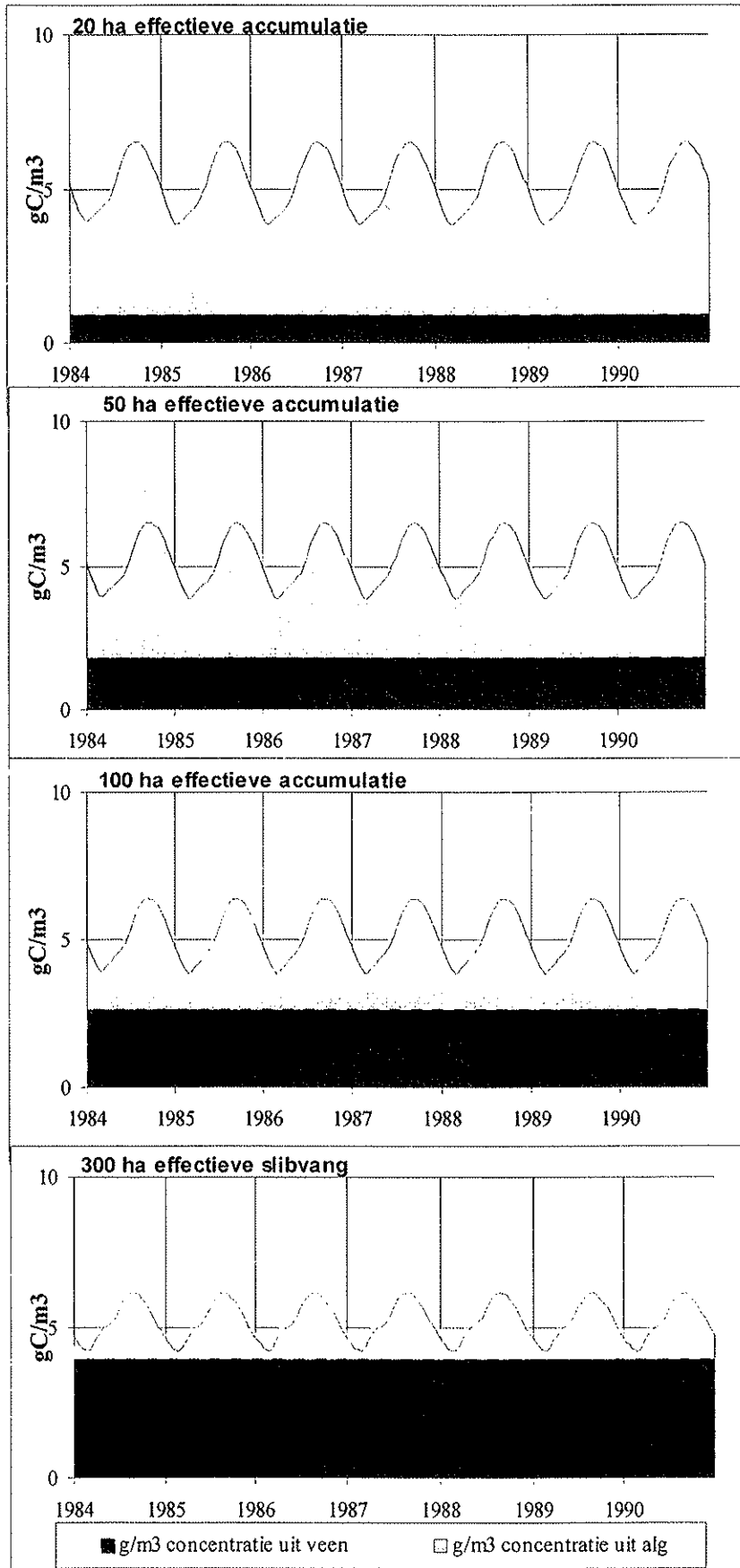
Fig. 4



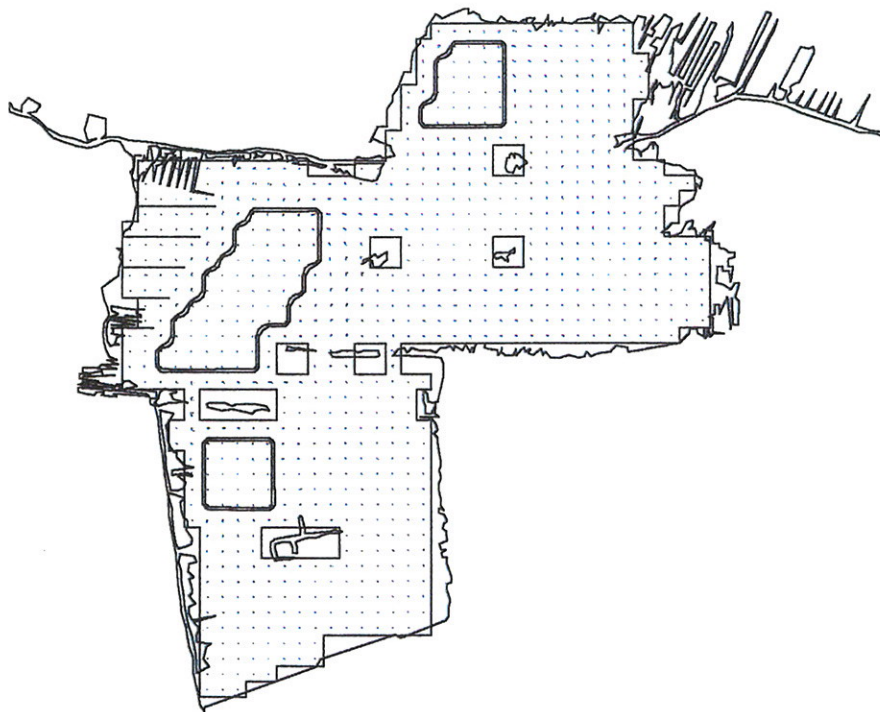
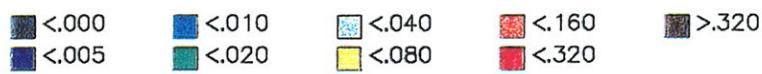
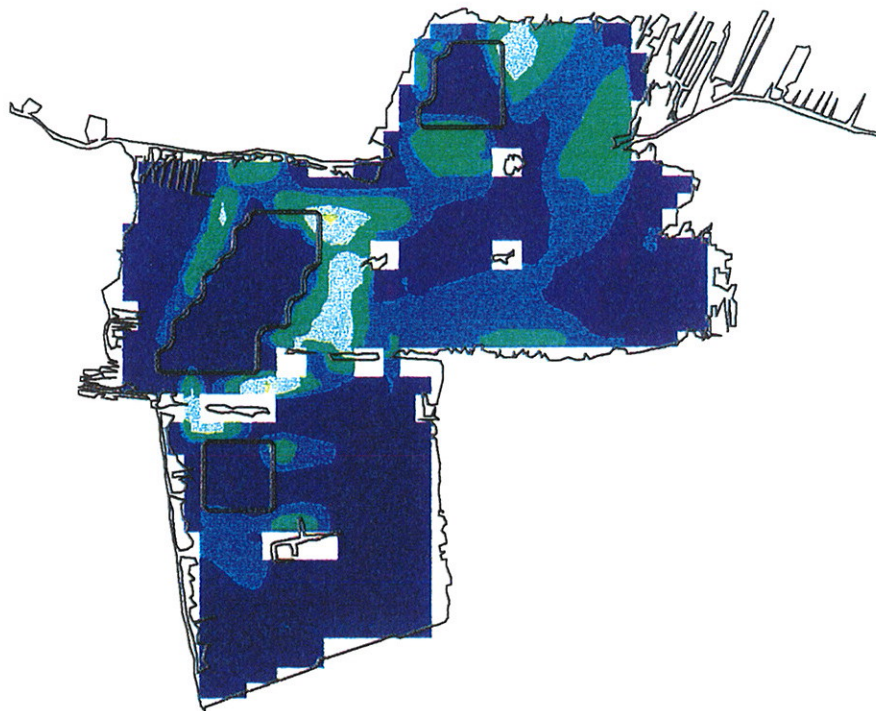
gemiddelde frekwentie is 36.5 %

Frekwentie van resuspensie in Loosdrecht
In percentage van de tijd

Fig. 8



Figuur 9 Herkomst van zeer fijn slib bij verschillende accumulatieoppervlakten.

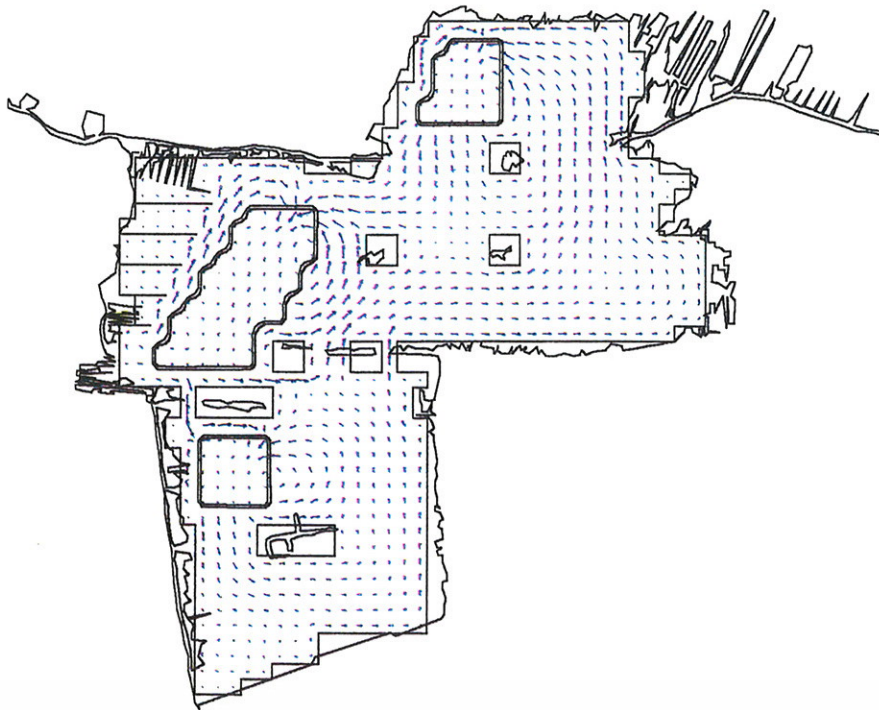
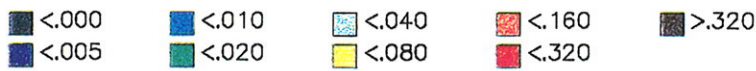
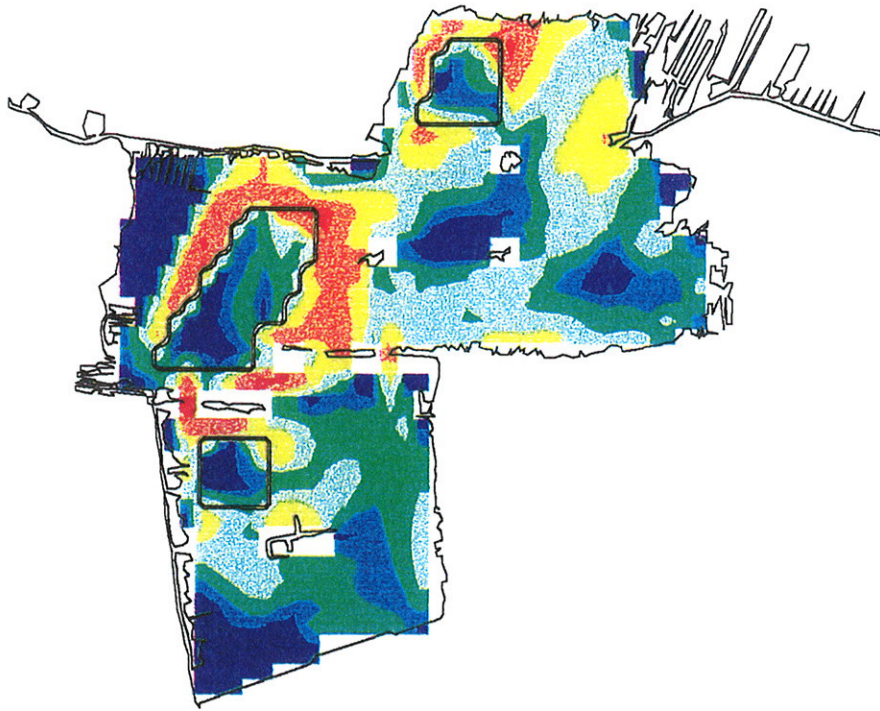


→ 1.000m/s

schuifspanning contour plot (Pascal) (boven)
 stroomsnelheid/richting vector plot (m/s) (onder)
 zuidwestenwind 5 m/s

Fig. 13 a

scenario: drie verdiepingen

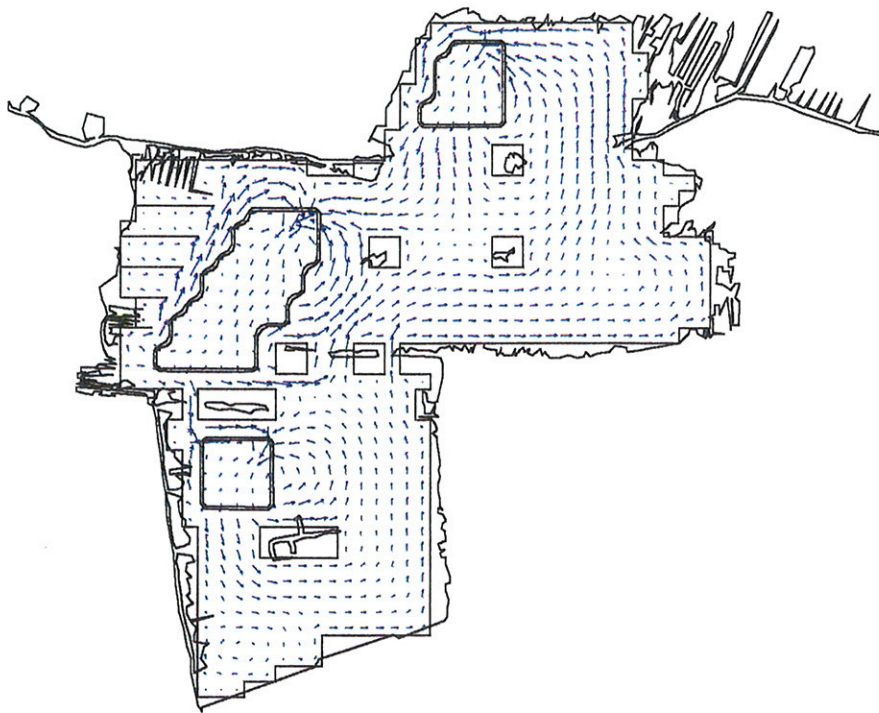
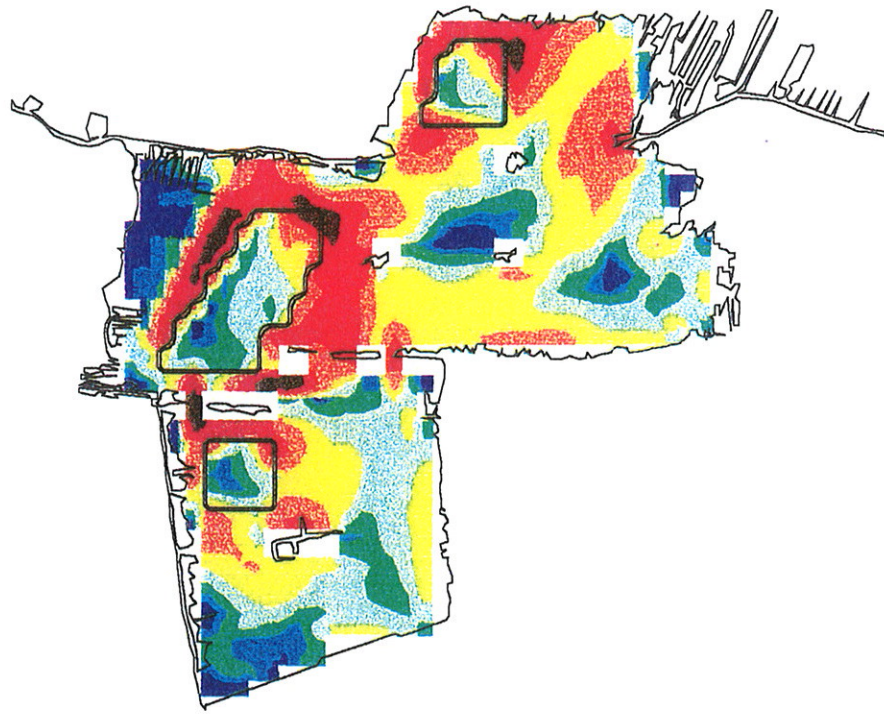


→ .500m/s

schuifspanning contour plot (Pascal) (boven)
 stroomsnelheid/richting vector plot (m/s) (onder)
 zuidwestenwind 10 m/s

Fig. 13 b

scenario: drie verdiepingen

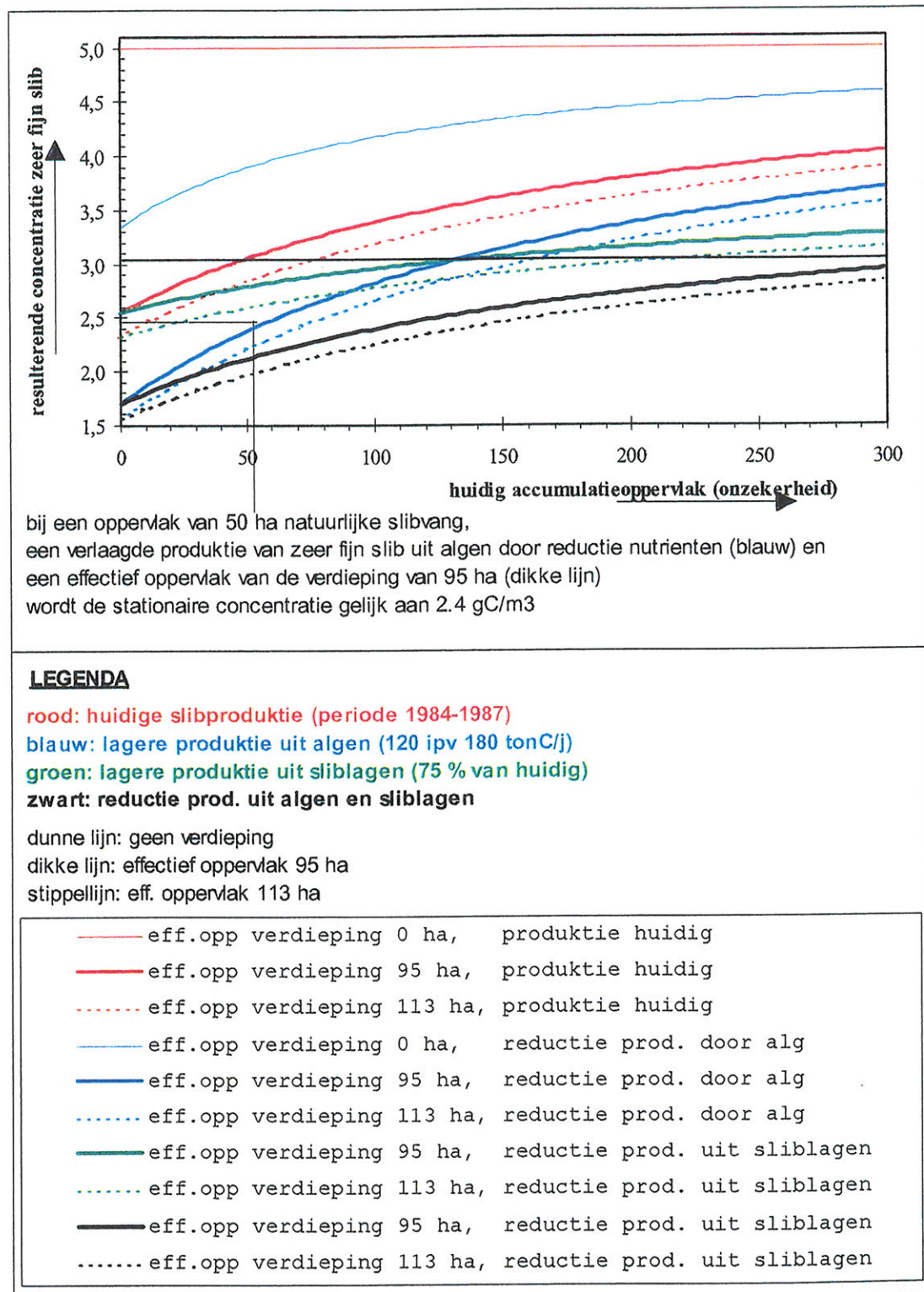


→ .500m/s

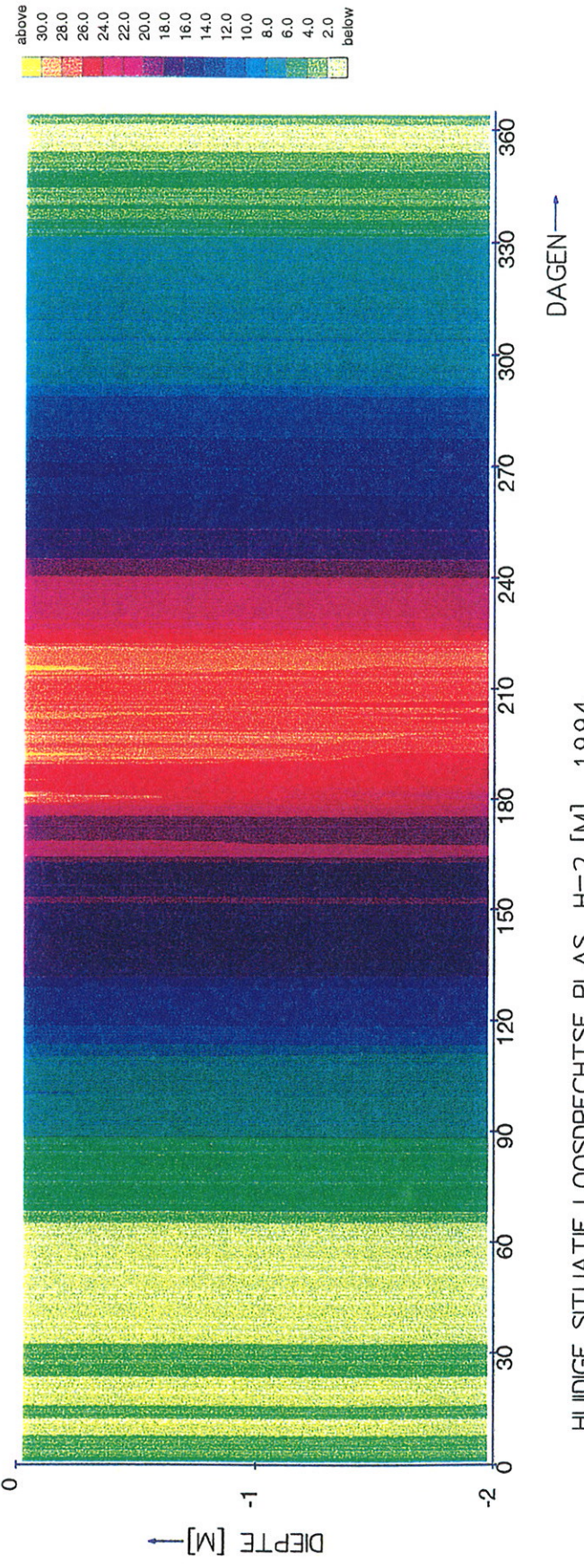
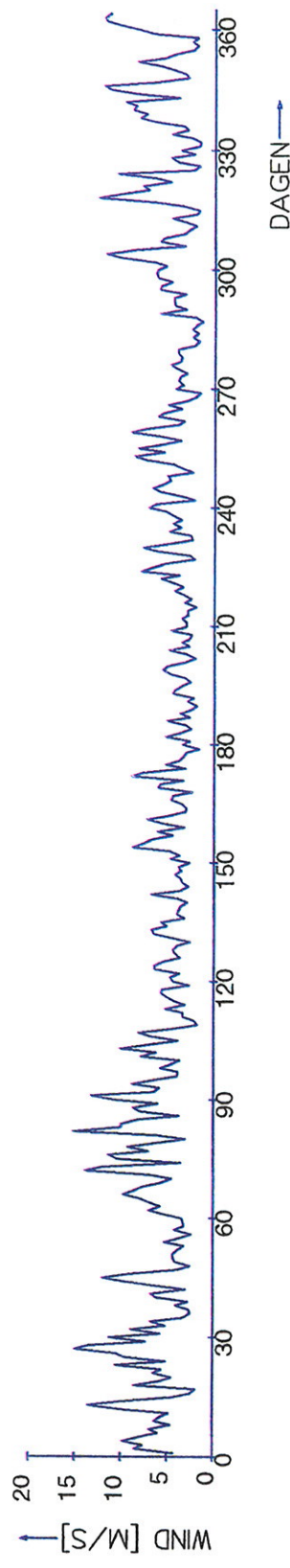
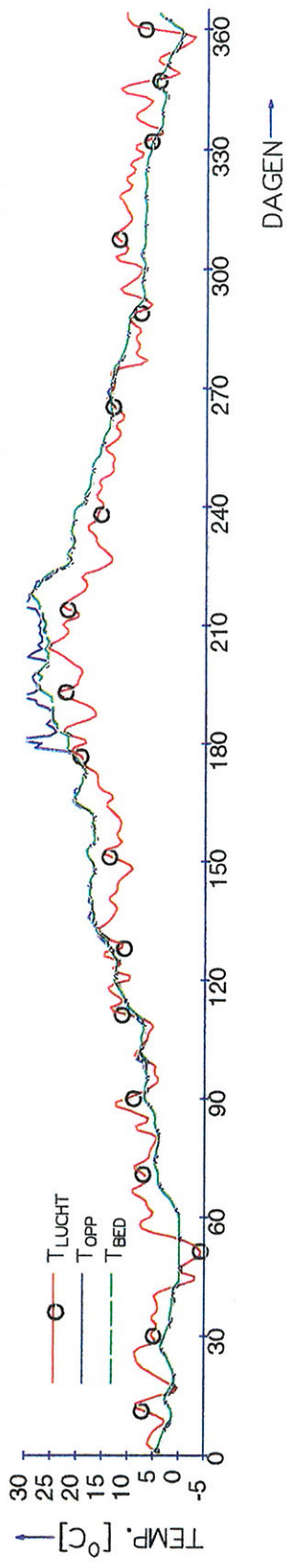
schuifspanning contour plot (Pascal) (boven)
 stroomsnelheid/richting vector plot (m/s) (onder)
 zuidwestenwind 15 m/s

Fig.13 c

scenario: drie verdiepingen



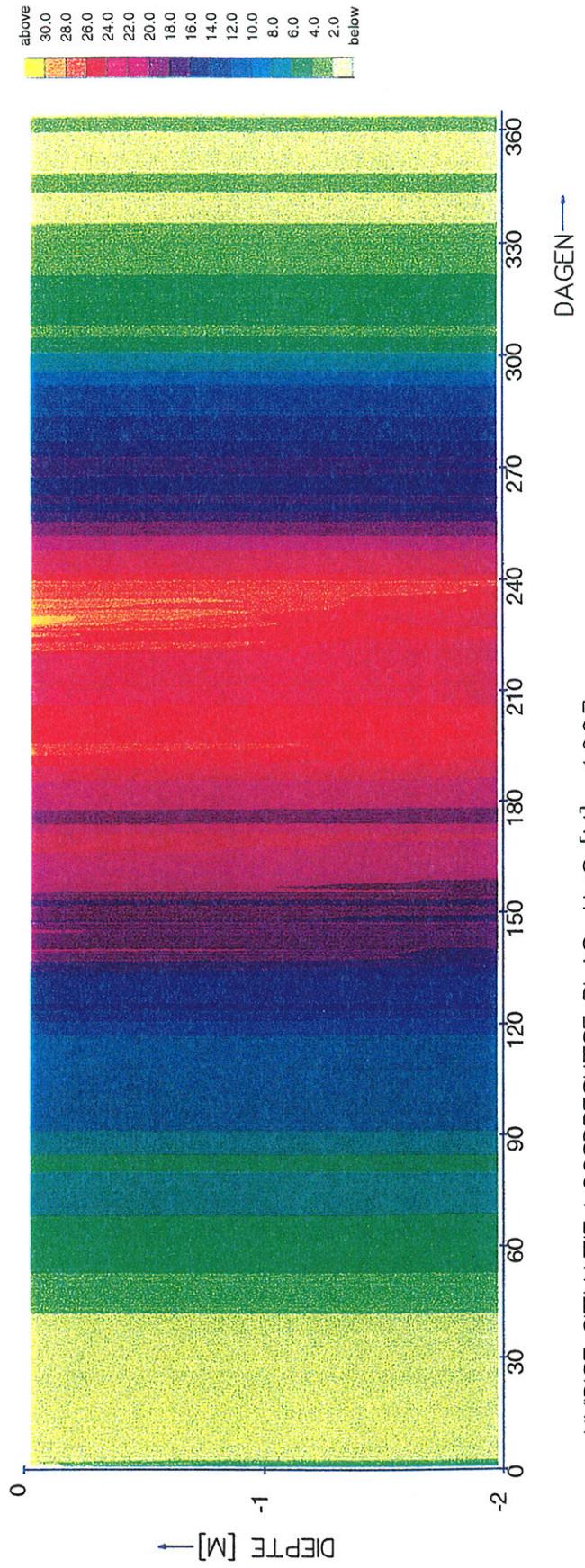
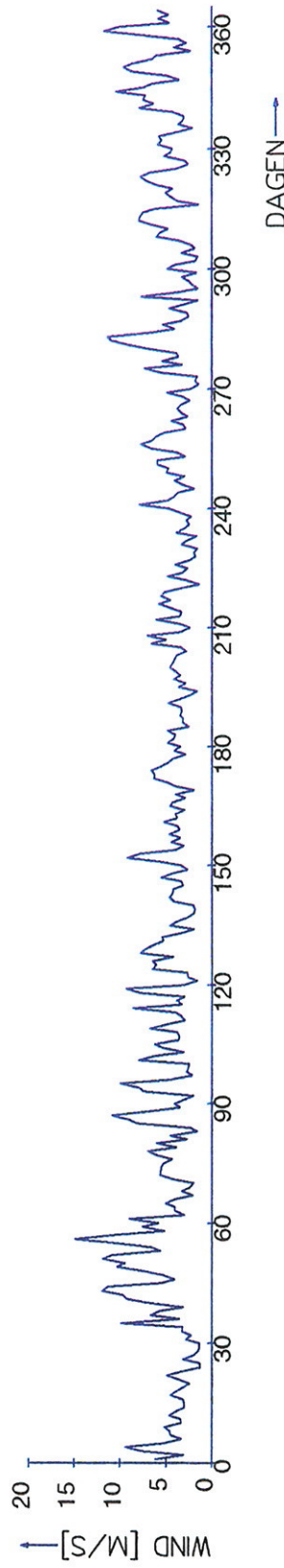
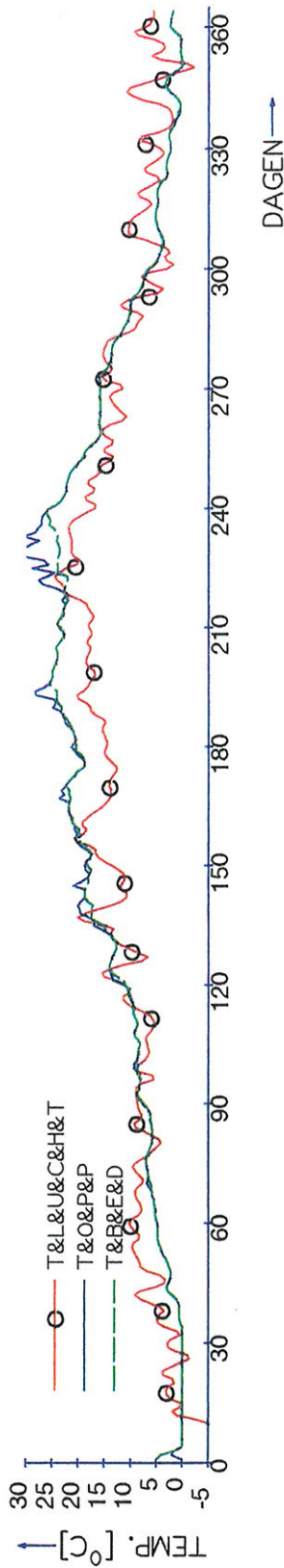
Figuur 14 De resultaten van de analyse van de gevoeligheid van de concentratie zeer fijn slib onder invloed van slibvang in de huidige situatie en onder invloed van onzekerheden in andere sturende parameters.



HUIDIGE SITUATIE LOOSDRECHTSE PLAS H=2 [M], 1994.

TEMPERATUUR IN LOOSDRECHTSE PLAS IN 1994.
 HUIDIGE DIEPTE: H=2 [M] ; GEEN STROMING
 LANE'S WARMTE-FLUX MODEL AANGEDREVEN DOOR WIND, BEWOLKINGSGRAAD,
 LUCHTTEMPERATUUR, ATMOSFERISCHE DRUK EN REL. VOCHTIGHEID.

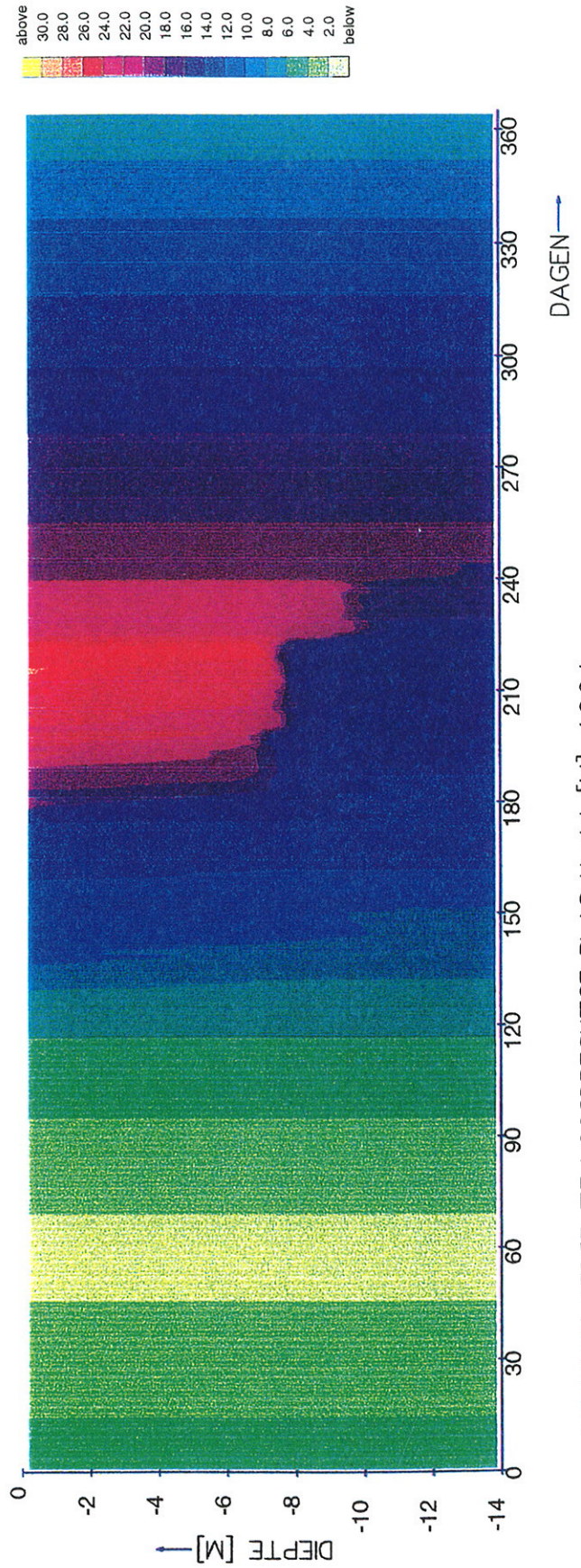
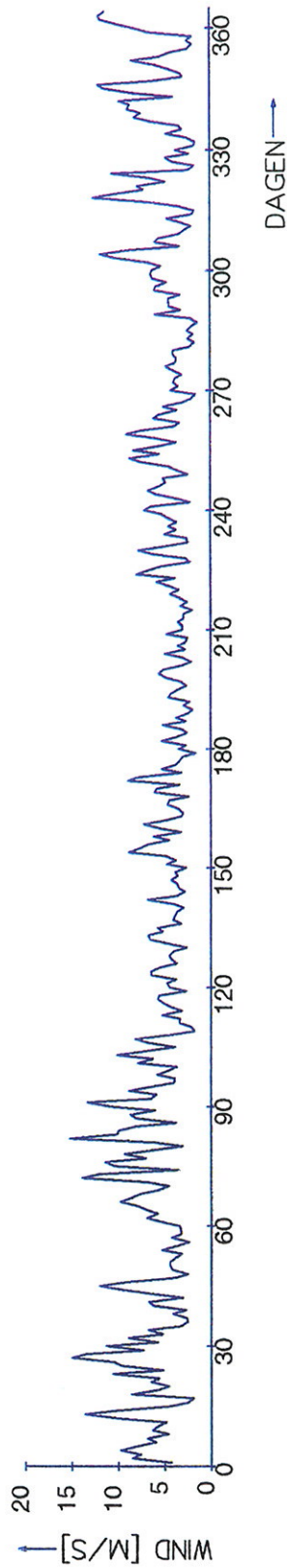
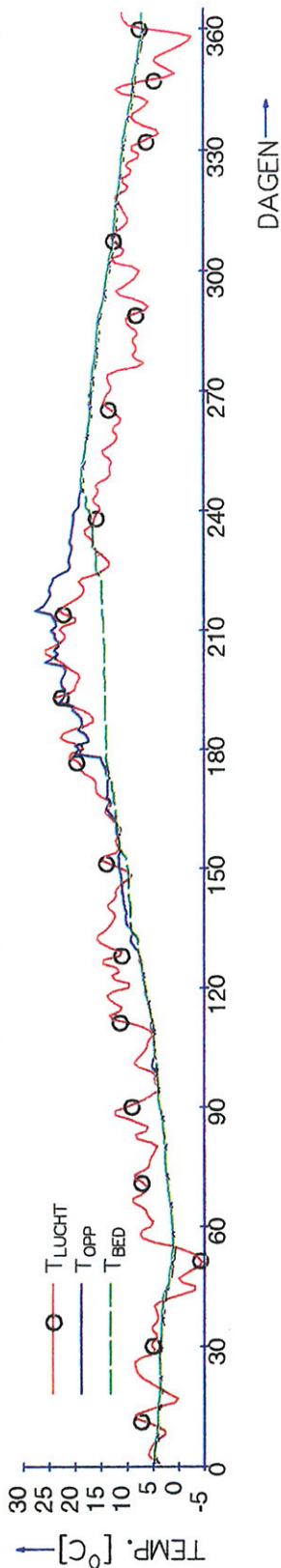
THERMO.94-2



HUDIGE SITUATIE LOOSDRECHTSE PLAS H=2 [M] , 1997.

TEMPERATUUR IN LOOSDRECHTSE PLAS IN 1997.
 HUDIGE DIEPTE: H=2 [M] ; GEEN STROMING
 LANE'S WARMTE-FLUX MODEL AANGEDREVEN DOOR WIND, BEWOLKINGSGRAAD,
 LUCHTTEMPERATUUR, ATMOSFERISCHE DRUK EN REL. VOCHTIGHEID.

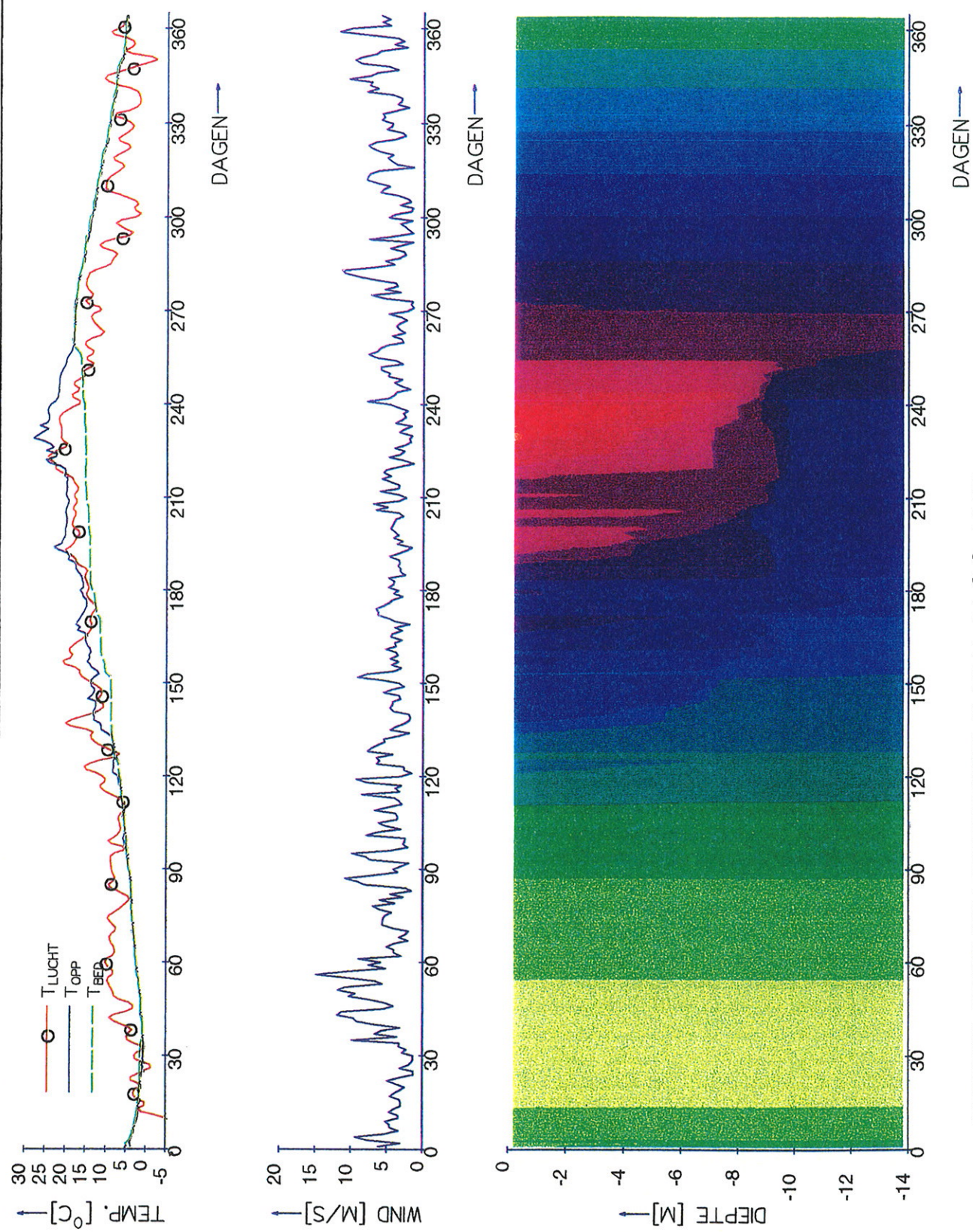
THERMO.972



VERDIEPT GEDEELTE LOOSDRECHTSE PLAS H=14 [M], 1994.

TEMPERATUUR IN LOOSDRECHTSE PLAS IN 1994.
 VERDIEPT GEDEELTE: H=14 [M] ; GEEN STROMING
 LANE'S WARMTE-FLUX MODEL AANGEDREVEN DOOR WIND, BEWOLKINGSGRAAD,
 LUCHTTEMPERATUUR, ATMOSFERISCHE DRUK EN REL. VOCHTIGHEID.

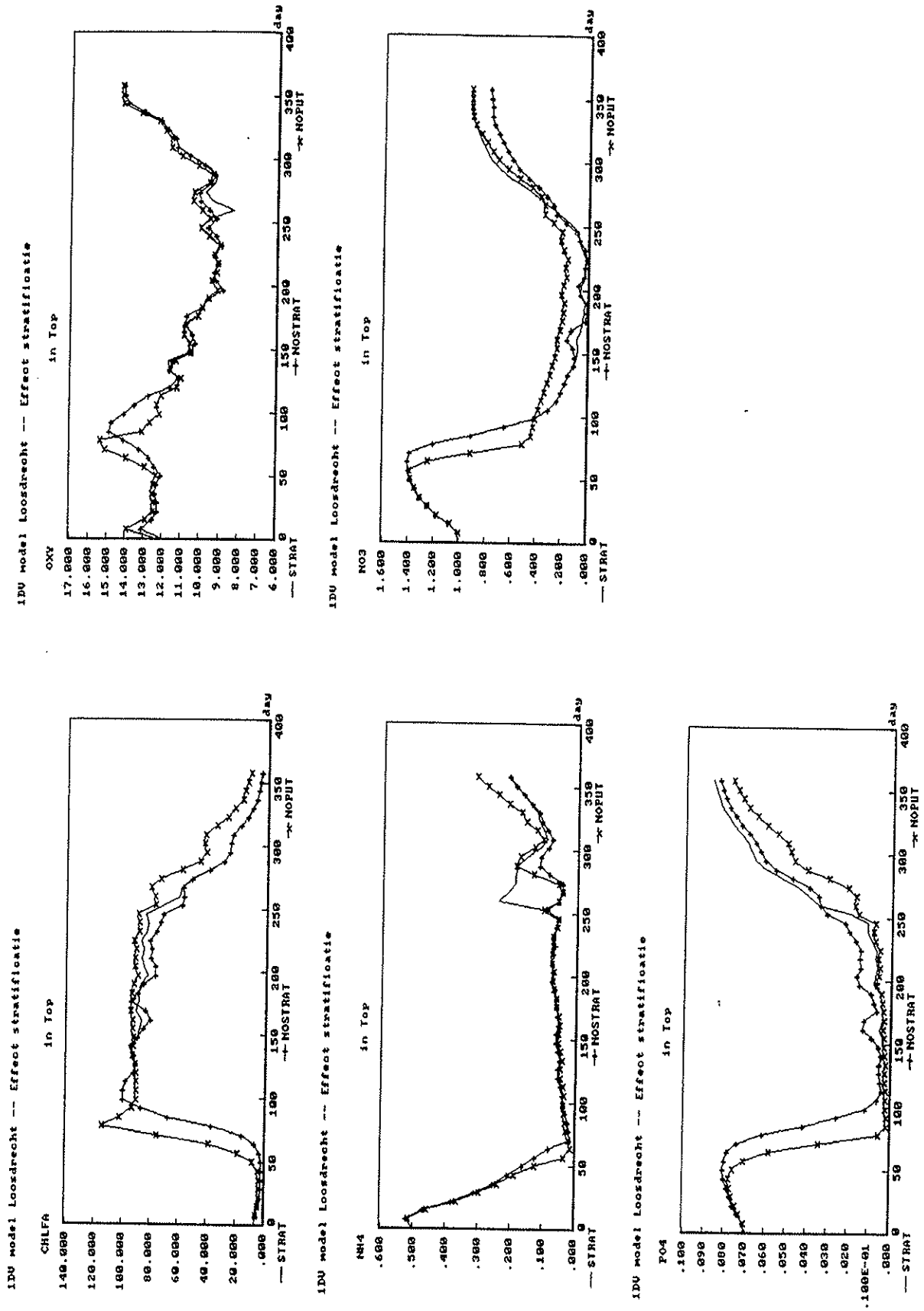
THERMO.94



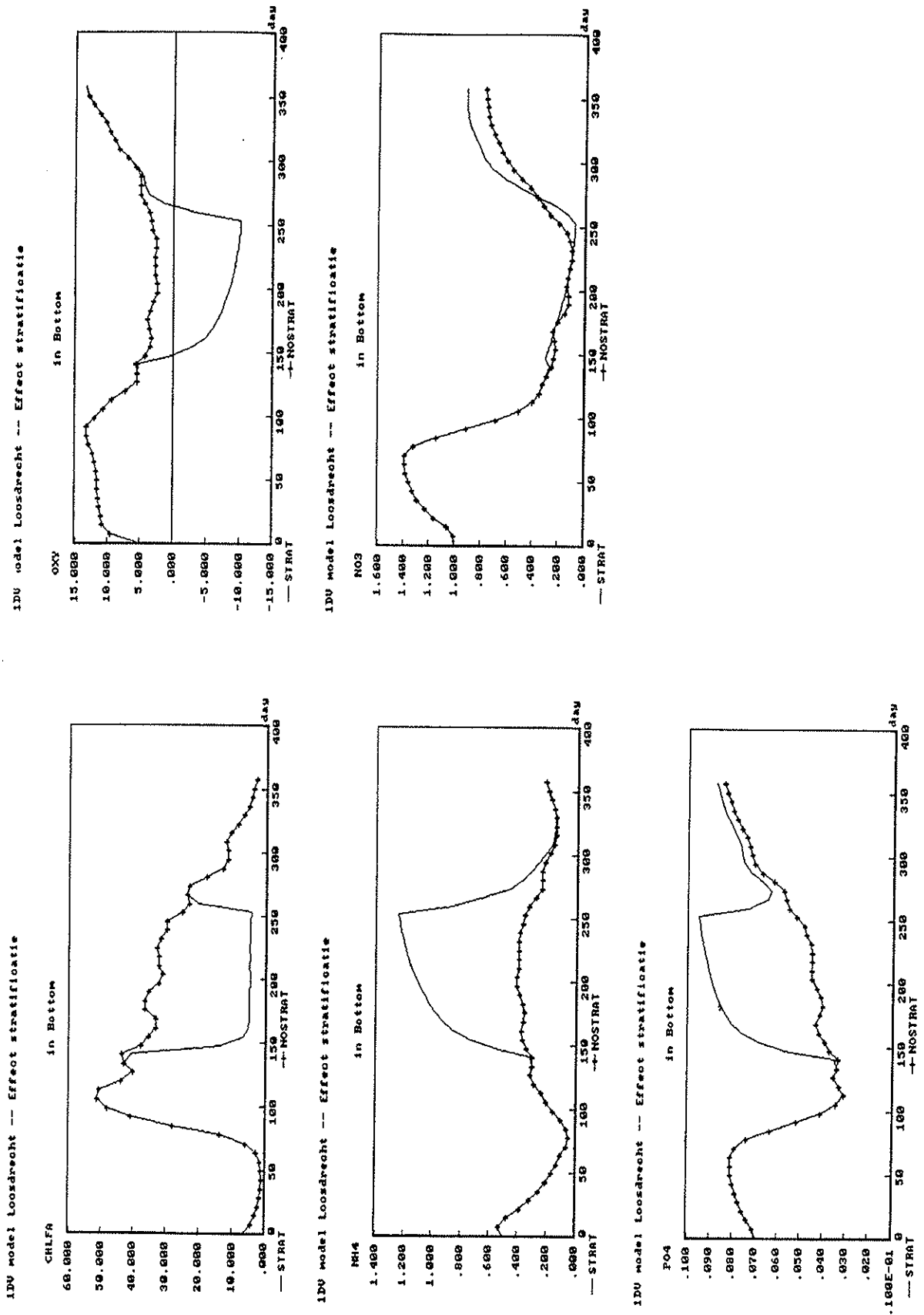
VERDIEPT GEDEELTE LOOSDRECHTSE PLAS H=14 [M], 1997.

TEMPERATUUR IN LOOSDRECHTSE PLAS IN 1997.
 VERDIEPT GEDEELTE: H=14 [M] ; GEEN STROMING
 LANE'S WARMTE-FLUX MODEL AANGEDREVEN DOOR WIND, BEWOLKINGSGRAAD,
 LUCHTTEMPERATUUR, ATMOSFERISCHE DRUK EN REL. VOCHTIGHEID.

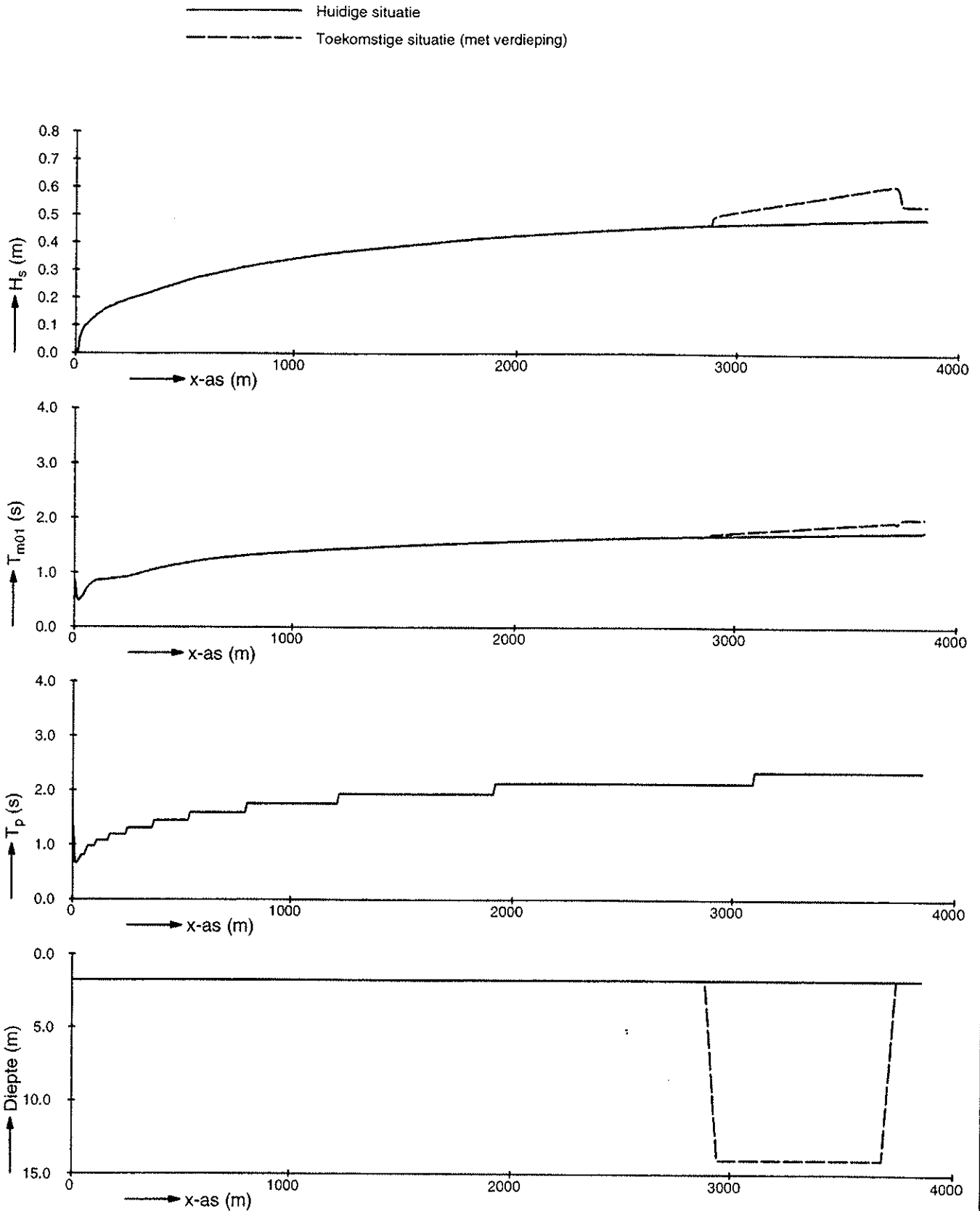
THERMO.97



Figuur 19 Berekende waarde van chlorofyl, zuurstof, ammonium, nitraat en ortho fosfaat in het bovenste segment met stratificatie (STRAT), zonder stratificatie (NOSTRAT) en zonder verdieping (NOPUT).



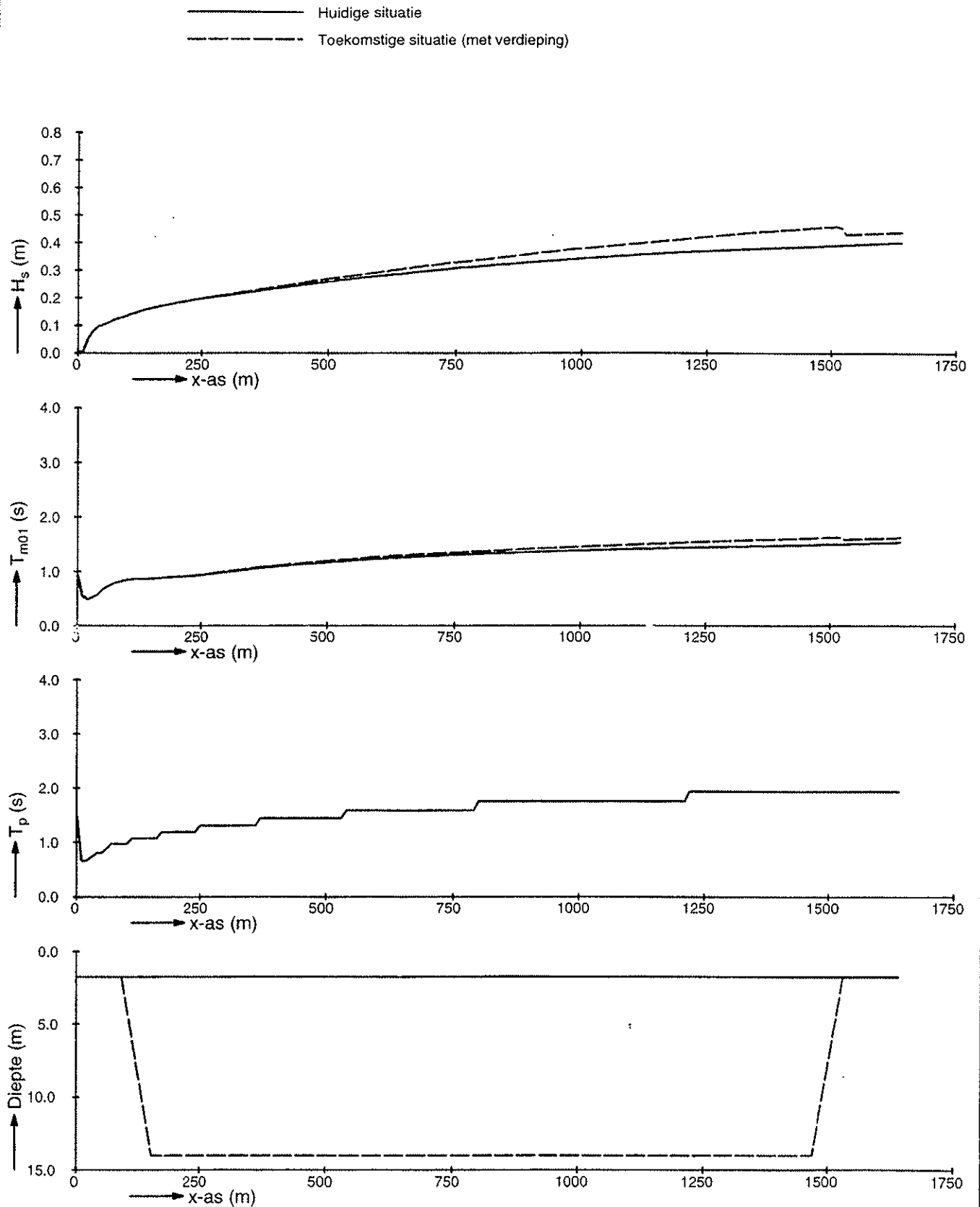
Figuur 20 Berekende waarde van chlorofyl, zuurstof, ammonium, nitraat en ortho fosfaat in het bodem segment met stratificatie (STRAT), zonder stratificatie (NOSTRAT) en zonder verdieping (NOPUT).



Loosdrechte plassen
 Effect van lokale verdieping op golfcondities nabij de oever.
 Berekende golfcondities met SWAN langs Oost-West raai.

SWAN-1D

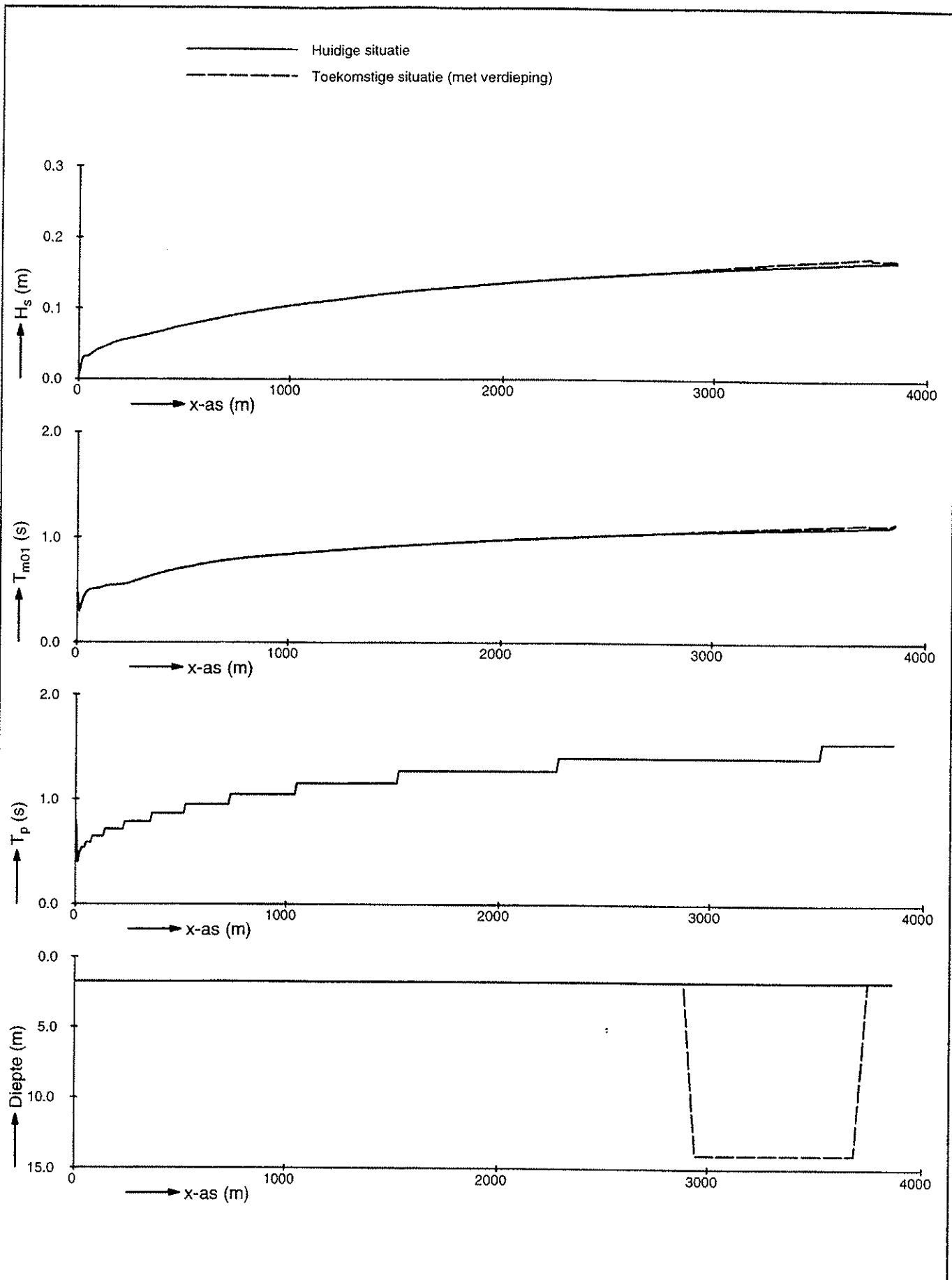
$U_{10}=15$ m/s



Loosdrechte plassen
 Effect van lokale verdieping op golfcondities nabij de oever.
 Berekende golfcondities met SWAN langs Zuidwest-Noordoost raai.

SWAN-1D

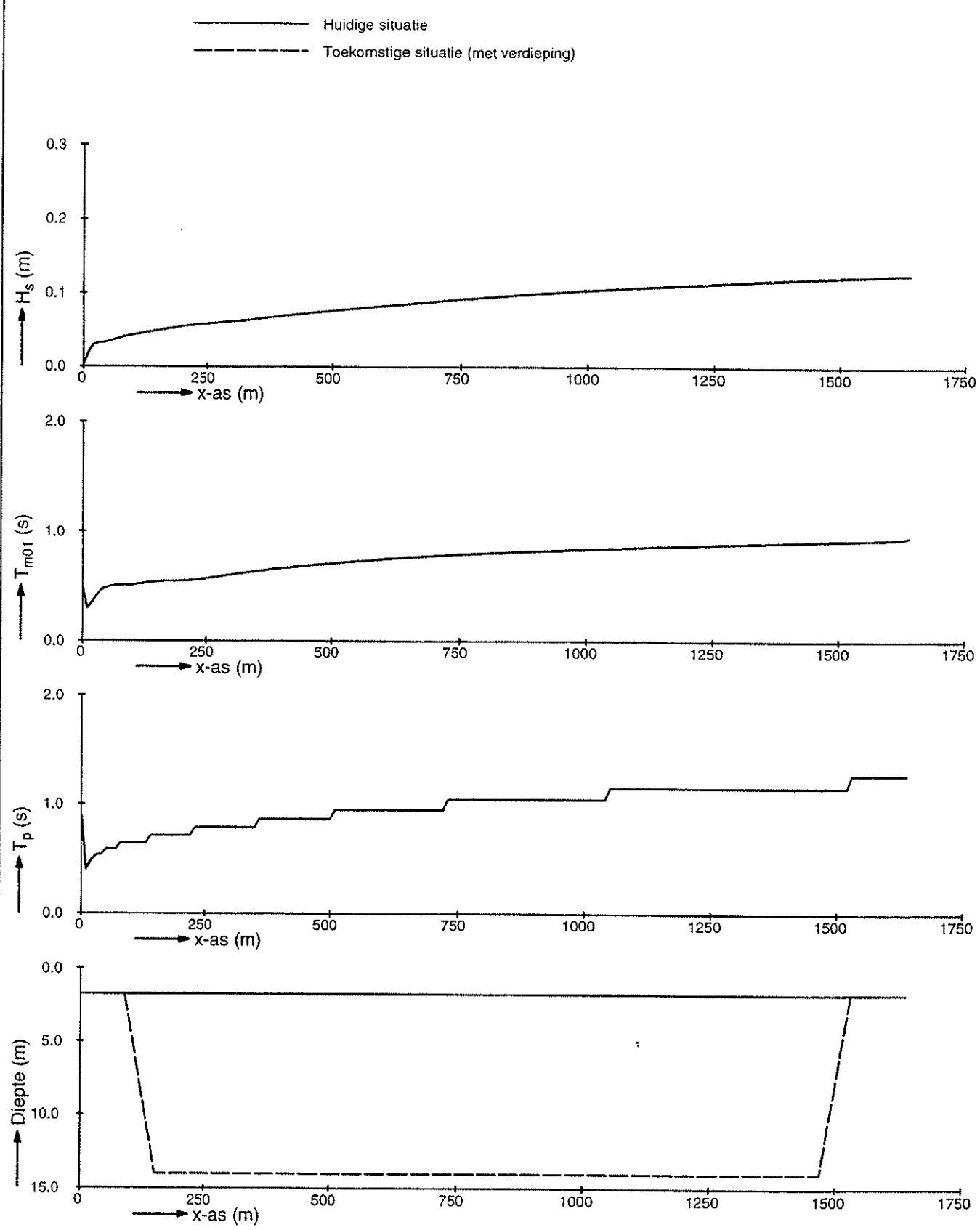
$U_{10}=15$ m/s



Loosdrechte plassen
 Effect van lokale verdieping op golfcondities nabij de oever.
 Berekende golfcondities met SWAN langs Oost-West raai.

SWAN-1D

$U_{10}=5$ m/s



Loosdrechte plassen
 Effect van lokale verdieping op golfcondities nabij de oever.
 Berekende golfcondities met SWAN langs Zuidwest-Noordoost raai.

SWAN-1D

$U_{10}=5$ m/s