



Invloed waterbeweging op onderwatervegetatie

Natuurvriendelijke oevers Noordzeekanaal

Rijkswatersstaat Noord-Holland
Rapport ANW 05.27

30 november 2005

Definitief rapport

9R1288.A0

Barbarossastraat 35
Postbus 151
6500 AD Nijmegen
(024) 328 42 84 Telefoon
(024) 360 54 83 Fax
info@nijmegen.royalhaskoning.com E-mail
www.royalhaskoning.com Internet
Arnhem 09122561 KvK

Documenttitel	Invloed waterbeweging op ondewatervegetatie Natuurvriendelijke oevers Noordzeekanaal
Verkorte documenttitel	Vegetatie NVO's Noordzeekanaal
Status	Definitief rapport
Datum	30 november 2005
Projectnaam	Natuurvriendelijke oevers Noordzeekanaal
Projectnummer	9R1288.A0
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Noord-Holland
Referentie	9R1288.A0/R0001/GJA/SEP/Nijm

Auteur(s)	Koen van Gerven, Tom van den Broek, Gert Jan Akkerman
Collegiale toets	Michel van Heereveld
Datum/paraaf	30 november 2005
Vrijgegeven door	Gert Jan Akkerman
Datum/paraaf	30 november 2005



SAMENVATTING

De voorliggende studie betreft een analyse van de invloed van de waterbeweging en vissen op de onderwatervegetatie van de natuurvriendelijke oevers Spaarnwoude (in dit rapport aangeduid met zuidoever) en Zuiderpolder (in dit rapport aangeduid met noordoever) langs het Noordzeekanaal. Gebleken is namelijk dat de onderwatervegetatie nagenoeg ontbreekt in beide oevers.

De natuurvriendelijke oevers worden gekenmerkt door grote, relatief beschutte, lagunes die via inlaten met het Noordzeekanaal zijn verbonden. Deze natuurvriendelijke oevers hebben een bijzonder karakter: 1) een deel van de dynamiek wordt verkregen door de waterbeweging veroorzaakt door voorbijvarende schepen en 2) de lagunes hebben een brak karakter.

Deze studie is een vervolg op een eerdere verkenning, gebaseerd op dezelfde metingen; deze verkenning had echter een te beperkte reikwijdte om tot eenduidige conclusies te komen. De eerdere verkenning is in de voorliggende rapportage geïntegreerd. Deze rapportage omvat ook de eerdere verkenning. Basis voor de analyse zijn de metingen die door Rijkswaterstaat Noord-Holland in de lagunes zijn verricht op 6 en 7 oktober 2004.

Opdracht voor deze studie werd verleend door Rijkswaterstaat Noord-Holland.

De probleemstelling spitst zich toe op de volgende twee vragen:

1. in hoeverre kan de waterbeweging een mogelijke oorzaak zijn voor het ontbreken van onderwaterplanten in de natuurvriendelijke oevers bij Spaarnwoude en Zuiderpolder;
2. in hoeverre kunnen vissen hier een rol in hebben gespeeld.

Om antwoord te geven op het eerste deel van de probleemstelling is achtereenvolgens de invloed van windgolven, van passerende schepen en van schommelingen in het kanaalpeil als gevolg van schutten en/of spuien op de waterbeweging geanalyseerd. Op grond van de uitkomsten van deze analyse zijn conclusies getrokken ten aanzien van de vestigings- en handhavingsmogelijkheden van onderwaterplanten.

In de lagunes blijkt de golfslag door wind tijdens normale omstandigheden (zoals tijdens de metingen, waarbij de windkracht 4 tot 5 Bft was bij een windrichting uit ZW) beperkt te zijn. De stroomsnelheden die daardoor aan de bodem worden veroorzaakt blijven dan ook beperkt ($< 0,1$ m/s). Dit zal derhalve geen nadelige invloed hebben op de vegetatie. Ook bij extreme omstandigheden zal dit het geval zijn, maar dan moeten de planten wel goed zijn aangeslagen (de stroomsnelheden zijn dan kortstondig hooguit $0,3$ m/s). Dit is met name van belang voor de oostzijde van de lagunes waar de golven bij westelijke winden het hoogst zijn. Overigens zal thans bij de zuidoever ook nog golfdemping optreden door de brede rietkragen langs de smalle lagunegedeelten.

Passerende schepen veroorzaken stroming én golven. Uit de waarnemingen blijkt dat de doordringing van de scheepsgeïnduceerde golven in de lagunes klein is; deze is vergelijkbaar met waterstandsfluctuaties als gevolg van windgolven, interne oscillaties in de lagune en schommelingen op het Noordzeekanaal ($< 0,1$ m). Ook bij extreem grote (diepliggende) en snelvarende schepen zal de dooweking van de scheepsgolven in de lagunes maar beperkt zijn. Dit komt vooral door de hooggelegen inlaten.

De waterspiegeldaling die gepaard gaat met scheepspassages geeft een stroming in de lagunes die hierdoor gedeeltelijk ledigt (en aansluitend weer vult). De hierdoor veroorzaakte stroomsnelheden blijven hierbij echter zeer beperkt: tot orde 0,1 m/s voor beide oevers. In extreme situaties zullen deze stroomsnelheden naar verwachting hooguit 30 % toenemen, zodat dit ook geen nadelige invloed op de ondergedoken waterplanten in de lagunes zal geven. Wel treden in en in de directe nabijheid van de breukstenen inlaten hoge stroomsnelheden op (grootte-orde 1 m/s); waterplanten zullen hier dus niet goed gedijen.

Op het Noordzeekanaal blijken zich vrijwel onafgebroken schommelingen in de waterstand voor te doen. Deze zijn ook, zij het gedempt, zichtbaar binnen de lagunes. De schommeling in de waterstand op het Noordzeekanaal bedraagt hierbij enige cm tot maximaal circa 20 cm (gemiddeld 10 cm) en de periode is relatief groot (orde een half uur). Deze gemeten schommelingen blijken te kunnen worden verklaard uit het spuien en schutten van de schepen bij IJmuiden (tijdens de metingen alleen als gevolg van schutten). Opgemerkt wordt dat als gevolg van (instationaire) opwaaiing ook waterstandsveranderingen op het Noordzeekanaal kunnen optreden, maar deze zullen doorgaans veel trager zijn dan de schommelingen als gevolg van schutten en spuiten; een uitzondering hierop zijn de op- en afwaaiingseffecten tijdens bui-oscillaties, maar deze treden heel incidenteel op.

Doordat de schommelingen als gevolg van spuien en schutten een relatief lage frequentie hebben, is het aannemelijk dat de fluctuerende waterschijf in de lagunes volledig wordt uitgewisseld met het Noordzeekanaal. De stroomsnelheid zal als gevolg hiervan in de oevers hooguit enige cm/s zijn; waterplanten zullen door deze stroming dus niet worden beschadigd of ontworteld. De waterbeweging die door de vrijwel onafgebroken schommelingen wordt veroorzaakt, is van belang voor de wateruitwisseling tussen de lagune en het Noordzeekanaal. Voor verversing van de lagune is deze wateruitwisseling waarschijnlijk belangrijker dan die als gevolg van de scheepspassages. Door de Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde is overigens aangegeven dat bij het ontwerp van de zuidoever hiermee rekening zou zijn gehouden, maar verdere gegevens hieromtrent zijn ons niet ter beschikking gesteld.

Bij extreme schommelingen van het Noordzeekanaal (samenvallen van spui- en schuteffecten) zullen de stroomsnelheden in de lagunes naar verwachting hooguit 0,1 m/s bedragen, zodat dit ook voor de waterplanten geen probleem zal zijn.

Een bijkomend effect is dat binnen de lagunes oscillaties optreden behorende met de eigenfrequenties van slingeren in dwars- en lengterichting. De vele verschillende frequenties doen vermoeden dat het hier om gecompliceerde patronen gaat. Deze slingeren laten een waterstandsfluctuatie zien die qua grootte vergelijkbaar is met die van de windgolven ten tijde van de metingen. De stroomsnelheden aan de bodem ten gevolge van de oscillaties zullen echter groter zijn geweest dan bij de windgolven (stroomsnelheid ten hoogste 0,10 m/s tegenover ten hoogste enkele cm/s bij de windgolven), omdat de frequentie van de oscillaties veel lager ligt. De windgolven zullen in extreme situaties wél dominant kunnen zijn (noordwesterstorm), vooral bij de geëxposeerd liggende noordbever (Zuiderpolder).

Ten aanzien van de waterbeweging kan derhalve worden gesteld dat deze, door de relatief beschutte ligging van de lagunes, beperkt blijft: dit geldt zowel voor de waterstandsfluctuaties als voor de stroomsnelheden.

Alleen tijdens extreme windomstandigheden is het denkbaar dat de condities beperkend zijn door tijdelijke golfslag (met name voor jonge planten).

Concluderend kan worden gesteld dat waterstandsfluctuaties en stroomsnelheden in de lagunes niet dusdanig beperkende factoren zijn dat hiermee de algehele afwezigheid van de doelvegetatie kan worden verklaard.

De analyse van de effecten van vissen in de lagunes van beide oevers geeft het volgende beeld. Tijdens onderzoek in 2004 bleek bij de zuidoever (Spaarnwoude) Brasem verantwoordelijk te zijn voor bijna 70% van de biomassa (103 kg/ ha). Bij de noordoever (Zuiderpolder) bleek het aandeel Brasem meer dan 90%. Ook in het open water en andere zijwateren van het Noordzeekanaal bleek het aandeel Brasem hoog tot zeer hoog. Het is zeer wel mogelijk dat in beide lagunes de massaal aanwezige Brasems een zodanige vertroebeling veroorzaken dat ondergedoken waterplanten door lichtgebrek niet kunnen groeien en/ of door een overdaad aan nutriënten - waardoor eutrofiëring kan optreden (dit laatste lijkt door luchtfoto's te worden bevestigd) - door fytoplankton worden weggeconcentreerd. Dit strookt met eerdere ervaringen. Zo leidde massale kolonisatie van Brasem in de jaren '60 en '70 van de vorige eeuw in de randmeren eveneens tot enorme vertroebeling en achteruitgang van de soortenrijkdom. Nadat in 1993 de vangst van Brasem is geïntensiveerd, daalde de Brasemstand sterk en verhoogde de waterkwaliteit en soortenrijkdom (Meijer *et al.*, 1999).

Een mogelijke maatregel om deze problematiek tegen te gaan, is dan ook het wegvangen van Brasem, al dan niet in combinatie met het beschermen van aangeplante delen van de lagune met bijvoorbeeld een tijdelijke gaasconstructie. Hiermee kan de vegetatie tegen de Brasem worden beschermd, totdat deze vegetatie goed is aangeslagen. Voordat wordt overgegaan op deze maatregel, moet het echter helder zijn dat de vestiging en groei van waterplanten niet door nog andere factoren wordt veroorzaakt, bijvoorbeeld vraat door vogels.

INHOUDSOPGAVE

	Blz.
1 INLEIDING	1
1.1 Achtergrondinformatie	1
1.2 Opdracht en probleemstelling	2
1.3 Projectteam	3
1.4 Leeswijzer	4
2 GEVOELIGHEID ONDERWATERVEGETATIE VOOR WATERBEWEGING	5
3 OVERZICHT EN VERWERKING MEETGEGEVENS EN OVERIGE INFORMATIE	7
3.1 Overzicht van de meetgegevens en overige informatie	7
3.2 Verwerking meetgegevens	10
4 ANALYSE METINGEN WATERBEWEGING	12
4.1 Analysestappen	12
4.2 Illustratie van de waterbeweging bij de passage van een schip	12
4.3 Waterbeweging als gevolg van de scheepspassages	13
4.4 Effect van windgolven	15
4.5 Effect van de laagfrequente schommelingen van het kanaalpeil als gevolg van schutten en spuien op de waterbeweging in de lagune	16
4.6 Aanwijzingen met betrekking tot de waterbeweging uit andere bronnen	17
4.7 Kwantitatieve analyse van de gemeten waterbeweging	18
4.7.1 Waterbeweging als gevolg van scheepspassages en de voortplanting in de lagunes	18
4.7.2 Schommelingen op het Noordzeekanaal	22
4.7.3 Interne oscillaties	23
4.7.4 Windgolven	24
4.8 Erodeerbaarheid bodem van de lagunes	25
4.9 Invloed van de geconstateerde en te verwachten extreme waterbeweging op de onderwatervegetatie	27
4.10 Opmerkingen ten aanzien van de metingen en de waterbeweging	28
5 INVLOED VISSSEN OP ONDERWATERVEGETATIE	30
5.1 Analyse van de beschikbare informatie	30
5.2 Mogelijk effect van vissen op de onderwatervegetatie	30
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	32
6.1 Conclusies	32
6.2 Aanbevelingen	32
7 REFERENTIES	34

BIJLAGEN

A: Resultaten van de metingen

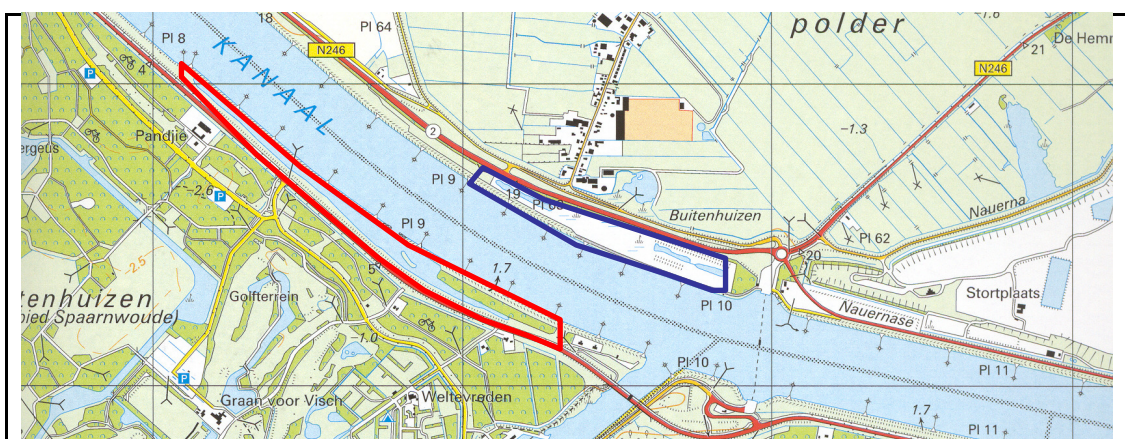
B: Achtergronden bij de analyse van de waterbeweging

C: Overzicht meetlocaties (uitklapvel)

1 INLEIDING

1.1 Achtergrondinformatie

In 1996 is langs het Noordzeekanaal bij Spaarnwoude een natuurvriendelijke oever aangelegd (Figuur 1-1). In combinatie met de aan de noordzijde gelegen, in eind 2003 en begin 2004 aangelegde natuurvriendelijke oever Zuiderpolder, moet deze oever ruimte bieden aan bijzondere flora en fauna en een stapsteen vormen voor organismen die migreren tussen beide brakke natuurgebieden aan weerszijden van het Noordzeekanaal. Om voor dergelijke organismen de juiste habitatvoorwaarden te creëren, is de harde oever van beton en stortsteen verwijderd. Een gedeelte van de oeververdediging is hiertoe verlaagd en lokaal doorgestoken. Achter de oorspronkelijke beschoeiing is zo een lagune ontstaan, die in verbinding staat met het Noordzeekanaal. Door de voortdurende uitwisseling met brak water van het Noordzeekanaal heeft het water in de lagune ook een brak karakter.



Figuur 1-1: Ligging van de natuurvriendelijke oevers Spaarnwoude (zuidoever, in rood) en Zuiderpolder (noordoevers, in blauw) langs het Noordzeekanaal

Met name het creëren van een dergelijk brakwatermilieu is de achterliggende doelstelling van de natuurvriendelijke oevers, waarmee deze passen in het rijksbeleid voor het Noordzeekanaalgebied (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1998). Naast het bieden van een geschikt leefmilieu voor aan brak water gebonden flora en fauna, zoals het verbeteren en aanbieden van paai- en opgroeiplaatsen voor vis uit het Noordzeekanaal, is ook het verminderen van de ecologische barrière tussen het kanaal en brakke natuur in het achterliggende land een belangrijke doelstelling van dit beleid.

Om in de natuurvriendelijke oever bij Spaarnwoude een basis te scheppen voor het ontstaan van een aanvullend brakwaterecosysteem in het Noordzeekanaal, zijn diverse helofyten en ondergedoken waterplanten in het gebied uitgezet. In verband met het zilte karakter van het water, betreffen het voornamelijk zouttolerante soorten. De aangeplante helofyten betreffen voornamelijk Riet (*Phragmites australis*), Heen (*Bolboschoenus maritimus*) en Ruwe bie (*Schoenoplectus tabernaemontani*), afkomstig uit het Zwartewater en het Wormer- en Jisperveld.

De uitgezette ondergedokenwaterplanten waren afkomstig uit Polder Oostzaan en betreffen Grof hoornblad (*Ceratophyllum demersum*), Aarvederkruid (*Myriophyllum spicatum*), Groot nimfkruid (*Najas marina*), Schedefonteinkruid (*Potamogeton pectinatus*), Tenger fonteinkruid (*P. pussilus*), Snavelrupsia (*Ruppia maritima*) en Zannichellia (*Zannichellia palustris*) (Van Splunder, 1998).

Nadat in het najaar van 1997 een flora-inventarisatie is uitgevoerd, bleek de aanplant slecht te zijn aangeslagen. Veel van de aangeplante rietwortelstokken waren niet ontsproten. De aangeplante Ruwe bies en vooral Heen had zich wel al door het gebied kunnen uitbreiden. Met de uitgezette waterplanten bleek het slechter te aan. Hoewel enkele soorten werden teruggevonden, is het onduidelijk of de planten zich hadden weten te vestigen. Zannichellia bleek wel in staat geweest zich te vestigen (Van Splunder, 1998). Tijdens de laatste inventarisatieronde in 2003 zijn helemaal geen ondergedoken waterplanten meer aangetroffen (Aquasense, 2004).

Voor het niet aanslaan van de onderwatervegetatie zijn een aantal mogelijke oorzaken aan te geven. Mogelijk zijn de milieuomstandigheden van de lagune onvoldoende geschikt voor de waterplanten. Zo kan het chloridegehalte te hoog zijn, of is door vertroebeling van het water het lichtklimaat ontoereikend. Tevens is het mogelijk dat de uitgezette waterplanten (te) sterk begraasd worden door aanwezige watervogels en/of vissen. Een derde mogelijkheid is dat de golfslag en/of stroming in de lagune een sterk negatieve invloed op de waterplanten heeft (notitie H. Coops).

Onderzoek heeft aangetoond dat golven en stroming direct en indirect van invloed zijn op ondergedokenwaterplanten. Met name de negatieve effecten kunnen groot zijn. De meest directe, mechanische, nadelige effecten zijn het kapot slaan en/of ontwortelen van de planten. Indirecte gevolgen liggen meestal in het feit dat de chemische samenstelling van het water, bijvoorbeeld organisch stof gehalte of voedselrijkdom, wordt beïnvloed. Daarnaast leidt de opwelling van bodemdeeltjes tot een verminderde lichtkwaliteit in het water (Ali *et al.*, 1999). Naast nadelige effecten kan stroming en golfslag ook positief voor waterplanten uitpakken. Weisner *et al.* (1997) concludeerden dat (milde) stroming leidde tot het afvoeren van epifytische algen van de bladeren en zo de fotosynthesecapaciteit bevorderde. Echter, waterplanten bleken in luwe gebieden vaker het slachtoffer van herbivore watervogels omdat deze rustig water prefereren boven water met veel golfslag.

1.2 Opdracht en probleemstelling

Het project is in twee delen uitgevoerd. In eerste instantie is een verkennende studie uitgevoerd, waarbij de metingen van de waterbeweging zijn verwerkt en op hoofdlijnen geanalyseerd. Dit heeft geresulteerd in een rapportage in december 2004. Door de beperkte opdracht en de ruwe wijze van aanleveren van de data bleek een goede analyse in dat kader niet mogelijk te zijn, zodat hieruit geen conclusies konden worden getrokken.

Vervolgens is besloten een aanvullende analyse uit te voeren, op basis van een offerte van 29 juni 2005 met kenmerk 9R1288.A0/L0001/GJA/MJANS/Nijm. Opdrachtverlening werd verkregen op 2 september 2005, met kenmerk Deelplan 3437_014, Opdracht-nummer 99211313.

In het voorliggende rapport zijn de uitkomsten van beide studies geïntegreerd, zodat het niet nodig is om ook het eerdere rapport te lezen.

De probleemstelling spitst zich toe op de volgende twee vragen:

1. in hoeverre kan de waterbeweging een mogelijke oorzaak zijn voor het ontbreken van onderwaterplanten in de natuurvriendelijke oevers bij Spaarwoude en Zuiderpolder;
2. in hoeverre kunnen vissen hier een rol in hebben gespeeld.

Meer in detail zijn de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

- expliciet maken van de verschillen tussen de natuurvriendelijke oevers van Spaarwoude (zuidoever) en van de Zuiderpolder (noordoever);
- nagaan van de representativiteit van de drukmetingen ter indicatie van de waterstandsfluctuaties;
- analyseren van de ledigings- en vullingsverschijnselen van de lagunes bij scheepspassage en bij lange translatiegolven (als gevolg van schutten en spuien e.d.);
- onderscheid maken tussen primaire en secundaire scheepsgeïnduceerde waterbeweging;
- uitvoeren van een meer gedetailleerde analyse van de erodeerbaarheid van de bodem in relatie met opwerveling van bodemmateriaal;
- koppeling maken van de diverse meetseries aan de hand van de referentiepunten;
- update van de eerder uitgevoerde DIPRO-berekeningen met het oog op hogere vaarsnelheden, doordat op het Noordzeekanaal soms harder wordt gevaren dan de norm;
- het betrekken van recente informatie (Witteveen + Bos en Aquaterra, 2004) over de visstand op het Noordzeekanaal en in de natuurvriendelijke oevers, als een mogelijk bepalende factor (naast waterbeweging) voor het al of niet voorkomen van ondergedoken waterplanten in de natuurvriendelijke oevers.

De metingen betreffen vanzelfsprekend een korte periode. Daarom is ook een extrapolatie gemaakt naar meer extreme situaties. Hierbij is ook gebruik gemaakt van het tussentijds getraceerde rapport van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde m.b.t. oeververdedigingen langs het Noordzeekanaal in het kader van het Beheersplan Nat (DWW, 2001).

1.3 Projectteam

Namens Rijkswaterstaat Noord-Holland is het project begeleid door de heer M. van Wieringen, in samenwerking met de heer M. van der Wal en mevrouw P. Duyn van de Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde. Bij het eerdere onderzoek was ook mevrouw L.C. van den Hengel betrokken als projectbegeleider namens Rijkswaterstaat Noord-Holland. De veldmetingen zijn uitgevoerd door de Informatiedienst Water Noord-Holland onder begeleiding van de heer A. Kikkert.

Het projectteam van Royal Haskoning bestond uit:

- Gert Jan Akkerman (projectleider en specialist hydraulica en oevers);
- Koen van Gerven (projectingenieur en inhoudelijke analyse waterbeweging);
- Michel van Heereveld (specialist waterbeweging door schepen, review);
- Tom van den Broek (specialist ecologie).

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de waterbeweging die voor onderwatervegetatie van belang is, los van het feit of een dergelijke waterbeweging ook daadwerkelijk optreedt in de lagunes van de natuurvriendelijke oevers. Vervolgens wordt in Hoofdstuk 3 een overzicht gegeven van de metingen en de overige bronnen en van de wijze waarop de metingen zijn verwerkt. Vervolgens is de analyse van de waterbeweging in Hoofdstuk 4 gepresenteerd. Het betreft hier de informatie die van direct belang is voor het vaststellen van het mogelijke effect van de waterbeweging op de onderwatervegetatie. Daarnaast wordt ook een meer kwantitatieve analyse van de metingen gepresenteerd, van belang voor het begrijpen van de waterbeweging in de lagunes. Voor verdere details wordt verwezen naar Bijlage A (meetregistraties) en Bijlage B (achtergrond bij de analyse van de metingen). In Hoofdstuk 5 wordt het recente rapport betreffende de visstand² geanalyseerd. In Hoofdstuk 6 worden vervolgens conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan. Referenties staan in Hoofdstuk 7.

Eenvoudigheidshalve worden de locaties van de natuurvriendelijke oevers in dit rapport als volgt aangeduid:

- zuidoever: dit is de natuurvriendelijke oever bij Spaarnwoude;
- noordoever: dit is de natuurvriendelijke oever bij Zuiderpolder.

GEVOELIGHEID ONDERWATERVEGETATIE VOOR WATERBEWEGING

Hierna wordt ingegaan op de gevoeligheid van de onderwatervegetatie voor de waterbeweging. Dit geeft inzicht in welke waterbeweging van belang is voor de onderwatervegetatie en welke niet; deze kennis is gebruikt bij het structureren van de analyse van de waterbeweging.

Onderzoek naar stromende rivieren in Canada heeft aangetoond dat bij een toenemende stroomsnelheid de biomassa van ondergedoken waterplanten afneemt. Bovendien bleek bij stroomsnelheden van meer dan 1 m/s dat er nauwelijks of geen waterplanten meer aanwezig zijn (Chambers *et al.*, 1991). De fysieke belasting op de waterplanten is bij stroomsnelheden groter dan 1 m/s veelal te groot om te overleven, omdat de planten bij dergelijke snelheden uit de bodem worden getrokken of afscheuren. In Nederland is weinig direct onderzoek naar de relatie tussen stroomsnelheid en ondergedoken waterplanten uitgevoerd (o.a. Schutten, 2005). Wel kan worden aangenomen dat ook voor de Nederlandse wateren geldt dat stroomsnelheden boven de 1 m/s funest zijn voor uitgezette waterplanten (mondelinge mededeling M. de la Haye). Schutten (2005) heeft aangetoond dat waterplanten alleen beschadigd kunnen worden gedurende extreme windsituaties tijdens het groeiseizoen, wanneer stroming en golfslag samen ervoor zorgen dat waterplanten breken en ontwortelen.

Niet alleen de stroomsnelheid, maar ook de variabiliteit in grootte en richting kan van belang zijn. Madsen *et al.* (2001) hebben na onderzoek aan zoutwater- en zoetwaterplanten geconcludeerd dat zoetwaterplanten een hogere trekkracht dan zoutwaterplanten kunnen weerstaan voordat ze breken. De flexibiliteit is echter minder. De verklaring hiervoor is dat zoetwaterplanten voornamelijk te maken hebben met een continue kracht (de stroming van water van één kant), terwijl zoutwaterplanten een variërende belasting hebben te verduren door wisselende stroming en golfslag. De morfologie van beide plantengroepen is dan ook fundamenteel anders: zoutwaterplanten zijn langgerekt met de biomassa verspreidt over de gehele lengte, terwijl zoetwaterplanten veelal meer biomassa aan het uiteinde van de plant hebben.

Zoetwaterplanten vertonen ook onderling verschillen in hun bouw en structuur. Dit resulteert in verschillen in de mate waarin planten bestand zijn tegen stroming en/ of golfslag. Een overzicht in Schutten (2005) laat zien dat de kracht die op waterplanten wordt uitgeoefend en waarbij deze breken, varieert van 0.72 MN m⁻² voor *Ranunculus peltatus* tot 33.8 MN m⁻² voor *Potamogeton pectinatus*. Uit vergelijkbaar onderzoek aan drie plantensoorten in Egypte en Groot-Brittannië bleek dat Zannichellia het best bestand was tegen golven, gevolgd door Aarvederkruid en als laatste Schedefonteinkruid (Ali *et al.*, 1999). Opmerkelijk is dat deze drie soorten ook in de natuurvriendelijke oevers zijn uitgezet en Zannichellia zich daarvan (in eerste instantie) heeft kunnen vestigen.

Hoewel Schedefonteinkruid slecht bestand is tegen golfslag, komt deze soort veelvuldig voor in (snel)stromend water. Opvallend is hierbij dat de morfologie van de exemplaren in stromend water sterk afwijken van die in stilstaand water: de planten waren veel meer gestroomlijnd (Madsen *et al.*, 2001). Ook dit gegeven zou invloed kunnen hebben gehad hebben op het niet aanslaan van uitgezet Schedefonteinkruid in Spaarwoude.

De planten zijn immers in stilstaand water (Polder Oostzaan) verzameld en zullen naar alle waarschijnlijkheid ook geen gestroomlijnde structuur gehad hebben. Mogelijk kunnen ondergedoken waterplanten uit een stromend milieu de lagune beter koloniseren.

3 OVERZICHT EN VERWERKING MEETGEGEVENS EN OVERIGE INFORMATIE

3.1 Overzicht van de meetgegevens en overige informatie

Gegevens zijn ontleend aan meerdere bronnen, waarvan met name te noemen:

1. Stroom- en drukmetingen, zoals aangegeven in het Plan van Aanpak. In het Plan van Aanpak is aangegeven welke metingen van stroomsnelheden en drukken (te vertalen naar waterstanden) zijn verricht en op welke wijze deze metingen zijn uitgevoerd;
2. Rijkswaterstaat Noord-Holland, oktober 2004. Stroommetingen in de natuurvriendelijke oevers Zuiderpolder en Spaarnwoude, werkdocument opgesteld door de heer A. Kikkert. Hierin is een eerste uitwerking gegeven van de metingen zoals hiervoor genoemd;
3. Beschrijving oeververdedigingen langs het Noordzeekanaal in het kader van het BPN (Rijkswaterstaat, 2001);
4. Recent rapport m.b.t. de visstand het Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal (Witteveen + Bos en Aquaterra, 2005);
5. Veldbezoek op 12 september 2005 en 6 oktober 2005;
6. Startbespreking op 12 september 2005.

De metingen zelf zijn uitgevoerd op 6 oktober 2004 (noordoever) en 7 oktober 2004 (zuidoever).

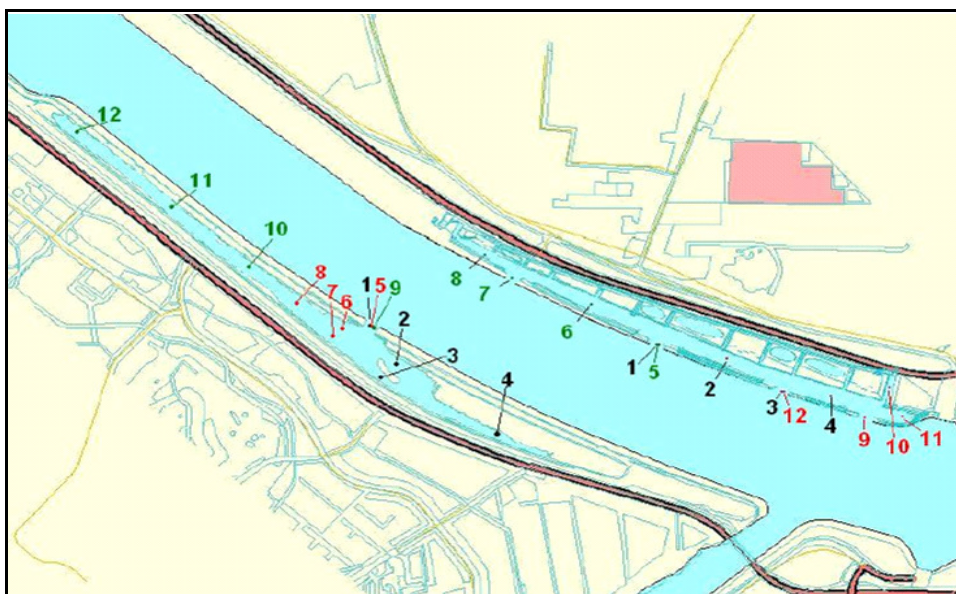
Een overzicht van de meetlocaties op de zuidoever (Spaarnwoude) en noordoever (Zuiderpolder) is in Figuur 3-1 gegeven. Opgemerkt wordt dat in de zuidoever maar één inlaat is te zien. Dit is de hoofdinlaat (V-vormige overlaat op circa 0,5 m onder kanaalpeil met een breedte op de waterlijn van circa 30 m); westelijk daarvan zijn op regelmatige afstand ook nog een vijftal duikers (met een inwendige diameter van 0,8 m) aangebracht, die ook voor uitwisseling met de lagune zorgdragen.

Ten aanzien van de noordoever zijn er een viertal V-vormige openingen, met een breedte op de waterlijn van ongeveer 30 tot 40 m (afhankelijk van welke opening). Over het niveau van deze openingen is overigens tijdens deze studie geen eenduidig beeld naar voren gekomen. Aanvankelijk werd gesteld dat de openingen relatief hoog zouden liggen (drempels op circa 0,2 m onder kanaalpeil), om voldoende beschutting te kunnen geven aan de lagune. Op het eind van de studie werd echter aangegeven dat de inlaten wellicht aanzienlijk lager zouden liggen en dat deze ligging sterk zou variëren bij de verschillende inlaten (0,3 m tot 0,8 m onder kanaalpeil). Vooralsnog is door ons bij de uiteindelijke analyse aangenomen dat er geen wezenlijk niveauverschillen zijn tussen de inlaten aan beide oevers en dat er dus geen essentiële verschillen zijn qua orde van grootte van uitwisseling in beide oevers.

Ten aanzien van de kwaliteit van de toelevering van de meetgegevens willen we het volgende opmerken:

- meetgegevens werden aangeleverd in tekst-files. De gehanteerde nummering van deze files kwam niet volledig overeen met de nummering van de meetlocaties. Een bijgeleverde Excel-file was benodigd om de juiste koppeling te kunnen maken. Bovendien werden de benamingen 'meetlocatie', 'meetkast', 'meetpunt' en 'meting' door elkaar gehanteerd. Dit werkte verwarrend;
- de periodewaarover een meting op vier meetpunten plaatsvond, was voor de vier meetpunten niet altijd gelijkwaardig door een onderlinge vergelijking maar voor een beperkt deel van de tijd mogelijk was;

- vanwege het defect raken van een meetkast zijn niet voor alle metingen gegevens beschikbaar op 4 meetlocaties;
- enkele metingen zijn tijdelijk onderbroken geweest, wat het uitvoeren van bewerkingen op de meetgegevens heeft bemoeilijkt;
- enkele metingen lopen in elkaar over. De meetopstelling was hierbij uit het water gehaald en op een andere locatie teruggeplaatst. Dit heeft extra bewerking gevergd;
- bepaalde metingen blijken niet representatief te zijn. Dit reduceert het aantal bruikbare meetlocaties aanzienlijk;
- er wordt met computertijd en met een loggertijd gewerkt. Deze tijden komen niet overeen maar verschillen onderling 2 uur, wat tot verwarring aanleiding gaf.



Figuur 3-1: Overzicht van de meetlocaties (zwart, groen en rood zijn achtereenvolgende meetsessies 1 tot en met 3)

Het instrumentarium dat bij de metingen is gebruikt, is te zien op Foto 3-1.

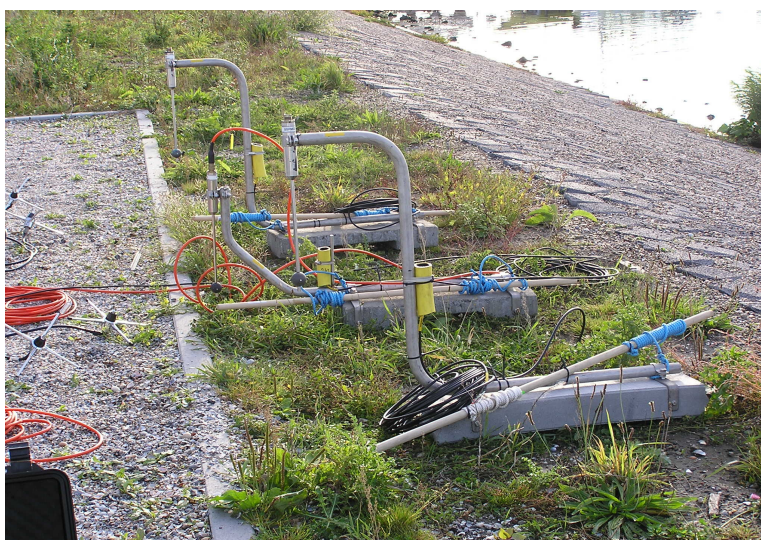


Foto 3-1: Drie meetopstellingen met op verschillende hoogten de stroomsensor (zwarte bal) en drukdoos (gele buis) gemonteerd

De metingen zijn meer in detail beschreven in (Rijkswaterstaat, oktober 2004).

Met de drukmetingen kunnen de waterstandsfluctuaties worden bepaald. Bij (snelle) golfbeweging treedt dan een afwijking op: deze is beperkt en derhalve wordt toch een goede indruk verkregen (zie Bijlage B). Langzamere fluctuaties zijn zonder meer goed te meten met de drukmetingen.

De stroommetingen zijn wel representatief, voor zover de meters goed hebben gewerkt (zie verder).

Metingen noordoever

Op 6 oktober zijn 3 meetsessies uitgevoerd aan de noordoever. Tabel 3-1 geeft een overzicht van de locaties en tijden van deze meetsessie. De dieptes bij de inlaten zijn niet altijd goed terug ten halen, omdat de inlaatiniveaus niet eenduidig zijn vastgelegd. De punten die in de lagune liggen, liggen op een waterdiepte van circa 1,0 m onder het wateroppervlak (= 1,5 m – 0,5 m).

Tabel 3-1: Meetgegevens meting noordoever

Meting	meetlocaties	meetkast	hoogte meting boven bodem	Tijd	Opmerking
sessie 1 (midden gedeelte)	punt 1	kast 1	20 cm	9:21 - 10:35	
	punt 2	kast 2	50 cm	9:21 - 10:35	
	punt 3	kast 3	20 cm	9:21 - 10:35	
	punt 4	kast 4	50 cm	9:21 - 10:35	snellh. niet representatief
sessie 2 (westelijke gedeelte)	punt 5	kast 1	20 cm	11:46 - 12:57	
	punt 6	kast 4	50 cm	11:46 - 13:02	snellh. niet representatief
	punt 7	kast 3	20 cm	12:21 - 13:02	
	punt 8	kast 2	50 cm	11:46 - 13:02	snellh. niet representatief
sessie 3 (oostelijke gedeelte)	punt 9	kast 3	20 cm	14:33 - 15:24	
	punt 10	kast 2	50 cm	14:33 - 15:24	snellh. niet representatief
	punt 11	kast 4	50 cm	14:33 - 15:24	snellh. niet representatief
	punt 12	kast 1	20 cm	14:33 - 15:24	

Metingen zuidover

Op 7 oktober zijn 3 meetsessies uitgevoerd aan de zuidover.

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de locaties en tijden van deze meetsessie. De diepte van de meters bij de hoofdinlaat is circa 0,3 m (= 0,5 m - 0,2 m). De punten die in de lagune liggen, liggen op een waterdiepte van circa 1,5 m onder het wateroppervlak (= 2,0 m - 0,5 m). Alleen punten 3 en 6 liggen hoger: op circa 0,95 m onder het wateroppervlak (1,15 m - 0,2 m).

Tabel 3-2: Meetgegevens meting Zuidoever

Meting	Meetlocaties	Meetkast	Hoogte meting boven bodem	Tijd	Opmerking
sessie 1 (oostelijke gedeelte)	punt 1	kast 1	20 cm	8:24 - 9:33	
	punt 2	kast 2	50 cm	8:24 - 9:33	snelheid niet representatief
	punt 3	kast 3	20 cm	8:24 - 9:33	
	punt 4	kast 4	50 cm	8:24 - 9:33	snelheid niet representatief
sessie 2 (midden gedeelte)	punt 5	kast 1	20 cm	11:21 - 13:27	
	punt 6	kast 3	20 cm	11:21 - 13.01	
	punt 7	kast 2			defect
	punt 8	kast 4	50 cm	11:21 - 12:45	snelheid niet representatief
sessie 3 (westelijke gedeelte)	punt 9	kast 1	20 cm	11:21 - 13:27	
	punt 10	kast 4	50 cm	13:04 - 14:40	snelheid niet representatief
	punt 11	kast 3	20 cm	13:25 - 14:44	
	punt 12	kast 2			defect

3.2 Verwerking meetgegevens

De meetgegevens zijn aangeleverd als platte tekst. De waterstanden en stroomsnelheden zijn gemeten en vastgelegd om de 0,25 seconden. Ook zijn de tijden waarop de schepen passeerden genoteerd. Met behulp van Excel en Matlab programmatuur zijn de data grafisch gepresenteerd en zijn maatgevende data geselecteerd.

Uit een eerste analyse van de meetgegevens komt naar voren dat meetkast 4 een niet representatief signaal produceert, voor wat betreft de stroomsnelheden, omdat deze een constante, onnatuurlijke vibratie laten zien van 0,25 m/s. Het gemiddelde van de registratie is mogelijk wel goed, maar omdat dit niet zeker is, wordt hier niet van uitgegaan. De gemeten stroomsnelheden van kast 4 (punten 4, 6 en 11 van de metingen van de noordoever en punten 4, 8 en 10 van de metingen van de zuidoever) worden daarom buiten beschouwing gelaten.

Ook de stroomsnelheden die met kast 2 van de zuidoever zijn gemeten vertonen, weliswaar in mindere mate, deze vibratie. Tijdens meetsessies 2 en 3 van de zuidoever is deze kast als defect opgegeven. Echter tijdens meetsessie 2 en 3 van de noordoever, vertoont het gemeten snelheidsverloop door deze meetkast ook een onnatuurlijke constante vibratie.

Dit reduceert het aantal bruikbare meetpunten voor de stroomsnelheid tijdens de meeste meetsessies tot 2 bruikbare meetpunten. In Tabel 3-1 en Tabel 3-2 is bij de opmerkingen aangegeven welke meetpunten niet representatief zijn.

In Bijlage A is een grafische presentatie van de gemeten stroomsnelheden en waterstands-fluctuaties weergegeven, zoals volgt uit de bewerkingen met Excel en Matlab. Opgemerkt wordt dat van de waterstanden alleen de fluctuaties (inclusief langzaam verlopende fluctuaties) van belang zijn, omdat het nulniveau arbitrair is.

Verder komt de loggertijd niet overeen met de echte tijd (computertijd): in het hele rapport is alles in loggertijd weergegeven: binnen het voorliggende rapport is dit consistent, bij vergelijking met andere rapporten dient hiermee echter rekening te worden gehouden.

Aangezien de meetsessies op verschillende momenten hebben plaatsgevonden kunnen deze niet zonder meer aan elkaar worden gerelateerd.

Vanzelfsprekend zijn tijdens de metingen niet de meest extreme, te verwachten belastingen voorgekomen (storm, snelst varende grootste schip). Dit betekent dat de bij de metingen geconstateerde waterbeweging nog moet worden 'opgeschaald' naar te verwachten extreme omstandigheden. Hieraan is bij de verdere analyse in Hoofdstuk 4 aandacht besteed.

De waterbeweging bij de ingangen en in de lagunes is complex. Achterliggende analyses en berekeningen zijn in Bijlage B weergegeven. Bij de analyse in Hoofdstuk 4 wordt, waar relevant, naar deze Bijlage verwezen.

In Tabel 3-3 en Tabel 3-4 is aangegeven welke schepen tijdens de metingen passeerden, inclusief de globale tijdsduur van de passage; het gaat hierbij om schepen die een merkbare invloed hadden op de waterbeweging langs de oever. Bij de analyse is de aandacht in eerste instantie gericht op deze periode. In Hoofdstuk 4 wordt ter illustratie van wat er in de lagunes gebeurt tijdens scheepspassages, de waterbeweging tijdens de passage van een groot schip (Championship) weergegeven.

Tabel 3-3: Passerende schepen bij de meetsessies van de noordoever

Meting	Tijd	Schepen	Vaarrichting
sessie 1	9:34 - 9:44	Draagvleugel	IJmuiden
	9:56 - 10:06	olieboot	A'dam
	10:15 - 10:25	Butskop, draagvleugel	A'dam, A'dam
sessie 2	12:35 - 12:45	onbekende naam	A'dam
sessie 3	14:44 - 14:54	Finnlines	IJmuiden
	15:05 - 15:15	onbekende naam	Onbekend

Tabel 3-4: Passerende schepen bij de meetsessies van de zuidoever

Meting	Tijd	Schepen	Vaarrichting
sessie 1	8:30 - 8:40	Vanitas, Marjan, Rodie 4, draagvleugel, Bijlmermeer	A'dam, A'dam, IJmuiden, A'dam, A'dam
	8:57 - 9:03	Championship	A'dam
	9:20 - 9:30	Wiljopa, Nelly	A'dam A'dam
	9:30 - 9:40	onbekende naam	Onbekend
sessie 2	11:34 - 11:44	onbekende naam	Onbekend
	12:00 - 12:10	Copain, Vicus, Harmonie	A'dam, IJmuiden, A'dam
	12:22 - 12:27	Henmar	A'dam
sessie 3	14:29 - 14:40	Bebedouro, Bro Travellin	A'dam, A'dam
	13:43 - 13:48	Angello della gatta	A'dam

4 ANALYSE METINGEN WATERBEWEGING

4.1 Analysesstappen

De analyse van de meetgegevens verliep als volgt:

- om de waterbeweging goed te kunnen interpreteren, werd eerst een totaalbeeld gevormd door de stroom- en waterstandsmetingen van alle meetpunten grafisch weer te geven (Bijlage A);
- vervolgens is een selectie gemaakt van kenmerkende verschijnselen en locaties, gericht op de vraagstelling van dit onderzoek;
- aansluitend is de scheepsgeïnduceerde waterbeweging verder geanalyseerd en de golfbeweging als gevolg van wind;
- op grond van de voorgaande stappen is de (relevante) waterbeweging verder geanalyseerd; hierbij bleken vooral de voortdurende schommelingen (als gevolg van translatiegolven) op het Noordzeekanaal en de interne oscillaties in de lagunes van belang.

Vanuit de vraagstelling ligt de nadruk op het bestuderen van de waterbeweging die (potentieel) relevant is voor de onderwaterplanten (zie Hoofdstuk 2). Daarnaast is, om de waterbeweging in de lagunes beter te kunnen begrijpen, een meer kwantitatieve analyse uitgevoerd. Tevens zijn de metingen en de uitkomsten op hoofdlijnen geëvalueerd.

Ten aanzien van de belasting door voorbijvarende schepen zijn de meetdata geselecteerd van de passerende schepen die zijn aangegeven in Tabel 3-3 en Tabel 3-4. Deze schepen zijn geselecteerd op basis van een significante waterbeweging in de punten 1, 5 en 9 (hoofdinlaat zuidoever) en punten 1, 5 en 12 (inlaten noordoever). Deze data zijn aan de hand van met Matlab gegenereerde grafieken (zie Bijlage A) geanalyseerd.

4.2 Illustratie van de waterbeweging bij de passage van een schip

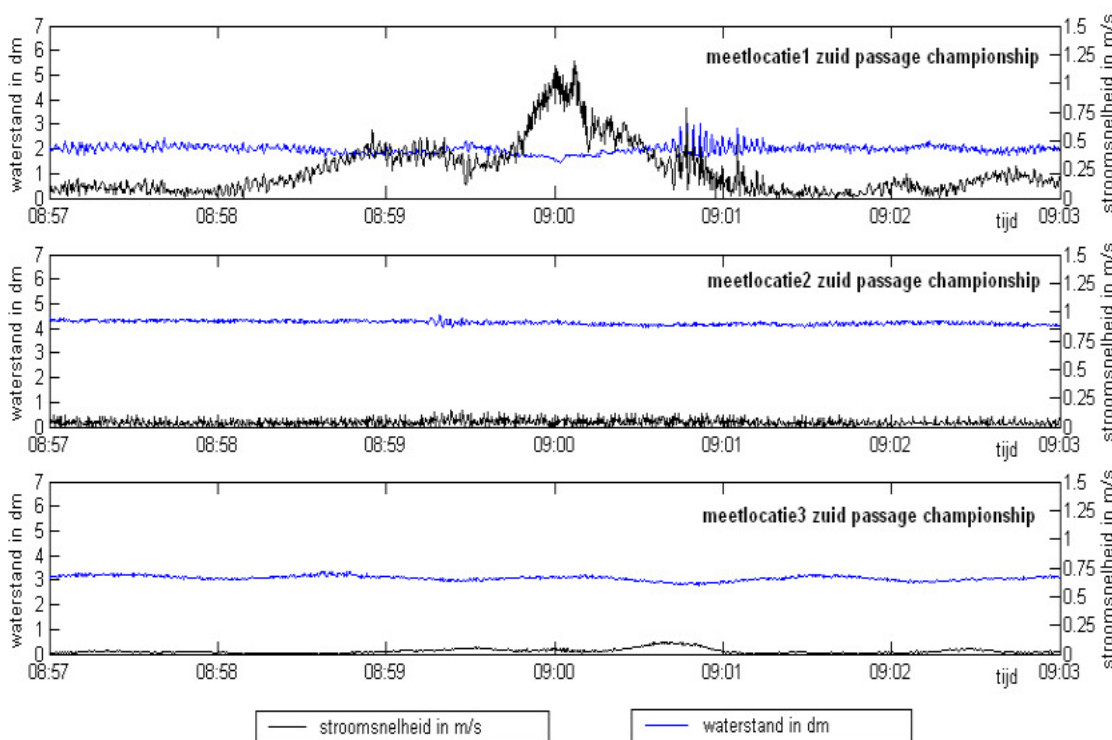
Om het begrip te vergroten van de verschijnselen die optreden tijdens de passage van een groot schip, wordt ter illustratie hierna de passage langs de zuidoever van het Championship gepresenteerd.

De kenmerkende waterbeweging is te zien in Figuur 4-1, waarin de gemeten waterstandsfluctuaties en stroomsnelheden aan de zuidoever in meetpunten 1, 2 en 3 is weergegeven.

Uit dit voorbeeld is te zien dat de waterbeweging complex is. In de opening zijn grote fluctuaties met sterk afwijkende frequenties waarneembaar. De verschillende fenomenen kunnen in de fluctuaties in waterstand en stroming worden herkend. Zo is het verschil tussen het effect van scheepspassages en windgolven op de stroomsnelheden in de openingen en de lagune duidelijk zichtbaar: de passage van schepen leidt tot fluctuaties van enkele minuten als gevolg van in- en uitstroming in de lagune, dan wel tot sterke 'uitschieters' als gevolg van scheepsgolven. De waterstand in de hoofdingang van de zuidoever verlaagt aanzienlijk minder (minder dan 0,1 m) dan op grond van de waterspiegeldaling bij het Championship verwacht zou kunnen worden (circa 0,3 m).

Dit komt omdat over de overlaat volkomen afvoer plaatsvindt en de waterstand daar niet verder zakt. Dit is ook een indicatie dat het uitstromende debiet begrensd is.

De windgolven geven meer regelmatige, snelle fluctuaties te zien: deze zijn van een grootte orde van 0,1 m of minder, wat correspondeert met de te verwachten golfslag bij de weersomstandigheden tijdens de metingen (4 tot 5 Bft vanuit ZW).



Figuur 4-1: Gemeten waterstanden en stroomsnelheden meetsessie 1 in zuidoever tijdens de passage van het 'Championship'

Duidelijk is ook dat de punten 2 en 3, die in de lagune liggen, nauwelijks nog effecten van de scheepspassage te zien geven.

Opgemerkt moet worden dat de waterstandsfluctuaties als gevolg van windgolven, die gemeten worden via de drukmeters die op zekere hoogte boven de bodem zijn geplaatst, niet de volledige fluctuatie aan het oppervlak zullen weergeven. Dit is het gevolg van de afnemende orbitaalbeweging (en corresponderende drukken) naarmate de meters verder van het wateroppervlak zijn verwijderd. Overigens is de afwijking niet erg groot. Hierop wordt in Bijlage B verder ingegaan.

4.3 Waterbeweging als gevolg van de scheepspassages

Na de illustratie van de waterbeweging tijdens de passage een schip langs de zuidoever, wordt hierna ingegaan op het totaalbeeld en wordt e.e.a. verder gekwantificeerd.

Golfwerking door schepen

Schepen veroorzaken een complexe waterbeweging tijdens het voorbijvaren: waterspiegeldaling, golven (primaire en secundaire golven) en schroefstraalwerking. De schroefstraal is alleen voor de bodem van het Noordzeekanaal van belang. De waterspiegeldaling, waardoor zuigstroming vanuit de oever optreedt, is vaak al merkbaar voordat het schip passeert en gaat (via een golving) over in een stroming naar de oever toe, nadat het schip is gepasseerd en de haalgolf (primaire golf) de oever heeft bereikt. Vervolgens treden de secundaire scheepsgolven op (interferentiepieken).

Schepen veroorzaken dus stroming én golven. Uit de waarnemingen blijkt dat de scheepsgeïnduceerde golven in de lagune vewaarloosbaar zijn ten opzichte van windgolven ($<0,1$ m).

Werking van de waterspiegeldaling tijdens de meetperiode

De waterspiegeldaling is wel van belang voor de stroming, omdat de lagune hierdoor gedeeltelijk ledigt (en aansluitend weer vult). Dit is duidelijk te zien op Foto 4-1, waarin de uitstroming zichtbaar is aan de noordoever tijdens de passage van een groot schip.



Foto 4-1: Beeld van de uitstroming bij de meest westelijke opening aan de noordoever (Zuiderpolder) als gevolg van de passage van een groot zeeschip dat richting IJmuiden vaart op 11 juni 2004

Met DIPRO berekeningen is door ons nagegaan hoe groot globaal de waterspiegelafzinking is geweest tijdens passage van schepen bij de metingen: voor het Kampioenschap wordt aldus een afzinking van circa 0,5 m gereconstrueerd (afhankelijk van de werkelijke vaarsnelheid). Het effect op de stroomsnelheden in de lagune is echter zeer beperkt: tot orde 0,1 m/s voor beide oevers (dit is het effect dat zichtbaar is bovenop de stroomsnelheidsvariatie als gevolg van andere fluctuaties).

Werking van de waterspiegeldaling tijdens extreme omstandigheden

Volgens het BPN rapport (2001) zijn extreme scheepsbelastingen te verwachten als gevolg van (overschrijding van) hoge vaarsnelheden en grote schepen. Hiermee kan de meest extreme waterspiegeldaling maximaal circa 0,5 m worden (zeeschip) en kunnen interferentiepieken optreden van maximaal 0,5 m (sleepboot). Zoals eerder gesteld zal de doorwerking van de scheepsgolven in de lagune naar verwachting beperkt zijn. De extreme waterspiegeldaling werkt niet-lineair door in de stroomsnelheid van de uitstroming (wortelfunctie); bovendien treedt boven de hooggelegen drempels bij de inlaten al snel volkomen afvoer op, zodat de stroomsnelheden hiermee gelimiteerd zijn. Ook is er sprake van een grote traagheid in het lagunesysteem door de grote afmetingen. De toename van de waterspiegeldaling in extreme omstandigheden (0,3 m bij de meting naar maximaal 0,5 m) zal daarmee een toename van de stroomsnelheden geven tot hooguit circa 30 %. Ook deze stroomsnelheden zullen de vestiging van ondergedoken waterplanten in de lagunes niet nadelig beïnvloeden.

4.4 Effect van windgolven

Werking van windgolven tijdens de meetperiode

De windgolven kenmerken zich door snelle fluctuaties (orde van grootte 1 tot enkele seconden). Tijdens de metingen was er een zuidwestelijke wind, windkracht 4-5; een dergelijke windkracht kan als redelijk vaak voorkomend worden beschouwd.

Vanzelfsprekend is het windeffect bij deze metingen beperkt (windrichting vrijwel haaks op de lengteas van de lagunes). Bovendien ligt de zuidelijke oever bij die windrichting erg beschermd. De noordelijke oever ligt minder beschermd voor de zuidwestelijke wind, maar er is in beide gevallen sprake van een korte striklengte binnen de lagunes. Het verschil in golfbeweging is binnen de lagunes dan ook nauwelijks meetbaar: in beide is sprake van een onbeduidende golfbeweging (orde 1 tot enkele centimeters). In en nabij de openingen van de lagunes wordt de golfbeweging meer beïnvloed door die op het Noordzeekanaal. Dit blijkt ook uit de metingen: bij de openingen is sprake van een gemeten golfbeweging van orde 5 tot 10 centimeter. Deze grotere merkbare golfbeweging kan echter ten dele ook zijn veroorzaakt door de hogere ligging van de opnemers (vlak boven de inlaten), ten opzichte van die in de lagunes (op 0,5 m boven de bodem, dus globaal 1 tot 1,5 m onder het wateroppervlak): doordat deze opnemers diep zijn gelegen ten opzichte van het wateroppervlak is sprake van een gedempte golfwerking bij de opnemers. Een schatting van dit effect geeft aan dat de golfwerking aan het oppervlak globaal 20% sterker is dan die welke op 0,5 m boven de bodem is gemeten.

Bij deze onbeduidende golfbeweging is het effect in de lagunes op de stroomsnelheid nabij de bodem zeer beperkt. Uit de metingen blijken de snelle fluctuaties als gevolg van golfwerking in de lagunes hooguit 0,1 m/s te bedragen (2 zuid, 2 noord), maar doorgaans enkele cm/s (6 zuid, 3 noord, 11 zuid).

Geconcludeerd kan dus worden dat in de lagunes de golfslag als gevolg van wind tijdens gemiddelde omstandigheden (zoals tijdens de metingen) zeer beperkt is en niet van invloed zal zijn op de vegetatie. Vooral bij de zuidoever treedt bovendien nog golf demping op door de brede rietkragen langs de smalle lagunegedeelten. Uit oriënterende berekeningen (zie Bijlage B) blijkt dat deze demping enkele tientallen procenten kan bedragen.

Werking van windgolven tijdens extreme omstandigheden

Uit conservatieve berekeningen (Bijlage B) blijkt dat bij extreme noordwestelijke wind aan de oostzijde van de lagunes golven kunnen ontstaan met een (significante) golfhoogte van circa 0,4 m voor beide oevers (bij de noordoever iets groter dan bij de zuidoever). Wanneer rekening gehouden wordt met demping door het riet en met de beschutting langs het kanaal door de aanwezige bomen bij de zuidoever zullen de golven daar hooguit 0,3 m kunnen worden. Door de korte golf lengte zal de golfwerking maar beperkt merkbaar zijn aan de bodem. Globaal bedraagt de golfperiode hierbij 2 s. Terugrekenend naar de pieksnelheid aan de bodem betekent dit bij een golfhoogte van circa 0,3 m, een stroomsnelheid van ruim 0,1 m/s bij een waterdiepte van 2 m en van circa 0,3 m/s bij een waterdiepte van 1 m. Bij de noordoever zouden deze snelheden nog iets hoger kunnen liggen. De orbitaalsnelheden aan de bodem zijn onder extreme omstandigheden dus vrij groot, maar zullen alleen lokaal optreden (daar waar de windgolven hoog zijn); luwe plaatsen zullen veel lagere golven en pieksnelheden hebben. Ook is sprake van een relatief korte en zeldzame belasting.

4.5 Effect van de laagfrequente schommelingen van het kanaalpeil als gevolg van schutten en spuien op de waterbeweging in de lagune

Werking van de schommelingen tijdens de meetperiode

In Bijlage A zijn laagfrequente schommelingen in de waterstand te zien; deze blijken vrijwel continu op te treden en blijken het gevolg te zijn van translatiegolven op het Noordzeekanaal als gevolg van schutten (dit kan ook bij spuien plaatsvinden, maar hiervan was tijdens de meetperiode geen sprake). Deze laagfrequente schommelingen in het kanaalpeil zijn van groot belang voor de uitwisseling van het water in de lagune. Zoals in Bijlage B is geanalyseerd, blijken de schommelingen zich regelmatig voor te doen en zijn ze ook zichtbaar binnen de lagunes (zie bijvoorbeeld meetpunten 2 zuid en 2 noord), zij het in gedempte vorm. De fluctuatie in waterstand bedroeg tijdens de metingen enige cm tot circa 5 cm en de periode is erg groot: orde een half uur. Deze gemeten fluctuaties kunnen worden verklaard uit het schutten van de schepen bij IJmuiden (zie Bijlage B). Op het Noordzeekanaal is niet gemeten, maar de schommeling kan worden aangehouden op circa 10 cm, als gemiddelde dagelijkse fluctuatie (Rijkswaterstaat, 1998). Doordat de schommelingen zo langzaam verlopen, is het aannemelijk dat de fluctuerendewaterschijf volledig wordt uitgewisseld met de lagunes. Het gaat hierbij om grote hoeveelheden water: bijvoorbeeld circa 2000 m³ bij een fluctuatie van 0,05 m. Dit is een schatting voor de zuidoever, maar het zal ook voor de noordoever in dezelfde orde van grootte liggen. Dit betekent een uitwisselingssnelheid door de overlaat én openingen (zuidoever) van circa 0,2 m/s. Dit is minder dan de maximale uitwisselingssnelheid door grote voorbijvarende schepen, maar de duur van de uitwisseling is wel veel groter. De lagune aan de zuidoever heeft een doorstroomoppervlak dat orde 10 keer groter is dan de doorstroomopening van de inlaten: de stroomsnelheid zal daar dus hooguit enige cm/s bedragen. Waterplanten zullen door deze stroming dus niet worden beschadigd of ontworteld. Wel is deze snelheid wisselend in richting (vulling en lediging) en treedt ze veelvuldig op: voor het waterkwaliteitsaspect is de wateruitwisseling tussen de lagune en het Noordzeekanaal wel van belang. Voor de noordoever zal de stroomsnelheid in de lagune als gevolg van deze schommelingen van dezelfde grootte-orde kunnen zijn, of wellicht nog minder in verband met het grotere binnengebied).

Werking van de schommelingen tijdens extreme omstandigheden

Extreme omstandigheden t.a.v. de schommelingen komen bijvoorbeeld voor als translatiegolven samenvallen (stoppen met spuien, schutten bij IJmuiden en bij de Oranjesluizen en dergelijke). De dagelijkse fluctuaties geven ook aan dat de waterstand minimaal 10 cm kan variëren. De meest extreme fluctuatie kan worden gesteld op 0,2 m, blijkens een studie van het RIZA (Rijkswaterstaat RIZA, 1993). Als we aannemen dat deze fluctuatie van 0,2 m in 15 min optreedt, dan neemt de stroomsnelheid met een factor 4 toe. Dit is voor de overlaten enigermate vergelijkbaar met de passage van een groot schip en voor de lagune zal de stroming dan nog hooguit 0,1 m/s zijn, wat wederom voor waterplanten geen probleem zou moeten zijn.

Opgemerkt moet worden dat de aangegeven maximale waterstandsschommeling alleen de verlaging van de waterstand betreft: als gevolg van tijdelijk waterbezwaar kan het peil op het Noordzeekanaal incidenteel wel verder oplopen dan NAP – 0,2m, maar dit zal veel trager gaan. Wel kan daarbij een maatgevende situatie optreden voor de doorwerking van de waterbeweging als gevolg van passerende schepen, als gevolg van de grotere waterdiepte bij de inlaten. Indien mogelijk zou veldonderzoek naar de werking van scheepspassage bij dergelijke hogere waterstanden moeten plaatsvinden.

4.6 Aanwijzingen met betrekking tot de waterbeweging uit andere bronnen

Inmiddels zijn er van de oevers diverse monitoringrapporten. Deze geven echter geen kwantitatief inzicht in de waterbeweging in de lagunes. Omdat hieraan geen metingen zijn verricht, worden hieruit geen verdere aanwijzingen gevonden, behoudens indirecte aanwijzingen (zoals de erosie van de oevers en het eilandje aan de zuidoever, waarop verderop wordt ingegaan).

Bij het ons ter beschikking gestelde ontwerpverslag voor de noordoever (Rijkswaterstaat Noord-Holland, 1998), is wel aandacht gegeven aan de verwachte waterbeweging. Zo reguleren de V-vormige inlaten de uitstroming van water vanuit de lagunes bij scheepspassages, doordat tijdens de waterspiegeldaling het doorstroomoppervlak afneemt en er eerder 'kritische stroming' zal ontstaan, waardoor de stroomsnelheid boven de inlaten niet verder kan toenemen.

Zowel scheepsgolven als windgolven kunnen vanaf het kanaal volgens het ontwerpverslag incidenteel circa 0,2 m hoog zijn in de lagune. Windgolven in de lagune zelf opgewekt worden kunnen naar verwachting circa 0,3 m worden (oostzijde). Dit correspondeert globaal met de door ons voor extreme situaties berekende windgolven.

Door Rijkswaterstaat Noord-Holland zijn de metingen in 2004 reeds globaal verwerkt en geanalyseerd (Rijkswaterstaat, 2004). Naast een overzicht van de metingen en een grafische weergave van de metingen aan de noordoever, zijn ook stroommaxima en stroomrichtingen op een kaart (bovenaanzicht) van beide oevers aangegeven.

Opvallend daarbij is dat de grootste stroomsnelheden in de inlaten in de vaarrichting zijn. Dit kan echter worden verklaard door de haalgolf van de voorbijvarende schepen, die vermoedelijk de grootste momentane snelheid geeft. Interessant is dat de maximale snelheden in de lagunes klein zijn en qua richting een diffuus beeld vertonen: dit laatste wijst er inderdaad op dat de maximale stroming in de lagunes niet wordt gedomineerd door de in- en uitstroming.

4.7 Kwantitatieve analyse van de gemeten waterbeweging

Hierna worden de hiervoor vermelde meetresultaten verder kwantitatief uitgewerkt om meer inzicht te verkrijgen in de aard van de waterbeweging in de lagunes en de wijze waarop verstoringen vanuit het Noordzeekanaal in de lagunes doordringen. Dit is weliswaar niet zozeer van belang voor de onderwatervegetatie, welke hiervoor is geanalyseerd, maar wel om hieruit lering te kunnen trekken voor toekomstige projecten. Het gaat bij deze kwantitatieve analyse met name om de wijze waarop de verstoringen door voorbijvarende schepen en door schommelingen op het Noordzeekanaal doordringen in de lagunes, om de schommelingen (oscillaties) die in de lagune zelf ontstaan en om de golfbeweging.

4.7.1 Waterbeweging als gevolg van scheepspassages en de voortplanting in de lagunes

Overzicht waterbeweging op het Noordzeekanaal als gevolg van scheepspassages

De waterbeweging op het Noordzeekanaal is ten tijde van de metingen niet gemeten. Weliswaar is dit wel bij de inlaten gedaan, maar deze geven geen goed beeld van de waterbeweging op het kanaal. Derhalve is voor drie (maatgevende) schepen de waterbeweging globaal berekend met behulp van DIPRO. Het gaat hierbij om de zuidoever. Bij de noordoever ontbrak een goede beschrijving van de voorbijvarende schepen, op één na: bij de laatste is de waterspiegeldaling echter niet gemeten. De uitkomsten zijn in de navolgende tabel weergegeven, inclusief extreme waarden, wanneer de schepen de maximaal toegestane vaarsnelheid zouden overschrijden. Opgemerkt wordt dat er vanuit is gegaan dat de schepen volgeladen waren (dit kan in werkelijkheid niet zo zijn geweest).

In de DIPRO berekeningen is het kanaal geschematiseerd tot een rechte bak van 250 m breedte en een diepte van 15 m. De schepen varen 50 m uit de as van het kanaal. In Tabel 4-1 is per schip aangegeven wat de voorspelde waterbeweging is bij vaarsnelheden van 2 tot 4 m/s. De grootste waarden voor de scheepsgeïnduceerde waterbeweging worden gevonden bij de bulkcarrier Angelo Della Gatta (ADG). Dit schip heeft een lengte van 265 m, breedte van 41 m en een diepgang van 13,7 m. Uit de metingen bij de oevers blijkt de secundaire waterbeweging bij de ADG aanzienlijk lager te zijn geweest dan hier berekend: dit kan een aanwijzing zijn dat de ADG niet was volgeladen.

Tabel 4-1: Berekende waterbeweging bij scheepspassages voor verschillende vaarsnelheden en bekende schepen

Gastanker Championschip (lxbxd=120x19x6,2) (motorschip)					
Vs (m/s)	Dhe (m)	Dhcn (m)	Hf (m)	Hi (m)	Urm (m/s)
2	0.14	0.08	0.08	0.02	0.1
3	0.28	0.17	0.17	0.08	0.18
4	0.46	0.27	0.28	0.26	0.29
Bulkcarrier Angelo Della Gatta (lxbxd=265x41x13,7) (motorschip)					
Vs (m/s)	Dhe (m)	Dhcn (m)	Hf (m)	Hi (m)	Urm (m/s)
2	0.19	0.14	0.18	0.05	0.35
3	0.4	0.3	0.39	0.23	0.59
4	0.69	0.51	0.66	0.74	0.88

Motorschip Ellen Bro (183 x 30 x 6,9)					
Vs (m/s)	Dhe (m)	Dhcen (m)	Hf (m)	Hi (m)	Urm (m/s)
2	0.16	0.09	0.12	0.02	0.17
3	0.33	0.19	0.25	0.1	0.29
4	0.54	0.31	0.42	0.31	0.44

Vs Vaarsnelheid (m/s)
 Dhe Waterspiegeldaling bij excentrisch varen (m)
 Dhcen Waterspiegeldaling bij centrisch varen (m)
 Hf Hoogte frontgolf (m)
 Hi Hoogte interferentiepieken (m)
 Urm Retourstroomsnelheid (m/s)

De toegestane vaarsnelheid op het kanaal verschilt per diepgangsklasse. De diepgangsklassen en toegestane vaarsnelheden zijn weergegeven in Tabel 4-2. Voor de schepen Championship en Ellen Bro geldt met een diepgang van respectievelijk 6,2 en 6,7 m een maximaal toegestane vaarsnelheid ($V_{s,max}$) van 14 km/u ofwel 3,89 m/s. Voor de Angelo Della Gatta geldt met een diepgang van 13,7 m een maximaal toegestane vaarsnelheid van 3,33 m/s. Bekend is dat de schepen doorgaans harder varen dan toegestaan, zelfs tot 20 procent meer ($v_{s;120\%}$). Dit geeft vaarsnelheden van orde 4,67 m/s voor de Championship en Ellen Bro en 4,0 m/s voor de Angelo Della Gatta.

Tabel 4-2: Toegestane vaarsnelheden per diepgangsklasse

Diepgang (m)	toegestane vaarsnelheid		$V_{s;120\%}$	schip
	km/u	$V_{s,max}$		
0-4	18	5.00	6.00	-
4-8	14	3.89	4.67	Championship / Ellen Bro
>8	12	3.33	4.00	ADG

Overschrijding van de toegestane vaarsnelheden resulteert in een toename in hydraulische belastingen. In Tabel 4-3 is voor $V_{s,max}$ en voor $v_{s;120\%}$ per schip aangegeven wat de toename in de hydraulische belastingen is.

Tabel 4-3: Berekende waterbeweging bij varen op toegestane snelheid en 20% overschrijding daarvan

ABSOLUUT	Dhe		Hf		Hi		Urm	
	$V_{s,max}$	$V_{s;120\%}$	$V_{s,max}$	$V_{s;120\%}$	$V_{s,max}$	$V_{s;120\%}$	$V_{s,max}$	$V_{s;120\%}$
Championship	0.42	0.59	0.25	0.35	0.21	0.49	0.27	0.38
ADG	0.49	0.69	0.47	0.66	0.35	0.74	0.68	0.88
Ellen Bro	0.49	0.7	0.38	0.54	0.25	0.57	0.41	0.58
RELATIEF	Dhe		Hf		Hi		Urm	
	$V_{s,max}$	$V_{s;120\%}$	$V_{s,max}$	$V_{s;120\%}$	$V_{s,max}$	$V_{s;120\%}$	$V_{s,max}$	$V_{s;120\%}$
Championship		40%		40%		133%		41%
ADG		41%		40%		111%		29%
Ellen Bro		43%		42%		128%		41%
gemiddelde toename belasting:		41%		41%		124%		37%

$V_{s,max}$ Maximaal toegestane vaarsnelheid in diepgangsklasse (zie Tabel 4-3)

$V_{s;120\%}$ Maximaal toegestane vaarsnelheid in diepgangsklasse x 120%

Uit deze berekeningen blijkt dat de waterspiegeldaling bij 20 procent overschrijding van de toegestane snelheid voor de drie schepen gemiddeld met orde 40 procent toeneemt. Dit geldt ook voor de hoogte van de frontgolf en de retourstroomsnelheid. Echter, de hoogte van de interferentiepieken kan toenemen met orde 120 procent ten opzichte van de belastingen bij het varen met de maximaal toegestane vaarsnelheid. De extreme belasting door te hard varen neemt dus wel sterk toe.

Overzicht van de gemeten waterbeweging in de lagunes als gevolg van scheepspassages

In onderstaande tabellen is de gemeten waterbeweging in de lagunes weergegeven als gevolg van een drietal maatgevende scheepspassages tijdens de metingen.

Tabel 4-4: Waterbeweging bij scheepspassage in lagune zuidoever

meting	meet-locaties	naam schip	tijd scheepspassage	waterspiegel daling/ snelheden primair		fluctuaties secundaire waterbeweging	
				snelheid (cm/s)	waterstand (cm)	snelheid (cm/s)	waterstand (cm)
sessie 1 (oostelijke gedeelte)	punt 1	Championship	8.57-9.03	84	4	45	13
	punt 2	Championship	8.57-9.03	nrp	1.5	nrp	2
	punt 3	Championship	8.57-9.03	8	3	2	1
	punt 4	Championship	8.57-9.03	nrp	< 1	nrp	< 1
sessie 2 (middenste gedeelte)	punt 5	onbekend schip	11.34 - 11.44	16	2	53	10
	punt 6	onbekend schip	11.34 - 11.44	3	< 1	5	3
	punt 8	onbekend schip	11.34 - 11.44	nrp	1	nrp	< 1
sessie 3 (westelijke gedeelte)	punt 9	Angelo della gatta	13.43 - 13.48	105	6	25	4
	punt 10	Angelo della gatta	13.43 - 13.48	nrp	2	nrp	< 1
	punt 11	Angelo della gatta	13.43 - 13.48	< 1	2	< 1	< 1

nrp = niet representatief

Tabel 4-5: Waterbeweging bij scheepspassage in lagune noordoever

meting	meet-locaties	naam schip	tijd scheepspassage	waterspiegel daling/ snelheids primair		fluctuaties secundaire waterbeweging	
				snelheid (cm/s)	waterstand (m)	snelheid (cm/s)	waterstand (cm)
sessie 1 (midden gedeelte)	punt 1	bunkerschip	9.56 - 9.59	10	1	30	7.5
	punt 2	bunkerschip	9.56 - 9.59	< 1	< 1	13	1
	punt 3	bunkerschip	9.56 - 9.59	10 a 15	2	28	7
	punt 4	bunkerschip	9.56 - 9.59	nrp	< 1	nrp	1
sessie 2 (westelijke gedeelte)	punt 5	onbekend schip	12.35 - 12.45	18	< 1	28	6
	punt 6	onbekend schip	12.35 - 12.45	nrp	< 1	nrp	1
	punt 7	onbekend schip	12.35 - 12.45	12	< 1	17	6
	punt 8	onbekend schip	12.35 - 12.45	nrp	< 1	nrp	< 1
sessie 3 (oostelijke gedeelte)	punt 9	Finnlines	14.45 - 14.55	30	4	20	8
	punt 10	Finnlines	14.45 - 14.55	nrp	2,5	nrp	1
	punt 11	Finnlines	14.45 - 14.55	nrp	2	nrp	1
	punt 12	Finnlines	14.45 - 14.55	55	6	25	8

Te zien is dat de waterbeweging als gevolg van de primaire waterbeweging door de schepen in de lagune sterk afneemt: de waterstanden nemen hierbij een factor 2 of meer af, bij de stroomsnelheid is dat vaak nog veel meer.

Bij de doordringing van de secundaire golfbeweging dempt de waterbeweging nog sterker.

Passage Championship

Voor de verdere analyse van de waterbeweging in de lagune van de zuidoever wordt wederom de passage van het Championship op 7 oktober 2004 genomen.

Het Championship gaf een sterke primaire waterbeweging en voer van west naar oost. Kenmerken van het schip zijn:

Tabel 4-6: Kenmerken van het Championship

Naam	Championship
Nationaliteit	Panama
Lengte	120 m
Breedte	19 m
Diepgang	6,2 m
Laa d ver mogen	6618 ton
Scheepstype	Gastanker

De tijd benodigd voor de passage van het Championship ten opzichte van een vast punt in de natuurvriendelijke oever is bepaald door aan te nemen dat het schip ten tijde van de metingen met de maximaal toegestane vaarsnelheid door het Noordzeekanaal voer. Voor het Noordzeekanaal geldt een diepgangs-afhankelijke vaarsnelheidsbeperking. Voor de diepgangsklasse 4 – 8 m geldt een maximaal toegestane vaarsnelheid van 14 km/uur (= 3,9 m/s). Met een scheepslengte van 120 m wordt voor de duur van de scheepspassage gevonden: 31 seconden.

De duur van de scheepspassage zal nagenoeg gelijk zijn aan de duur waarover de waterspiegeldaling wordt gemeten: uit de waterstandsregistratie van meetpunt 1 (in de opening) aan de zuidoever blijkt dat dit inderdaad het geval is.

De waterspiegeldaling die gepaard gaat met de primaire waterbeweging door voorbijvarende schepen, plant zich in de lagunes voort als een (negatieve) translatiegolf. Dit blijkt bijvoorbeeld uit Bijlage A, uit het waterstandsverloop tussen meetpunt 1 en meetpunt 2 van de zuidoever: de afstand tussen beide punten is circa 100 m, de geschatte grenssnelheid (volgens uit $c = \sqrt{gh}$) is bijna 4 m/s bij een aangehouden waterdiepte van 1,5 met een berekende looptijd van 26 s. Deze voortplanting is ook bij de metingen te zien. De translatiegolf breidt zich vanuit de opening(en) uit naar alle zijden van de lagune en neemt daardoor in hoogte af. Zo is de waterspiegeldaling boven de hoofdinlaat in dit geval circa 4 cm en in meetpunt 2 nog slechts 1,5 cm. Bij de meetpunten 3 en 4 is geen daling meer te destilleren uit het totaal aan fluctuaties (hierbij spelen de oscillaties – zoals verderop worden behandeld – ook een rol: de bijbehorende fluctuaties zijn vele malen groter). Ook aan de westzijde van de lagune is geen translatiegolf meer te herkennen.

De stroomsnelheden als gevolg van deze translatiegolven laten zich in een één-dimensionale toestand, beschrijven met de vergelijking voor de voortplanting van verstoringen, volgens:

$$u = \frac{\Delta h}{h} c$$

met u = stroomsnelheid, Δh = translatiegolfhoogte, h = waterdiepte en c = voortplantingssnelheid.

Hieruit volgt dat de stroomsnelheid in punt 2 circa 0,04 m/s zou bedragen. Dit is echter niet goed in de metingen terug te vinden, omdat de meting ter plaatse niet representatief blijkt te zijn.

Passage van de Angelo Della Gatta

Dit schip heeft een grote lengte en een grotere diepgang dan het Championship en passeerde de zuidoever eveneens op 7 oktober 2004. Ook dit schip ging van west naar oost.

De Angelo Della Gatta gaf een sterke primaire golfbeweging, maar nauwelijks secundaire golfbeweging. Kenmerken van het schip zijn:

Tabel 4-7: Kenmerken van de Angelo Della Gatta

Naam	Angelo Della Gatta
Nationaliteit	Gibraltar
Lengte	265 m
Breedte	41 m
Diepgang	13,7 m
Laa dver mogen	127 774 ton
Scheepstype	Bul kcarrier

De tijd benodigd voor het passeren van de inlaat was 80 s, bij een geschatte vaarsnelheid van 12 km/uur (3,3 m/s). Ook hier wordt deze duur in de metingen goed teruggevonden (meetpunt 9).

De loopsnelheid van de translatiegolf, te bepalen tussen meetpunten 9 en 10 is hier niet uit de metingen terug te halen: bij meetpunt 10 is de daling eerder merkbaar. Dit kan echter worden verklaard doordat er kennelijk al een voortplanting via de duikers heeft plaatsvonden (het schip vaart van west naar oost). Dit is ook te zien aan meetpunt 11 waar de daling nog eerder komt.

De waterspiegeldaling boven de hoofdinlaat (meetpunt 9) is nu circa 6 cm en in meetpunt 10 circa 2 cm. Ook bij meetpunt 11 is de daling van eenzelfde grootte.

De stroomsnelheid als gevolg van de translatiegolf is in meetpunt 11 geschat op minder dan 0,01 m/s; de fluctuatie lijkt groter, maar deze is waarschijnlijk veeleer toe te schrijven aan de oscillaties dan aan de translatiegolf.

Op de extreme omstandigheden is eerder ingegaan.

4.7.2 Schommelingen op het Noordzeekanaal

In Tabel 4-8 en 4-9 zijn de waterstandsfluctuaties in de lagunes als gevolg van de effecten van de schommelingen op het Noordzeekanaal verzameld.

Ervan uitgaande dat de gemiddelde dagelijkse fluctuatie op het Noordzeekanaal van circa 0,10 m ook tijdens de meetperiode is opgetreden, is er dus sprake van een demping in de lagunes met een factor 2 of meer.

Een eenduidig patroon is in de doorwerking van deze fluctuaties niet te herkennen.

Tabel 4-8: Gemeten fluctuaties als gevolg van schutten aan de zuidoever

Meting	Meetlocaties	Tijd	Fluctuatie (cm)
sessie 1 (oostelijke gedeelte)	punt 1	8:24 - 9:33	2
	punt 2	8:24 - 9:33	2
	punt 3	8:24 - 9:33	2
	punt 4	8:24 - 9:33	4
sessie 2 (midden gedeelte)	punt 5	11:21 - 13:27	1
	punt 6	11:21 - 13:01	1
	punt 7		-
	punt 8	11:21 - 12:45	2
sessie 3 (westelijke gedeelte)	punt 9	11:21 - 13:27	4
	punt 10	13:04 - 14:40	4
	punt 11	13:25 - 14:44	4
	punt 12		-

Tabel 4-9: Gemeten fluctuaties als gevolg van schutten aan de noordoever

Meting	Meetlocaties	Tijd	Fluctuatie (cm)
sessie 1 (midden gedeelte)	punt 1	9:21 - 10:35	5
	punt 2	9:21 - 10:35	3
	punt 3	9:21 - 10:35	2
	punt 4	9:21 - 10:35	5
sessie 2 (westelijke gedeelte)	punt 5	11:46 - 12:57	3
	punt 6	11:46 - 13:02	4
	punt 7	12:21 - 13:02	3
	punt 8	11:46 - 13:02	3
sessie 3 (oostelijke gedeelte)	punt 9	14:33 - 15:24	2
	punt 10	14:33 - 15:24	2
	punt 11	14:33 - 15:24	2
	punt 12	14:33 - 15:24	2

De resterende fluctuaties in de lagunes zijn dus beperkt. Zoals eerder opgemerkt, zijn de fluctuaties wel van belang voor de algehele wateruitwisseling, doordat het hier om trage fluctuaties gaat (periode bijvoorbeeld orde een kwartier of meer).

4.7.3 Interne oscillaties

Uit de registraties blijkt dat er schommelingen in de lagunes optreden die wijzen op oscillaties in de eigenfrequentie van de lagunes, vergelijkbaar met het optreden van seiches in havenbekkens.

Dit geldt zowel voor schommelingen in de dwarsrichting (dominante periode bijvoorbeeld globaal 40 s bij een uitwijking van circa 1 cm voor meetpunt 6 aan de zuidoever) als voor de lengterichting van de lagune (periode bijvoorbeeld globaal 80 s voor meetpunt 11 aan de zuidoever). Overigens zitten er meerdere frequenties in deze oscillaties. Er zijn ook meer laagfrequente oscillaties die overeenkomen met de eerste eigenfrequentie. Dat het systeem oscilleert is op zich niet opmerkelijk, maar wel opmerkelijk is dat dit waarschijnlijk de belangrijkste reden is van de gemeten stroomsnelheden aan de bodem, welke tijdens de meetperiode tot circa 0,1 m/s bedroegen. Dergelijke stroomsnelheden zijn waarschijnlijk niet toe te schrijven aan de golfbeweging, omdat de verticale golfbeweging tijdens de metingen beperkt bleef tot hooguit 1 decimeter.

Hoewel enigszins diffuus, is ook uit de registraties op te maken dat de oscillaties tijdelijk versterkt worden door de primaire golfbeweging bij scheepspassage. Het systeem is echter 'hardnekkig' en lijkt redelijk autonoom en zou bijvoorbeeld ook in stand kunnen worden gehouden door andere verstoringen (zoals de genoemde schommelingen op het Noordzeekanaal).

In extreme omstandigheden zullen de oscillaties naar verwachting niet evenredig meegroeien met de verstoringen van buiten af (hier het Noordzeekanaal), mede omdat de inflaten zorgen voor een stuk demping. Dit is echter nog wel punt van nader onderzoek wanneer men de waterbeweging beter zou willen extrapoleren naar extreme condities.

4.7.4 Windgolven

In Tabel 4-10 en 4-11 zijn de gemeten fluctuaties in de lagunes als gevolg van windgolven weergegeven.

Tabel 4-10: Gemeten fluctuaties als gevolg van windgolven aan de zuidoever

Meting	Meetlocaties	Tijd	Fluctuatie (cm)
sessie 1 (oostelijke gedeelte)	punt 1	8:24 - 9:33	2
	punt 2	8:24 - 9:33	1
	punt 3	8:24 - 9:33	1
	punt 4	8:24 - 9:33	< 1
sessie 2 (midden gedeelte)	punt 5	11:21 - 13:27	3
	punt 6	11:21 - 13:01	2
	punt 7		-
	punt 8	11:21 - 12:45	1
sessie 3 (westelijke gedeelte)	punt 9	11:21 - 13:27	2
	punt 10	13:04 - 14:40	1
	punt 11	13:25 - 14:44	2
	punt 12		-

Tabel 4-11: Gemeten fluctuaties als gevolg van windgolven aan de noordoever

Meting	Meetlocaties	Tijd	Fluctuatie (cm)
sessie 1 (middengedeelte)	punt 1	9:21 - 10:35	1
	punt 2	9:21 - 10:35	1
	punt 3	9:21 - 10:35	2
	punt 4	9:21 - 10:35	1
sessie 2 (westelijke gedeelte)	punt 5	11:46 - 12:57	2
	punt 6	11:46 - 13:02	< 1
	punt 7	12:21 - 13:02	2
	punt 8	11:46 - 13:02	1
sessie 3 (oostelijke gedeelte)	punt 9	14:33 - 15:24	3
	punt 10	14:33 - 15:24	2
	punt 11	14:33 - 15:24	1
	punt 12	14:33 - 15:24	3

De golfhoogtes blijken marginaal te zijn en zullen verwaarloosbare stroomsnelheden aan de bodem hebben veroorzaakt (hooguit cm/s). Een duidelijk patroon is niet te onderkennen, behalve dat bij de noordoever de golven aan de oostzijde (enigszins aan de benedenwindse kant) iets groter zijn geweest. De gemeten stroomsnelheden van circa 10 cm/s die gemeten worden zijn veeleer aan de eigen oscillaties in de lagunes toe te schrijven dan aan de windgolven.

Het golfbeeld is tijdens de metingen maar op een paar punten in de lagunes gemeten. Hierbij waren de meters in de openingen of in de diepe delen van de lagunes geplaatst; alleen meetpunten 3 en 6 van de zuidoever bevonden zich in ondieper water, nabij de eilandjes. Een complicatie bij de metingen is dat de windrichting pakweg haaks op de lengterichting van de lagunes stond, waardoor de golfgroei klein was. De resulterende golfbeweging is daarmee zeer beperkt geweest. Het is op grond van de gemeten golfbeweging niet mogelijk om verantwoorde uitspraken te doen van het totale golfbeeld in de lagunes tijdens de metingen, laat staan tijdens maatgevende omstandigheden (bijvoorbeeld storm uit het noordwesten). Dit komt omdat de golven zullen dempen en diffracteren op de oevers, op en rondom de eilanden (zuidoever) en op ondiepe bodemgedeelten. In werkelijkheid is sprake van een driedimensionaal golfbeeld, wat zich alleen met een echt golfmodel (SWAN bijvoorbeeld) of met uitgebreide metingen laat onthullen.

4.8 Erodeerbaarheid bodem van de lagunes

Voor het succesvol vestigen van wortelend waterplanten moeten deze een goede hechting met de bodem kunnen hebben. Dit kan alleen als de stroomsnelheid dusdanig laag is dat geen erosie van bodemmateriaal optreedt. Als dit wel het geval zou zijn, kunnen de waterplanten los worden geslagen en op de oever worden geworpen of met de stroming worden meegenomen. In Tabel 4-12 is de erosiebestendigheid van een aantal bodemsoorten weergegeven voor stroming zonder overheersende golfwerking.

Tabel 4-12: Erosiebestendigheid van een aantal bodemsoorten tegen overtrekkende stroming (bron: CUR, 1999)

Bodemsoort	Kritieke stroomsnelheid (m/s)
Zand	0,15 – 0,30
Zavel, zandige klei	0,20 – 0,30
Slappe klei	0,40 – 0,60
Vaste klei	0,60 – 1,00

Door de opdrachtgever is aangegeven dat de bodem in de lagunes veelal bestaat uit zandig materiaal. De kritieke stroomsnelheid voor stroming bedraagt daarmee 0,2 m/s tot 0,3 m/s.

De golfwerking geeft doorgaans een stroomsnelheid (maximale orbitaalsnelheid aan de bodem) kleiner dan 0,1 m/s. Door deze golfwerking neemt de kritieke stroomsnelheid voor de resterende stroming af. Dit komt doordat de effectieve, op de bodem uitgeoefende schuifspanning toeneemt. Bij de hiervoor vermelde waarden, reduceert de kritieke schuifspanning zo'n 40 %: dit volgt uit de methode die is aangegeven op blz 5-58 van de CUR Manual 169, 1995. Dit betekent een reductie van een kleine 20% op de kritieke stroomsnelheid als gevolg van alléén stroming. De werkelijk optredende stroomsnelheid is onder normale omstandigheden in werkelijkheid hooguit 0,1 m/s, zodat deze altijd kleiner is dan de kritieke stroomsnelheid, inclusief reductie voor golfwerking. Alleen bij extreme golfwerking (storm in lengterichting van de lagunes), zou de kritieke snelheid kunnen worden overschreden en is er (beperkte) erosie mogelijk. Dit treedt echter zeer incidenteel op en wanneer de planten zijn aangeslagen zal dit naar verwachting geen problemen geven voor de plantenwortels.

Bij extreme golfomstandigheden zal het zand niet gemakkelijk in suspensie gaan, omdat dit pas gebeurt bij een schuifspanningssnelheid die circa 1,5 maal de valsnelheid van het zand is. Deze laatste is voor fijn zand enkele cm/s, zodat de schuifspanningssnelheid waarbij het zand in suspensie begint te komen orde 5 cm/s bedraagt of meer. De kritieke schuifspanningssnelheid is voor fijn zand minder dan 1,5 cm/s. Dit betekent dat het transportniveau aanzienlijk boven het begin van beweging moet liggen voordat het zand noemenswaardig in suspensie kan komen. Dit is voor de lagunes niet erg waarschijnlijk.

Tijdens de monitoring is oeverafslag geconstateerd bij de zuidoever, evenals erosie van het eilandje aan de westzijde van de hoofdinlaat: dit eilandje is thans onder water verdwenen. Naar onze mening zal deze erosie in beide gevallen vooral door golfafslag zijn veroorzaakt. Bekend is bijvoorbeeld dat bij onverdedigde oevers van nevengeulen langs de rivieren er door kleine golven reeds oeverafslag ontstaat, tot het moment waarop de pioniervegetatie op de oevers voldoende tot ontwikkeling is gekomen om hieraan weerstand te bieden. Anders dan bij de rivieren, is de waterstand bij de natuurvriendelijke oevers vrij constant, zodat dit effect nog groter zal zijn.

Aanslibbing treedt, voor zover bekend, ook niet in sterke mate op in de lagunes; dit wordt bevestigd door de opdrachtgever, die heeft aangegeven dat de bodem in de lagunes doorgaans uit zandig materiaal bestaat. Sedimentatie door geconstateerde verhoging van het bodemniveau zal veeleer uit de oevers afkomstig zijn, als gevolg van golfrosie kort na aanleg.

4.9 Invloed van de geconstateerde en te verwachten extreme waterbeweging op de onderwatervegetatie

In de instroomopeningen in de zuidoever en de noordoever treden hoge stroomsnelheden op en is sprake van zware golfwerking tijdens scheepspassages. In de lagunes zijn deze belastingen echter sterk afgenomen en kunnen als relatief 'licht' worden gekwalificeerd: de golfhoogte (behoudens tijdens storm) is in de orde van 0,1 m en de stroomsnelheden bedragen circa 0,1 m/s of minder. Zelfs tijdens extreme omstandigheden zullen de golven waarschijnlijk maximaal 0,3 m hoog zijn (lokaal, aan de oostzijde) en zullen stroomsnelheden nabij de bodem maar hooguit enkele decimeters/s bedragen en zal er daarbij nauwelijks of niet sprake zijn van erosie van de bodem en van suspensie. Indien er wel sprake is van erosie zal deze hoogstwaarschijnlijk niet leiden tot het beschadigen van wortelende planten (zeer uitzonderlijke situatie, korte duur van belasting, zeer lokaal).

Wel zullen de dagelijkse kleine golven, enige erosie kunnen veroorzaken van onbegroeide delen, zoals het eilandje aan de westzijde van de hoofdinlaat van de zuidoever. Daar zullen zich derhalve geen planten kunnen vestigen, maar dit zal voor onderwaterplanten (behoudens in de directe omgeving van de eroderende eilandjes) verder geen invloed hebben.

Ook moet worden bedacht dat er wel vrij continu sprake is van lichte stroming, vooral als gevolg van de schommelingen in het Noordzeekanaal (translatiegolven als gevolg van schutten en/of spuien).

Voor wortelende dan wel in de bodem aangebrachte waterplanten zullen de stroomsnelheden op deze locaties geen belemmering vormen voor de groei van de onderwatervegetatie. Ook in natuurlijke wateren komen de uitgezette ondergedoken en emerse waterplanten onder vergelijkbare stroomsnelheden voor (o.a. Jaarsma & Verdonschot, 2000; Nijboer et al., 2000); pas bij snelheden nabij de 1 m/s worden planten in hun ontwikkeling (sterk) beperkt.

Doordat echter vrijwel constant een lichte stroming aanwezig is, kan de vestiging van nieuwe planten wel gehinderd worden. Zowel vestiging uit zaad als uit vegetatieve delen geschiedt vrijwel alleen in luwe gedeelten van het water (De la Haye, 1997). Bij de zuidoever zijn de waterplanten naar verluid drijvend aangebracht en ligt het derhalve voor de hand dat deze zich niet tijdig hebben kunnen hechten in het substraat. Verder zal in de directe nabijheid van de ingangen een zone aanwezig zijn met geconcentreerde stroming en zal de vestiging van onderwatervegetatie daar sowieso moeilijker zijn.

Snelle aanslibbing kan voor waterplanten ook een probleem zijn. Uit onderzoek aan natuurvriendelijke oevers (Boedeltje *et al.*, 2003) is gebleken dat snelle aanslibbing in zeer rustig water een sterk negatieve invloed kan hebben op ondergedoken waterplanten. Als gevolg van de slibophoping kan (verhoogde) eutrofiëring optreden, wat leidt tot een explosie van algen en kroos. Bovendien bedekt de sliblaag ook de planten. Beide factoren resulteren vervolgens in een sterke afname van de lichtbeschikbaarheid voor ondergedoken waterplanten, waarna deze snel verdwijnen. Langs de Zuid-Willemsvaart zijn op een aantal locaties de natte stroken volledig afgeschermd van het kanaal, waardoor deze volledig zijn afgeschermd van golfwerking en sedimentatie vanuit het kanaal (niet van sediment invang vanaf de landzijde), doordat de scheidingswanden ondoorlaatbaar en hoog genoeg zijn om mogelijk overslaande golven tegen te houden.

De geïsoleerde stroken werden hierdoor voornamelijk gevoed door regen- en grondwater. Onder de relatief nutriëntarme condities konden ondergedoken waterplanten, waaronder kranswieren, goed tot ontwikkeling komen.

Hoewel een dergelijke afscheiding blijkbaar wel een goede uitgangspositie voor ondergedoken watervegetatie creëert, zal zo'n afscheiding langs de zuidoever en de noordoever niet ten goede komen aan de oorspronkelijke doelstellingen van deze oevers, omdat deze zijn gericht op het bieden van een brak water milieu aan flora en fauna en het bieden van paai- en opgroeiplaatsen aan vis uit het Noordzeekanaal (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1998).

Naast het uitzetten van ondergedoken waterplanten, is ook kieming vanuit zaden een optie. Mogelijk kiemen zaden van nature op de meest geschikte locaties, bijvoorbeeld op plaatsen waar de stroming het minst sterk is. Doordat de kiemende zaden tegelijk ondergronds en bovengronds biomassa opbouwen, blijft de trekkracht van de stroming (aan de bovengrondse biomassa) in evenwicht met het houvast in de bodem (door de ondergrondse biomassa). Tevens ontwikkelt de plant zich in stromend water, met de daarbij behorende morfologische eigenschappen.

Voorwaarde voor kieming vanuit zaden is natuurlijk dat deze daadwerkelijk aanwezig zijn in de natuurvriendelijke oevers. Enerzijds kunnen de zaden afkomstig zijn van reeds aanwezige zaden in het water, bijvoorbeeld van de uitgezette waterplanten, of van andere vegetaties in de omgeving. Voor wat betreft dit laatste heeft onderzoek van Boedeltje (2005) aangetoond, dat kanalen grote hoeveelheden zaden en andere diasporen bevatten en functioneren als dispersiebaan. Met name perioden van hoge afvoer/ hoogwater zijn belangrijk voor de dispersie van planten. Boedeltje *et al.* (2001) toonde aan dat ondiepe zone's langs kanalen geschikt zijn voor vestigen van veel soorten en waarbij lichtgebrek, slibophoping en eutrofiëring de belangrijkste stressoren zijn. Anderzijds is het mogelijk dat zaden in de bodem van de lagune (in de zaadvoorraad) aanwezig zijn. Tevens bestaat de mogelijkheid dat zaden worden aangevoerd door migrerende fauna, zoals watervogels. Aangezien over deze mogelijke zaadbronnen voor het Noordzeekanaal onvoldoende gegevens beschikbaar zijn, is nader onderzoek hiernaar aan te bevelen. Met een kleine inventarisatie van welke wateren er op het Noordzeekanaal uitmonden, kan al voldoende informatie worden verkregen. Indien blijkt dat er geen of onvoldoende kiemkrachtige zaden in of rond de oever aanwezig zijn, bestaan wellicht mogelijkheden zaden in de lagunes aan te brengen. Onderzoek vooraf zal moeten uitwijzen wat hiervoor de meest geschikte methode is.

Wel moet bedacht worden dat planten die voortkomen uit kieming zich alleen op stroomluwe delen zullen vestigen; dit betekent voor beide lagunes dat dit in relatief kleine gebieden zal zijn. Voor grotere delen van de lagunes zal het nodig zijn de waterplanten aan te brengen en in te graven.

4.10 Opmerkingen ten aanzien van de metingen en de waterbeweging

Terugkijkend naar de voorgaande bevindingen, kan het volgende worden opgemerkt t.a.v. de metingen (zonder hier expliciet een waarde-oordeel aan te willen geven: ten volle wordt erkend dat het stroombeeld zeer complex is):

- de uitgevoerde meetseries geven maar beperkt inzicht in de waterbeweging;
- een belangrijke oorzaak hiervan ligt in de achtereenvolgende meetseries: deze kunnen niet goed worden gekoppeld, omdat de achtereenvolgende scheepspassages een zeer specifieke waterbeweging veroorzaken;

- een andere oorzaak is het ontbreken van referentiemetingen aan de Noordzeekanaalzijde; er zijn weliswaar metingen in de inlaten verricht, maar deze geven niet een representatief beeld van de randvoorwaarden vanuit het Noordzeekanaal;
- bovenop het beperkt aantal meetpunten per sessie (4), bleken de stroomsnelheidsmetingen van een aantal niet representatief te zijn;
- er ontbreekt een koppeling tussen metingen en extreme omstandigheden (passage van zeer grote schepen, harde wind vanuit het noordwesten, sterke schommelingen op het kanaal als gevolg van schutten/spuien): voor de planning is dit ook niet gemakkelijk, maar het maakt doorvertaling naar extreme omstandigheden onzekerder;
- het verdient aanbeveling om de meetgegevens in de toekomst beter te voorzien van meta-informatie en bij voorkeur de metingen in uitgewerkte vorm (grafieken en tabellen) beschikbaar te stellen: voor ons was het een onevenredig grote inspanning om deze goed uitgewerkt te krijgen, gezien de toestand van aanlevering.

Ten aanzien van de geconstateerde waterbeweging wordt het volgende opgemerkt. Uit de metingen is gebleken dat de beschutting van de lagunes voor de waterbeweging door scheepspassages vanuit het Noordzeekanaal groot is. Verder was de waterbeweging als gevolg van windgolven ook marginaal. Het effect van de laagfrequente schommelingen op het Noordzeekanaal door schutten en spuien is wel voor de uitwisseling tussen Noordzeekanaal en lagunes van belang, maar geeft maar een marginale belasting in de lagunes.

Grote verschillen tussen de zuidoever en noordoever zijn niet geconstateerd. Dit is mogelijk te verklaren doordat de aanvankelijk vermeende hoge inlaten in de noordoever, zich bij nader inzien mogelijk toch op een niveau bevonden dat vergelijkbaar is met het niveau van de hoofdinlaat in de zuidoever. Naar verwachting zal de windbelasting bij de noordoever wel wat sterker kunnen zijn bij sterke noordwesten wind, gezien de meer geëxposeerde ligging.

Over de golfbeweging vlak bij de oevers, waar het ondiep is, kan worden opgemerkt dat hier geen metingen zijn verricht. Het merendeel van de opnemers was in de inlaten én in de diepe delen van de lagune van de zuidoever geplaatst (alleen opnemers 3 en 6 bij een waterdiepte van 0,75 m nabij de twee eilandjes). De twee opnemers nabij de eilandjes bij de zuidoever geven geen algemene informatie, omdat deze in de sterk versturende werking van de eilandjes liggen. Op basis van de uitgevoerde metingen kan hier over de golfwerking op ondiepe plaatsen derhalve niets zinnigs worden gezegd. Ook bij de noordoever waren de meetinstrumenten in de inlaten geplaatst en in de relatief dieper gelegen geul van de oever (waterdiepte circa 1,5 m); zonder verdere computersimulaties en/of aanvullende metingen kan ook hier ook geen uitspraak over het algehele golfbeeld worden gedaan.

5 INVLOED VISSSEN OP ONDERWATERVEGETATIE

5.1 Analyse van de beschikbare informatie

In 2004 is de visstand van het Noordzeekanaal (en het Amsterdam-Rijnkanaal) bemonsterd (Witteveen & Bos en Aquaterra, 2005). In de oeverzone van het Noordzeekanaal zijn twee trekken uitgevoerd om een beeld te krijgen van de visstand. In de natuurvriendelijke oevers (zowel Spaarnwoude als Zuiderpolder) werden vrijwel geheel geen limnofiele soorten (dit zijn vissen die een voorkeur hebben voor stilstaand, rijk begroeid water) aangetroffen. De lagunes bleken zeer soortenarm en werden sterk gedomineerd door grote Brasem (>40 cm). De visbiomassa bedroeg 103 kg/ha. In Spaarnwoude is het aandeel biomassa Brasem 69%, in de NVO Zuiderpolder zelfs 92%. In de NVO Zuiderpolder worden verder vooral Blankvoorn (2%), Baars (3%) en Winde (3%) gevangen. In de NVO Spaarnwoude betreft het vooral Karper (11%), Koornaarvis (10%), Winde (4%) en Zeebaars (3%). Ook in het openwater en andere zijwateren van het Noordzeekanaal is het aandeel Brasem hoog tot zeer hoog. Naast brasem wordt eveneens relatief veel Winde aangetroffen, hetgeen een indicator is voor turbulente (stromings) condities. Deze condities zijn echter niet aangetoond, behoudens bij de diverse inlaten.

5.2 Mogelijk effect van vissen op de onderwatervegetatie

De kale condities (geen submerse vegetatie) kunnen hierdoor verklaard worden: Brasem voorkomt door bodemwoeling de ontwikkeling van deze vegetatie. Deze situatie (erg veel Brasem in de oevers waardoor deze kaal blijven) wordt in Nederland veel aangetroffen in natuurvriendelijke oevers. Volwassen Brasem foerageert voornamelijk op bodemdierpjes zoals insecten (larven), wormen en slakken. De vis steekt hiertoe zijn uitschuifbare bek de bodem in (tot wel 10 cm!) en woelt het bodemmateriaal om. Als gevolg hiervan treedt sterke vertroebeling op. Tevens leidt het omwoelen van de bodem tot het vrijkomen van voedingsstoffen en treedt dus interne eutrofiëring op. De eutrofiëring kan in sterke algenbloei resulteren, welke bovendien nauwelijks geremd wordt doordat algenetend waterflooiën door jonge Brasems worden gegeten. vertroebeling van het water zal dus steeds verder kunnen toenemen, wat de Brasem opnieuw bevoordeelt doordat natuurlijke, op zicht jagende, predatoren als Snoek verdwijnen (De Jong *et al.*, 2003).

Het resultaat is een soortenarm en vegetatieloos oppervlaktewater, waarin alleen Brasem en algen voorkomen. Dergelijke wateren komen veelvuldig voor in Nederland en zijn ook bij natuurvriendelijke oevers bekend (Witteveen & Bos en Aquaterra, 2005). Het is dus zeer wel mogelijk dat ook in de zuidoever bij Spaarnwoude en de noordoever bij de Zuiderpolder de massaal aanwezige Brasems een zodanige vertroebeling veroorzaken dat ondergedoken waterplanten door lichtgebrek en een overdaad aan nutriënten worden weggeconcentreerd.

Een aanwijzing van eutrofiëring wordt verkregen uit de luchtfoto's van beide oevers, welke beschikbaar zijn bij Rijkswaterstaat Noord-Holland. Een foto van de zuidoever is hier opgenomen, zie Figuur 5-1. Het oppervlak van de lagunes is sterk afwijkend van kleur van die van het Noordzeekanaal, wat vooral zichtbaar is tijdens instroming en tijdens uitstroming. De kleurafwijking duidt op organische deeltjes die zich op het wateroppervlak hebben verzameld. Deze verkleuring lijkt erg afhankelijk te zijn van seizoensvariaties.



Figuur 5-1: de afwijkende kleur van het oppervlak van de lagune aan de zuidoever ten opzichte van die van het Noordzeekanaal is een aanwijzing voor mogelijke eutrofiëring (bron: RW S Directie Noord Holland: foto genomen op 16 juni 1999)

Een mogelijke maatregel om deze problematiek tegen te gaan, is het wegvangen van Brasem. In de randmeren leidde massale kolonisatie van Brasem in de jaren '60 en '70 van de vorige eeuw eveneens tot enorme vertroebeling en achteruitgang van de soortenrijkdom. Nadat in 1993 de vangst van Brasem werd geïntensiveerd, daalde de Brasemstand sterk en verhoogde de waterkwaliteit en soortenrijkdom (Meijer *et al.*, 1999). In 1996 is overigens bij de zuidoever geprobeerd de Brasem buiten de lagune te houden, maar door de waterbeweging en door ijsgang, gingen het net in de hoofdopening en de roosters in de duikers stuk, zodat dit niet is gelukt.

Het niet aanslaan van waterplanten als gevolg van vogelvraat is niet erg waarschijnlijk (Schutte, 2005). Het verlies van bovengrondse delen in voorjaar en zomer als gevolg van vogelvraat is waarschijnlijk erg klein in vergelijking met de potentiële groeisnelheid van de planten. De maximale dichtheid van waterplantenetende vogels piekt in de late zomer en in het najaar wanneer de groeisnelheid van de waterplanten is gereduceerd. Bij hoge dichtheden vogels laat in het seizoen kan een relatief groot deel van de overwinterende structuren worden geconsumeerd, wat de herstellende watervegetatie negatief kan beïnvloeden. Als oorzaak voor het niet aanwezig zijn van waterplanten lijkt dit echter een onwaarschijnlijke factor.

Ten aanzien van de aanplant van onderwaterplanten, zou kunnen worden overwogen om deze sowieso te beschermen met bijvoorbeeld een gaasconstructie die de aangeplante delen van de lagune beschermt tegen de Brasem, totdat voldoende vestiging is verkregen.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 Conclusies

- Het ontbreken van de onderwatervegetatie van de twee natuurvriendelijke oevers, bij Spaarnwoude en bij de Zuiderpolder langs het Noordzeekanaal, is voor zover is na te gaan aan de hand van de metingen van de waterbeweging in oktober 2004, niet te wijten aan de waterbeweging. De waterbeweging als gevolg van passerende schepen, windgolven en schommelingen op het Noordzeekanaal blijft zeer beperkt en zal naar verwachting geen bedreiging vormen voor waterplanten die zich reeds hebben gevestigd.
- De meest waarschijnlijke oorzaak is de massaal aanwezige Brasem in beide lagunes. Behalve omwoeling van de bodem, veroorzaken de bijkomende effecten (vertroebeling en eutrofiëring door vrijkomende nutriënten) naar verwachting een dusdanige achteruitgang van de soortenrijkdom dat onderwaterplanten in beide oevers niet kunnen gedijen.
- De waterbeweging als gevolg van scheepspassages is weliswaar sterk merkbaar en zichtbaar bij de inlaten, maar blijft in de lagunes beperkt en is van eenzelfde orde van grootte als het effect van windgolven (behalve bij storm) en van schommelingen van het kanaalpeil als gevolg van schutten/spuien. Alleen tijdens zware storm uit westelijke tot noordelijke richting zou er tijdelijk enig materiaaltransport aan de bodem van de lagunes kunnen optreden; dit is dan wel beperkt tot de ondiepe zones en de oostkant van de lagunes en zal bij de noordoever wat meer voorkomen dan bij de zuidoever.
- De schommelingen in het kanaalpeil dragen in belangrijke mate bij aan de wateruitwisseling met het Noordzeekanaal en zijn in die zin voor de zuidoever belangrijker dan de passerende schepen. Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde heeft overigens aangegeven dat bij het ontwerp van de zuidoever hier rekening mee zou zijn gehouden, maar hieromtrent hebben wij geen nadere informatie gekregen. De inlaathoogtes van de inlaten bij de noordoever is op dit moment ook niet geheel duidelijk, zodat over de uitwisseling bij de noordoever geen eenduidig beeld bestaat. Het lijkt er nu op dat de inlaten op een hoogte liggen die vergelijkbaar is met de hoofdinlaat van de zuidoever, zij het wel sterk variërend (0,3 m tot 0,8 m onder kanaalpeil).
- Opmerkelijk zijn de 'eigen' oscillaties die in de lagunes optreden; bij veel meetpunten in de lagunes zijn dit de belangrijkste fluctuaties. De maximale gemeten stroomsnelheden van 0,10 m/s zijn waarschijnlijk voornamelijk aan deze oscillaties toe te schrijven.

6.2 Aanbevelingen

- De metingen in oktober 2004 zijn goed bruikbaar geweest, ondanks dat een deel ervan niet representatief was, waardoor onder andere de meetseries niet goed aan elkaar konden worden gekoppeld. Voor toekomstige metingen is het goed om meer tijd en aandacht aan de metingen te geven en hierbij ook inhoudsdeskundigen uit te nodigen, vooral ook voor een visuele impressie van de te meten verschijnselen. Hierbij zou de focus meer op de waterbeweging in de lagunes kunnen liggen en minder op de waterbeweging bij de inlaten. Tevens is het van belang om een goede referentiemeting te hebben van de waterbeweging op het Noordzeekanaal nabij de oevers, omdat dit de externe randvoorwaarde voor de oevers is.

Indien mogelijk zouden de metingen bij een zo hoog mogelijk kanaalpeil dienen te worden uitgevoerd, met het oog op de grotere doordringing van de scheepsbeweging in de lagunes.

- Het verdient aanbeveling onderwaterplanten goed in de bodem te verankeren op die plaatsen waar enige stroming is (dit is in grote delen van de lagunes). Kiemen van planten zal alleen op zeer stroomluwe plaatsen kunnen.
- Ter bescherming van de planten, maar ook ter verbetering van de soortenrijkdom, is het van belang dat de Brasem wordt ingetoomd, bijvoorbeeld door het wegvangen van Brasem.
- Als aanvullende maatregel ter bescherming van de planten, kunnen gaasconstructies worden toegepast die kunnen worden weggehaald wanneer de vegetatie goed is aangeslagen.
- In de toekomst zou een diepgaander meetsessie zijn aan te bevelen, waarbij rekening wordt gehouden met de opmerkingen zoals in paragraaf 4.10 zijn vermeld. Een dergelijke sessie kan het begrip van de waterbeweging verder vergroten en kan beter inzicht geven in de te verwachten waterbeweging tijdens extreme omstandigheden. Het lijkt in elk geval wenselijk dat bij verdere aanpassing van de inlaten, mocht dat worden overwogen, er een goede nulmeting van de huidige situatie komt, alsmede een vergelijkende meting na oplevering van de nieuwe inlaten.

REFERENTIES

Ali, M.M., K.J. Murphy & J. Langendorff, 1999. Interrelations of river ship traffic with aquatic plants in the River Nile, Upper Egypt. *Hydrobiologia* 415: 93-100.

Aquasense, 2004. Natuurvriendelijke oever Spaarnwoude, monitoring 2003. In opdracht van Rijkswaterstaat Noord-Holland, Haarlem, nota ANW 0402.

Boedeltje, G., 2005. The role of dispersal, propagule banks and abiotic conditions in the establishment of aquatic vegetation. Thesis, Radboud University, Nijmegen.

Boedeltje, G., Smolders, A.J.P., Roelofs, J.G.M. & J.M. van Groenendaël, J.M., 2001. Constructed shallow zones along navigation canals: vegetation establishment and change in relation to environmental characteristics. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 11(6): 453-471.

Coops, H. Notitie Potentiële waterplantengroei NVO Spaarnwoude.

CUR, 1995. Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering, CUR Manual 169

CUR, 1999. Natuurvriendelijke oevers, deel belasting en sterkte.

Jaarsma, N. G. & P. F. M. Verdonschot, 2000. Natuurlijke levensgemeenschappen van de Nederlandse binnenwateren deel 10, Regionale kanalen. Achtergronddocument bij het 'Handboek Natuurdoeltypen in Nederland'. Rapport EC-LNV nr. As-10. In opdracht van het ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij. Expertisecentrum LNV, Wageningen.

Jong, Th. de, R. Beenen & P. Heuts, 2003. Atlas van de Utrechtse vissoorten. De verspreiding van vissoorten in de provincie Utrecht en het beheersgebied van het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. Provincie Utrecht, Utrecht.

Meijer, M.L., R. Portielje, R. Noordhuis, W. Joosse, M. van der Berg, B. Ibelings, E. Lammens, H. Coops & D.T. van der Molen, 1999. Stabiliteit van de Veluwerandmeren. BOVAR-rapportnummer 99.06. RIZA-rapport 99.054. RIZA, Lelystad.

Nijboer, R., N. Jaarsma, P. Verdonschot, D. van der Molen, N. Geilen & J. Backx, 2000. Natuurlijke levensgemeenschappen van de Nederlandse binnenwateren deel 3, Wateren in het rivierengebied. Achtergronddocument bij het 'Handboek Natuurdoeltypen in Nederland'. Rapport EC-LNV nr. As-03. In opdracht van het ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij. Expertisecentrum LNV, Wageningen.

Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, maart 1995. Natuurvriendelijke oevers Noordzeekanaal; advies voor oeverdeelsysteem 2; zuid-oever km 8,0 – km 9,5.

Rijkswaterstaat, december 1998. Natuurvriendelijke oever Zuiderpolder, ontwerp schaal 1:1000. Deeluitwerking van de ideeënschets: 'Brak is de basis; kansen voor natuur en landschap in het NZK-gebied', nota ANW 98.09.

Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, juli 2001. Oeververdedigingen langs het Noordzeekanaal, Basis voor de instandhoudingsplannen, Beheerplan Nat.

Rijkswaterstaat, 2003. Afspraken boezembeheer Noordzeekanaal.

Rijkswaterstaat Informatiedienst Water Noord-Holland, september 2004. Plan van aanpak stroommeting NVO Spaarnwoude en Assendelft, projectnummer ANI 4347014.

Rijkswaterstaat Noord-Holland, oktober 2004. Stroommetingen in de natuurvriendelijke oevers Zuiderpolder en Spaarnwoude, werkdocument opgesteld door de heer A. Kikkert.

Rijkswaterstaat, 2004. Natuurvriendelijke oever Spaarnwoude: monitoring 2003.

Rijkswaterstaat RIZA, december 1993. Het Noordzeekanaal, beschrijving toestand en ontwikkelingen 1976-1991, Rijkswaterstaat RIZA/ Rijkswaterstaat Noord-Holland, Nota 93.017.

Schiereck, G.J., 2001. Bed, Bank and Shore protection.

Schutten, J., 2005. Biomechanical limitations on macrophytes in shallow lakes. Proefschrift Universiteit van Amsterdam.

Van Splunder, 1998. Natuurvriendelijke oever Spaarnwoude, monitoring 1997.

WL|delft hydraulics, april 1995. Handboek belastingen op waterbouwkundige constructies.

Weisner, S.E.B., J.A. Strand & H. Sandsten, 1997. Mechanisms regulating abundance of submerged vegetation in shallow eutrophic lakes. Oecologia 109: 592-599.

Witteveen + Bos en Aquaterra, februari 2005. Nulmeting visstand Amsterdam - Rijnkanaal en Noordzeekanaal, in opdracht van Rijkswaterstaat Utrecht en Rijkswaterstaat Noord-Holland, Nota ANW 05.01

Bijlage A

Resultaten van de metingen

Bijlage B

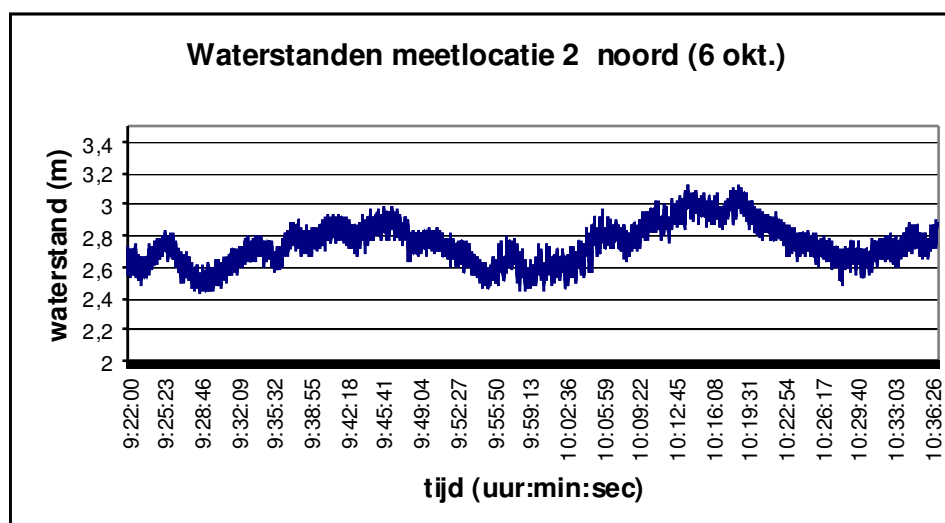
Achtergronden bij de analyse van de waterbewegingen

BIJLAGE B: ACHTERGRONDEN BIJ DE ANALYSE VAN DE WATERBEWEGING

Uit de waterstandsmetingen is te zien dat de waterbeweging complex is en wordt gekenmerkt door fluctuaties met sterk afwijkende frequenties. De verschillende fenomenen kunnen in de fluctuaties in waterstand en stroming worden herkend. Zo kunnen scheepspassages (fluctuaties van enkele minuten als gevolg van in en uitstroming in de lagune of sterke 'uitschieters' als gevolg van scheepsgolven) en windgolven (regelmatige snelle fluctuaties) duidelijk worden herkend. Verder is een laagfrequente schommeling in de waterstand te zien; dit treedt waarschijnlijk op als gevolg van schutten en spuien. Een dergelijke zweeping is overigens wel van belang voor het ledigen en vullen van de lagune. Verder zijn ook snellere schommelingen te zien (oscillaties binnen de lagunes). In onderstaande paragrafen worden de verschillende waargenomen waterbewegingen nader beschouwd.

B.1 Schommelingen van het kanaalpeil

Bij verschillende meetreeksen is een vrijwel voortdurende laagfrequente waterstandsfluctuatie te zien. Deze is bijvoorbeeld duidelijk te herkennen bij meetsessie 1 (meetlocatie 1 t/m 4) aan de noordoever. De periode van de golfbeweging is ongeveer een half uur met een bijbehorende golfhoogte van circa 0,05 m (zie Figuur B-1B-1).



Figuur B-1: Waargenomen waterstandsschommelingen in meetlocatie 2 aan de Noordoever tijdens de meting van 6 oktober 2004

Deze golfverschijnselen lijken voort te komen uit de operationele ingrepen in het waterbeheer. Zo wordt bij IJmuiden geschut, gespuid en/of gemaaid; bij Amsterdam (Schellingwoude) wordt geschut en zijn inlaatwerken aanwezig (voor doorspoeling Markermeer en Buiten IJ), waarmee water vanuit het Markermeer naar het Noordzeekanaal wordt ingelaten. Ook vindt wateruitwisseling met het Amsterdam-Rijn kanaal plaats.

Bekeken is of deze waargenomen schommelingen inderdaad kunnen worden verklaard uit de translatiegolven die als gevolg van operationele ingrepen in het waterbeheer door het Noordzeekanaal lopen. Hiertoe is zowel van een negatieve translatiegolf (a.g.v. het spuien bij IJmuiden) als van een positieve translatiegolf (schutten van de Noordersluis bij IJmuiden) de invloed op de waterstanden op het Noordzeekanaal nagegaan. Dit is hierna aangegeven.

Indien de hoogte van de translatiegolf (z) wordt verwaarloosd ten opzichte van de oorspronkelijke waterdiepte (h), geldt voor de voortplantingssnelheid (c) van de translatiegolf:

$$c = \sqrt{gh}$$

Het streefpeil op het Noordzeekanaal bedraagt NAP -0,40 m. Uitgaande van een bodempeil van NAP -15,9 m bedraagt de waterdiepte 15,5 m.

Voor de voortplantingssnelheid van de translatiegolf wordt hiermee gevonden: 12,3 m/s, oftewel 44,4 km/uur. Omdat de totale lengte van het Noordzeekanaal ruim 20 km bedraagt, planten de golven zich voort over het Noordzeekanaal in ongeveer een half uur, waarna terugkaatsing optreedt. De gemeten periode correspondeert hiermee.

Bij het ledigen van de schutkolk van de Noordersluis wordt in een korte tijd een groot debiet water in het stilstaande Noordzeekanaal gebracht. Hierdoor ontstaat een plotselinge plaatselijke verhoging van het kanaalpeil, een positieve translatiegolf. Voor de kanaalpeilverhoging geldt:

$$z = \frac{Q}{Bc}$$

met:

- z = de waterspiegelverhoging (m)
- Q = ledigingsdebiet (m^3/s)
- B = breedte van het kanaal (m) ≈ 270 m
- c = voortplantingssnelheid van de translatiegolf (m/s)

Het ledigingsdebiet (Q) van de Noordersluis is bepaald aan de hand de gemeten Q - h relatie (bron: Rijkswaterstaat, 2003) van de omloopriolen van de sluis. Het maximale ledigingsdebiet treedt op als het waterstandsverschil tussen het peil in de kolk en het Noordzeekanaal het grootst is, oftewel op het moment dat wordt gestart met het ledigen van de kolk. Het ledigingsdebiet is afgelezen bij een gemiddelde buitenwaterstand (en streefpeil op het NZ-kanaal) en bij een gemiddeld hoog buitenwater:

Bij een gemiddelde buitenwaterstand van NAP +0.02 m bedraagt het verval 0,42 m. Hierbij hoort een ledigingsdebiet van $115 \text{ m}^3/\text{s}$ per omloopriool. Met 2 omloopriolen wordt het totale ledigingsdebiet dus $230 \text{ m}^3/\text{s}$ voor de sluis. De waterspiegelverhoging die hierdoor optreedt, bedraagt (bij een kanaalbreedte van 275m) 0,07 m.

Bij een gemiddeld hoge buitenwaterstand van NAP +0.97 m wordt het verval 1,37 m. Hierbij hoort een ledigingsdebiet van ongeveer $200 \text{ m}^3/\text{s}$ per omloopriool. Met 2 omloopriolen wordt het totale ledigingsdebiet dus $400 \text{ m}^3/\text{s}$ voor de sluis. De waterspiegelverhoging die hierdoor optreedt, bedraagt (bij een kanaalbreedte van 275 m): 0,12 m.

Bij het spuien van water van het Noordzeekanaal naar de buitenhaven wordt in een korte tijd een groot debiet uit het stilstaande Noordzeekanaal onttrokken. Hierdoor ontstaat een plotselinge plaatselijke verlaging van het kanaalpeil: een negatieve translatiegolf. Voor de kanaalpeilverlaging geldt de hiervoor gebruikte formule ter bepaling van de waterstandverhoging.

Vrij snel na het begin van het spuien wordt een afvoerdebiet bereikt van 500 m³/s. Bij normaal bedrijf wordt maximaal 500 m³/s ingesteld, doorgaans zal dit lager zijn afhankelijk van de verwachte afvoer (bron: Rijkswaterstaat, 2003). Uitgaande van deze maximale spuicapaciteit, bedraagt de berekende waterspiegelverlaging 0,15 m.

Uit navraag bij de heer Ebbinge van Rijkswaterstaat Noord Holland, blijkt dat ten tijde van de meetcampagne niet onder natuurlijk verval werd gespuid, maar constant water is uitgepompt naar zee met een debiet van circa 100 m³/s. Omdat het constante wegpompen van het water op het Noordzeekanaal geen translatiegolf teweeg kan brengen, zal het schutten van schepen tijdens de metingen de waargenomen waterstandsschommelingen hebben veroorzaakt.

Voor de natuurvriendelijke oevers kan worden verwacht dat de schommelingen minder zullen zijn dan de hiervoor aangegeven waarden door uitdamping als gevolg van wrijving en de veranderingen in het dwarsprofiel. De gemeten waterstandsschommelingen bedragen circa 0,05 m. Deze kunnen aan de hand van het voorgaande volledig worden verklaard uit het schutten van de schepen ten tijde van de metingen.

B.2 Windgolven

De hoogte van de golven die worden opgewekt door de wind, wordt bepaald door factoren als de windsnelheid, waterdiepte en strijklengte.

De zuidoever is langgerekt en ligt in de richting van NW tot ZO. Bij noordwestelijke of zuidoostelijke richting zal dus een grote strijklengte optreden. Bij een wind uit andere richtingen zal de golfgroei beduidend kleiner zijn.

Golfgroei kan worden beschreven met behulp van de formule van Bretschneider (Schierreck, 2001):

$$H_s = 0,283 \frac{u_w^2}{g} p_1 \tanh \left(\frac{0,0125 F_x^{0,42}}{p_1} \right)$$

Hierbij geldt voor de verschillende parameters (F_x en p_1) de volgende relatie:

$$F_x = \frac{gF}{u_w^2}$$

$$p_1 = \tanh(0,53 * h_x^{0,75})$$

met:

u_w = windsnelheid op 10 meter hoogte (m/s)

h = waterdiepte (m)

F = strijklengte (m)

g = zwaartekrachtversnelling (9,81 m/s²)

h_x = waterdiepteparameter = $\frac{gh}{u_w^2}$ (-)

Bij de onderhavige studie is de tabel voor windgolfgroei uit CUR Manual 201 (CUR, 1999) gebruikt (tabel 1 op blz 33). Dit nomogram is gebaseerd op bovenstaande formules.

Met behulp van de langjarige gemiddelde windsnelheden over de periode 1971-2000 van het KNMI is berekend welke significante golfhoogtes kunnen worden verwacht bij wind uit noordwestelijke of uit zuidoostelijke richting.

De extreme gemiddelde windsnelheid die is gevonden uit de meetdata uit het verleden bij meetlocatie IJmuiden voor noordwestelijke wind is 20 m/s (Beaufort 8-9). De significante golfhoogte (H_s) die wordt gevonden bij een waterdiepte van 2 m en een strijklengte van 1000 m bedraagt: 0,45 m. De windsnelheid die 50% van de tijd wordt onder- dan wel overschreden bedraagt 5 m/s (Beaufort 3-4). De significante golfhoogte bedraagt bij deze windsnelheid 0,11 m.

Bedacht moet worden dat de werkelijke golfhoogten in de lagune van de zuidoever lager zal zijn 1) doordat de waterdiepte niet constant 2 m is, maar op de flanken van de lagune aanzienlijk minder, 2) doordat er verstoringende elementen (eilandjes) in de lagune aanwezig zijn, 3) door de beperkte breedte van de lagune golf diffractie zal optreden en 4) door de rietvelden langs de oevers extra demping zal optreden. Al met al zal de werkelijke windgolfhoogte aanzienlijk lager kunnen zijn dan de hier theoretisch voorspelde golfhoogte. Anderzijds zal er wél lokaal enige reflectie kunnen optreden nabij de oevers aan de lijszijde van de lagunes: deze is ook niet meegenomen. Op de demping door riet wordt in B.3 ingegaan.

De overheersende windrichting ter plaatse van de zuidoever is zuidwest. Ook ten tijde van de metingen (6 en 7 oktober 2004) kwam de wind uit deze richting. Beide dagen had de wind hierbij een kracht 4 tot 5 Beaufort. De zuidoever wordt vanuit die richting beschermd door bosrijk gebied en de verhoogde aardewal van de Rijksweg N202. De windgolven in de lagune van de zuidoever zullen ten tijde van de metingen dan ook klein zijn geweest, hooguit 1 decimeter.

Voor de noordoever geldt dat windgolven ook kunnen worden opgewekt op het Noordzeekanaal bij wind uit zuidwestelijke richting of in de lagune zelf (de grootste bij wind uit eveneens noordwestelijke of uit zuidoostelijke richting, overeenkomend met de grootste strijklengte). In het eerste geval staat de windrichting ongeveer loodrecht op de as van het Noordzeekanaal, waardoor de strijklengte gelijk is aan de breedte van het Noordzeekanaal (275 m). De golven dringen door de aanwezigheid van de relatief hoge stortsteen drempels in de openingen van de oever echter maar weinig in de lagune door (vergelijkbaar met de zuidoever). De maatgevende golven zullen dus ook bij de noordoever optreden bij sterke wind uit noordwestelijke of uit zuidoostelijke richting. De optredende golven zijn dan vergelijkbaar met die in de zuidoever. Bij de noordoever is echter sprake van minder rietbegroeiing dan bij de zuidoever, zodat er minder demping van de golfgroei is te verwachten.

Tijdens de metingen zal zich ook bij de noordoever weinig golfslag hebben kunnen ontwikkelen, gezien de korte strijklengte bij wind vanuit het zuidwesten, zodat de golfslag hier ook onder of rond de 0,1 m zal hebben gelegen.

B.3 Golfdemping door riet

Vooraf bij de zuidoever is sprake van een goed ontwikkelde rietbegroeiing langs de oevers. Dit bleek ook tijdens een bezoek aan de zuidoever in september 2005, zie Foto B-1. Ook ten tijde van de metingen, in oktober 2004, was deze vegetatie al in sterke mate aanwezig.



Foto B-1: Oostelijk eilandje met wilgen en rietkraag, zomer 2003 (bron: RWS, 2003)

Deze rietbegroeiing zal een aanzienlijke bijdrage aan de golfdemping in de lagune geven. Een en ander is hierna verder uitgewerkt.

De bovengrondse delen (stengels) van een rietvegetatie reduceren de golfbelasting als gevolg van golfdemping. Voor golfdemping zijn recente onderzoeksresultaten voorhanden. Laboratoriumproeven uitgevoerd door RIZA en het WL|Delft Hydraulics, samen met prototype onderzoek door Rijkswaterstaat, geresulteerd in de navolgende relatie voor de golfdemping (CUR, 1999):

$$\frac{H_t}{H_i} = 1 - p \{1 - \exp(-cB_{eff})\}$$

met:

H_i = inkomende golfhoogte (m)

H_t = golfhoogte achter de vegetatie (m)

$c = 0,001(N_{s,l})^{0,8} \text{ (m}^{-1}\text{)}$

$N_{s,l}$ = aantal levende stengels per m^2 ($-\text{/m}^2$)

B_{eff} = effectieve breedte van de vegetatie (m)

p = factor die de seizoensinvloed aangeeft (-)

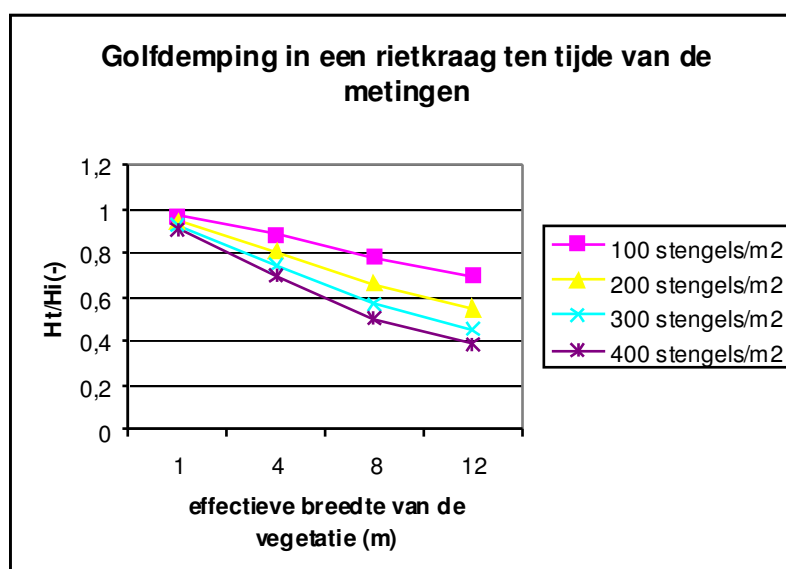
0,2 in eerste kwartaal

0,8 in tweede kwartaal

1,0 in derde kwartaal

0,6 in vierde kwartaal

Figuur B-2 laat ten tijde van de uitgevoerde metingen zien wat kan worden verwacht aan golfdemping door een rietkraag. Zo geeft een rietkraag met een effectieve breedte van 4m en een stengeldichtheid van 200 stengels/m² een demping van de golfhoogte van ongeveer 20%. Een rietkraag met een effectieve breedte van 8m en een maximale stengeldichtheid van 400 stengels/m² geeft een reductie in golfhoogte van circa 50%.



Figuur B-2: Golfdemping als functie van de effectieve breedte van de vegetatie voor verschillende stengeldichtheden begin oktober ($p \approx 0,8$)

De hoek van inval waarmee de golf de natuurvriendelijke oever binnendringt evenals de dichtheid van de zich gevestigde rietvegetatie, bepaalt uiteindelijk de mate van demping van de golven. De demping door de rietkragen langs de lange zijden zal dus nog groter zijn dan hier aangegeven, zodat de demping tenminste 20 % zal hebben bedragen.

B.4 Wateruitwisseling tussen de natte strook en het Noordzeekanaal

Zoals eerder aangegeven, treden vrijwel onafgebroken laagfrequente schommelingen in de waterstand op het Noordzeekanaal op als gevolg van schutten en/of spuien. Een dergelijke golfverschijnsel is van belang voor de wateruitwisseling tussen Noordzeekanaal en lagunes. Dit wordt hierna uitgewerkt.

In de lagunes zal stroming optreden als gevolg van de uitwisseling van de 'schijf' water tussen het Noordzeekanaal en de lagune bij waterspiegelverandering op het Noordzeekanaal. De bovengrens van de snelheid van deze stroming kan worden gevonden door er van uit te gaan dat de waterschijf van het Noordzeekanaal volledig met de lagune wordt uitgewisseld (bij hogere waterstand op het kanaal) en omgekeerd (bij lagere waterstand op het kanaal). Geschematiseerd, kan de stroomsnelheid vervolgens worden bepaald uitgaande van de golfbeweging met een periode van een half uur en een bijbehorende golfhoogte van circa 0,05 m (zie Figuur B-1B-1).

$$u_{\max} = \frac{\frac{z}{\Delta t} A_{ns}}{A_{uitstr}}$$

met:

$u_{\max}$ = maximale stroomsnelheid a.g.v. de wateruitwisseling in de inlaten (m/s)

z = grootte van de waterspiegelverandering op het Noordzeekanaal (m)

Δt = het tijdsinterval waarbinnen de verandering van de waterspiegel optreedt (s)

A_{ns} = oppervlakte van de 'natte strook' (m²)

A_{uitstr} = oppervlak van het totaal aan uitstroomopeningen aan de zuidoever (m²)

De waterspiegelverandering van 0,05 m vindt plaats binnen de tijd gelijk de helft van de golfperiode. Voor het tijdsinterval waarbinnen de verandering van de waterspiegel optreedt wordt derhalve een kwartier (900 s) aangehouden.

Aan de hand van ontwerptekeningen van de natuurvriendelijke zuidoever en een topografische kaart van het gebied is de oppervlakte van de 'natte strook' afgeschat.

Deze bedraagt grofweg 40.000 m², ofwel 4 ha.

De doorstroomopening van de V-vormige hoofdinlaat bedraagt circa 10 m² en de vijf doorlaten die gevormd worden door duikers met een inwendige diameter van 0,80 m hebben een gezamenlijk doorstroomoppervlak van 2,5 m². Het oppervlak van het totaal aan uitstroomopeningen aan de zuidoever bedraagt hiermee circa 12,5 m².

Invullen van voorgaande parameters in de formule levert een maximale stroomsnelheid in de openingen a.g.v. de wateruitwisseling tussen 'natte strook' en het Noordzeekanaal van 0,18 m/s. Doordat het water zich in werkelijkheid door de lagune zal verspreiden zullen de stroomsnelheden in de lagune een veelvoud lager zijn en deze kunnen derhalve worden verwaarloosd voor de vegetatie.

B.5 Orbitaalbeweging bij korte golven

Golfbewegingen zijn niet alleen aan het wateroppervlak aanwezig. Onder het wateroppervlak is een cyclische drukvariatie en waterbeweging aanwezig met eenzelfde golfperiode als de golf op het wateroppervlak. De druk- en snelheidsamplitude daarvan dempen bij korte golven, zoals windgolven en secundaire scheepsgolven, steeds verder uit met de afstand onder het wateroppervlak.

Gedurende de metingen zijn de stromingsmeters en drukdozen van de meetopstellingen op een hoogte van respectievelijk 0,2 m (in de openingen tussen de lagunes en het Noordzeekanaal en ondiepe locaties in de lagunes) en 0,5 m (ter plaatse van relatief diepe locaties in de lagunes) boven de bodem aangebracht. De gemeten snelheden en drukfluctuaties zijn dus kleiner dan de drukfluctuaties die plaatsvinden aan het wateroppervlak (en die de golfhoogte aangeven). Dit betekent dat de golfbeweging van windgolven e.d. door de meters wordt onderschat. Evenzo vindt een overschatting van de stroomsnelheid aan de bodem als gevolg van de orbitaalbeweging plaats indien wordt uitgegaan van de gemeten stroomsnelheid op enige afstand boven de bodem.

Hoe groot de onderschatting van de waterstandvariatie (dan wel de overschatting van de stroomsnelheid) precies is, is onder meer afhankelijk van de golfperiode, de meetlocatie boven de bodem en de verhouding tussen de golfhoogte en waterdiepte ter plaatse.

Het verloop als functie van de diepte is volgens de lineaire golftheorie als volgt (WL|Delft Hydraulics, 1995):

$$p_{\max} = \rho g(h - z) + p_0 \cosh\left(\frac{2\pi z}{L_p}\right)$$

en

$$u_{\max} = u_0 \cosh\left(\frac{2\pi z}{L_p}\right)$$

met:

$p_{\max}$ = druk onder een golftop (Pa)

ρ = volumieke massa van water (kg/m^3)

z = plaatshoogte ten opzichte van de bodem (m)

h = waterdiepte (m)

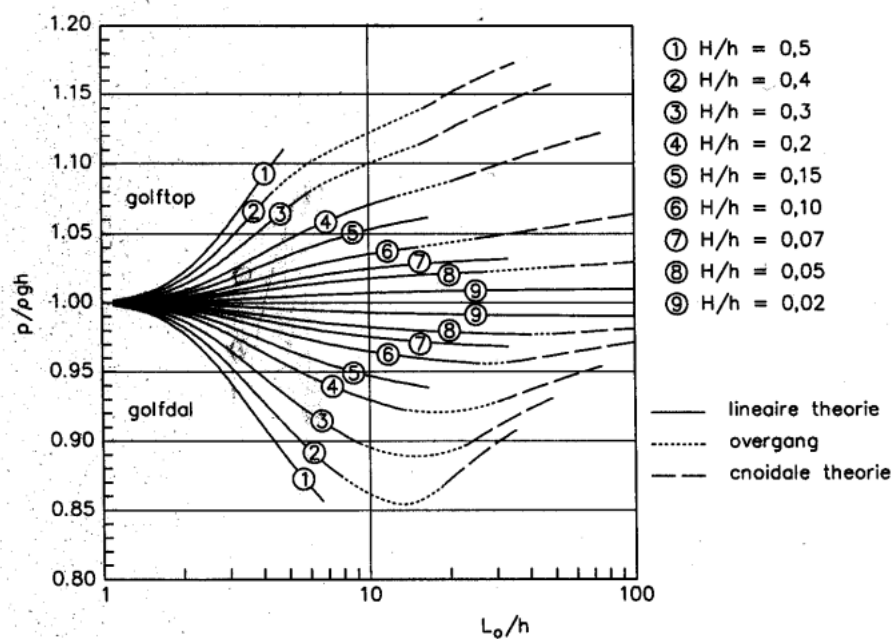
p_0 = drukamplitude onder een golf top bij de bodem (Pa)

$u_{\max}$ = horizontale snelheidscomponent onder een golf top (m/s)

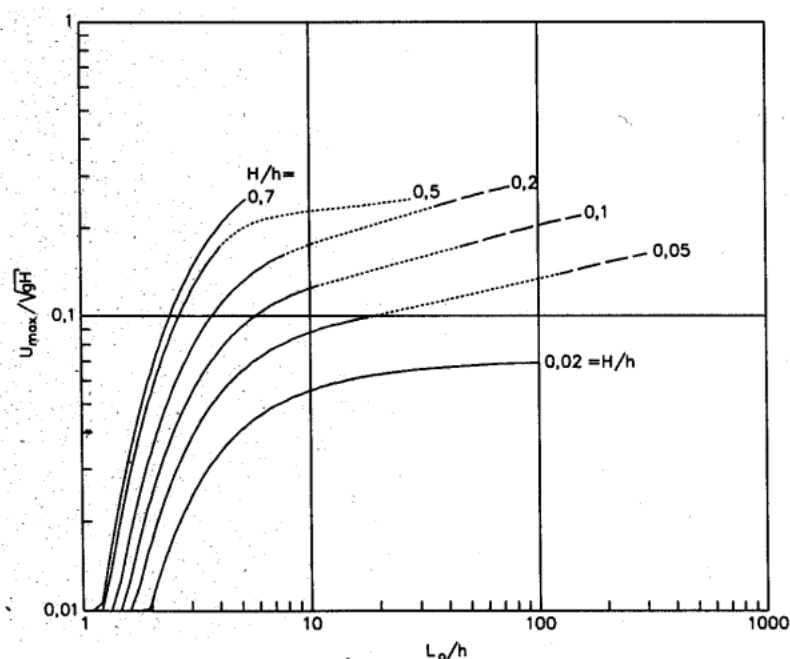
u_0 = horizontale snelheidscomponent onder een golf top bij de bodem (m/s)

L_p = golflengte behorende bij de piekperiode (m)

De druk bij de bodem onder een golf top en een golfdal kan worden bepaald met Figuur-3. De horizontale snelheid bij de bodem onder een golf top met Figuur B-4.

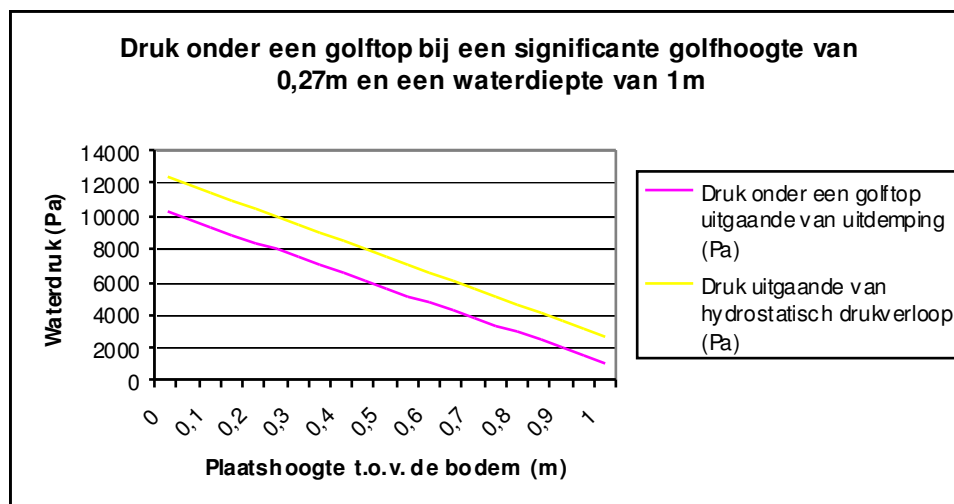


Figuur B-3: Maximale druk (onder een golftop) en minimale druk (onder een golfdal) bij de bodem ($z=0$)

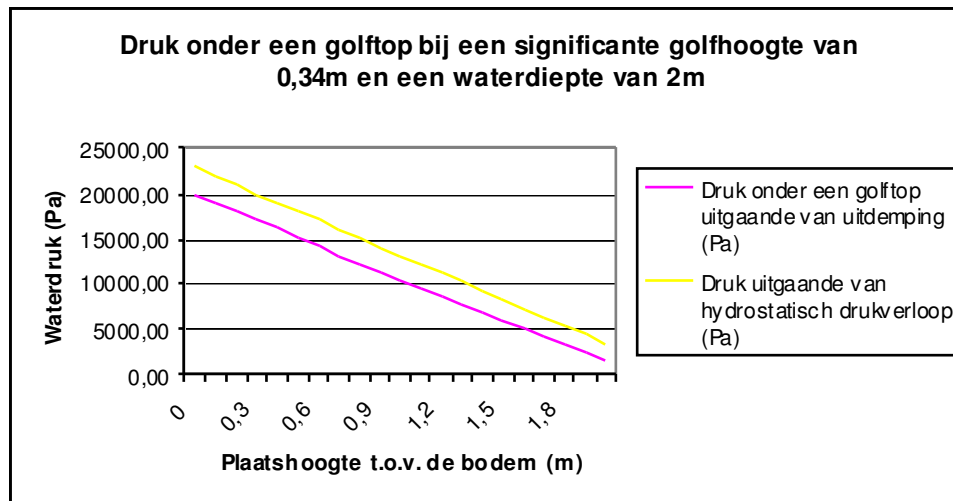


Figuur B-4: Maximale horizontale snelheid bij de bodem (onder een golftop)

Voor een windgolf met een strijklengte van 1000m en een continue windsnelheid van 15 m/s (7 Beaufort) is bij respectievelijk 1 en 2 m waterdiepte onderzocht hoe groot de onderschatting van de waterstandvariatie precies is. De resultaten hiervan staan weergegeven in Figuur B-5 en Figuur BB-6.



Figuur B-5: Onderschatting van de waterstandfluctuaties bij verschillende plaatshoogtes t.o.v. de bodem (inzichtelijk gemaakt aan de hand van het drukverloop onder een golftop) bij een waterdiepte van 1m

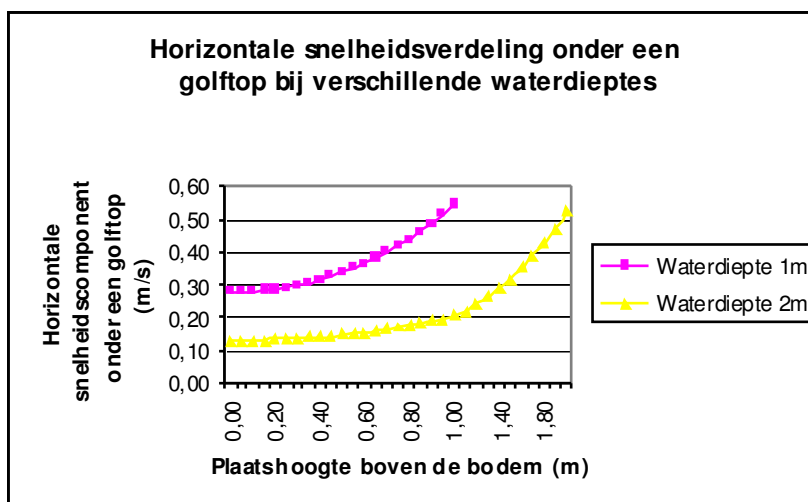


Figuur B-6: Onderschatting van de waterstandfluctuaties bij verschillende plaatshoogtes t.o.v. de bodem (inzichtelijk gemaakt aan de hand van het drukverloop onder een golftop) bij een waterdiepte van 2m

De volgende conclusies kunnen uit Figuur B-5 en Figuur BB-6 worden getrokken:

- naarmate de plaatshoogte van de meters t.o.v. de bodem toeneemt, wordt de golfhoogte beter voorspeld (het drukverschil neemt af). Dit komt overeen de verwachting dat de aanwezige cyclische drukvariatie uitdempt naarmate we dieper onder het wateroppervlak komen;
- bij een zekere plaatshoogte boven de bodem is de (absolute) afwijking groter bij een waterdiepte van 2 m dan van 1 m;
- het *relatieve* drukverschil (ten opzichte van de waterdiepte) is bij een zekere plaatshoogte boven de bodem groter bij een waterdiepte van 1 m dan van 2 m. Dit betekent dat (wanneer gemeten is op gelijke plaatshoogte boven de bodem) de procentuele onderschatting van de waterstandfluctuaties het grootst is bij kleine waterdieptes;
- de drukdozen zijn aangebracht op respectievelijk 0,2 en 0,5 m boven de bodem van de lagune van de natuurvriendelijke oever. Bij een plaatshoogte van 0,2 m t.o.v. de bodem bedraagt de onderschatting van de waterstandfluctuaties ongeveer 24 % bij een waterdiepte van 1 m en 16% bij een waterdiepte van 2 m. Bij een plaatshoogte van 0,5 m t.o.v. de bodem bedraagt deze ongeveer 34 % bij een waterdiepte van 1 m en 19% bij een waterdiepte van 2 m.

De maximale horizontale orbitaalsnelheid aan de bodem ($u_{0,max}$) wordt overschat indien deze gelijk wordt gesteld aan de gemeten snelheid door de stroomsensor. De stroomsensoren bevonden zich ten tijde van de metingen op gelijke hoogte van de drukdozen, dus op 0,2 of 0,5 m boven het aanwezige bodemniveau in de lagune. Voor een windgolf met een strijklengte van 1000 m en een windsnelheid van 15 m/s (7 Beaufort) is bij respectievelijk 1 en 2 m waterdiepte onderzocht hoe groot de overschatting van de stroomsnelheid is (voor resultaten zie Figuur B-7). Deze bedraagt bij een plaatshoogte van 0,2 m boven de bodem 3,4 % (0,29 i.p.v. 0,28 m/s) bij een waterdiepte van 1 m en 2,2 % (0,131 i.p.v. 0,128 m/s) bij een waterdiepte van 2 m. Bij een plaatshoogte van 0,5 m boven de bodem bedraagt de overschatting 22% (0,34 i.p.v. 0,28 m/s) bij een waterdiepte van 1 m en 13,8% (0,146 i.p.v. 0,128 m/s) bij een waterdiepte van 2 m.



Figuur B-8: Verdeling van de horizontale snelheidscomponent onder een golftop over de waterdiepte uitgaande van een windgolf met een strijklengte van 1 km bij een windsnelheid van 15 m/s

Het relatieve snelheidsverschil is bij een zekere plaatshoogte boven de bodem groter bij een waterdiepte van 1 m dan van 2 m. Dit betekent dat (wanneer gemeten is op gelijke plaatshoogte boven de bodem) de procentuele overschatting van de stroomsnelheden aan de bodem het grootst is bij kleine waterdieptes.

Bijlage C

Overzicht meetlocaties (uitklapvel)