

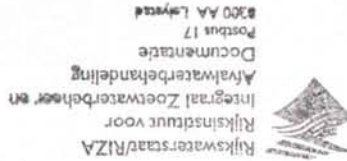
TNO-rapport / TNO report



Nederlandse Organisatie  
voor toegepast-  
natuurwetenschappelijk  
onderzoek / Netherlands  
Organisation for Applied  
Scientific Research

C 24792

c24792



Laan van Westenenk 501  
Postbus 342  
7300 AH Apeldoorn

www.mep.tno.nl

T 055 549 34 93

F 055 549 32 01

info@mep.tno.nl

**TNO-rapport**

**R 2004/051**

Waterzuivering door Driehoeksmosselen  
(*Dreissena polymorpha*) in het  
Volkerak-Zoommeer: De inzet van een  
mosselfilter in de Steenbergse Vliet

|               |   |
|---------------|---|
| Datum         | 4 februari 2004   |
| Auteurs       | A. Weber<br>M.G.D. Smit   |
| Projectnummer | 32161.02  |
| Trefwoorden   | Mosselfilter<br>Driehoeksmosselen<br>Nutriënten<br>Blauwalgen<br>Volkerak-Zoommeer<br>Biologische zuivering<br>Ecotechnologie |
| Bestemd voor  | Rijkswaterstaat directie Zeeland<br>W.J. de Vos<br>Postbus 5041<br>4330 KA Middelburg   |

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van TNO.

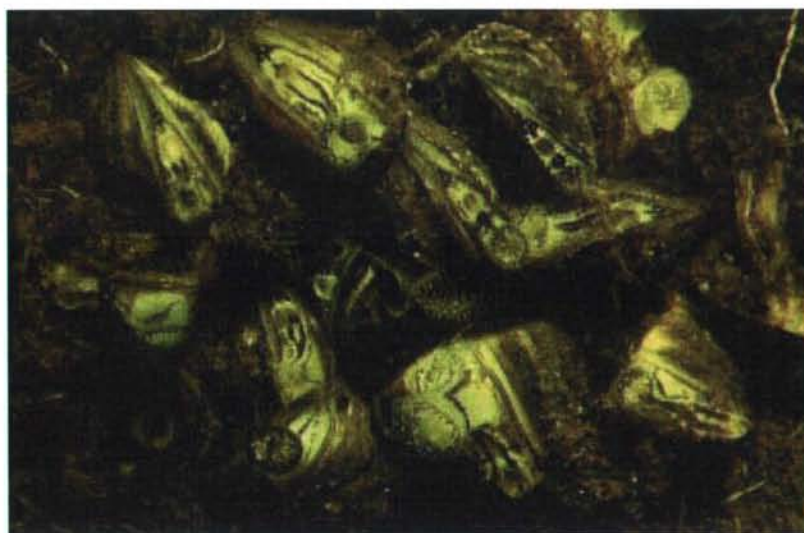
Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst. Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

## Voorwoord

Sinds 1994 is er sprake van grote eutrofiëringsproblemen in het Volkerak-Zoommeer. Deze problemen doen zich met name voor in de zomer en het najaar wanneer er dikke drijflagen van blauwalgen aanwezig zijn. De waterbeheerder van het Volkerak-Zoommeer, Rijkswaterstaat directie Zeeland, probeert met diverse maatregelen de eutrofiëringsproblemen terug te dringen. Hierbij worden zowel biologische methoden (bijv. rietaanplant) als technische methoden (bijv. doorspoeling) beschouwd. Het in deze rapportage beschreven project richt zich op de inzet van Driehoeksmosselen voor waterzuivering als één van de biologische maatregelen die een positief effect zouden kunnen hebben op de waterkwaliteit. Centraal in dit project staat de vraag of de filterende werking van Driehoeksmosselen kan bijdragen aan het verbeteren van de waterkwaliteit, doordat algen en deeltjesgebonden nutriënten uit het water gefilterd worden.

Gedurende drie jaar hebben TNO-MEP en Bureau Waardenburg samengewerkt aan een onderzoek naar het effect van het inzetten van Driehoeksmosselen ter verbetering van de waterkwaliteit in het Volkerak-Zoommeer. Rijkswaterstaat directie Zeeland heeft hierbij samen met experts van Rijkswaterstaat en het Hoogheemraadschap van West Brabant een begeleidende rol gespeeld. Het onderzoek sluit aan bij het project 'Helder Water'. Dit project is in 1999 door TNO-MEP gestart en betreft een onderzoek naar (i) de relatie tussen de helderheid en de samenstelling van water, (ii) de daaraan gerelateerde beleving door het publiek en (iii) de inzet van ecotechnologische oplossingen ter verbetering van de helderheid (Smit & Vink, 2000; Smit & Foekema, 2000; Blankendaal & Smit, 2003; Smit *et al.*, 2003).

Het bovengenoemde onderzoek richtte zich op een tweetal deelonderzoeken. Het deelonderzoek van TNO-MEP richtte zich op het effect van de installatie van Driehoeksmosselfilters in de monding van de Steenbergse Vliet op de belasting van het Volkerak-Zoommeer. Het deelonderzoek van Bureau Waardenburg richtte zich op de vraag of de ontwikkeling van Driehoeksmosselen door het storten van natuurlijk substraat kan worden bevorderd en zo ja, wat de gevolgen daarvan zijn voor de waterkwaliteit. De voorliggende rapportage bevat de resultaten van het door TNO-MEP uitgevoerde onderzoek. De resultaten van het door Bureau Waardenburg uitgevoerde onderzoek zijn beschreven in het Bureau Waardenburg rapport: 'Waterzuivering door Driehoeksmosselen (*Dreissena polymorpha*) in het Volkerak-Zoommeer: Het stimuleren van de ontwikkeling van Driehoeksmosselen door het storten van natuurlijk substraat' (Bak *et al.*, 2004).



*Foto 1 Filtrendere Driehoeksmosselen (Foto: Bureau Waardenburg BV).*

## Samenvatting

Driehoeksmosselen (*Dreissena polymorpha*) filteren gesuspendeerde deeltjes uit het water. De onverteerbare deeltjes worden verwerkt tot feces die worden uitgestoten om vervolgens te bezinken. Bij ongeschikt voedsel worden pseudo-feces geproduceerd die evenals de feces bezinken. Op deze manier zorgen Driehoeksmosselen voor een netto verwijdering van deeltjes uit de waterkolom. Hoewel onderzoek naar de rol van de Driehoeksmossel in het waterkwaliteitsbeheer nog altijd in volle gang is, zijn er tot op heden geen mogelijkheden onderzocht om Driehoeksmosselen in te zetten in een technisch waterfilter ter bestrijding van eutrofiëring in het Volkerak-Zoommeer. Door een dergelijk filter te installeren in de riviertjes die water toevoeren naar het Volkerak-Zoommeer zou de belasting met nutriënten van dit systeem gereduceerd kunnen worden. Om de mogelijkheden hiertoe te onderzoeken en om het effect van een dergelijk filter op de waterkwaliteit te bepalen is door TNO een driejarig onderzoeksprogramma uitgevoerd.

Om de onderzoeksvragen: (i) kan een technisch functionerend mosselfilter gerealiseerd worden? en (ii) kan dit filter ingezet worden om de eutrofiëringsproblematiek in het Volkerak-Zoommeer te verminderen? te beantwoorden zijn een drietal activiteiten uitgevoerd, te weten:

- Het bepalen van een geschikte locatie om een proeffilter experimenteel in het veld te testen middels een systeemanalyse (2001).
- Het ontwerpen van een prototype mosselfilter en het testen van dit filter op de geselecteerde locatie (2002).
- Het optimaliseren van het prototype mosselfilter alsmede het testen van het aangepaste mosselfilter (2003).

### **Systeemanalyse (2001)**

Op basis van een uitgebreide inventarisatie van biologische, chemische en fysische parameters op vier potentieel geschikte proeflocaties is gebleken dat zowel het water van de Steenbergse Vliet, als het water van de Mark/Dintel in principe geschikt zijn voor het installeren van een Driehoeksmosselfilter. Echter de omstandigheden voor groei van Driehoeksmosselen in de Steenbergse Vliet zijn beter dan in de Mark/ Dintel. Daarnaast blijkt dat de concentratie gebonden nutriënten in de Steenbergse Vliet per liter hoger is dan in de Mark/Dintel. Per liter kan derhalve meer gezuiverd worden. Ook gezien de geringere kans op verstoring van het experiment is de locatie in de monding van Steenbergse Vliet aangewezen als proeflocatie voor de experimenten.

Teneinde een goed ontwerp voor het uiteindelijke prototype mosselfilter te verkrijgen zijn experimentele systemen in verschillende uitvoeringen ontwikkeld en getest. Niet alleen de wijze waarop de mosselen in het filter zijn ondergebracht bepaalt de filterende werking, maar ook de keuze voor het substraat waarop de mosselen hechten is belangrijk. Ook belangrijk is de aanwezigheid van voldoende voedsel en voldoende zuurstof in het filter.



## Proeffilter in het veld (2002)

Het uiteindelijk ontwikkelde proeffilter bestond uit een drijvende bak verdeeld in een drietal compartimenten. Elk van deze drie compartimenten bestond uit een instroomdeel, een uitstroomdeel en een deel voor mosselen. Twee van deze compartimenten zijn daadwerkelijk gevuld met mosselen en substraat. Met deze opstelling is een experiment uitgevoerd gericht op het vaststellen van (i) de filtratiecapaciteit van mosselen in een technisch filter en (ii) het effect van dit filter op de nutriënten belasting van het Volkerak.

Hoewel er tijdens doorstroming van het filter gemiddeld een reductie van deeltjes over het filter plaatsvindt, was een eenduidig beeld van de filtratiecapaciteit van de mosselen in het filter niet uit de resultaten van de doorstroomexperimenten af te leiden. Echter op basis van afsluitexperimenten en vergelijkbare kleinschalige labexperimenten is voor de mosselen in het filter gedurende de experimentele periode een gemiddelde filtratiecapaciteit van  $35 \pm 12$  liter per uur per kg mosselen bepaald. Deze waterhoeveelheid wordt geheel ontdaan van het zwevend materiaal.

Drie keer is feces en slib uit het filter verzameld. De hoeveelheid feces en slib is gekwantificeerd en de gehalten aan fosfaat en stikstof zijn bepaald. De resultaten geven inzicht in de hoeveelheid nutriënten die worden vastgelegd in het slib. Verder zijn de mosselen uit het filter geanalyseerd op de accumulatie van metalen en PAKs. Hieruit is gebleken dat vooral nikkel, koper en cadmium zich in het mosselweefsel ophopen.

Middels de bekende filtratiecapaciteit is bepaald hoeveel deeltjes (en deeltjes gebonden nutriënten) er door een hoeveelheid mosselen uit de waterkolom verwijderd kan worden. Voor P en N zijn deze hoeveelheden, tijdens het experiment van 2002, respectievelijk 84 mg en 806 mg per kg mosselen per dag. Uit analyses van het opgevangen slib is gebleken dat de hoeveelheid P en N die met deze opstelling met het slib is opgevangen, respectievelijk 23% (17%-35%) en 7% (5%-11%) is van de totaal aangevoerde hoeveelheid. Voor een optimale verwijdering van nutriënten zal het echter van belang zijn om efficiënter het geproduceerde slib af te vangen en te verwijderen. Dit is immers de enige manier om daadwerkelijk een reductie teweeg te brengen.



### Geoptimaliseerd proeffilter (2003)

Voor het tweede experiment is een nieuw experimenteel systeem ontworpen gericht op verwijdering van nutriënten uit het water door mosselfiltratie, waarbij het geproduceerde slib automatisch en effectief wordt gewonnen. Met deze vernieuwde opstelling is in 2003 een verhoogde opbrengst van slib behaald. Wederom is de filtratiecapaciteit gebruikt om de hoeveelheid deeltjesgebonden nutriënten, die door een hoeveelheid mosselen uit de waterkolom verwijderd wordt, te bepalen. Voor P en N waren deze hoeveelheden in 2003 respectievelijk 34 mg en 396 mg per kg mosselen per dag. Door de lagere concentratie van gebonden nutriënten in 2003 is deze hoeveelheid lager dan de hoeveelheid bepaald in het experiment van 2002. Van de hoeveelheid P en N die door mosselfiltratie uit het water is verwijderd is echter met de huidige opstelling respectievelijk 39% (28-58%) en 12% (9-18%) met het slib afgevoerd. Dit is een verbetering met de opstelling van 2002.

Wanneer de gemiddelde voorjaarsconcentraties van gebonden N en gebonden P in de Steenbergse Vliet over de jaren 1995-2001 worden beschouwd, zal bij een filtratiecapaciteit van 35 liter per uur per kg mosselen 1800 mg N en 22 mg P per dag per ingezette kg mosselen uit het water worden gefilterd. Voor de zomerperiode zijn deze hoeveelheden gemiddeld 1700 mg N en 18 mg P. Van deze gefilterde hoeveelheden zal een deel door de mossel worden vastgelegd in mosselweefsel, een deel zal in opgeloste vorm worden uitgescheiden en een deel zal via de feces in het slib terechtkomen. De hoeveelheden die in het slib terechtkomen bedragen in de voorjaarsperiode voor de Steenbergse Vliet gemiddeld 210 mg N en 9 mg P per dag per ingezette kg mosselen. Voor de zomerperiode is dit gemiddeld 200 mg N en 11 mg P. Hoewel zowel N als P in het slib wordt aangetroffen wordt er ten opzichte van de hoeveelheid die wordt gefilterd veel meer P met het slib verwijderd dan N.

Wanneer een reductie van de eutrofiëringsproblemen wordt nagestreefd, zal het reduceren van de hoeveelheid P die het Volkerak in stroomt het meest effectief zijn. De problemen met overmatige algengroei doen zich met name in de zomer bij hoge temperaturen voor. Wanneer een mosselfilter wordt ingezet om de P vracht te reduceren, moet deze dus vooral de hoeveelheid die in het voorjaar en in de zomer door de Steenbergse Vliet wordt aangevoerd verminderen. Voor het uit de waterkolom filtreren van 10% van de hoeveelheid P die dagelijks in het voorjaar door de Steenbergse Vliet wordt aangevoerd, 21700 kg mosselen benodigd. Voor een reductie van 1% en 5% zijn deze hoeveelheden respectievelijk 2200 kg en 10820 kg. In de zomer liggen deze hoeveelheden lager (1900 kg, 9500 kg en 19000kg voor respectievelijk 1%, 5% en 10% reductie). Deze hoeveelheden nutriënten zullen echter niet geheel uit het watersysteem verwijderd worden. Alleen het deel wat in het slib terechtkomt kan daadwerkelijk verwijderd worden, hetgeen leidt tot een werkelijke reductie van de nutriëntenvracht. Voor een

verwijdering (door verwijdering van het slib) van 10% van de hoeveelheid P die dagelijks door de Steenbergse Vliet in het voorjaar wordt aangevoerd, is ongeveer 55200 kg mosselen benodigd. Voor een reductie van 1 en 5% zijn deze hoeveelheden respectievelijk 5500 kg en 27600 kg. In de zomer liggen deze hoeveelheden iets lager (4900 kg, 24500 kg en 49000 kg voor respectievelijk 1%, 5% en 10% verwijdering).

## Conclusies

Wanneer er wordt gekozen voor één grote filterunit met grote hoeveelheden Driehoeksmosselen op één locatie zijn de risico's die de filterwerking bedreigen hoger dan wanneer voor verschillende kleinere units wordt gekozen. Problemen die kunnen optreden zijn voedselschaarse, zuurstoftekort en verminderde filtratie door hoge ammoniumproductie. Aangezien scheepvaart in de Steenbergse Vliet ook mogelijk moet blijven en men dus is aangewezen op een partieel filter, heeft een combinatie van enkele kleinere filterunits dan ook sterk de voorkeur boven één groot filter. Bovendien kunnen de verschillende benodigde kleinere filters gefaseerd geïnstalleerd worden. Wanneer streefwaarden voor de nutriënten belasting van het Volkerak via de Steenbergse Vliet worden vastgesteld, kan samen met een inventarisatie van de voor mossel filters beschikbare locaties in de Steenbergse Vliet een gespecificeerd reductie- en inrichtingsplan worden opgesteld. Om de invloed van enkele achterelkaar geschakelde filterunits op de nutriëntenvrucht en -concentratie naar het Volkerak te bepalen, zijn enkele scenarioberekeningen uitgevoerd.

Ondanks de hoge filtratiecapaciteit van de Driehoeksmosselen en de reductie van N en P in de Steenbergse Vliet door het opvangen van geproduceerd slib, bestaan er nog verschillende factoren die het succes bepalen van het inzetten van mosselen voor de reductie van de nutriënten naar het Volkerak. Ten eerste kunnen mosselen door filtratie alleen de hoeveelheid gebonden N en P reduceren. De opgeloste hoeveelheid kan zelfs toenemen (door uitscheiding van ammonium), waardoor de beschikbare nutriënten voor algen toenemen. Daarnaast zullen, om een substantiële reductie van nutriënten in de Steenbergse Vliet te bewerkstelligen, grote hoeveelheden mosselen moeten worden ingezet (55200 kg mosselen voor verwijdering van 10% van het totale dagelijks in het voorjaar door de Vliet toegevoerde gebonden P uit het systeem). Dit komt enerzijds doordat de mosselen alleen de gebonden fracties N en P afvangen en anderzijds door grote watermassa die dagelijks door de Steenbergse Vliet wordt aangevoerd. Omdat grote hoeveelheden mosselen benodigd zijn voor een substantiële reductie van de hoeveelheden P en N, zal ook de hoeveelheid geproduceerd slib aanzienlijk zijn (meer dan 400 kg droog stof per dag bij verwijdering van 10% van het totale dagelijks in het voorjaar door de Vliet toegevoerde gebonden P). Het is van belang dat dit slib van goede kwaliteit is, waardoor hergebruik als bijvoorbeeld meststof of als bouwstof mogelijk is.

Gezien de ervaringen in de Steenbergse Vliet kan het inzetten van een mossel filter bij de verwijdering van gebonden nutriënten uit de waterstroom als succesvol worden beschouwd. Eén van de grote voordelen van filtratie met mosselen is dat het nauwelijks energie kost, terwijl toch een groot deel van de watermassa wordt gefilterd. Zeker wanneer gebruik kan worden gemaakt van een natuurlijk aanwezige Driehoeksmosselpopulatie. Echter, gezien de grote watermassa en de

periodiek hoge concentraties opgeloste nutriënten die door de Steenbergse Vliet en de andere rivieren wordt aangevoerd zullen grote hoeveelheden mosselen ingezet moeten worden om een substantiële bijdrage te leveren aan de reductie van de belasting van het Volkerak met nutriënten. Een mosselfilter alléén is niet het antwoord op de eutrofiëringsproblematiek in het Volkerak. In combinatie met andere maatregelen, die enerzijds de hoeveelheid algen in het Volkerak verminderen (bijv. bevordering van mossel- en zooplanktonpopulaties) of anderzijds de hoeveelheid beschikbare opgeloste nutriënten reduceren (bijv. stimulering van waterplanten), kan het worden ingezet om een bijdrage te leveren aan de oplossing van het probleem.

## Inhoud

|   | pagina |
|---|--------|
| Voorwoord.....  | 3      |
| Samenvatting.....   | 5      |
| Systeemanalyse (2001).....  | 7      |
| Proeffilter in het veld (2002).....                                     | 9      |
| Geoptimaliseerd proeffilter (2003).....                                 | 11     |
| Conclusies .....  | 13     |
| 1. Inleiding.....   | 17     |
| 1.1 Aanleiding onderzoek.....   | 17     |
| 1.2 Waarom Driehoeksmosselen? .....                                     | 18     |
| 1.3 Doel en opzet van het experiment .....                              | 19     |
| 1.4 Leeswijzer.....   | 20     |
| 2. Driehoeksmosselen, systeemanalyse en locatiekeuze.....               | 23     |
| 2.1 Inleiding.....  | 23     |
| 2.2 Systemeisen en ecosysteeminteracties van de<br>Driehoeksmossel..... | 23     |
| 2.3 Systeemanalyse van de vier locaties.....                            | 26     |
| 2.4 Locatiekeuze.....   | 33     |
| 3. Inrichting van een mosselfilter voor Driehoeksmosselen .....         | 35     |
| 3.1 Inleiding en doel .....   | 35     |
| 3.2 Randvoorwaarden.....  | 35     |
| 3.3 Inrichting van het filter.....                                      | 36     |
| 3.4 Eindontwerp van het experimentele filter.....                       | 39     |
| 4. Experimentele toetsing in het veld (2002) .....                      | 41     |
| 4.1 Inleiding en doel .....   | 41     |
| 4.2 Meetprotocol, analyses en meetschema.....                           | 44     |
| 4.3 Resultaten van het veldexperiment (2002) .....                      | 45     |
| 4.4 Analyse en discussie.....   | 58     |
| 4.5 Verwijdering van nutriënten .....                                   | 68     |
| 4.6 Conclusies en aanbevelingen.....                                    | 70     |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 5.  | Filteroptimalisering, automatisering en experimentele toetsing (2003).....          | 73  |
| 5.1 | Inleiding.....  | 73  |
| 5.2 | Constructie en installatie.....   | 73  |
| 5.3 | Bemonstering, meetprotocol en analyses.....   | 77  |
| 5.4 | Resultaten .....  | 78  |
| 5.5 | Analyse en discussie .....  | 81  |
| 5.6 | Verwijdering van nutriënten .....   | 82  |
| 5.7 | Conclusies.....   | 84  |
| 6.  | Nutriëntenverwijdering middels een mosselfilter .....                               | 85  |
| 6.1 | Aanvoer van nutriënten in de Steenbergse Vliet .....                                | 85  |
| 6.2 | Verwijdering van nutriënten door mosselen.....                                      | 85  |
| 6.3 | Scenario's voor nutriëntenverwijdering uit de Steenbergse Vliet.....                | 87  |
| 7.  | Discussie en conclusies .....   | 93  |
| 8.  | Literatuurlijst.....  | 97  |
| 9.  | Dankwoord.....  | 101 |
| 10. | Verantwoording .....  | 103 |
|     | Bijlage 1 Resultaten van de systeemanalyse .....                                    | 105 |
|     | Bijlage 2 Resultaten van nutriëntenanalyses tijdens het veldexperiment in 2002..... | 113 |
|     | Bijlage 3 Overzicht van filtratiecapaciteiten .....                                 | 117 |

## 1. Inleiding

### 1.1 Aanleiding onderzoek

Blauwalgen vormen sinds 1994 met name in de zomer en het najaar, een toenemend probleem in het Volkerak-Zoommeer. Naast de hinderlijke aanwezigheid van dikke drijflagen (Foto 2) kunnen bij het afsterven van deze blauwalgen giftige stoffen vrijkomen (zoals microcystines). Deze stoffen kunnen sterfte veroorzaken onder dieren die in of nabij het water leven, zoals vissen, vogels en zoogdieren. In de nazomer van 2002 werd bijvoorbeeld massale sterfte onder eenden, ganzen, zwanen en aalscholvers waargenomen in het Volkerak-Zoommeer. “Aangezien microcystines werden aangetroffen in de lever van enkele onderzochte eenden is het niet onwaarschijnlijk dat deze sterfte veroorzaakt is door het vrijkomen van giftige stoffen uit de blauwalgen” (artikel Provinciale Zeeuwse Courant 8 oktober 2002). Mensen die in aanraking komen met deze giftige stoffen kunnen huidirritatie of maag- en darmklachten krijgen. Om deze reden is het sinds 1994 reeds diverse malen afgeraden te zwemmen in het Volkerak-Zoommeer.



Foto 2 *Blauwalgendrijflagen in de haven van Ooltgensplaat in september 2000  
(Foto: Bureau Waardenburg BV).*

Om de eutrofiëringsverschijnselen tegen te gaan onderzoekt de waterbeheerder van het Volkerak-Zoommeer, Rijkswaterstaat directie Zeeland, op kleine schaal maatregelen die deze verschijnselen wellicht terug kunnen dringen. Voorbeelden van deze maatregelen zijn rietaanplant ter verwijdering van extra nutriënten en

doorstroom experimenten om versneld het water in het Volkerak-Zoommeer te vervensen. Een andere, nog beperkt onderzochte mogelijkheid om eutrofiering tegen te gaan is het inzetten van Driehoeksmosselen.

## 1.2 Waarom Driehoeksmosselen?

In de Nederlandse oppervlaktewateren komen verschillende soorten zoetwatermosselen voor. De Driehoeksmossel (*Dreissena polymorpha*) is de mosselsoort die in de hoogste aantallen voorkomt. Deze mosselen filteren organische en anorganische gesuspendeerde deeltjes uit het water. Het zijn “filter-feeders”. Ze eten vooral bacteriën, blauwgroene algen en zeer kleine detritus deeltjes. De verteerbare fractie wordt opgenomen. De onverteerbare deeltjes worden verwerkt tot feces die worden uitgestoten om vervolgens te bezinken. Bij een ongeschikt voedsel worden pseudo-feces geproduceerd (zie box 1) die evenals de feces bezinken. Op deze manier zorgen de Driehoeksmosselen voor een netto verwijdering van gesuspendeerde deeltjes uit waterkolom. De driehoeksmosselen prefereren deeltjes tussen de 15 en 40 µm. Deeltjes kleiner dan 5 µm worden wel gefilterd maar de opname efficiëntie van deze deeltjes ligt een stuk lager (Gossiaux *et al.*, 1998). Deeltjes groter dan 750 µm worden niet opgenomen. De voedselopname gebeurt selectief (Bastvinken *et al.*, 1998).

### Box 1

**Wat zijn pseudo-feces?** Dit is een term voor de niet-eetbare deeltjesfractie. Deze worden met behulp van de cilia (van de ‘labial palps’) uitgesorteerd en in slijm ingepakt. Vervolgens wordt het pakje door snel sluiten van de schelp door de inademsifon uitgestoten. In pseudo-feces is de fractie van deeltjes <10µm geconcentreerd (82% <10µm). Daardoor is de samenstelling van pseudo-feces anders dan die van gewone feces (71% <10µm). De pseudo-feces productie stijgt bij stijgende concentraties zwevend stof gehaltes.

De verwijdering van gesuspendeerde deeltjes door de mosselen zorgt ervoor dat het licht een grotere diepte kan bereiken waardoor de macrofyten een grotere kans krijgen om zich te ontwikkelen. De Driehoeksmosselen zorgen voor een verhoging van de concentratie organisch materiaal in het sediment, hetgeen gunstige omstandigheden schept voor muggenlarven en gammariden (Bruner *et al.*, 1994). Grote hoeveelheden mosselen kunnen door hun filterende vermogen een aanzienlijke bijdrage leveren aan de helderheid van het water. In de Nederlandse meren lijkt de hoeveelheid geschikt substraat een beperkende factor te zijn voor de ontwikkeling van grote concentraties mosselen (Blankendaal & Smit, 2003). Door de korte levenscyclus en het grote voortplantingsvermogen van de mosselen, kan, bij voldoende substraat, het toepassen van mosselen al in het eerste jaar resultaat opleveren.



In het verleden zijn vele onderzoeken uitgevoerd naar de rol van Driehoeksmosselen in het watersysteem. Een aantal van deze onderzoeken richtten zich op het gebruik van de Driehoeksmossel in het biologisch beheer. Enkele locaties die hierbij zijn onderzocht, zijn: het Wolderwijd (Noordhuis *et al.*, 1994), het Veluwemeer (Noordhuis *et al.*, 1994), de Roggebotssluis (Reeders *et al.*, 1993), het Volkerak-Zoommeer (Reeders, 1989a; Reeders, 1989b; Reeders 1990), de Hudson Rivier (Bastviken *et al.*, 1998) en Lake Erie (Stuckey & Moore, 1995; Nalepa & Schloesser, 1993; Dobson & Mackie 1998) (Zie Blankendaal & Smit, 2003 voor een overzicht). Van nature komen Driehoeksmosselen ongeveer sinds 1990 in het Volkerak-Zoommeer voor; een aantal jaren nadat het Volkerak-Zoommeer door de aanleg van de Philipsdam en de Oesterdam in 1987 afgesloten werd van de Oosterschelde.

Het eutrofiëringsprobleem in het Volkerak-Zoommeer, wat met name tot uiting komt in de grote concentraties blauwalgen (behorend tot de Cyanobacteriën), wordt veroorzaakt door onbalans in het biologische systeem. Een overschot aan nutriënten komt middels beken en rivieren in het systeem. Vooral wanneer door langdurige hitte en veel zon de algen explosief groeien is de hoeveelheid natuurlijke grazers ('filter-feeders' zoals zooplankton) te gering om de hoeveelheid algen te kunnen reduceren. Bij oververzadiging van het water kunnen drijfslagen ontstaan waarna de algen afsterven. Hierbij komen giftige microcystines vrij.

In dit onderzoek is gekeken naar de mogelijkheden om de zoetwatermossel *Dreissena polymorpha* gericht in te zetten in het verbeteren van de waterkwaliteit in het systeem van het Volkerak-Zoommeer. De mossel kan fungeren als macrobiologisch zoetwaterfilter met een direct effect op de algenconcentratie, doordat gesuspendeerde deeltjes (algen) uit het water gefilterd worden. Daarnaast kan het filter een indirect effect hebben op de verlaging van de eutrofiëring wanneer de relatief hoge concentratie deeltjesgebonden nutriënten in de waterkolom verlaagd wordt.

### 1.3 Doel en opzet van het experiment

Hoewel onderzoek naar de rol van de Driehoeksmossel in het waterkwaliteitsbeheer nog altijd in volle gang is, zijn er tot op heden geen mogelijkheden onderzocht om Driehoeksmosselen ter bestrijding van eutrofiëring in het Volkerak-Zoommeer in te zetten in een technisch waterfilter. In een dergelijk filter zouden Driehoeksmosselen, geconcentreerd, beschermd tegen predatie en gegarandeerd van continue aanvoer van deeltjes rijk water, hun zuiverende werking kunnen uitvoeren. Door dergelijke filters te installeren in de riviertjes die water toevoeren naar het Volkerak-Zoommeer zou de belasting met nutriënten van dit systeem gereduceerd kunnen worden. Om de mogelijkheden hiertoe te onderzoeken en om het effect van een dergelijk filter op de waterkwaliteit te bepalen is door TNO een drie jarig onderzoeksprogramma opgezet.

Het programma richtte zich aanvankelijk op de inrichting en ontwerp van een dergelijk filter. Mosselen zullen alleen optimaal filteren wanneer minimaal aan de randvoorwaarden van het natuurlijk voorkomen van Driehoeksmosselen wordt voldaan. Het afstemmen van de eisen die aan het filter gesteld werden op de behoeftes van de Driehoeksmosselen was derhalve van belang. Het ontworpen filter is getest op een speciaal geselecteerde locatie. De locatiekeuze is bepaald door de kwaliteit van het betreffende water en de experimentele omstandigheden zoals waterstroom, bereikbaarheid en verstoring gevoeligheid. Op de locatie is gedurende één jaar de efficiëntie van het filter en de conditie van de mosselen in het filter gemonitord. In het laatste jaar zijn ervaringen uit het eerste experiment gebruikt om middels een tweede experiment met een geoptimaliseerd filter een uiteindelijke uitspraak te doen over de mogelijkheid en efficiëntie om Driehoeksmosselen in te zetten in een technisch filter ter verbetering van de kwaliteit van het Volkerak-Zoommeer systeem.

Om de onderzoeksvragen: (i) kan een technisch functionerend mosselfilter gerealiseerd worden?; en (ii) kan dit filter ingezet worden om de eutrofiëringsproblematiek in het Volkerak-Zoommeer te verminderen?; te beantwoorden zijn een drietal activiteiten gedefinieerd, te weten:

- Het bepalen van een geschikte locatie om een proeffilter experimenteel in het veld te testen middels een systeemanalyse (2001);
- Het ontwerpen van een prototype mosselfilter en het testen van dit filter in op de geselecteerde locatie (2002);
- Het optimaliseren van het prototype mosselfilter alsmede het testen van het aangepaste mosselfilter in het veld (2003).

#### **1.4 Leeswijzer**

De in paragraaf 1.3 geformuleerde deelactiviteiten zullen achtereenvolgens in dit rapport aan de orde komen. Hoofdstuk 2 begint met een inleiding over de randvoorwaarden die Driehoeksmosselen stellen aan het milieu waarin zij voorkomen. Dit zijn tevens de minimale randvoorwaarden waaraan een functionerend mosselfilter moet voldoen. Vervolgens worden de opzet en de resultaten van de systeemanalyse beschreven samen met hoe de uiteindelijke testlocatie in de Steenbergse Vliet is bepaald. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van activiteiten en experimenten die zijn uitgevoerd om te komen tot een uiteindelijk ontwerp van een Driehoeksmosselfilter. De opzet, resultaten en conclusies van het eerste veldexperiment met het prototype mosselfilter in de Steenbergse Vliet worden beschreven in Hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 presenteert vervolgens de opzet van het tweede veldexperiment welke is uitgevoerd met een geoptimaliseerd mosselfilter. Tevens zullen uitvoer en de resultaten van dit experiment worden besproken. Uiteindelijk zal in hoofdstuk 6 met behulp van de resultaten van de experimenten bediscussieerd worden wat de invloed van mosselfiltratie op de nutriëntenvracht naar het Volkerak is. Berekeningen van hoeveelheden mosselen

die benodigd zijn om een bepaalde reducties van nutriënten te behalen worden gepresenteerd. Hoofdstuk 7 zal afsluiten met conclusies en aanbevelingen voor het optimaal inzetten van een mosselfilter ter vermindering van eutrofiëringsproblemen.

## 2. Driehoeksmosselen, systeemanalyse en locatiekeuze

### 2.1 Inleiding

Om een keuze te maken voor een geschikte proeflocatie is als uitgangspunt genomen dat de waterkwaliteit op de locatie geschikt moet zijn voor Driehoeksmosselen. Kennis over eisen die Driehoeksmosselen stellen aan de systeemkwaliteit is hierbij noodzakelijk. Deze kwaliteitseisen zijn vergeleken met de systeemkwaliteit van 4 potentiële locaties. Een tweede belangrijk criterium is de aanwezigheid van een hoge concentratie deeltjesgebonden nutriënten in het water. Wil een mossel filter ingezet kunnen worden om nutriënten te verwijderen, dan dient een substantieel deel van deze nutriënten zich in gebonden vorm, gesuspendeerd in de waterkolom te bevinden.

### 2.2 Systeemeisen en ecosysteminteracties van de Driehoeksmossel

#### 2.2.1 Systeemeisen

Van de verschillende soorten zoetwatermosselen die in de Nederlandse oppervlaktewateren voorkomen is de Driehoeksmossel (*Dreissena polymorpha*) de soort die in de hoogste aantallen voorkomt. Deze mossel is het onderwerp geweest van een groot aantal onderzoeken waarbij onder andere is gekeken naar manieren om de Driehoeksmossel te bestrijden en hoe de mossel gebruikt kan worden als signaleringsorganisme bij optredende vervuiling (Zwart *et al.*, 1995). Doordat de Driehoeksmossel weinig mobiel is, is deze soort zeer geschikt om toe te passen in onderzoeken naar de immobilisatie van verontreinigingen en als hulpmiddel bij het Actief Biologisch Monitoring (ABM) van geëutrofiëerde wateren (Kraak *et al.*, 1991; Reeders, 1989b).

Het feit dat de Driehoeksmossel voor bovenbeschreven doeleinden gebruikt kan worden en het feit dat, wanneer er voldoende substraat en voedsel beschikbaar is, deze mossel een plaag kan vormen, geeft aan dat deze soort resistent is tegen verstoringen en derhalve in een breed spectrum van milieus kan voorkomen. Deze eigenschappen maken de mosselen geschikt om ze breed in te zetten in het waterbeheer. Of dit ook kan in de vorm van een mossel filter is echter nog weinig belicht en hangt onder andere af van de inrichting van het filter (Blankendaal & Smit, 2003).

Een belangrijke fysiologische randvoorwaarde voor het overleven van de Driehoeksmosselen binnen een filter betreft de zuurstofconcentratie. De ondergrens van de zuurstofconcentraties waarbij Driehoeksmosselen nog efficiënt filteren ligt bij 25% verzadiging. Optimaal voor groei en reproductie zijn concentraties nabij 100% verzadiging (Stanczykowska, 1977). Met name in gestratificeerde plassen

kan er nabij de bodem sprake zijn van een zuurstof tekort, waardoor de Driehoeksmosselen bedreigd worden. Voor de werking van het filter is het van belang dat de Driehoeksmosselen gegarandeerd zijn van een goede zuurstofvoorziening.

De Driehoeksmossel tolereert een temperatuur tussen de 0 en de 30 °C. De optimale temperatuur voor een succesvolle voortplanting ligt echter tussen de 12 °C en 24 °C. Tussen deze temperaturen is de filtratiecapaciteit van de Driehoeksmosselen nagenoeg constant (Nalepa & Schloesser, 1993). Experimenten in het Wolderwijd hebben uitgewezen dat de optimale filtratiecapaciteit bij een temperatuur tussen de 10 °C en de 20 °C ligt (Noordhuis *et al.*, 1994). Er treed echter pas een substantiële reductie in de activiteit van de Driehoeksmossel op bij temperaturen lager dan 5 °C. Verschillende onderzoeken naar de optimale temperatuur voor voortplanting en filtratie van de Driehoeksmossel geven zeer uiteenlopende resultaten (Reeders, 1989a; Blankendaal & Smit, 2003; Borcharding, 1995).

De Driehoeksmosselen kunnen tot een gering zoutgehalte voorkomen. Chloridegehalten tussen de 0,4 tot 0,7 g/liter zijn nodig om een complete levenscyclus te voltooien. De mosselen komen ook voor in gebieden met een hoger zoutgehalte. De individuen zijn dan echter vaak ontstaan uit larven afkomstig uit gebieden met een lager chloridegehalte, en zullen zich naar alle waarschijnlijkheid niet voortplanten in dit gebied. De larven van de Driehoeksmosselen lijken beter bestand te zijn tegen een hoger zoutgehalte dan de volwassen mosselen (Nichols, 1996). De pH ligt voor een goede ontwikkeling van de larven tussen de 7,4 en de 9,4. Het optimum ligt waarschijnlijk rond de 8,5 (Nalepa & Schloesser, 1993).

De Driehoeksmossel koloniseert verschillende typen harde substraten (stenen, de schelpen van dode Driehoeksmosselen of de schelpen van levende en dode andere soorten zoetwatermosselen). In voormalige estuaria vormen de marine schelpen een belangrijk substraat voor de Driehoeksmosselen. Zolang het aangebonden oppervlak hard en ruw is, lijkt de Driehoeksmossel niet erg selectief te zijn.

In de literatuur worden verschillende dieptes genoemd waarop de Driehoeksmosselen voorkomen. De optimale diepte lijkt rond de 2 tot 4 meter onder het wateroppervlak te liggen. Bij ondiepere wateren is er waarschijnlijk sprake van een te grote turbulentie, waardoor sprake is van opwerveling van materiaal (Morton, 1969). Bij opwerveling van grote hoeveelheden silt en detritus kunnen complete kolonies bedekt worden met een laag materiaal en hierdoor verstikken (Nalepa & Schloesser, 1993). Ook predatie zou een mogelijke oorzaak kunnen zijn voor het minder voorkomen van de Driehoeksmosselen tot een diepte van 2 meter.

De stroomsnelheid kan de filtratiecapaciteit van de Driehoeksmosselen op twee manieren beïnvloeden. Tot een bepaalde snelheid zal de filtratiecapaciteit

toenemen, door een betere aanvoer van zwevende stof. Boven een bepaalde snelheid neemt de filtratiecapaciteit af omdat de mosselen dicht blijven. Bij zeer hoge snelheid kan dit uiteindelijk leiden tot het loslaten van de mosselen van het substraat (Ackerman, 1999).

### 2.2.2 Ecosysteem interacties

Driehoeksmosselen zijn éénslachtig, d.w.x. er zijn zowel mannelijke als vrouwelijke individuen. Als de mosselen een lengte van ongeveer 5 mm hebben bereikt worden ze geslachtsrijp. Tijdens de voortplanting in de periode van mei tot oktober komen miljoenen gameten vrij in het water. Hier vindt ook de bevruchting plaats. De duur van de planktonische fase is afhankelijk van de temperatuur van het water (Nichols, 1996). Als de larven, bij een bepaalde temperatuur, zwaar genoeg zijn geworden, zakken ze naar de bodem, waar ze zich met behulp van byssusdraden aan een geschikt substraat zullen proberen te hechten (MacIsaac & Sprules, 1991).

In alle stadia van de levenscyclus heeft de Driehoeksmossel verschillende natuurlijke vijanden. Zo vormt de volwassen Driehoeksmossel een belangrijke voedselbron voor verschillende soorten duikeenden, met name kuifeenden. Ook is er predatie door verschillende vissoorten, zoals blankvoorn, kolblei en aal. In het IJsselmeer is de blankvoorn verantwoordelijk voor vrijwel alle predatie door vissen op Driehoeksmosselen. Bloedzuigers (*Glossiphonia complanata*) en rivierkreeften (*Orconectes limosus*) prederen met name op jonge mosselen. Tevens zijn parasieten een belangrijke oorzaak van sterfte onder de jonge Driehoeksmosselen (Nalepa & Schloesser, 1993).

Er bestaat concurrentie om de ruimte op de harde substraten met andere organismen. Met name macroalgen, zoetwaterpoliepen en de slijkgarnaal (*Corophium curvispinum*) worden als concurrent genoemd. Tevens kunnen Driehoeksmosselen een negatief effect hebben op de filterefficiëntie en de voortbeweging van slakken en andere mosselsoorten (Griffiths, 1993).

Onderzoek van Bastviken *et al.* (1998) heeft uitgewezen dat de Driehoeksmossel zijn voedsel selecteert. De verschillen in opname lijken niet erg afhankelijk te zijn van de grootte van de deeltjes. Er zijn grote verschillen in opname tussen verschillende soorten algen die zich in dezelfde grote klasse bevinden. Sommige algensoorten als *Cryptomonas spp.* komen niet in de pseudo-feces van de Driehoeksmosselen voor. Dit duidt erop dat de mossel deze algensoorten compleet verteert. Onderzoek van Lei *et al.* (1996) naar de filtratie-dynamica ondersteunt de bevindingen van Bastviken *et al.* (1998).

De mosselen zorgen voor een transport van nutriënten uit het water naar het sediment in de vorm van feces. Een deel van de nutriënten gebruikt de mossel voor groei en reproductie. Een ander deel scheidt de mossel uit als organisch materiaal

of als opgelost anorganische stof. Opgeloste anorganische nutriënten zijn direct beschikbaar zijn voor de groei van algen. Daarom kan door de uitscheiding van opgeloste anorganische nutriënten door de mosselen de groei van bepaalde algensoorten gestimuleerd worden. De mosselen kunnen de algenpopulatie binnen een watersysteem dus op twee manieren beïnvloeden: reductie door begrazing en stimulatie door verhoging van opgeloste anorganische nutriënten (Arnott & Vanni, 1996). De mosselen zijn niet afhankelijk van een bepaald type vegetatie voor hun voorkomen. De aanwezige vegetatie is een bron van voedsel, zorgt voor de benodigde zuurstof in een systeem en dient als bescherming of als substraat (Bentham Jutting, 1959).

## **2.3      Systeemanalyse van de vier locaties**

### **2.3.1    Opzet van de systeemanalyse**

Om inzicht te krijgen in de geschiktheid van de Steenbergse Vliet en de Mark/Dintel voor het installeren van een mosselfilter is een uitgebreide inventarisatie van biologische, chemische en fysische parameters op vier potentieel geschikte locaties uitgevoerd. Twee locaties bevonden zich in de Steenbergse Vliet en twee in de Dintel.

Als eerste gekeken of de mosselen van nature in de twee watersystemen voorkomen. Dit geeft direct aan of aan de kwaliteitseisen van de Driehoeksmosselen wordt voldaan. Daarnaast is, om de groeiomogelijkheden van de mosselen te onderzoeken, op iedere locatie een hoeveelheid mosselen uitgehangen met bekende lengte. Na verloop van een aantal maanden is de groei en overleving van deze mosselen bepaald. Dit zegt indirect iets over voedselbeschikbaarheid en filtercondities.

Aangezien een mosselfilter alleen effectief nutriënten uit het water kan filteren wanneer de nutriënten zich met name aan deeltjes gebonden en gesuspendeerd in de waterkolom bevinden, is het voorkomen van deeltjesgebonden nutriënten in het water belangrijk. Voor het verkrijgen van een lange-termijn-beeld van de nutriënten concentraties in de rivieren zijn waterkwaliteitsparameters gebruikt die gemeten zijn door de verantwoordelijke waterkwaliteitsbeheerder (Hoogheemraadschap van West Brabant). Middels fytoplanktonmetingen en chemische analyses is onderzocht of de rivieren qua voedselaanbod geschikt zijn om een Driehoeksmosselfilter te laten werken.

Tenslotte zijn op de beoogde proeflocaties beperkingen in de omgeving ten aanzien van verstoring van het filter door o.a. scheepvaart en recreatie geïnventariseerd. Hierbij zijn tevens objecten geïdentificeerd die mogelijk hinder van de aanwezigheid van het filter kunnen ondervinden (bijv. door begroeiing door Driehoeksmosselen die mogelijk uit het filter vrij komen). In Tabel 1 wordt een

overzicht gegeven van de biologische, chemische en fysische bepalingen die onderdeel uitmaken van de systeemanalyse.

*Tabel 1      Overzicht van chemische, biologische en fysische metingen uitgevoerd tijdens de systeemanalyse van de vier beoogde locaties.*

| Type meting       | Meting   |
|-------------------|--|
| <b>Chemisch</b>   | turbiditeit<br>EGV (geleidingsvermogen)<br>zuurstofgehalte (mg/l)<br>zwevend stofgehalte (mg/l)<br>deeltjes grootte verdeling<br>organische stof gehalte (%)<br>chlorofyl-a (µg/l)<br>nutriënten |
| <b>Biologisch</b> | fytoplankton bemonstering<br>zoöplankton bemonstering<br>macrofauna bemonstering<br>biomonitoring met mosselmandjes  |
| <b>Fysisch</b>    | stroomsnelheid<br>watertemperatuur<br>bronnen van verstoring<br>objecten voor hinder   |



### 2.3.2 Overzicht van de locaties

Tijdens een eerste inventarisatie is een selectie van 4 potentiële locaties gemaakt. Achtereenvolgens zullen deze locaties kort worden beschreven.

#### ***Locatie 1: Steenbergse Vliet, monding***

De eerste locatie bevindt zich in de Steenbergse Vliet aan de noordkant van de sluis Beneden Sas, ongeveer 100 meter stroomafwaarts van de sluis richting het Volkerak. Langs de westoever staat een rij meerpalen. Aan de vierde paal vanaf het Volkerak is aan de binnen- en buitenkant van de paal gemeten en bemonsterd. De paal is circa 7 meter van de oever af gelegen. De waterdiepte ter plaatse is 2,5 meter. De paal is begroeid met algen en op de plekken die tegen vraat afgeschermd zijn, zijn Driehoeksmosselen aanwezig.

Tussen deze locatie en het Volkerak zijn geen activiteiten gevestigd. De palen worden zomers wel gebruikt om schepen aan af te meren. Het merendeel van schepen meert echter af tussen de meerpalen en de oever. Voor het uitvoeren van de werkzaamheden is een boot benodigd die beschikbaar is bij de beheerder van de sluis.



Foto 3 *Locatie 1; Steenbergse Vliet, monding, gezien in zuidelijke richting (foto: TNO-MEP).*

***Locatie 2: Steenbergse Vliet, jachthaven***

De tweede beoogde locatie bevindt zich in de Steenbergse Vliet vanaf de sluis Beneden Sas, circa 1 km stroomopwaarts (zuidelijke richting). Voorbij de jachthaven staat midden in de stroom een houten constructie bestaande uit drie palen. Twee staande palen zijn met kettingen verbonden met een derde, horizontale houten paal, die aan de wateroppervlakte drijft. De afstand tot beide oevers is meer dan 20 meter. De waterdiepte bedraagt 2,1 meter. Tussen de constructie en de westelijke oever is geen scheepvaartverkeer toegestaan. Dit gebied is gereserveerd voor recreatie en visactiviteiten vanaf de oever. Aan de drijvende paal meren regelmatig recreanten af. Vanaf de locatie tot aan het Volkerak (stroomafwaarts) bevindt zich een jachthaven, een spuisluis en de sluis voor scheepvaart. Voor het uitvoeren van de werkzaamheden is een boot benodigd die beschikbaar is bij de beheerder van de sluis.



Foto 4 *Locatie 2; Steenbergse Vliet, jachthaven, gezien in noordelijke richting (foto: TNO-MEP).*

***Locatie 3: Dintel, sluis***

De derde beoogde locatie bevindt zich in de Dintel direct bij de Dintelsluis ongeveer 1 km vanaf de daadwerkelijke monding. De monsternamen en metingen zijn uitgevoerd ter hoogte van het huis van de sluisbeheerder en in uitsparingen van de sluisdeuren. Dit is aan de zuidkant van de sluis. De sluisconstructie is begroeid met algen. In de monding van de sluis zijn macrofaunamonsters genomen. In de Dintelmond tussen de beoogde locatie en het Volkerak is een industriehaven gevestigd. De scheepvaart is intensief en veroorzaakt sterke waterbewegingen. Een boot is niet noodzakelijk voor het verrichten van de metingen.



Foto 5      *locatie 3; Dintel, sluis, gezien in zuidelijke richting (foto: TNO-MEP).*

**Locatie 4: Dintel, viaduct**

De vierde locatie ligt onder het viaduct van de A29 over de Dintel. Dit Viaduct bevindt zich ongeveer 2 km stroomopwaarts ten opzichte van de sluis (locatie 3). De oever loopt steil af en bestaat onder water uit losse stortstenen. Het grootste deel van de oever is aan beide zijden van het viaduct begroeid met een brede rietkraag. Onder het viaduct bevinden zich pilaren welke uit beton zijn opgebouwd. In het verlengde van de betonnen pilaren staan zowel in noordelijke als in zuidelijke richting een rij meerpalen. De monsternamen en metingen zijn onder het viaduct en circa 50 meter stroomopwaarts uitgevoerd aan de oostelijke oever. Grote schepen die langskomen, veroorzaken een sterke verandering van stroming en waterpeil. Het water tussen de oever en de pilaren loopt dan bijna geheel weg, waarna het in een golf terug spoelt. Tussen de beoogde locatie en de monding van de Dintel bevinden zich een jachthaven, een industriehaven en enkele industriële activiteiten, waaronder een suikerfabriek. Voor de uitvoering van de werkzaamheden is een boot nodig.



Foto 6 *Locatie 4; Dintel, viaduct, vanaf de oostelijke oever gezien in zuidelijke richting (foto: TNO-MEP).*

**2.3.3 Resultaten van de systeemanalyse**

Een overzicht van de belangrijkste resultaten van de systeem analyse wordt gegeven in Bijlage 1. De tabellen en figuren zijn onderverdeeld naar resultaten van de fysische, chemische en biologische bepalingen.

Opvallend is het verschil in fysische kwaliteit tussen de monsterpunten in de Steenbergse Vliet en de Dintel. Zowel het zuurstofgehalte van het water als de turbiditeit in de Dintel zijn verhoudingsgewijs aanzienlijk slechter. Uit het

bepaalde geleidingsvermogen (EGV) blijkt dat de twee wateren ook verschillend zijn qua geleidingskarakteristieken.

De stroomsnelheid blijkt zeer te variëren per locatie en per monsterpunt. Dit blijkt mede afhankelijk te zijn van het scheepvaartverkeer. Gedurende het jaar kan het debiet aanzienlijk variëren. In de zomermaanden is er vrijwel geen sprake van afvoer van water vanuit het stroomgebied van de beide rivieren. Bij de Steenbergse Vliet kan het zelfs voorkomen dat er water vanuit het Volkerak-Zoommeer het gebied binnenkomt. Dit kan bij de sluisen van de Vliet leiden tot ophoping van draadalg en blauwalgen. Soms worden om deze redenen de sluisdeuren gesloten.

In de Steenbergse Vliet bevindt zich ten opzichte van de Dintel een hogere concentratie chlorofyl-*a*. Het blijkt dat er in de Steenbergse Vliet verhoudingsgewijs meer flagellaten en voorkomen dan in de Dintel. In de Dintel komen relatief meer diatomeeën en groenalgen voor. Flagellaten zouden de stroming opgewekt door de Driehoeksmosselen kunnen ontwijken en hierdoor minder geschikt voedsel zijn voor Driehoeksmosselen. De aantallen algen in de Steenbergse Vliet zijn echter dusdanig hoger (ook in voor Driehoeksmosselen meer geschikte algen) dat dit niet als criterium geldt voor de geschiktheid van de locatie voor een Driehoeksmossel filters.

Het aantal deeltjes verschilt per locatie zowel in de Steenbergse Vliet als in de Dintel aanzienlijk. Waarschijnlijk wordt dit verklaard door de aanwezigheid van verschillende stromingspatronen op de bemonsterde plekken, waardoor op bepaalde monsterpunten sprake is van opwerveling of bezinking van organisch materiaal. Ook in de hoeveelheid zwevende stof is dit verschil tussen de monsterpunten zichtbaar. De monsterpunten in de Dintel hebben ten opzichte van de monsterpunten in de Steenbergse Vliet een relatief hoog zwevend stof gehalte. Over het algemeen is de fractie tot 1,5  $\mu$  in overhand aanwezig. Op alle locaties is er geschikt voedsel aanwezig is voor de Driehoeksmosselen.

In de maanden juli en augustus blijkt de fractie gebonden nutriënten in zowel de Steenbergse Vliet als de Dintel het hoogst te zijn. Per liter wordt er door de Steenbergse Vliet gemiddeld meer nutriënten afgevoerd dan door de Dintel.

Uit gemeten waarden voor de groei van de mosselen in de ABMs (Algemene Biologische Monitoring), blijkt in de Steenbergse Vliet een gemiddelde wekelijkse toename in lengte van bijna 1 %. Terwijl in de Dintel een toename is van ongeveer 0,5%. De ABM's wijzen er derhalve op dat de groeiomstandigheden voor Driehoeksmosselen in de Steenbergse Vliet beter zijn dan in de Dintel.

## 2.4 Locatiekeuze

Zowel het water van de Steenbergse Vliet als het water van de Dintel zijn in principe geschikt bevonden voor het installeren van een Driehoeksmossel filters op grond van deeltjes aantallen en chlorofyl-*a* bepalingen. Gezien de overige randvoorwaarden welke gesteld worden aan de locatie geniet de Steenbergse Vliet evenwel de voorkeur boven de Dintel.

De Driehoeksmosselen in de ABM's uitgehangen in de Steenbergse Vliet, zijn beter gegroeid dan de Driehoeksmosselen in de Dintel. Dit wijst erop dat de omstandigheden voor groei (en daarmee de filterende werking) van Driehoeksmosselen in de Steenbergse Vliet beter zijn dan in de Dintel.

Daarnaast blijkt uit de meetgegevens en de monitoringsgegevens van het Hoogheemraadschap van West Brabant dat de concentratie nutriënten in de Steenbergse Vliet per liter hoger is dan in de Dintel. Per liter kan er derhalve meer gezuiverd worden.

Gezien de risico's op verstoring is de positie in de monding van de Steenbergse Vliet een betere plek voor de experimenten met een Driehoeksmossel filter. In de Dintel kan er sprake zijn van grote deining van het water door de (beroeps)scheepvaart die van deze rivier gebruik maakt. In de Steenbergse Vliet is alleen sprake van kleine pleziervaart, die voor aanzienlijk minder verstoring zorgt. Door de betere bereikbaarheid heeft locatie 1 in de Steenbergse Vliet de voorkeur boven locatie 2. Bovendien is op locatie 1 een zeer hoge zaadval geregistreerd, hetgeen gunstig is voor een verhoging van de filterwerking, wanneer het substraat daardoor extra gekoloniseerd wordt (Foto 7).



*Foto 7 Aangroei van mosselen op het uitgehangen mosselmandje in de Steenbergse Vliet (foto: TNO-MEP).*

### 3. Inrichting van een mosselfilter voor Driehoeksmosselen

#### 3.1 Inleiding en doel

In dit hoofdstuk worden de activiteiten besproken die zijn uitgevoerd om te komen tot een optimale opzet van het mosselfilter. Het hoofddoel was een opstelling te maken waarin de mosselen ongehinderd kunnen leven en het water, waarin zij zich bevinden, met maximale zuiveringscapaciteit filtreren. Een inventarisatie van reeds uitgevoerde experimenten met artificieel substraat, enkele labexperimenten en de resultaten van de systeemanalyse tezamen moeten uiteindelijk leiden tot het ontwerp van een (proef)mosselfilter welke vervolgens in 2002 wordt ingezet in de Steenbergse Vliet.

#### 3.2 Randvoorwaarden

De inrichting van het mosselfilter moet aan een aantal eisen voldoen. Niet alleen de wijze waarop de mosselen in het filter zijn ondergebracht bepaalt de filterende werking, maar ook het substraat waarop de mosselen moeten hechten is belangrijk. Het is gewenst de Driehoeksmosselen op de gewenste locatie (in de verontreinigde waterstroom) te fixeren. Als voorwaarde aan het substraat wordt gesteld dat het een zekere mate van oppervlakte ruwheid en hardheid moet hebben. Als aan deze voorwaarden is voldaan is de materiaalkeuze van minder belang.

Een tweede belangrijk aspect voor het kunnen overleven van de mosselen in een filter is een voldoende voedselaanbod en voldoende zuurstofbeschikbaarheid in het filter. Om dit te waarborgen moet de doorstroming van het filter voldoende zijn om een constante aanvoer van deeltjes en zuurstof te waarborgen. Belangrijk hierin is tevens een goede verhouding tussen de hoeveelheid mosselen en de hoeveelheid aangeboden voedsel in het aanvoerwater. De mosselen mogen niet verhongeren, maar moeten wel zorgen voor een zo hoog mogelijke verwijdering van het zwevend organisch materiaal door filtratie. Naast toevoer van voedsel en zuurstof zorgt de doorstroming van het filtersysteem ook voor afvoer van afvalstoffen welke door de activiteit van mosselen wordt geproduceerd (vooral ammonium).

Bovendien dient bij het filterontwerp rekening met de uit te voeren bemonsteringen te worden gehouden. Om de filtratiecapaciteit en de efficiëntie van de mosselen te kunnen bepalen moeten monsters bij zowel de instroom (influent) als de uitstroom (effluent) van het filter genomen kunnen worden. Bovendien moet het geproduceerde slib (zie box 2) periodiek verzameld en afgevoerd worden om de hierin verzamelde nutriënten te bepalen. Door het slib af te voeren kunnen er middels het mosselfilter ook daadwerkelijk nutriënten afgevoerd worden.



**Box 2**

**Slib of feces?** Met slib wordt in dit rapport bedoeld de som van geproduceerde pseudo-feces (box 1), feces en ander gesedimenteerd materiaal. Tussen feces en pseudo-feces wordt geen onderscheid gemaakt. Door de concentraties van de nutriënten die in het slib zitten te bepalen kan berekend worden hoeveel nutriënten door mosselfiltratie in de vorm van slib uit de waterkolom verwijderd worden. Door het slib af te voeren kunnen er middels het mosselfilter ook daadwerkelijk nutriënten afgevoerd worden.

Bijkomende zaken waarmee rekening moet worden gehouden bij de inrichting van het mosselfilter zijn bijvoorbeeld de bedekking van filter met organisch materiaal en/of eventuele algenbegroeiing en predatie door vogels (duikeenden) op de mosselen uit het filter. Mogelijk levert eventuele groei en aanwas van mosselen in het filter een probleem op. Door overmatige begroeiing kan het filter dichtslibben.

Tenslotte kunnen verontreinigingen die in de mosselen in hun weefsel kunnen accumuleren de kwaliteit en werkzaamheid van het filter aantasten. Analyse van het mosselweefsel zal na blootstelling aangeven of er accumulatie heeft plaatsgevonden.

Teneinde een goed ontwerp voor het uiteindelijke prototype mosselfilter te verkrijgen zijn experimentele systemen in verschillende uitvoeringen ontwikkeld en getest. Samengevat zijn de voorwaarden waaraan het uiteindelijke systeem moet voldoen de volgende:

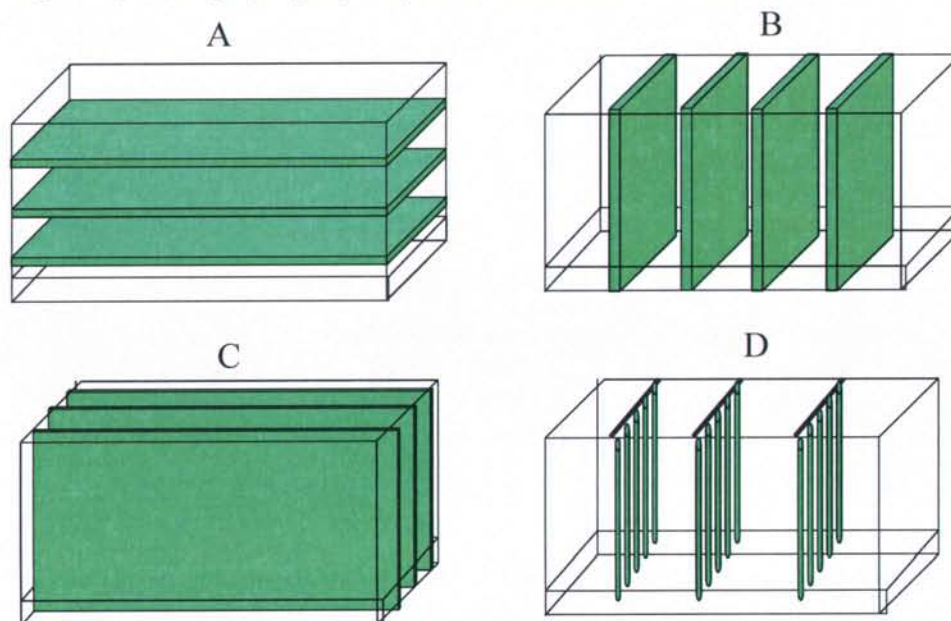
1. Voor de doorstroming van het filter dient gebruik te worden gemaakt van de natuurlijke afvoer van het watersysteem.
2. Het filter moet voldoende open zijn om doorstroming te garanderen ook wanneer door aanwas de hoeveelheid Driehoeksmosselen toeneemt.
3. Het oogsten van de mosselen moet eenvoudig kunnen geschieden.
4. De opvang en verwijdering van de door de mosselen gevormde feces moet mogelijk zijn.
5. De in- en uitstroom van het filter moet gemakkelijk toegankelijk zijn voor bemonstering, maar afgeschermd zijn voor vogels.
6. De mosselen moeten makkelijk in het filter bevestigd kunnen worden, hetzij dat zij zelf aan substraat hechten of dat zij hierop gefixeerd kunnen worden.

### **3.3 Inrichting van het filter**

#### **3.3.1 Groepering van de mosselen**

Voor de ontwikkeling van de optimale opstelling zijn enkele kleinschalige experimenten met Driehoeksmosselen uitgevoerd. Enerzijds is hierin gekeken naar

het substraat, anderzijds is plaatsing van de mosselen in het filter onderzocht. De wijze waarop de mosselen in het filter zitten, is van invloed op hun filtratiecapaciteit en op de doorstroming van het systeem. Door het kiezen van de juiste groepering van de mosselen in het filter en het juiste substraat, kunnen problemen als ophoping van slib en algenbegroeiing worden geminimaliseerd. Figuur 1 geeft mogelijke groeperingen van de mosselen in het filter weer.



*Figuur 1* Mogelijke groeperingen van de mosselen in een filter. Het substraat (matten met mosselen in A (horizontaal), B (haaks), en C (parallel) of in figuur D netten met erin de mosselen) is groen weergegeven.

Opstelling A (horizontaal), waarbij de mosselen op platen zijn uitgelegd, is in eerdere experimenten uitvoerig getest (Smit en Foekema, 2000). Het nadeel van deze opstelling is de sterke ophoping van slib op de platen waarop de mosselen zich bevinden. Dit kan leiden tot problemen als dichtslibbing en zuurstofloosheid, waardoor de mosselen niet meer (optimaal) filteren.

In opstelling B bevinden de mosselen zich haaks op de stroomrichting. Het water stroomt door het raamwerk van substraat. Hierdoor is optimaal contact van het water met de mosselen gewaarborgd. Voorwaarde voor een goede doorstroming is dat de mosselen op het substraat en het substraat zelf de doorstroming niet blokkeren.

In opstelling C zitten de mosselen eveneens op het substraat, maar hier stroomt het water parallel langs. Hoewel het water minder direct contact heeft met de mosselen (langsstroming) zal de aanwas van mosselen hier tot minder problemen leiden dan in opstelling B.

In opstelling D hangen de mosselen in netten in de waterkolom. Deze netten zijn vergelijkbaar met de hangcultures van zoutwatermosselen. Aanwas van de mosselen kan op de netten plaatsvinden en de mosselen hangen in vrij contact met het water. Een nadelige ophoping van slib in de netten wordt niet verwacht mits de afvoer van de door mosselen midden in het net geproduceerde feces niet belemmerd wordt. De doorsnede van de netten mag dan ook niet te groot zijn.

In experimenten zijn de groeperingen B, C en D op kleine schaal getest. Opstelling A is niet getest vanwege de problemen met de ophoping van slib tussen de mosselen. Gebleken is dat zolang goede doorstroming gewaarborgd blijft, de filtratie in alle opstellingen goed verloopt. Afhankelijk van het type substraat zal de uiteindelijke opstelling van de mosselen gekozen worden.

### 3.3.2 Substraatkeuze

Naast de groepering van de mosselen is de substraatkeuze van belang. Uit veldinventarisaties is gebleken dat de Driehoeksmossel weinig selectief is in de keuze van het substraat. Voorwaarde is dat het substraat hard en ruw is. Steen, hout, maar ook niet sterk oxiderend metaal wordt vaak snel gekoloniseerd door de mossel (Nalepa & Schloesser, 1993).

Aan de universiteit van Dresden (Duitsland) wordt in samenwerking met het 'Sachsisches Textil Forschungs Institut', sinds 1998 onderzoek uitgevoerd naar geschikt substraat voor Driehoeksmosselen (Kusserow & Mählmann, 1999). Dit onderzoek wordt uitgevoerd om substraat te ontwikkelen waaraan mosselen optimaal hechten om vervolgens te kunnen worden ingezet als een filter. Dit filter is erop gericht om versnelde vastlegging van zwevend slib in effluent van rioolwaterzuiveringsinstallaties, in de bodem van zogenaamde 'polishing ponds' te bewerkstelligen. Hiertoe worden de mosselen, die zich van nature alleen op de bodem bevinden, gefixeerd op substraat en in de waterkolom gebracht. Naast de reeds in de waterkolom aanwezige 'filterfeeders' (bijv. watervlooien) dragen de mosselen zo bij aan het verwijderen van zwevend stof in deze nazuiveringsvijvers.

De overeenkomsten tussen het onderzoek in Duitsland en het onderzoek binnen dit project heeft geleid tot een uitwisseling van informatie over beschikbare geschikte substraten. Het betrokken textielonderzoeksinstituut onderzoekt nieuwe toepassingsmogelijkheden voor textiel en kunstvezel gerelateerde producten en produceert dit substraat op kleine schaal. Middels hechtingsexperimenten is in Duitsland reeds de kolonisatie van de Driehoeksmosselen op verschillende soorten kunststof substraat getest (gevlochten matten van verschillende kunststofstrengen). Foto 8 Laat een opstelling zien waarbij verschillende substraten zijn uitgehangen en na verloop van tijd de kolonisatie door mosselen is vastgesteld.



Foto 8 *Test opzet voor kolonisatie van verschillende substraattypen (Kusserow en Mählmann). De zwarte substraatmatten onderaan op de foto zijn gebruikt in deze studie (Foto: Mählmann).*

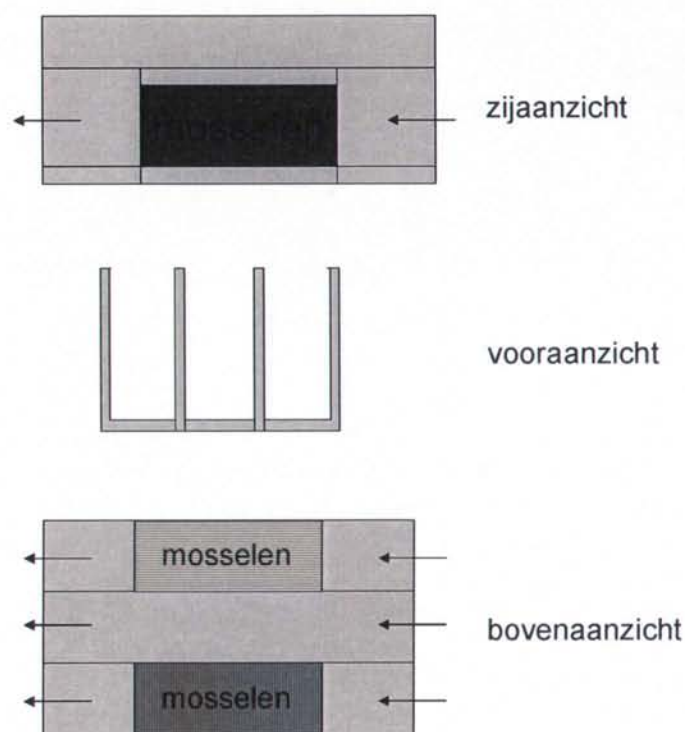
Samen met de hierboven beschreven gevlochten substraatmatten zijn een tweetal extra substraten (gaasmat met geperst dakpangruis en een kunststof mat met eierdopprofiel) ingezet in een stroomgoot om onder sterke stroom de hechting van Driehoeksmosselen vast te stellen. Zowel onder als boven de drie ingezette substraten zijn Driehoeksmosselen aangebracht. Gedurende een week is de hechtingsgraad van de mosselen op het substraat onderzocht.

De beste resultaten werden verkregen met de gevlochten substraatmatten uit Duitsland. De hechting van de mosselen aan elkaar was echter in alle gevallen beter dan de hechting aan het substraat zelf. Daarom is besloten om de gevestigde mosselen op de substraatmatten te fixeren door een netje over het substraat en mosselen te spannen ter voorkoming van het afvallen van de mosselen bij verticale bevestiging in het filter.

### 3.4 Eindontwerp van het experimentele filter

Met in acht neming van de randvoorwaarden voor de ontwikkeling van het filter die in 3.2 zijn genoemd en de keuze voor het substraat is een proeffilter ontwikkeld waarmee de filterefficiëntie van de Driehoeksmosselen te meten zou moeten zijn. Doordat de keuze is gemaakt voor een substraatmat, is de opstelling waarbij de mosselen in netjes in het filter geplaatst worden afgevalen (Figuur 1D). De uiteindelijke opstelling bestond uit een drijvende bak die verdeeld is in een drietal compartimenten. Elk van deze drie compartimenten bevat een instroomdeel, een uitstroomdeel en een deel voor de mosselen. Twee van deze compartimenten zijn

daadwerkelijk gevuld met mosselen en substraat volgens de opstellingen B (haaks) en C (parallel) zoals dit is weergegeven in Figuur 1. In het middelste compartiment bevinden zich alleen lege substraatmatten. Hiermee wordt, als controle, de mechanische bezinking zonder mosselen bepaald. Er zijn 8 substraatstukken zoals B ingezet en 4 stukken zoals C. Zowel in het ‘haaks-compartiment’ als in het ‘parallel-compartiment’ is 8 kg mosselen in ingezet (16 kg in totaal). Figuur 2 geeft schematisch het prototypefilter met mosselen weer.



Figuur 2 Schematisch overzicht van de uiteindelijke opstelling

Doordat de opstelling bestaat uit een drietal open goten kan het water van de Vliet vrij door het filter heen stromen. Zo wordt voor de doorstroming van het filter gebruik gemaakt van de natuurlijke afvoer van het watersysteem. De substraatmatten met mosselen zijn zo opgehangen dat zijdelings nog ruimte over wordt gehouden om doorstroming te garanderen ook wanneer door aanwas de hoeveelheid Driehoeksmosselen toeneemt. De matten hangen los in het systeem waardoor het eventuele oogsten van de mosselen eenvoudig kan geschieden. Voor de opvang en verwijdering van de door de mosselen gevormde slib zijn onder de substraatmatten bakken aangebracht. Deze bakken kunnen periodiek worden geleegd. De in- en uitstroom van het filter zijn onder water afgeschermd door gaas tegen de predatie van vogels. Boven het wateroppervlak sluiten schuiven het systeem af. Door deze schuiven te openen komen de in- en uitstroom vrij waaruit monsternames plaatsvindt.

## **4. Experimentele toetsing in het veld (2002)**

### **4.1 Inleiding en doel**

In hoofdstuk 2 en 3 is de locatie voor een proeflocatie vastgesteld en zijn de randvoorwaarden waaraan een efficiënt functionerend mosselfilter moet voldoen, geïnventariseerd. De resultaten van deze twee deelonderzoeken zijn toegepast om het proefmosselfilter te optimaliseren en in het veld te testen. In dit hoofdstuk worden de opzet, uitvoer en de resultaten van het veldexperiment besproken.

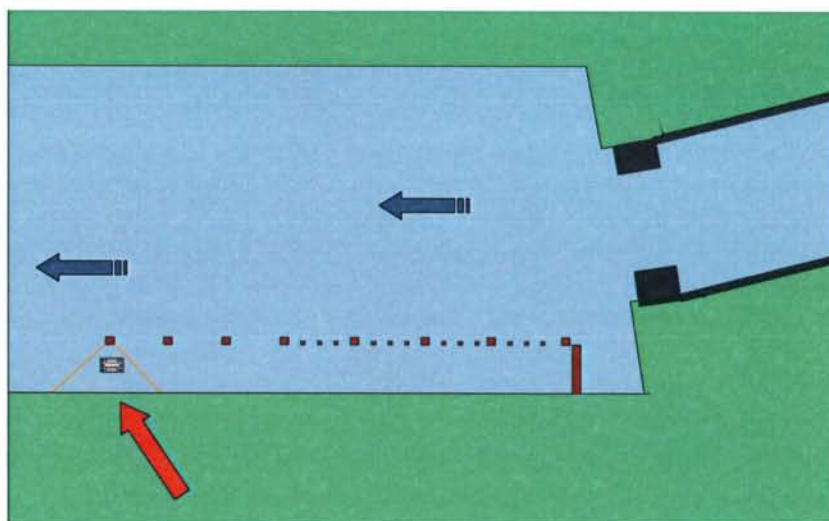
Het experimentele filter is op de gekozen locatie geïnstalleerd. Met dit filter is het effect van filtratie door Driehoeksmosselen op de waterkwaliteit, met name de concentratie deeltjes en deeltjesgebonden nutriënten van de Steenbergse Vliet bepaald. De nadruk lag op de directe verwijdering door filtratie. Op de tweede plaats is gekeken naar de vastlegging van nutriënten in de vorm van slib. Deze vastgelegde hoeveelheid nutriënten kan uit het systeem verwijderd worden wanneer het slib afgevangen wordt. Zowel van het influent als het effluent van het filter zijn tweewekelijks watermonsters genomen waarin de concentraties stikstof (S) en fosfor (P) verbindingen zijn bepaald. Uiteindelijk leidden de resultaten van dit veldexperiment tot een opzet voor een verder geoptimaliseerd mosselfilter dat in 2003 getest is.

#### **4.1.1 Constructie en installatie**

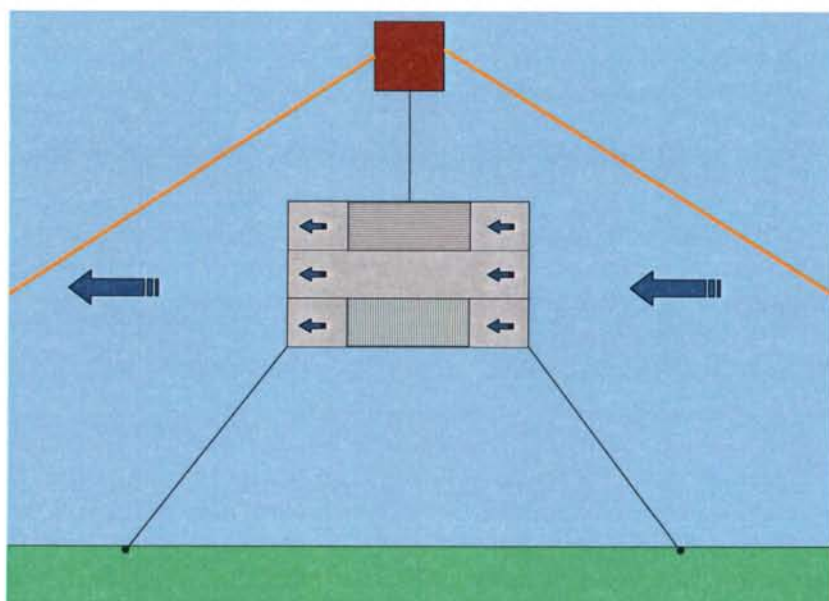
Op 9 april 2002 is het ontwikkelde experimentele systeem geïnstalleerd in de Steenbergse Vliet. Onderstaande figuren geven schematisch weer hoe en waar het filter is geplaatst. Figuur 3 geeft de positie van het filter ten opzichte van de sluis weer, terwijl Figuur 4 de bevestiging aan de afmeerpaal laat zien.

De filterbak zelf is geconstrueerd van betonplex en hout. Aan de opstelling zitten drijvers bevestigd (Foto 9), zodat de opstelling op de juiste diepte in de waterkolom komt te hangen. Onder water is de opstelling met staalkabels en kettingen bevestigd aan de meerpaal en aan de oever.

In de opstelling zijn een drietal roestvrijstalen bakken geplaatst welke dienen voor het opvangen van slib (Foto 9). Boven twee van deze bakken bevinden zich de substraten met mosselen. Het middelste compartiment blijft leeg en dient als controle (zie ook Figuur 2). Gedurende het experiment is de bovenkant van de opstelling afgesloten met platen (Foto 10). Deze platen zijn in horizontale



*Figuur 3* Locatie van het filter aan de buitenzijde van de sluis in de monding van de Steenbergse Vliet.



*Figuur 4* Bevestiging van het filter aan de afmeerpaal. De rood getekende lijnen zijn markeringen van de opstelling ter voorkoming van verstoring door de scheepvaart. Het filter bestaat uit 3 compartimenten. In één compartiment (boven in het figuur) hangen de substraatmatten **parallel** op de waterstroom, in het andere compartiment (onder in het figuur) zijn zij **haaks** op de stroming aangebracht. In het derde (middelste) compartiment bevinden zich geen mosselen maar alleen lege substraatmatten. Dit compartiment dient als controle en als indicatie voor de puur mechanische sedimentatie van slib zonder mosselen.

In de opstelling zijn een drietal roestvrijstalen bakken geplaatst welke dienen voor het opvangen van slib (Foto 9). Boven twee van deze bakken bevinden zich de substraten met mosselen. Het middelste compartiment blijft leeg en dient als controle (zie ook Figuur 2). Gedurende het experiment is de bovenkant van de opstelling afgesloten met platen (Foto 10). Deze platen zijn in horizontale aluminium profielen geschoven welke aan weerszijden aan de bovenkant van de opstelling zijn bevestigd. Wanneer slib (zie box 2) wordt bemonsterd, kunnen deze platen aan de voor en achterzijde van de opstelling in verticale aluminium profielen worden geschoven waardoor de bak wordt afgesloten. Met pompen is het water uit de bak te verwijderen, waardoor deze gaat drijven. Met een zuigpomp kan vervolgens het slib uit de opvangbakken worden bemonsterd.

De in- en uitstroomopeningen zijn met gaas afgesloten ter voorkoming van predatie door vogels. De maaswijdte is echter wel zo groot gekozen dat het water vrij in en uit kan stromen. Tijdens bemonsteringen zal dit regelmatig gecontroleerd worden.



*Foto 9 Tewaterlating van de opstelling. Duidelijk zijn de bakken ter opvang van slib in de drie compartimenten en het gaas ter voorkoming van predatie te zien.*

Aangezien de opstelling is geïnstalleerd op een locatie waar regelmatig recreatievaartuigen afmeren en passeren, is de opstelling duidelijk gemarkeerd en afgebakend. De borden geven een invaarverbod aan (Foto 10). Daarnaast zijn informatie borden geplaatst om het publiek te informeren over het onderzoek en zijn beheerders van de sluis en de jachthaven geïnformeerd.





Foto 10 *Het mosselfilter geïnstalleerd op de proeflocatie in de monding van de Steenbergse Vliet. De markering van de opstelling ter voorkoming van verstoring is duidelijk te zien.*

Tot eind september 2002 (ruim 5,5 maanden) is de opstelling tweewekelijks gecontroleerd en bemonsterd. Zo konden ook tijdens de periode waarin blauwalgen bloei optrad (Tabel 3) de filtratie eigenschappen van de mosselen proefondervindelijk gevolgd worden. Tevens is de overleving van de mosselen in het filter bij aanwezigheid van de toxische drijfslagen gemonitord.

## 4.2 Meetprotocol, analyses en meetschema

Tijdens de bemonsteringen aan het filter zijn er watermonsters genomen voor analyse en zijn er verschillende metingen *in situ* aan het filter uitgevoerd. De watermonsters zijn zowel aan de instroom als aan de uitstroom van het filter genomen. Door de verschillen tussen de concentraties nutriënten en deeltjes in deze watermonsters te bepalen wordt het effect van het filter op de waterkwaliteit bepaald. De bemonsteringen richten zich met name op deeltjes en deeltjesgebonden nutriënten. Op basis hiervan kan de efficiëntie van het filter in het verwijderen van deeltjes (en dus deeltjesgebonden nutriënten) berekend worden. Tabel 2 geeft een overzicht van parameters die tijdens het doorstroomexperiment zijn bepaald.

Tabel 2 *Overzicht van metingen en analyses tijdens het doorstroomexperiment.*

### **Watermonsters met een steekbuis genomen, 1 liter per monster:**

- instroom parallel
- instroom haaks
- instroom controle
- uitstroom parallel
- uitstroom haaks
- uitstroom controle

**Metingen ter plaatse van alle instroom- en uitstroom openingen:**

- pH
- temperatuur
- zuurstofgehalte
- chlorofyl-a
- stroomsnelheid

**Analyses in het laboratorium (gemeten volgens NEN-, EN- en/of ISO-voorschriften):**

- deeltjes
- nitraat
- nitriet
- ammonium
- totaal N
- totaal P
- opgelost P

Uit de gegevens is de hoeveelheid deeltjesgebonden stikstof en fosfaat berekend volgens:

$$\text{Deeltjesgebonden N} = \text{totaal N} - \text{nitraat} - \text{nitriet} - \text{ammonium}$$

$$\text{Deeltjesgebonden P} = \text{totaal P} - \text{opgelost P}$$

Naast de metingen aan het filter tijdens doorstroming zijn er tevens een tweetal afsluitexperimenten uitgevoerd. Hierbij is het gehele filter afgesloten en is het water in het filter periodiek bemonsterd. Deze afsluitexperimenten zijn tevens op kleine schaal in het laboratorium herhaald met dezelfde mosselen en het water uit de Steenbergse Vliet. De filtratiecapaciteit, bepaald uit het doorstroomexperiment en de verschillende afsluitexperimenten, is in perspectief gezet met berekende waarden op basis van formules uit de literatuur. De filtratiecapaciteit geeft aan hoeveel deeltjes (en dus deeltjes gebonden nutriënten) er uit de waterkolom verwijderd worden.

Drie keer is slib uit het filter verzameld. De hoeveelheid is gekwantificeerd en vervolgens zijn de gehalten aan fosfaat en stikstof bepaald. De resultaten geven inzicht in de hoeveelheid nutriënten die worden vastgelegd in het slib. Een vergelijking van de hoeveelheid nutriënten die wordt aangevoerd met de gefilterde hoeveelheid en de hoeveelheid nutriënten die in het slib wordt vastgelegd, geeft het totale rendement van het filter weer.

Tenslotte zijn de mosselen uit het filter geanalyseerd op de accumulatie van microverontreinigingen (metalen en PAKs).

### 4.3 Resultaten van het veldexperiment (2002)

In deze paragraaf worden achtereenvolgens de resultaten van de metingen van het doorstroomexperiment en de afsluitexperimenten gepresenteerd. De nadruk wordt gelegd op de resultaten van de deeltjestellingen, die van belang zijn om de filtratiecapaciteit te bepalen. Hierbij worden ook kort de resultaten van

kleinschalige experimenten naar de filtratiecapaciteit, die ter ondersteuning van de veldexperimenten in het lab zijn uitgevoerd, besproken. Vervolgens worden de resultaten van de slibbemonsteringen besproken. Hoeveelheid geproduceerd slib en de gehalten aan nutriënten zijn van belang om de verwijdering van nutriënten te kunnen bepalen. Tenslotte wordt een overzicht gegeven van microverontreinigingen (PAKs en metalen) die zich gedurende het experiment in de mosselen van het filter hebben opgehoopt.

#### Meetschema

Het schema in Tabel 3 geeft een overzicht van welke bemonsteringen wanneer zijn uitgevoerd, hierin wordt tevens weergegeven wanneer blauwalgen zijn aangetroffen. Vanaf juni zijn ook jonge Driehoeksmosselen in het filter aangetroffen.

Tabel 3 *Meetschema 2002. Ter voorbereiding op de langdurige afsluitexperimenten is op 05/07/02 een test met afsluiting van het filter uitgevoerd.*

| Datum       | Bemonsteringen      | Blauwalgen          | Opmerkingen          |
|-------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 09/04/02    |                     |                     | Installatie          |
| 24/04/02    | X                   |                     |                      |
| 08/05/02    | X                   |                     |                      |
| 23/05/02    | X                   |                     |                      |
| 12/06/02    | X                   |                     |                      |
| 19/06/02    | X                   |                     | Slib bemonstering 1  |
| 30/06/02    |                     | Aanwezig            |                      |
| 05/07/02    | X                   | Aanwezig            | 2h-afsluitexperiment |
| 17/07/02    | X                   | Drijfslag           | Slib bemonstering 2  |
| 31/07/02    | X                   | Drijfslag           | Slib bemonstering 3  |
| 14-15/08/02 | Afsluitexperiment 1 | Opkomende Drijfslag |                      |
| 28/08/02    | X                   | Aanwezig            |                      |
| 18-19/09/02 | Afsluitexperiment 2 |                     |                      |

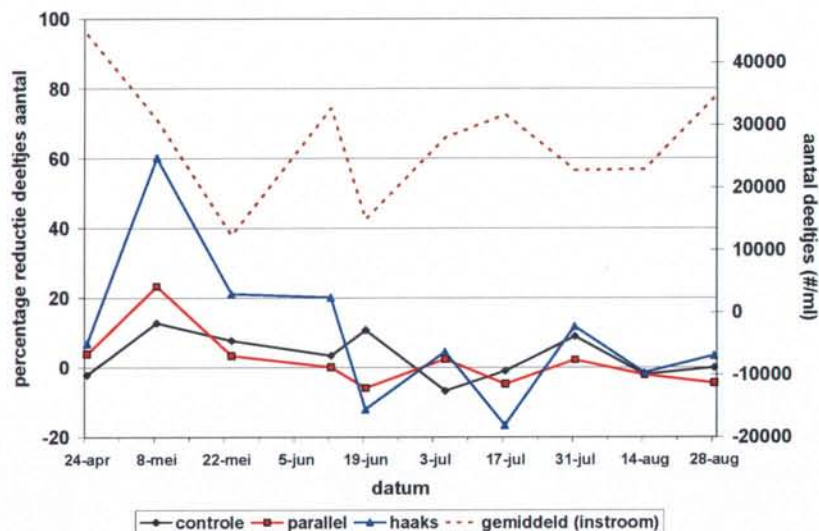
#### 4.3.1 Doorstroomexperiment

Om de twee weken is het experiment bemonsterd waarbij de metingen volgens het meetprotocol zijn uitgevoerd. Achtereenvolgens zullen de resultaten van de metingen van deeltjes (aantallen en volume), zuurstofconcentratie, nutriënten, chlorofyl-*a* en doorstroming worden besproken.

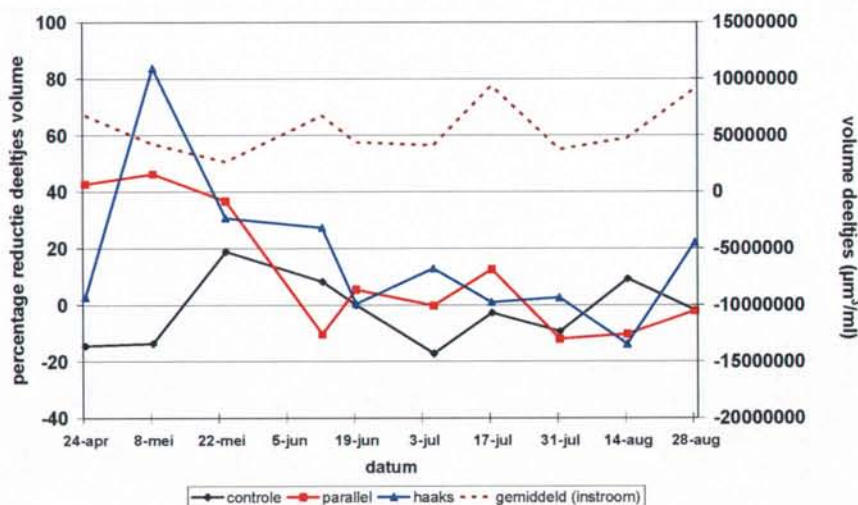
#### Deeltjestellingen

Figuur 5 en Figuur 6 geven de verschillen in deeltjesconcentraties weer tussen de instroom en de uitstroom van de compartimenten van het filter. De deeltjestellingen zijn uitgevoerd met een 'Royco particle counter'. De deeltjes worden geteld in 8 klassen tussen de 0,5 en >40 µm. Figuur 5 is gebaseerd op het totaal aantal deeltjes per monster en geeft de verwijderde hoeveelheid deeltjes in procent per compartiment weer. Dit is een maat voor de filterefficiëntie van het filter. In deze figuur is ook het gemiddelde aantal deeltjes per ml water dat het filter instroomt weergegeven. Figuur 6 presenteert op dezelfde wijze het totale volume van de verwijderde deeltjes. Hierbij is er van uitgegaan dat de deeltjes bolvormig zijn.

Ook het totaal volume van de deeltjes per ml dat het filter instroomt is hierin weergegeven.



**Figuur 5** De reductie van het aantal gefiltreerde deeltjes (in procent) gedurende de meetperiode. Op de X-as is de datum vermeld, op de linker Y-as het percentage deeltjes wat verwijderd wordt. Negatieve waarden betekenen dat het aantal deeltjes in de uitgaande waterstroom groter is dan het aantal in het influent. De stippellijn geeft het gemiddelde weer van het totaal aantal deeltjes per ml bij de instroom in de verschillende compartimenten (rechter Y-as).



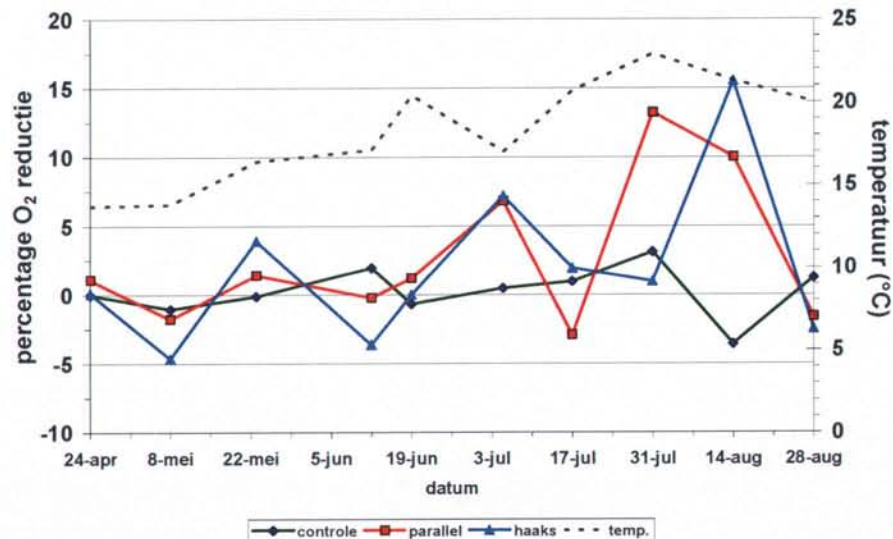
**Figuur 6** De reductie van het volume gefiltreerde deeltjes (in procent) gedurende de meetperiode. Op de X-as is de datum vermeld, op de linker Y-as het percentage deeltjes wat verwijderd wordt. Negatieve waarden betekenen dat het volume van de deeltjes in de uitgaande waterstroom groter is dan het volume in het influent. De stippellijn geeft het gemiddelde weer van het totaal volume van deeltjes bij de instroom in de verschillende compartimenten (rechter y-as).

Aanvankelijk (bemonsteringen 1-4) lijken er duidelijke verschillen te bestaan tussen de compartimenten met mosselen en de controle. Van het volume van de deeltjes wordt procentueel meer gereduceerd dan van de aantallen deeltjes wanneer het water door de compartimenten met mosselen stroomt. Dit geeft aan dat vooral de grotere fractie van de deeltjes wordt weggevangen. Bij latere bemonsteringen wordt het beeld moeilijker te interpreteren en is de uitstroom van deeltjes soms hoger dan de instroom (zie paragraaf 4.4.1). Hoewel er gemiddeld over de gehele periode een reductie van deeltjes door mosselfiltratie lijkt plaats te vinden (bij het 'haaks' compartiment iets hoger dan bij het 'parallel' compartiment) is een eenduidig beeld van de filtratiecapaciteit van de mosselen in het filter moeilijk uit deze resultaten af te leiden.

### **Zuurstofconcentratie**

De mosselen in het filter hebben door respiratie een effect op de zuurstofconcentratie. Verwacht wordt dat de concentraties in de instroom hoger zijn dan de concentraties in de uitstroom. In een optimaal werkend filter mag echter de zuurstof verlaging over filter niet zo groot zijn dat de mosselen een verminderde filtratieactiviteit vertonen. De verzadiging met zuurstof was gedurende de meetperiode altijd voldoende en zakte nooit onder de 85% (Figuur 7). De zuurstofconcentratie fluctueerde tussen de 5,5-13,8 mg/L gedurende de meetperiode met een gemiddelde van 8,6 mg/L. Het effect van een afname in beschikbaar zuurstof op de filtratie is daarom vermoedelijk gering.

Ook de temperatuur is van belang voor de filtratie van de mosselen. Tussen de 10-20°C kan een goed functioneren van de mosselen worden verwacht (Noordhuis *et al.*, 1994). Gedurende de meetperiode liep de watertemperatuur op. Eind mei werd de grens van 10 °C overschreden (Figuur 7). Boven de 10 °C worden de mosselen niet geremd in hun filtratiecapaciteit (Reeders, 1989a).



Figuur 7 Zuurstofreductie tijdens de meetseries in procent. De stippelijntje beschrijft de temperatuur.

Naast de zuurstofvraag van de mosselen heeft het verzamelde slib en alle andere organismen die het substraat bevolken ook een effect op de zuurstofconcentratie. Dit is een mogelijke verklaring voor de toenemende verschillen in de zuurstofconcentratie tussen de in- en de uitstroom over de tijd.

### Nutriëntenbepalingen

Bijlage 2 (Tabel 46) geeft een overzicht van de nutriëntenconcentraties zoals deze tijdens de tweewekelijkse bemonsteringen bepaald zijn. Hoge waarden van  $\text{NH}_4(\text{N})$  zijn een indicatie voor het ontbreken van zuurstof in het water en een hoge activiteit van mosselen. De hier gemeten waarden zijn echter als laag te beschouwen. Ook de resultaten voor  $\text{NO}_3(\text{N})$  zijn een indicatie voor een goed geoxideerd watersysteem. De waarden van  $\text{PO}_4$  (ortho-fosfaat) zijn een indicatie voor de biologische beschikbaarheid van fosfaat en men gaat ervan uit dat een reductie van deze fractie een efficiënte maatregel tegen eutrofiëring is.

De gemeten waarden kunnen slechts incidenteel als hoog beschouwd worden (23 mei, alle metingen 19 juni en 5 juli: telkens 1 meting). Bij de concentraties van  $\text{NO}_2(\text{N})$  worden geen bijzonderheden opgemerkt. De norm voor het totaal aan gebonden N (totaal N(N)) ligt bij 2,2 voor oppervlaktewater en wordt voor 17 juli altijd met maximaal een factor van 2,5 overschreden. Op 17 en 31 juli liggen de waarden lager dan in de periode ervoor en schommelen rond de normwaarde. Voor totaal fosfaat (totaal P(P)) ligt de norm bij 0,15, wat slechts éénmalig op 23 mei bereikt wordt. Gedurende de rest van de meetperiode fluctueert de concentratie tussen 0,08-0,13 (gemiddelde: 0,09) en kan ervan uit worden gegaan dat de concentraties niet hoog zijn. De grootste fractie stikstof werd aangetroffen in de opgeloste vorm, die niet door de Driehoeksmosselen gereduceerd wordt. In Tabel 4

staat samengevat wat het effect van de passage door het filter op de concentraties van gebonden en opgelost stikstof en gebonden fosfaat is.

*Tabel 4 Reductie van nutriënten in het filter gedurende de meetperiode. Negatieve waarden weerspiegelen een toename van de concentratie gemeten in de uitstroom ten opzichte van de instroom. Getallen tussen haakjes zijn de veranderde concentraties uitgedrukt in procenten. De meest rechtse kolom geeft gemiddelde reductie in procent weer.*

|                   | 23-apr-02    | 8-mei-02      | 23-mei-02     | 12-jun-02     | 19-jun-02     | 5-jul-02      | 17-jul-02     | 31-jul-02     | gemiddeld reductie (%) |
|-------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|
| <b>gebonden N</b> |              |               |               |               |               |               |               |               |                        |
| controle          | 0,21 (23,9)  | 0,00 (0,0)    | 0,00 (0,0)    | -0,09 (-0,01) | 0,60 (36,4)   | 0,10 (9,6)    | -0,27 (30,0)  | 0,00 (0,0)    | 1,3                    |
| parallel          | -0,01 (-1,5) | 0,10 (11,5)   | 0,10 (11,5)   | -0,10 (-11,5) | 0,30 (28,6)   | 0,20 (18,5)   | 0,08 (7,0)    | -0,19 (-19,6) | -2,0                   |
| haaks             | -0,01 (-1,2) | 0,00 (0,0)    | 0,00 (0,0)    | 0,01 (1,1)    | 1,02 (49,8)   | -0,19 (121,6) | 0,13 (13,0)   | 0,09 (10,5)   | <b>4,1</b>             |
| <b>opgelost N</b> |              |               |               |               |               |               |               |               |                        |
| controle          | 0,08 (1,8)   | 0,10 (3,0)    | 0,10 (2,5)    | -0,01 (-0,4)  | 0,1 (2,8)     | 0,3 (17,4)    | -0,03 (-2,7)  | -0,1 (-7,0)   | <b>2,2</b>             |
| parallel          | 0,11 (2,2)   | 0,10 (3,0)    | 0,11 (2,7)    | 0,0 (0,0)     | 0,0 (0,0)     | -0,2 (-15,2)  | -0,18 (-17,0) | -0,41 (-28,7) | -6,6                   |
| haaks             | -0,19 (-4,1) | 0,10 (2,9)    | 0,10 (2,5)    | -0,01 (-0,4)  | -1,8 (-56,0)  | -0,21 (-10,9) | -0,23 (-23,0) | -0,21 (-13,6) | -9,4                   |
| <b>gebonden P</b> |              |               |               |               |               |               |               |               |                        |
| controle          | 0,02 (20,0)  | -0,05 (-83,3) | -0,02 (-27,3) | 0,02 (-20,0)  | -0,01 (-12,5) | -0,01 (-11,1) | -0,01 (-12,5) | -0,01 (-11,1) | -14,7                  |
| parallel          | 0,03 (27,3)  | -0,01 (-14,3) | -0,02 (-18,2) | -0,02 (-20,0) | -0,01 (-12,5) | 0,0 (0,0)     | 0,0 (0,0)     | -0,02 (-28,6) | -8,3                   |
| haaks             | 0,00 (0,0)   | 0,0 (0,0)     | -0,04 (-36,4) | 0,2 (25,0)    | -0,01 (-11,1) | -0,01 (-12,5) | 0,0 (0,0)     | 0,03 (33,3)   | <b>-0,2</b>            |

De fractie gebonden stikstof wordt gemiddeld licht gereduceerd in het haakse compartiment. Voor de fractie gebonden fosfaat geldt, dat slechts de in de controle gemeten toename van fosfaat door de activiteit van de mosselen tegengewerkt wordt. Een eenduidig beeld van het effect van de mosselen op de concentraties van nutriënten in het water kan echter aan de hand van de resultaten niet worden gegeven.

### Chlorofyl-*a*

Het meten van chlorofyl-*a* concentraties betekent een aanvulling op de deeltjestellingen omdat ook een reductie in deze concentratie een reductie van (algen)deeltjes betekent, hetgeen duidt op filteractiviteit bij de mosselen. Uit Tabel 5 valt af te lezen, dat de chlorofyl-*a* gehalten in de twee compartimenten met mosselen gemiddeld met 5,5 tot 11,1 percent gereduceerd worden. Dit is vergelijkbaar met de gemiddelde waarden bepaald voor de reductie van het aantal deeltjes. Ook hier is echter het beeld tussen concentraties in de instroom en uitstroom verre van eenduidig.

*Tabel 5 Gemiddelde chlorofyl-a reductie (in procent) gedurende de meetperiode. De waarden zijn berekend op basis van de concentratieverschillen tussen de in- en de uitstroom van het filter. Negatieve getallen geven een toename aan, positieve waarden een reductie.*

| Datum             | Percentage concentratie chlorofyl-a gereduceerd |             |            |
|-------------------|---|-------------|------------|
|                   | Controle  | Parallel    | Haaks      |
| 24/04/02          | 2,2   | 9,7         | 3,2        |
| 08/09/02          | -7,6  | 44,1        | 29,6       |
| 23/05/02          | 5,4   | -15,3       | -8,9       |
| 12/06/02          | -2,5  | -11,6       | -0,4       |
| 19/06/02          | -1,6  | 33,4        | -6,6       |
| 05/07/02          | -13,2   | 13,7        | 24,6       |
| 17/07/02          | 2,5   | -1,0        | -0,3       |
| 31/07/02          | 12,6  | 14,4        | 7,2        |
| 14/08/02          | 3,8   | 11,6        | 3,5        |
| 28/08/02          | 5,1   | 11,6        | 3,5        |
| <i>gemiddelde</i> | <i>0,7</i>                                      | <i>11,1</i> | <i>5,5</i> |

### Stroomsnelheid

De stroomsnelheid in de verschillende compartimenten van het filter is gemeten met behulp van een dobber. De tijd die deze dobber, die voor slechts enkele millimeters boven het wateroppervlak uitsteekt, nodig had om door het gehele compartiment te drijven werd genoteerd. Tijd en afgelegde afstand zijn omgerekend naar een stroomsnelheid. De stromingsmetingen worden gebruikt om de verblijftijd van het water in het filter te bepalen en om de doorstroming van de verschillende compartimenten te vergelijken (Tabel 6).

*Tabel 6 Stroomsnelheden (m/sec) in de Steenbergse Vliet (28/08/02)*

| Compartiment | Stroomsnelheid (m/sec) |                    |
|--------------|------------------------|--------------------|
|              | Gemiddeld              | Standaardafwijking |
| Controle     | 0,018                  | 0,006              |
| Parallel     | 0,019                  | 0,005              |
| Haaks        | 0,024                  | 0,002              |

### 4.3.2 Afsluitexperimenten

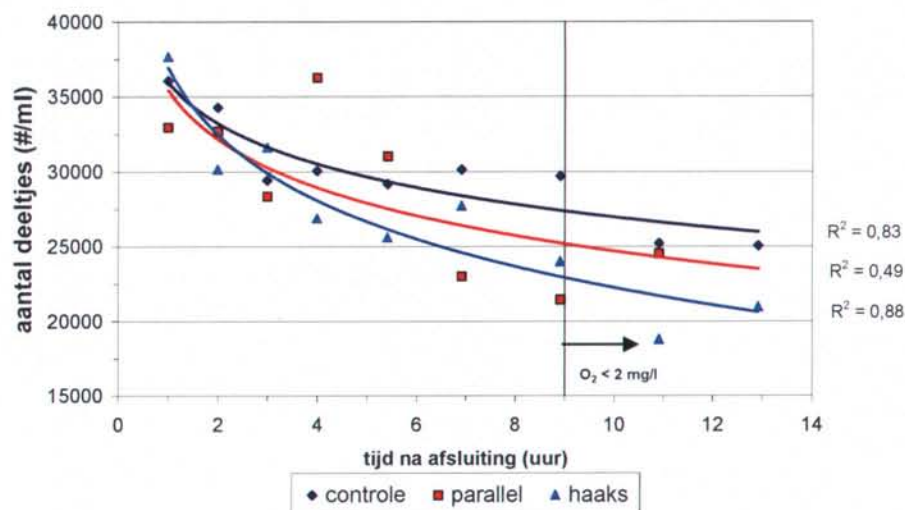
In 2002 zijn twee afsluitexperimenten uitgevoerd. Elk experiment bestaat uit een reeks opeenvolgende afsluitingen van het filter gedurende een aantal uren. Hierbij zijn regelmatig watermonsters voor analyse genomen. Verwacht werd dat de deeltjesconcentratie in de compartimenten door mosselfiltratie af zou nemen. Uit de afname zou vervolgens de filtratiecapaciteit kunnen worden afgeleid. Omdat overdag sprake was van veel verstoring van het experiment door passerende boten (golven overspoelen de drie compartimenten, waardoor deze niet strikt gescheiden bleven en waardoor menging van extern water met water binnen het filter plaatsvond), is besloten het experiment ook 's nachts uit te voeren. De resultaten van deze onverstoordde metingen laten zien dat de afname van de deeltjesconcentratie in het controlecompartiment minder is dan de afname in de



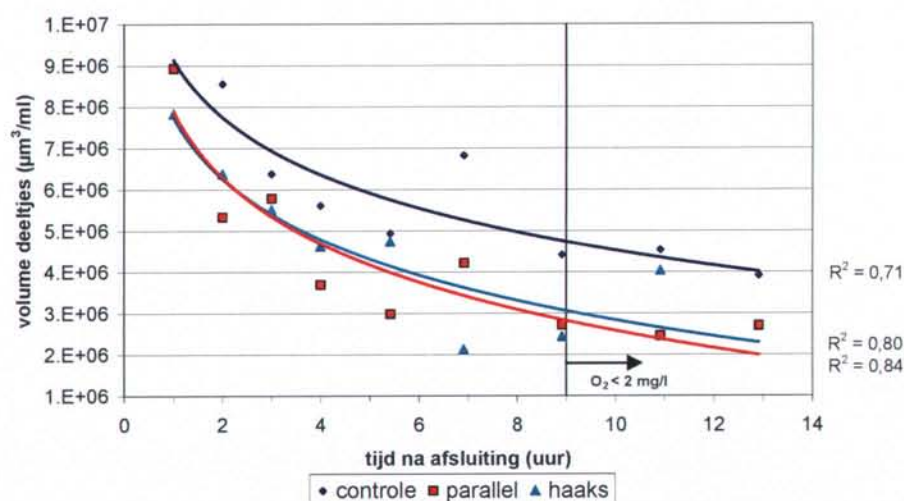
compartimenten met mosselen. Dit geeft aan dat de reductie niet slechts een bezinking van de deeltjes is maar het gevolg van actieve verwijdering door mosselfiltratie. De hier gepresenteerde resultaten zijn een representatieve steekproef van deze metingen. Besproken worden achtereenvolgens veranderingen in concentraties van deeltjes (verwijderd aantal en volume), chlorofyl-*a* en, zuurstof.

### Deeltjestellingen

Gedurende de afsluitexperimenten is het filter afgesloten en zijn periodiek watermonsters genomen en waterkwaliteitsparameters (pH, zuurstof concentratie en watertemperatuur) gemeten. Onderstaande figuren geven de resultaten weer van de deeltjestellingen (Figuur 8) en deeltjes volume bepalingen (Figuur 9) gedurende afsluitexperiment I, periode II (20:30-02:30 uur). Na negen uur afsluiting is het filter geopend omdat de zuurstofconcentratie te laag (<20%) werd. De verschillen in het concentratieverloop in de compartimenten is met behulp van een gefitte trendlijn (exponentiële fit) benadrukt. Regressiecoëfficiënten laten zien hoe goed de meetwaarden weergegeven kunnen worden door de veronderstelde exponentiële afname.



**Figuur 8** Afname van het aantal deeltjes gedurende het afsluitexperiment. De verschillen in het concentratie verloop in de compartimenten is met behulp van een gefitte trendlijn (exponentiële fit) benadrukt. Regressiecoëfficiënten laten zien hoe goed de meetwaarden weergegeven kunnen worden door de veronderstelde exponentiële afname.



**Figuur 9** *Afname van het volume van de deeltjes gedurende het afsluitexperiment. De verschillen in het concentratie verloop in de compartimenten is met behulp van een gefitte trendlijn (exponentiële fit) benadrukt. Regressiecoëfficiënten laten zien hoe goed de meetwaarden weergegeven kunnen worden door de veronderstelde exponentiële afname.*

Uit de resultaten blijkt dat zowel het aantal deeltjes (Figuur 8) als het volume van de deeltjes (Figuur 9) in alle compartimenten afneemt gedurende de afsluitperiode. De afname is sterker in de compartimenten met mosselen dan in het controle compartiment. Het verschil wordt pas goed zichtbaar nadat het filter ca. twee uur afgesloten is. Verondersteld kan worden dat de verwijdering van deeltjes gedurende de eerste twee uur voornamelijk het resultaat is van bezinking van de zware fractie en opdrijving van blauwalgen (passief) en dat pas na deze periode de verwijdering door de mosselen zichtbaar wordt (actief). De afnamesnelheden van de concentratie deeltjes in de verschillende compartimenten maken het mogelijk een inschatting te maken van de filtratiecapaciteit van de mosselen in het filter (zie 4.4).

### Chlorofyl

Door de hoge concentratie van blauwalgen (drijfslaag en grote vlokken in het water) was het niet mogelijk de chlorofyl-*a* concentratie vast te stellen. Opvallend was echter de zichtbaarheid van het effect van de mosselen op de algenconcentratie in het filter. Na afloop van de tweede (nachtelijke) afsluiting was duidelijk een reductie van de algen in de compartimenten met mosselen te zien ten opzichte van het controlecompartiment. Dat lijkt erop te duiden dat de mosselen een reducerend effect hebben op de hoeveelheid algenkolonies.

### Zuurstof

De zuurstofconcentratie verandert sterk tijdens het experiment. Uit de metingen in

het controlecompartiment blijkt dat niet alleen de mosselen zelf zuurstof verbruiken maar ook de overige macrofauna dat in in het filter verblijft (zeer veel gammariden en enkele kleine vissen). Lage zuurstofconcentraties (<25%) hebben een negatieve invloed op de fysiologie van de mossel (Aldridge *et al.*, 1995) en kunnen de filtratie beïnvloeden. Daarom is het filter geopend wanneer de zuurstofverzadiging lager werd dan 20%. In Tabel 7 is een voorbeeld gegeven van de afname van zuurstof in de afzonderlijke compartimenten tijdens afsluiting.

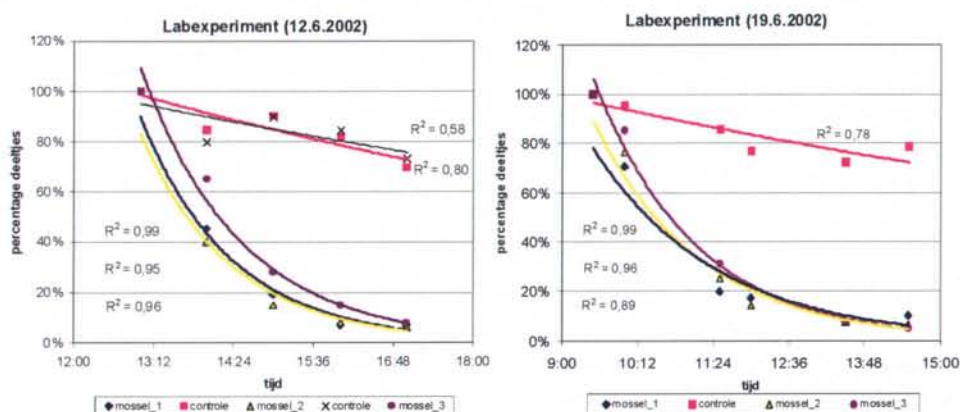
Tabel 7 *Afname in zuurstofconcentratie (in mg/L) gedurende een afsluitperiode van acht uur. Het aantal uren na afsluiting is weergegeven in de eerste rij. De getallen tussen haakjes geven de percentages zuurstofverzadiging weer.*

| afgesloten: | 0 uur        | 2 uur        | 4 uur       | 6 uur       | 8 uur       |
|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Controle    | 8,7 (101,0%) | 8,7 (101,0%) | 5,6 (65,6%) | 4,2 (48,9%) | 2,9 (32,8%) |
| Parallel    | 8,7 (101,0%) | 6,7 (78,9%)  | 3,6 (42,9%) | 2,3 (27,9%) | 1,3 (13,4%) |
| Haaks       | 8,7 (101,0%) | 7,4 (86,8%)  | 2,7 (32,6%) | 1,7 (21,0%) | 1,3 (14,4%) |

### 4.3.3 Kleinschalige filterexperimenten

Om de resultaten van de veldexperimenten te ondersteunen zijn er een drietal kleinschalige experimenten uitgevoerd naar de filtratiecapaciteit van de mosselen in het water van de Steenbergse Vliet. Tweemaal is een experiment met enkele mosselen uitgevoerd in bekeerglazen. Eénmaal is een experiment uitgevoerd met een substraatmat uit het filter in een mesocosm.

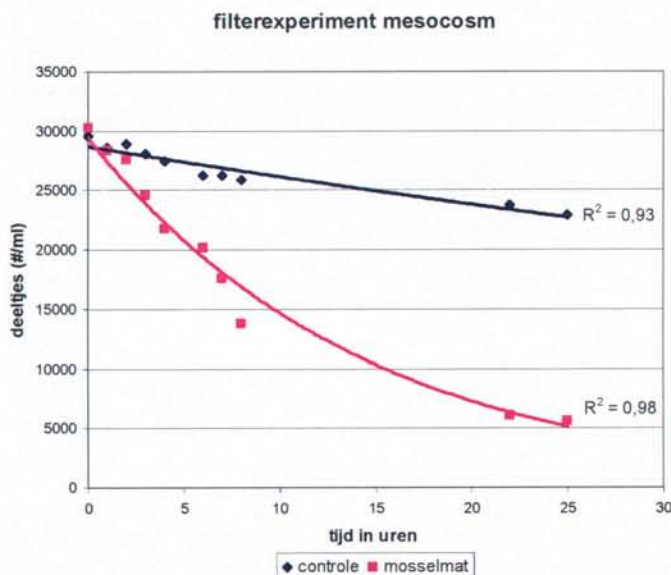
Voor het de experimenten in het laboratorium is in bekeerglazen van 2 liter ongeveer 30 g mosselen in gezet ( $\pm 25$  individuen). Het startvolume bedroeg 2000



Figuur 10 *Reductie van het aantal deeltjes in het water van de Steenbergse Vliet gedurende de twee labexperimenten in bekeerglazen met mosselen uit het filter. De lijnen laten de gefitte exponentiële afname van deeltjes zien.  $R^2$  is de regressiecoëfficiënt en laat zien hoe goed de meetwaarden de veronderstelde exponentiële deeltjes afname in de tijd weergeven.*

ml, maar is door monsternamen gereduceerd. Figuur 10 laat de reductie van het aantal deeltjes ten opzichte van het totaal aantal aanwezige deeltjes bij aanvang van het experiment zien.

Een vergelijkbaar filtratie-experiment is uitgevoerd in een groter volume (500 liter) met de mosselen zoals deze in het filter op een substraat aanwezig zijn. Eén mat met hierop 700 gram mosselen is uit het filter gehaald en in een deeltjes rijke mesocosm uitgehangen. Aanvankelijk zijn elk uur (en later met een groter tijdsinterval), gedurende 31 uur, watermonsters uit deze mesocosm genomen en op deeltjesaantallen geanalyseerd. Figuur 11 laat het resultaat zien van de metingen. Tevens is hierin de exponentiële afname van deeltjes gefit.



*Figuur 11 Reductie van het aantal deeltjes in het water gedurende het filtratie-experiment in de mesocosm met mosselen uit de Steenbergse Vliet. De lijn laat de gefitte exponentiële afname van deeltjes zien.  $R^2$  is de regressiecoëfficiënt en laat zien hoe goed de meetwaarden de veronderstelde exponentiële deeltjesafname in de tijd weergeven.*

Zowel de laboratoriumexperimenten in bekerglazen als het mesocosmexperiment laten een sterke afname van de deeltjes in het water met mosselen ten opzichte van de afname in het water zonder mosselen zien. Uit beide experimenten kan een filtratiecapaciteit worden bepaald (paragraaf 4.4.).

#### 4.3.4 Slibproductie en -samenstelling

Uit het filter is driemaal (19 juni, 17 en 31 juli 2002) het geproduceerde slib (zie box 2) verwijderd en geanalyseerd. Foto 11 geeft een indruk van de zichtbare verschillen tussen het gedroogde slib van de drie compartimenten. Het slib uit de controle is gladder van structuur dan dat uit de compartimenten met mosselen. Uit

Figuur 12 blijkt dat de totale hoeveelheid slib uit de controle kleiner is dan uit de andere compartimenten. De mosselen filteren actief de kleine deeltjes uit het water, waardoor het aandeel van kleine deeltjes in het door de mosselen geproduceerde slib hoger is.

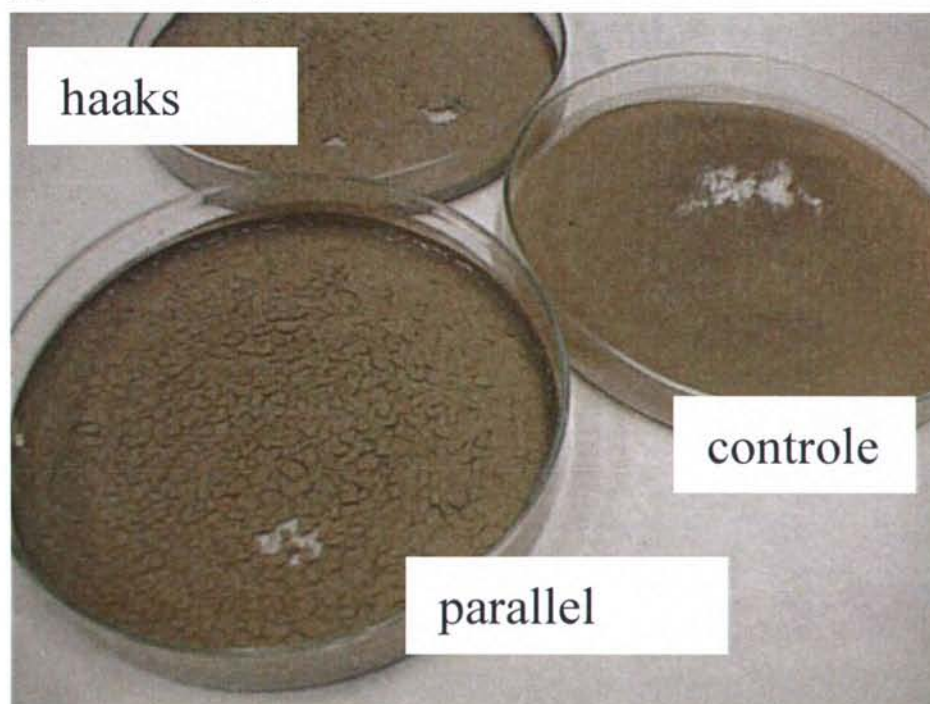
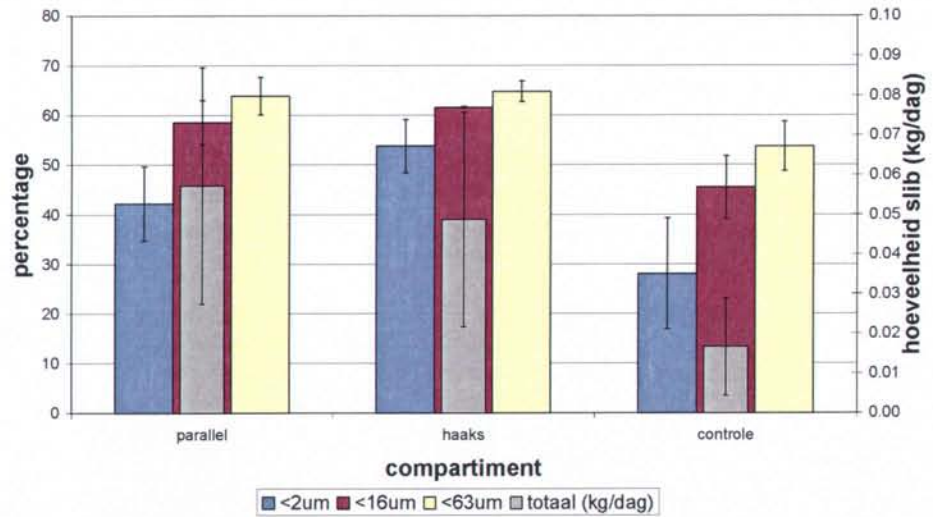


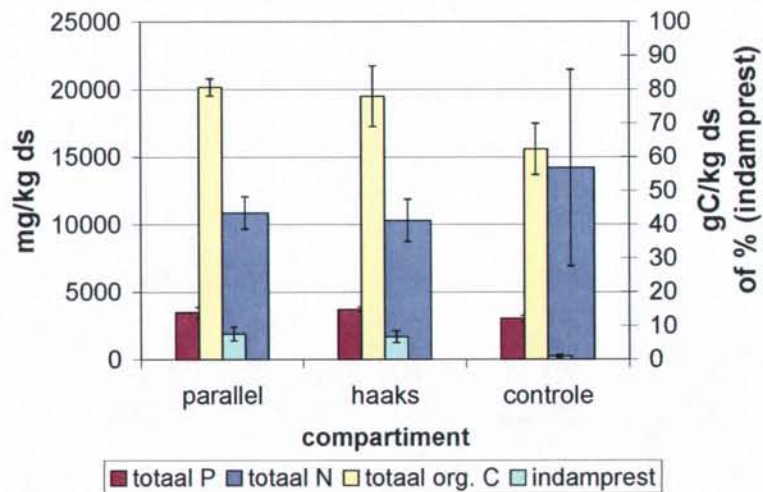
Foto 11 Gedroogde slibmonsters (31/07/02). Het is duidelijk te zien dat de consistentie van het slib afkomstig uit het controlecompartiment behandeling zonder mosselen verschilt van het slib uit de andere twee compartimenten (foto: TNO-MEP).

De hoeveelheid slib bemonsterd uit het filter is omgerekend naar een slibproductie in kg slib per dag. Figuur 12 laat zien dat de totale slibproductie in de compartimenten met mosselen ongeveer 3 maal driemaal zo hoog is dan in het controlecompartiment.



Figuur 12 De gemiddelde slijbproductie (kg/dag) en korrelgrootte fracties(%) zoals gemeten op basis van de drie bemonsteringen.

Naast de verschillen in geproduceerde hoeveelheid slijb blijkt uit Figuur 13 dat de samenstelling van het slijb verschilt tussen controle en compartimenten met mosselen. De gehalten van totaal fosfaat zijn vergelijkbaar terwijl de gehalten totaal stikstof in de compartimenten met mosselen lager zijn dan in de controle. Het gehalte totaal organisch koolstof daarentegen is hoger van het slijb afkomstig uit de mosselcompartimenten.



Figuur 13 Samenstelling van de verzamelde slijb per compartiment. Weergegeven zijn de gemiddelde waarden van de analyses van het slijb plus standaard deviaties. Het is te zien dat de samenstelling van het slijb in het controle compartiment verschilt van die in de andere twee compartimenten. Eenheden zijn: totaal P, totaal N: mg/kg droge stof (ds); totaal org. C: gC/kg ds; indamprest: procent.

### 4.3.5 Opname van verontreinigingen

Het weefsel van de mosselen die in 2002 zijn uitgehangen in het filter zijn geanalyseerd op de aanwezigheid van contaminanten. Tabel 8 laat zien dat er nauwelijks accumulatie van polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAKs) heeft plaatsgevonden. Metalen daarentegen zijn wel in verhoogde concentraties aangetroffen. Met name koper, cadmium en nikkel zijn sterk verhoogd ten opzichte van het uitgangsmateriaal.

Tabel 8 *Accumulatie van polycyclische aromatische koolwaterstoffen en metalen in Dreissena weefsel gedurende 6 maanden in de Steenbergse Vliet. In de laatste kolom is aangegeven of het een verhoging of een verlaging ten opzichte van de controle betreft. - = verlaging; + = verhoging; ++ = sterke verhoging.*

| Parameter:   | Controle   | Experiment | X keer controle | +/- |
|--|------------|------------|-----------------|-----|
| <i>Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (op basis van vetgehalte)(mg/kg)</i> |            |            |                 |     |
| naftaleen  | <1,65      | <1,86      | >/=0,21         | +   |
| acenaftyleen   | <1,65      | <1,86      | >/=0,21         | +   |
| acenaftaleen   | <1,65      | <1,94      | >/=0,29         | +   |
| fluoreen   | <1,65      | <1,86      | >/=0,21         | +   |
| fenanthreen  | 3,7        | 6,1        | 1,6             | ++  |
| anthraceen   | <0,33      | <0,37      | >/=0,04         | +   |
| flurantheen  | 1,7        | 1,4        | 0,8             | -   |
| pyreen   | 1          | 1,5        | 1,5             | ++  |
| benz(a)anthraceen  | 0,36       | 0,42       | 1,2             | ++  |
| cryseen  | 0,7        | 0,67       | 1,0             | ++  |
| benzo(b)fluorantheen   | <0,33      | 0,44       | 0,1             | +   |
| benzo(k)fluorantheen   | <0,33      | <0,37      | >/= 0.04        | +   |
| benzo (a)pyreen  | <0,33      | <0,37      | >/= 0.04        | +   |
| dibenz(a,h)anthraceen  | <0,33      | <0,37      | >/= 0.04        | +   |
| benzo(ghi)peryleen   | <0,33      | <0,37      | >/= 0.04        | +   |
| indeo(1,2,3cd)pyreen   | <0,33      | <0,37      | >/= 0.04        | +   |
| <i>Metalen (op basis van drooggewicht)(mg/kg)</i>                                  |            |            |                 |     |
| arseen   | 4          | 13         | 3,3             | ++  |
| <b>cadmium</b>   | <b>0,2</b> | <b>3</b>   | <b>15,0</b>     | ++  |
| chromium   | 3,1        | 10         | 3,2             | ++  |
| <b>koper</b>   | <b>6,7</b> | <b>49</b>  | <b>7,3</b>      | ++  |
| kwik   | 0,07       | 0,3        | 4,3             | ++  |
| lood   | <1,3       | 5,5        | >/= 4.2         | ++  |
| <b>nikkel</b>  | <b>7,2</b> | <b>140</b> | <b>19,4</b>     | ++  |
| zink   | 190        | 420        | 2,2             | ++  |

### 4.4 Analyse en discussie

Het experiment met het prototype mosselfilter was gericht op het verkrijgen van inzicht in de bijdrage van mosselen in een technisch filter op de reductie van de nutriëntenvrucht naar het Volkerak. De filtratiecapaciteit geeft inzicht in het functioneren van de mosselen in het filter en de daarmee samenhangende verwijdering van deeltjes (en gebonden nutriënten) uit het water. De slibproductie

en -samenstelling geeft vervolgens weer welke fractie van de gefilterde deeltjes en deeltjes gebonden nutriënten vastgelegd wordt in slib. De duurzaamheid van een dergelijk filter kan worden ingeschat met behulp van de opname van contaminanten in het mosselweefsel. Achtereenvolgens zullen de drie genoemde factoren worden bediscussieerd. Deze discussie zal leiden tot aanbevelingen voor het experiment van 2003.

#### 4.4.1 Filtratiecapaciteit

Het experimentele filter was zo ingericht dat verschillen tussen concentraties in de instroom en de uitstroom gerelateerd konden worden aan de filtratiecapaciteit van de mosselen. Echter, de resultaten van de metingen tijdens het doorstroomexperiment van het filter leverden geen uniform beeld op van reductie over het filter van het aantal deeltjes, de chlorofyl-*a*, zuurstof en nutriënten concentratie (paragraaf 4.3.1.) Gemiddeld over alle metingen aan het filter tijdens doorstroming, is er voor gebonden N, gebonden P, chlorofyl-*a* en deeltjes echter wel een positief effect van de mosselen in het filter ten opzichte van de controle te zien. Daarnaast heeft dit experiment informatie opgeleverd over de ontwikkeling van mosselen in een semi-afgesloten systeem, de productie van slib en de inrichting van een dergelijk filter.

Ondanks dat er tijdens de doorstroomexperimenten geen filtratiecapaciteit bepaald kon worden gaf de slibproductie, het feit dat de mosselen in leven blijven en de aanwas van mosselen in filter aan, dat de mosselen hun filterwerking uitvoeren. Deze factoren zijn allen gerelateerd aan een goede mosselconditie.

De filterwerking van de mosselen is ook aangetoond door de resultaten van de deeltjesanalyses van de afsluitexperimenten. Uit deze resultaten kan een filtratiecapaciteit worden berekend. Verondersteld wordt dat de afname van de deeltjes in het parallelle en het haakse compartiment veroorzaakt wordt door filtratie van de mosselen (actief) en bezinking (passief) terwijl de afname in de controle veroorzaakt wordt door alleen bezinking.

Het simulatieprogramma ModelMaker (Cherwell Scientific, 1993) is gebruikt om uit de verkregen resultaten de filtratiecapaciteit per hoeveelheid mosselen te berekenen. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de filtratiecapaciteit van de mosselen constant is en het water in het filter constant volledig gemengd is. Hierdoor volgt de deeltjesconcentratie een eerste orde afnameproces. Formule 1 is gebruikt om de hoeveelheid deeltjes in het filter te beschrijven.



$$\frac{dN}{dt} = -(Q * n) * \frac{N}{V} \quad \text{Formule 1}$$

met :

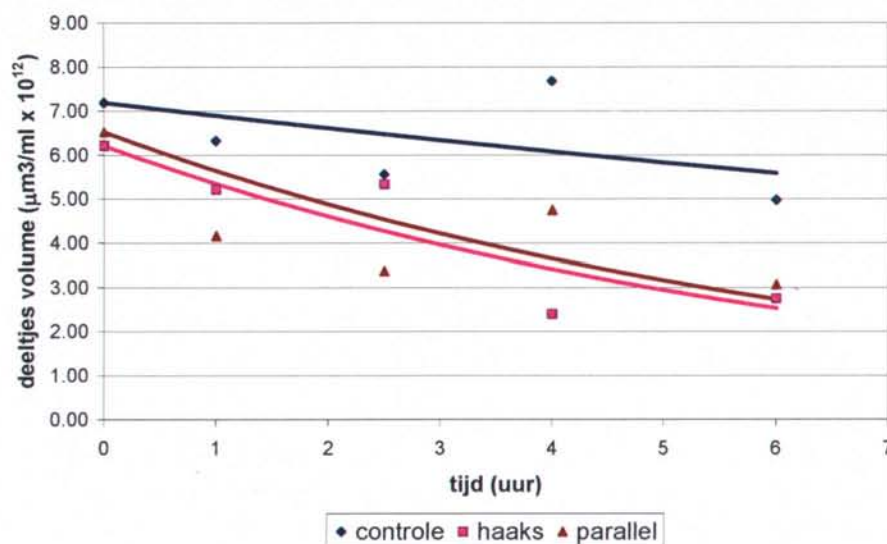
N = totaal aantal deeltjes in V

Q = filtratiecapaciteit (liter per uur per kg mosselen (= ml per uur per g))

n = hoeveelheid mosselen (g)

V = watervolume

De hoeveelheid mosselen in de compartimenten van het filter bedroeg bij inzetten 8 kg. Na afronding van het experiment zijn de hoeveelheid mosselen in het filter per compartiment nogmaals bepaald en werd 5,6 kg mossel levend teruggevonden. Deze waarde is in formule 1 voor n gebruikt. Het totale watervolume (V) per compartiment is 1125 liter. Figuur 14 geeft het resultaat van de fit van formule 1 op de resultaten weer.



Figuur 14 Gefitte filtratiecapaciteit op de resultaten van een afsluitexperiment (formule 1).

De afname van de deeltjesconcentratie in het controlecompartiment wordt toegeschreven aan passieve bezinking. Rekening houdend met deze bezinking en de spreiding in de gevonden resultaten is een gemiddelde filtratiecapaciteit van 21,2 liter per uur per kg mosselen bepaald.

Deze berekende filtratiecapaciteit is vergeleken met verschillende theoretisch en praktisch vastgestelde waarden voor de filtratiecapaciteit in het water van de Steenbergse Vliet. In Noordhuis *et al.* (1992 en 1994) en Reeders *et al.* (1993) wordt een aantal empirische formules gegeven waarmee de filtratiecapaciteit van Driehoeksmosselen berekend kan worden. De opgegeven filtratiecapaciteit wordt afhankelijk gesteld van de schelpenlengte van de Driehoeksmosselen en van het zwevend stof gehalte.

Voor de relatie tussen de zwevend stof concentratie en de filtratiecapaciteit worden een tweetal formules gegeven. Formule 2 geldt voor temperaturen hoger dan 10 °C en voor schelpen met een lengte van 22 mm. Formule 3 geldt ook voor temperaturen hoger dan 10 °C, maar voor een gemiddelde mossel uit een natuurlijke populatie. Omdat in dit rapport ook uit wordt gegaan van een gemiddelde mossel zal voor het berekenen van de filtratiecapaciteit vooral gebruik worden gemaakt van formule 3

$$Q = 187,1 * \exp(-0,037 * ZS) \quad \text{Formule 2}$$

$$Q = 97,8 * \exp(-0,037 * ZS) \quad \text{Formule 3}$$

met:

Q = filtratiecapaciteit in ml per mossel per uur;

ZS = de zwevend stof concentratie in mg/l.

De relatie tussen de schelpenlengte en filtratiecapaciteit wordt beschreven door de formule 4

$$Q = 15,43 / (0,293 + 52,38 * \exp(-0,367 * L)) \quad \text{Formule 4}$$

met:

Q = filtratiecapaciteit in ml per mossel per uur;

L = schelp lengte in mm.

Metingen van de zwevend stof concentraties worden periodiek in de monding van de Steenbergse Vliet uitgevoerd door het RIZA (DONAR database). Deze gegevens zijn beschikbaar vanaf 1990. Voor de in dit rapport gemaakte berekeningen van de filtratiecapaciteit worden de gegevens van januari tot en met juni 2002 gebruikt. Tabel 9 geeft een overzicht van de gegevens die zijn gebruikt om voor verschillende seizoenen de filtratiecapaciteit te bepalen:

Tabel 9 Gegevens gebruikt voor de berekening van de filtratiecapaciteit.

| Overzicht van de gegevens voor de berekeningen |                  |                |
|--|------------------|----------------|
| Natgewicht per mossel                          | 1,2 g per mossel | eigen metingen |
| Lengte van de gemiddelde mossel in het filter  | 15 mm            | eigen metingen |
| Gemiddelde zwevend stof concentratie (mg/L)    |                  |                |
| Voorjaar                                       | 6,6              | DONAR          |
| Zomer  | 4,8              | DONAR          |
| Herfst   | 13,5             | DONAR          |
| Winter   | 5,8              | DONAR          |

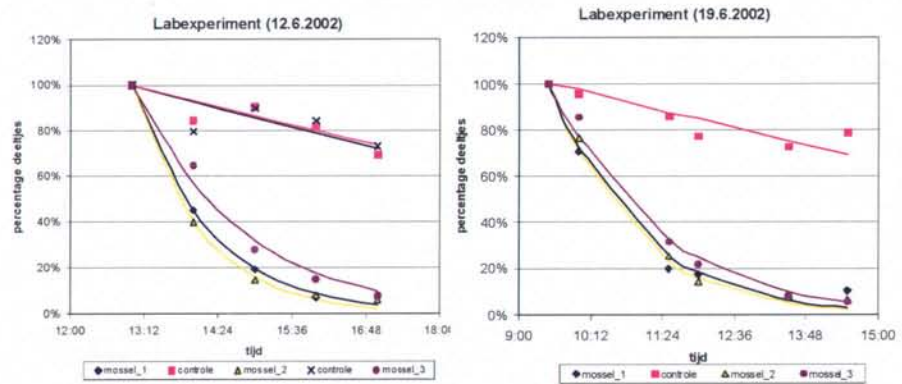
Tabel 10 geeft een overzicht van de met behulp van drie formules berekende filtratiecapaciteiten per kilogram mossel.

Tabel 10 Overzicht van berekende filtratiecapaciteiten in liter per uur per kg mosselen.

| Formule op basis van  |          | Filtratiecapaciteit<br>(liter per uur per kg) |
|---|----------|---|
| Zwevendstof<br>(formule 2; mossel van 22 mm)                    | Voorjaar | 122,1   |
|   | Zomer    | 130,8   |
|   | Herfst   | 94,6  |
|   | Winter   | 126,0   |
| Zwevendstof<br>(formule 3; gemiddelde mossel uit een populatie) | Voorjaar | 63,8  |
|   | Zomer    | 68,4  |
|   | Herfst   | 49,5  |
|   | Winter   | 65,9  |
| Lengte<br>(formule 4; gemiddelde mossel in het filter )         |          | 25,4  |

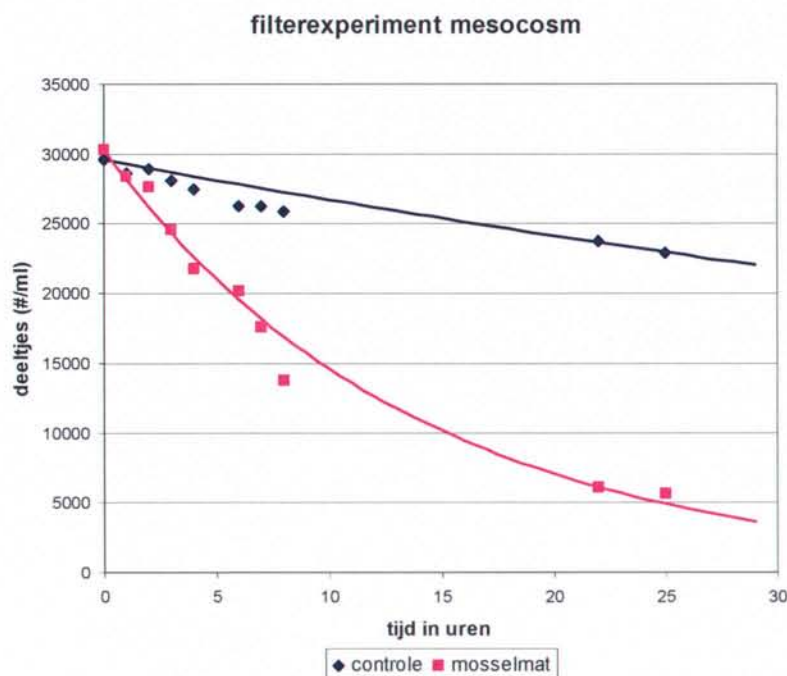
De gevonden berekende waarden zijn hoger dan de waarde berekend uit de resultaten van het afsluitexperiment. Alleen de waarde berekend uit de lengte van de gemiddelde mossel in het filter (15mm; formule 4) komt redelijk overeen met de experimenteel bepaalde waarde.

Het simulatieprogramma ModelMaker (Cherwell Scientific, 1993) is wederom gebruikt om formule 1 toe te passen op de gevonden meetwaarden van de kleinschalige filtratie-experimenten en om zo de filtratiecapaciteit per hoeveelheid mosselen te berekenen. Per bekersglas zijn ongeveer 30 g mosselen ingezet. Rekeninghoudend met de bezinking van deeltjes in de controle en de spreiding in de gevonden resultaten tussen de twee experimenten en de ingezette duplo's, is een filtratiecapaciteit van 39,7 liter per uur per kg mosselen bepaald. Deze waarde ligt aanzienlijk hoger dan de waarde van 21,1 zoals deze is afgeleid uit de resultaten van het afsluitexperiment. Wanneer in formule 3 voor de zwevend stof concentratie 19,4 mg/L wordt ingevuld, wordt dezelfde filtratiecapaciteit berekend. Figuur 15 laat de gefitte formule 1 op de gereduceerde deeltjes concentraties van de experimenten zien.



Figuur 15 Resultaat van de laboratorium experimenten waaruit een gemiddelde filtratiecapaciteit van 39,7 liter per uur per kg mosselen bepaald is.

Een vergelijkend mesocosm experiment is uitgevoerd in een groter volume met de mosselen zoals deze in het filter op een filtermat aanwezig zijn. Ook op basis van de resultaten van dit experiment is met ModelMaker (Cherwell Scientific, 1993) een filtratiecapaciteit vastgesteld. Rekeninghoudend met de bezinking van deeltjes in de controle en de spreiding in de gevonden resultaten is een filtratiecapaciteit van 44,1 liter per uur per kg mosselen bepaald. Deze waarde is vergelijkbaar met de filtratiecapaciteit vastgesteld uit de resultaten van het lab experiment. Wanneer in formule 3 voor de zwevend stof concentratie 16,6 mg/L wordt ingevuld, wordt dezelfde filtratiecapaciteit berekend. De waarde ligt wederom aanzienlijk hoger dan is vastgesteld in het afsluitexperiment. Figuur 16 laat het resultaat zien van de gefitte formule 1 op de meetresultaten van het mesocosmexperiment.



Figuur 16 Resultaat van het mesocosmexperiment waaruit de filtratiecapaciteit van 44,1 liter per uur per kg mosselen bepaald is.

Uiteindelijk is op zes verschillende manieren gebruikmakend van de experimentele resultaten en literatuur waarden de filtratiecapaciteit van de mosselen bepaald. Alleen bij de zwevend stof formules (2 en 3) is er onderscheid te maken in de variatie van de filtratiecapaciteit per seizoen. Voor de overige methoden is een constante waarde genomen. De bepaalde filtratiecapaciteiten zullen worden gebruikt om de afname van nutriënten middels mosselfiltratie te bepalen. Een overzicht van de gevonden waarden staat in Tabel 11. Op bijlage 3 wordt een overzicht gegeven van verschillende gerapporteerde waarden voor de filtratiecapaciteit.

Tabel 11 Filtratiecapaciteit van de mosselen op basis van vier verschillende formules  
Bij de zwevend stof formules (2 en 3) is er onderscheid te maken in de variatie van de filtratiecapaciteit per seizoen.

| Gegevens                      | Formule | Filtratiecapaciteit    |
|-------------------------------|---------|------------------------|
|                               |         | (liter per uur per kg) |
| Laboratorium experiment       | 1       | 39,7                   |
| Afsluitexperiment in de Vliet | 1       | 21,1                   |
| Mesocosm experiment           | 1       | 44,1                   |
| Zwevend stof (DONAR)          | 2       | 94,6 – 126,0           |
| Zwevend stof (DONAR)          | 3       | 49,5 – 68,4            |
| Lengte (15 mm)                | 4       | 25,4                   |

Opvallend is de hoge waarde die wordt berekend met formule 2 waarin gebruik wordt gemaakt van het gehalte zwevend stof. Deze formule veronderstelt (evenals formule 3) dat de filtratiecapaciteit exponentieel gerelateerd is aan de hoeveelheid zwevend stof in het water. Bij afnemende zwevend stof concentraties neemt de filtratiecapaciteit exponentieel toe. Om deze veronderstelling te toetsen is deze exponentiele relatie gebruikt om de filtratiecapaciteit voor de mosselen in het laboratorium experiment te bepalen. De filtratiecapaciteit  $Q$  is exponentieel afhankelijk gemaakt van de zwevend stof concentratie in het water. De formule is derhalve getransformeerd tot:

$$\frac{dN}{dt} = -(Q * n) * \frac{N}{V} \quad \text{waarin } Q = A * \exp(-B * ZS) \quad \text{Formule 5}$$

Met ModelMaker (Cherwell scientific, 1993) is deze relatie gefit op de experimentele gegevens. Hierbij zijn voor de parameters  $A$  en  $B$  waarden ingeschat, waardoor  $Q$  als een functie van de zwevend stof concentratie is bepaald. Hieruit blijkt dat voor het laboratoriumexperiment  $Q$  bij aanvang van het experiment een waarde had van 30 liter per uur per kg en aan het eind van het experiment 60 liter per uur per kg. 60 bleek ook de maximale waarde van de filtratiecapaciteit wanneer in de gefitte formule een waarde van 0 voor het zwevend stof gehalte werd ingevoerd.

Formule 5 is vervolgens ook gebruikt bij de evaluatie van het mesocosmexperiment en het afsluitexperiment. Hieruit is gebleken dat de filtratiecapaciteit niet gerelateerd was aan het zwevende stofgehalte in het water, maar dat deze een constante waarde heeft.

Het gebruik van de resultaten van formule 2 waarin de filtratiecapaciteit wordt bepaald voor een mossel van 22 mm lijkt op basis van deze gegevens dan ook een overschatting te geven van de werkelijke filtratiecapaciteit. Deze waarde wordt daarom niet in de verdere evaluatie meegenomen. De gemiddelde waarde van de gemeten filtratiecapaciteiten uit de laboratoriumexperimenten, het mesocosmexperiment en het afsluitexperiment is in hoofdstuk 6 gebruikt om de nutriëntenafname middels mosselfiltratie te bepalen. Deze gemiddelde waarde voor de filtratiecapaciteit voor de experimentele periode bedraagt  $35 \pm 12$  (gemiddelde en standaard deviatie) liter per uur per kg mosselen.

Met deze gemiddelde filtratiecapaciteit en de stromingsnelheden in het filter is het mogelijk een verklaring te geven voor het feit dat er geen consistente afname van deeltjes in het filter is gemeten (zie paragraaf 4.3.1). In Tabel 12 wordt weergegeven hoeveel water er per compartiment in stroomt bij de gemeten van stroomsnelheden in het filter. De mosselen in elk compartiment zuiveren 35 liter per uur per kg. Hieruit is de door het filter gezuiverde hoeveelheid water (5,6 kg mosselen per compartiment) per uur te bepalen (196 l/u). Deze hoeveelheid is procentueel uitgezet tegen de aangevoerde hoeveelheid water per uur. Hieruit blijkt

dat de mosselen in elk compartiment in staat zijn slechts een zeer klein gedeelte van het water te zuiveren. Dit verschil is waarschijnlijk niet met deze opstelling en monsternamen te bepalen. Derhalve is het met doorstroommetingen aan het filter niet mogelijk de filtratiecapaciteit te bepalen.

Tabel 12 *Vergelijking tussen de hoeveelheid water die het filter instroomt en de hoeveelheid die doormosselen in het filter wordt gezuiverd.*

| Compartiment | Stroomsnelheid | Debiet                 | Debiet     | Gezuiverd  | Percentage |
|--------------|----------------|------------------------|------------|------------|------------|
|              | <i>m/s</i>     | <i>m<sup>3</sup>/s</i> | <i>l/u</i> | <i>l/u</i> | <i>%</i>   |
| Controle     | 0,018          | 0,0066                 | 23768      | 196        | 0,82       |
| Parallel     | 0,019          | 0,0073                 | 26214      | 196        | 0,75       |
| Haaks        | 0,024          | 0,0091                 | 32767      | 196        | 0,60       |

#### 4.4.2 Slib- en fecesproductie

De gemeten slibproductie kan met berekende waarden voor de fecesproductie worden vergeleken om een indicatie te krijgen van de filterwerking van de mosselen (Reeders *et al.* 1993). De gebruikte formules 6, 7 en 8 zijn empirisch vastgesteld op basis van de schelpenlengte, zwevend stof concentratie en de temperatuur:

$$PSF = 5,54 + 0,97 * ZS \text{ (schelpen van 19 mm)} \quad \text{Formule 6}$$

$$PSF = -23,01 + 1,21 * ZS + 1,90 * T \text{ (schelpen van 19 mm)} \quad \text{Formule 7}$$

$$PSF = 34,87 / (1 + 34,87 * 0,83^L) \quad \text{Formule 8}$$

met:

PSF = fecesproductie in mg ds per mossel per dag

ZS = zwevend stof in mg ds per liter

T = water temperatuur

L = schelpenlengte in mm

De totale slibproductie (Figuur 12) is omgerekend naar de dagelijkse slibproductie per compartiment, uitgedrukt ten opzichte van de controle (in mg ds per dag per mossel). Hiervoor is uitgegaan van een mosselgewicht van 1,2 g per mossel en een hoeveelheid van 5600 gram mosselen per compartiment. De resultaten van deze berekening staan weergegeven in Tabel 13. Tevens is hierin weergegeven de berekende fecesproductie middels de drie verschillende formules. De temperaturen zijn gemiddelden van tijdens het experiment gemeten waarden. De zwevend stof concentraties zijn de resultaten van de metingen van 2002 van het RIZA afkomstig uit de DONAR database van het meetpunt in de monding van de Steenbergse Vliet. 15 mm is weer als lengte gebruikt van de standaard gemiddelde mossel in het filter.

*Tabel 13*      *Dagelijkse slibproductie per compartiment uitgedrukt ten opzichte van de controle. ZS = zwevend stof in mg/L (DONAR database RIZA); T is de watertemperatuur (eigen metingen); L = de schelp lengte (15 mm als standaard mossel in het filter); PSF<sub>gem</sub> = gemeten slibproductie in mg ds per dag per mossel; PSF-f<sub>i</sub> = met formule i bepaalde feces productie in mg ds per dag per mossel.*

| Datum      | compartiment | ZS  | T  | L  | PSF <sub>gem</sub> | PSF-f <sub>6</sub> | PSF-f <sub>7</sub> | PSF-f <sub>8</sub> |
|------------|--------------|-----|----|----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 19 april - | Parallel     | 5,3 | 15 | 15 | 5,5                | 10,6               | 11,8               | 11,1               |
| 19 juni    | Haaks        | 5,3 | 15 | 15 | 5,4                | 10,6               | 11,8               | 11,1               |
| 19 juni –  | Parallel     | 5,9 | 17 | 15 | 7,7                | 11,3               | 16,4               | 11,1               |
| 17 juli    | Haaks        | 5,9 | 17 | 15 | 4,1                | 11,3               | 16,4               | 11,1               |
| 17 juli –  | Parallel     | 5,9 | 21 | 15 | 13,0               | 11,3               | 24,0               | 11,1               |
| 31 juli    | Haaks        | 5,9 | 21 | 15 | 11,0               | 11,3               | 24,0               | 11,1               |

Uit Tabel 13 blijkt dat de gemeten slibproductie in het filter in bijna alle gevallen lager is dan de met de verschillende formules geschatte hoeveelheden voor de fecesproductie. Mogelijk zijn er bij dit experiment naast de temperatuur en de zwevend stof concentraties nog andere factoren aanwezig die niet in de empirische formules zijn meegenomen maar die toch bepalend zijn voor de fecesproductie. Daarnaast zal de, niet meegenomen, variatie in de temperatuur en de zwevend stof concentratie ook een afwijking van de berekende waarden opleveren. Ook kan worden aangenomen dat niet alle geproduceerde feces is opgevangen in de daarvoor bestemde opvangbakken. Een deel kan door langzame bezinking buiten de bakken van het filter zijn terechtgekomen, wat resulteert in een lagere gemeten slibhoeveelheid. Gemiddeld over de gehele periode wordt ongeveer 50% van de gemiddelde berekende dagelijkse hoeveelheid geproduceerde feces teruggewonnen.

Opvallend is de sterke toename van de gemeten hoeveelheid slib in de laatste periode in juli. Dit is mogelijk veroorzaakt door de extreem hoge zwevend stof concentraties die periodiek aanwezig waren in deze periode door de aanwezigheid van blauwalgen. Ook was deze periode de kortste periode waarbij het slib bemonsterd werd. Derhalve zou uitspoeling bij de langere periodes tevens een verklaring kunnen zijn voor de daar gemeten lage hoeveelheid.

Door de filtratiecapaciteit van de mosselen te vermenigvuldigen met de zwevend stof concentratie in het water is de hoeveelheid verwijderde deeltjes uit het water te berekenen. Tabel 14 laat voor de verschillende periodes zien dat de hoeveelheid gefiltreerde deeltjes lager is dan de hoeveelheid deeltjes die samen het slib vormen. Ook gemiddeld over de gehele periode is de hoeveelheid deeltjes opgevangen als slib hoger dan te verwachten uit alleen filtratie door mosselen. Dit verschil kan niet verklaard worden uit mechanische bezinking omdat rekening is gehouden met de hoeveelheid slib in de controle. Mogelijk is de gebruikte zwevend stof concentratie waarmee de filtratiecapaciteit vermenigvuldigd is te laag. Periodieke aanwezigheid van drijfslagen van blauwalgen en opwerveling van bodemmateriaal door scheepvaart kunnen de zwevend stof concentratie aanzienlijk verhogen. Een andere verklaring is dat andere organismen in het filter bijdragen aan actieve bezinking.



Tabel 14 *Vergelijking tussen de gefilterde hoeveelheid deeltjes en hoeveelheid deeltjes teruggewonnen als slib.*

| Periode               | Filter-capaciteit | Zwevend-stof conc. | Gefilterd Stof per kg | Gefilterd stof per mossel | Gemeten slib per mossel | Gemeten tov gefilterd |
|-----------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|
|                       | l/u/kg            | mg/l               | mg/u/kg               | mg/d/msl                  | mg/d/msl                | %                     |
| 19 april -<br>19 juni | 35<br>(23-47)     | 5,3                | 186<br>(122-249)      | 5,3<br>(3,5-7,2)          | 5,5                     | 102<br>(76-155)       |
| 19 juni -<br>17 juli  | 35<br>(23-47)     | 5,9                | 207<br>(136-277)      | 5,9<br>(3,9-8,0)          | 5,9                     | 99<br>(74-151)        |
| 17 juli -<br>31 juli  | 35<br>(23-47)     | 5,9                | 207<br>(136-277)      | 5,9<br>(3,9-8,0)          | 12,0                    | 202<br>(150-307)      |
| Gewogen<br>gemiddeld  | 35<br>(23-47)     | 5,6                | 195<br>(128-261)      | 5,6<br>(3,7-7,5)          | 6,5                     | 116<br>(87-177)       |

Het feit dat de samenstelling van het slib in de controle afwijkt van de samenstelling van het slib in de mosselcompartimenten (Figuur 13) is in overeenstemming met eerder onderzoek naar de productie van feces in het Volkerak-Zoommeer (Reeders, 1989a). Dit onderzoek wijst uit dat de feces een grotere concentratie verontreinigingen heeft dan het gemeten slib. Dit komt vermoedelijk doordat de Driehoeksmossel voor voedsel organische stof onttrekt in de vorm van algen en bacteriën, waardoor de samenstelling van de feces afwijkt van de samenstelling van de gesuspenderde slibdeeltjes (Reeders, 1989a).

#### 4.4.3 Opname van verontreinigingen

Uit het geanalyseerde mosselweefsel is gebleken dat vooral koper, cadmium en nikkel zich in de mosselen opgehoopt hebben. Mogelijke bronnen van koper en cadmium zijn veevoeder en kunstmest. De hoge concentraties nikkel zijn waarschijnlijk afkomstig van natuurlijke pyrietbanken die zich in het stroomgebied van de Steenbergse Vliet bevinden. Door de oxidatie van deze banken, die onder andere wordt veroorzaakt door vermisting, wordt nikkel vrijgemaakt en kan in de waterstroom terecht komen (pers. comm. Hoogheemraadschap van West Brabant). Aangezien de Driehoeksmossel zelf in groten getale voorkomt in de Steenbergse Vliet lijkt de verontreiniging niet belemmerend te zijn voor de ontwikkeling van de mossel.

## 4.5 Verwijdering van nutriënten

### 4.5.1 Verwijdering uit de waterkolom (filtratie)

Uit de experimenten is gebleken dat de mosselen in de Steenbergse Vliet gemiddeld ongeveer 35 liter per kilogram per uur kunnen filtreren (met een standaard deviatie van 12). Met de gemiddelde concentraties van het gebonden N en P die tijdens de experimentele periode in het water zijn gemeten (eigen metingen), is de hoeveelheid N en P die per kg mosselen verwijderd wordt,

berekend (Tabel 15). De concentraties worden vermenigvuldigd met de filtratiecapaciteit om een hoeveelheid “verwijderd uit de waterkolom” te bepalen.

*Tabel 15 Overzicht van de uit het water gefilterde hoeveelheid N en P bij een gemiddelde filtratiecapaciteit van 35 liter per kilogram per uur.*

|                         | Hoeveelheid      | Eenheid            |
|-------------------------|------------------|--------------------|
| Concentratie gebonden P | 0,1              | mg/L               |
| Concentratie gebonden N | 1,0              | mg/L               |
| Filtratiecapaciteit     | 35 (23 – 47)     | l/u/kg mosselen    |
| Verwijderd P uit water  | 84 (55 – 113)    | mg/kg mosselen/dag |
| Verwijderd N uit water  | 806 (530 – 1083) | mg/kg mosselen/dag |

Deze hoeveelheid die door de mosselen verwijderd wordt uit de waterkolom zal niet geheel in het slib terecht komen. Van alle nutriënten die de mossel binnenkrijgt zal een deel door de mossel worden vastgelegd. Door assimilatieprocessen van de mossel vinden omzettingen plaats waardoor de nutriënten gedeeltelijk vrij komen. Dit deel zal in opgeloste vorm worden uitgescheiden. Het overige deel zal in de feces terecht komen.

#### 4.5.2 Verwijdering uit het systeem (slibafvoer)

Tabel 16 geeft de gemiddelde samenstelling van het opgevangen slib weer. Door deze samenstelling te vermenigvuldigen met de slibproductie (paragraaf 4.5.1) wordt de hoeveelheid verwijderde P en N bepaald. Tabel 17 laat het resultaat van deze berekening zien voor verschillende berekende en gemeten waarden van de slibproductie.

*Tabel 16 Gemiddelde nutriënten concentraties in het slib in 2002.*

| P in slib (g/kg ds) |       | N in slib (mg/kg ds) |       |
|---------------------|-------|----------------------|-------|
| gemiddeld (P)       | stdev | gemiddeld (N)        | stdev |
| 3,58                | 0,31  | 10,58                | 1,29  |

Van de 84 mg P die door 1 kg mosselen dagelijks uit het water gefilterd wordt (Tabel 15) blijkt dat met deze opstelling 19,4 mg daadwerkelijk verwijderd kan worden uit het systeem. Dit is een rendement van 23% (17-35%). Voor N is dit slechts 57,3 mg van de gefilterde 806 mg. Het rendement is hier 7% (5-11%). Voor een efficiënt filtersysteem dient derhalve de slibopvang geoptimaliseerd te worden.

*Tabel 17 Gemiddelde berekende en gemeten verwijdering van nutriënten door mosselfiltratie per dag per kilogram mosselen. (De gemiddelde zwevend stof concentratie is 5,6 mg/L (Tabel 14). De gemiddelde temperatuur is 17,7(eigen meting). Voor L is de lengte van de standaard mossel in het filter ingevuld 15 mm).*

| Methode                          | slib productie |              | verwijderd N |                  |       |
|----------------------------------|----------------|--------------|--------------|------------------|-------|
|                                  | tov controle   | verwijderd P | stdev        | mg/kg mossel/dag | stdev |
| Berekend uit ZS (formule 6)      | 9,1            | 32,8         | 2,8          | 96,8             | 11,8  |
| Berekend uit ZS en T (formule 7) | 14,4           | 51,8         | 4,4          | 152,9            | 18,6  |
| Berekend uit L (formule 8)       | 9,3            | 33,3         | 2,8          | 98,2             | 12,0  |
| Gemeten                          | 5,4            | 19,4         | 1,7          | 57,3             | 7,0   |

## 4.6 Conclusies en aanbevelingen

### 4.6.1 Conclusies

Het experiment met het mosselfilter in de Steenbergse Vliet was erop gericht het effect van filtratie door Driehoeksmosselen op de waterkwaliteit, met name de concentratie deeltjes en deeltjesgebonden nutriënten van de Steenbergse Vliet te bepalen. Middels dit kleinschalige technisch filter zouden parameterwaarden voor de nutriëntenbalans worden bepaald welke gebruikt kunnen worden bij opschaling naar een operationeel mosselfilter. De nadruk lag op de vaststelling van de filtratiecapaciteit van mosselen in een filter. Op de tweede plaats is gekeken naar de vastlegging van nutriënten in de vorm van feces. Deze vastgelegde hoeveelheid nutriënten kan uit het systeem verwijderd worden wanneer de feces afgevangen wordt.

Gebleken is dat de geteste opstelling niet optimaal was om de filtratiecapaciteit direct te meten uit de concentraties van deeltjes in de instroom en de uitstroom. Dit is gedeeltelijk te wijten aan het hoge debiet door het filter ten opzichte van de filtercapaciteit van de mosselen. De mosselen filteren slechts een kleine fractie van het passerende water, waardoor het effect van de filtratie niet met de doorstroomexperimenten kon worden bepaald.

De conditie van de mosselen in het filter was echter wel goed. Dit is, naast de aanwas van mosselen in het filter, gebleken uit de afnemende deeltjesconcentratie tijdens de afsluitexperimenten en de slibproductie in het filter. Beide factoren geven aan dat de mosselen in het filter het doorstromende water filteren.

Middels verschillende experimenten is de filtratiecapaciteit van de mossel populatie in het technische filter vastgesteld op  $35 \pm 12$  liter per uur per kg mosselen. Deze waterhoeveelheid wordt per uur geheel ontdaan van al het zwevend

materiaal aanwezig in het water. Deze filtratiecapaciteit was onafhankelijk van de opstelling van de mosselen in het filter. Beide opstellingen leveren ongeveer dezelfde filtratiecapaciteit en dezelfde hoeveelheid slib op wat gezien de verhouding : mosselhoeveelheid.

Middels de bekende filtratiecapaciteit is bepaald hoeveel deeltjes en deeltjes gebonden nutriënten er door een hoeveelheid mosselen uit de waterkolom verwijderd worden. Voor P en N zijn deze hoeveelheden respectievelijk 84 en 806 mg per dag per kg mosselen. Wanneer men echter deze hoeveelheid nutriënten daadwerkelijk uit het systeem wil verwijderen, zal het geproduceerde slib efficiënt moeten worden afgevangen en verwijderd. Het uitgevoerde experiment levert reeds een indicatie op van de hoeveelheid slib die door de mosselen wordt geproduceerd: 50% van de theoretische slib productie werd opgevangen. De opstelling was echter primair gericht op het bepalen van de filtratiecapaciteit. Van de hoeveelheid P en N die door mosselfiltratie uit het water is verwijderd is met de huidige opstelling respectievelijk 23% (17%-35%) en 7% (5%-11%) in het slib opgevangen. Voor een filter wat gericht is verwijdering van nutriënten zal het echter van belang zijn om efficiënter het geproduceerde slib af te vangen en te verwijderen. Dit is de enige manier om daadwerkelijk een nutriënten reductie in de Steenbergse Vliet teweeg te brengen. In toekomstige experimenten zal derhalve meer aandacht worden besteed aan de opvang van het geproduceerde slib. Wanneer de slibopvang geoptimaliseerd wordt kan een goede massabalans voor nutriënten verwijdering door mosselen worden opgesteld. Een hoogfrequente slibbemonstering wordt hierbij nagestreefd om uitspoeling van slib te voorkomen.

Bij vergelijking van de hoeveelheid geproduceerd slib door mosselen en de hoeveelheid gefilterd stof door de mosselen, bleek dat de hoeveelheid slib hoger was dan de hoeveelheid die door alleen filtratie van mosselen kan worden verklaard (zie paragraaf 4.4.2, Tabel 14). Waarschijnlijk is de gemiddelde zwevend stof concentratie gedurende de experimentele periode hoger geweest dan voorspeld op basis van DONAR gegevens, waardoor meer slib geproduceerd wordt dan berekend.

Wanneer de doorstroming van het filter te laag is kunnen er snel problemen met de zuurstof- en voedselvoorziening optreden. Met name al het biota wat zich in de substraatmatten gevestigd heeft en de aanwezige ophoping van slib zal bij geringe doorstroming voor een afname van de zuurstofconcentratie zorgen. Voor een optimale filterwerking dient dit te worden voorkomen. Een filter waarbij de mosselen vrij in de waterkolom hangen heeft voor toekomstige experimenten dan ook de voorkeur. Aangezien de filtratiecapaciteit van de mosselen in het filter bekend is, is het ook niet noodzakelijk de mosselen in een afgesloten systeem onder te brengen.

Tijdens het experiment vond sterke kolonisatie van mosselen uit het water op het filter plaats. Deze extra mosselen leiden tot verhoging van de filtratiecapaciteit in

zowel het controle als in de mosselcompartimenten. Het lijkt er derhalve op dat wanneer een mosselfilter eenmaal in de Steenbergse Vliet is aangebracht, de natuurlijke aanwas van mosselen volstaat om het filter in stand te houden. Het feit dat bijna elk substraat dat wordt aangeboden in de Steenbergse Vliet, wordt gekoloniseerd, is een indicatie, dat de Driehoeksmosselpopulatie in de Steenbergse Vliet waarschijnlijk beperkt wordt door een tekort aan geschikt substraat. De overlevingskans van de mosselen was gedurende de experimentele periode gemiddeld 70%. Dit ondanks de niet altijd optimale opstandigheden in het filter en ondanks een lange periode van drijfslagen toxische blauwalgen. Wanneer een andere locatie voor het filter gezocht wordt, waar geen beïnvloeding van het experiment door blauwalgen plaatsvindt, maar waar nog wel de aanwas van mosselen mogelijk is, lijkt het instandhouden van een mosselfilter in de Steenbergse Vliet dan ook geen probleem. Ook de concentraties aan zware metalen lijken geen bedreiging te zijn voor de werkzaamheid van het filter.

#### **4.6.2 Aanbevelingen**

Om de benodigde parameters voor de massabalans voor nutriënten voor het mosselfilter nauwkeuriger te bepalen zal het vervollexperiment, dat is gepland voor 2003, zich richten op de volgende punten:

- Optimaliseren en automatiseren van de slibopvang;
- Analyse van samenstelling en hoeveelheid geproduceerd slib;

De experimentele opstelling zal in tegenstelling tot dit experiment in 2002 op een locatie binnen de sluis van de Steenbergse Vliet worden geïnstalleerd. Hiermee wordt verkomen dat drijfslagen van blauwalgen het experiment mogelijk verstoren. Tevens zal de opstelling zo open mogelijk worden gehouden om het contact van het verse water met de mosselen te optimaliseren. Het doel, de opzet en de resultaten van het tweede veldexperiment zullen in hoofdstuk 5 worden besproken.

## **5. Filteroptimalisering, automatisering en experimentele toetsing (2003)**

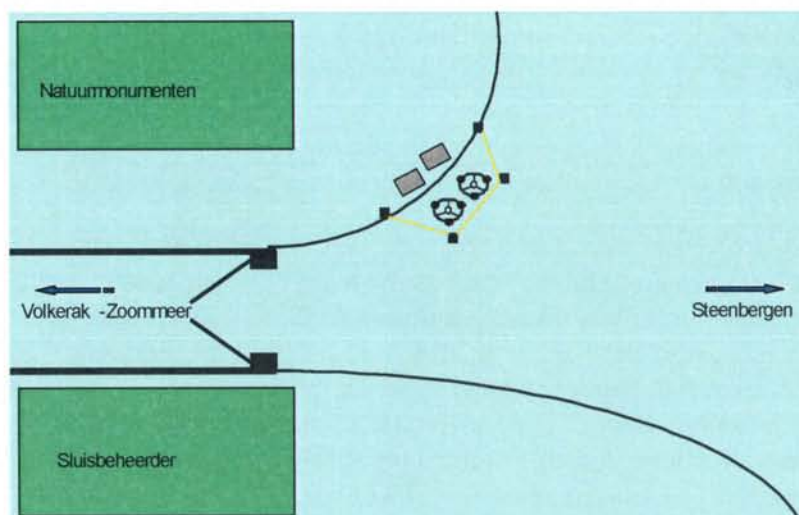
### **5.1 Inleiding**

Op basis van de resultaten beschreven in hoofdstuk 3 en 4 is een nieuw experimenteel systeem ontworpen waarmee nutriënten beter middels mosselfiltratie uit het water kunnen worden verwijderd. Gebleken is dat de mosselen in staat zijn grote watervolumes te filteren waardoor de helderheid van het water toeneemt (Blankendaal & Smit, 2003; paragraaf 4.4.1). Wanneer echter ook het uitscheidingsproduct van mosselen (feces en pseudo-feces) wordt opgevangen en uit de waterstroom wordt verwijderd, wordt de hoeveelheid nutriënten in het systeem daadwerkelijk verminderd. Het mosselfilter heeft in deze vorm een directe en een indirecte invloed op de hoeveelheid algen. Enerzijds zullen algen direct uit het water gefilterd worden. Anderzijds zal de reductie van nutriënten in het water leiden tot een verminderde kans op algenbloei. Middels het vernieuwde en geautomatiseerde mosselfilter zal de efficiëntie van het verwijderen van deeltjesgebonden nutriënten worden vastgesteld. Dit wordt gedaan door automatisch, periodiek het slib uit het mosselfilter te verwijderen en vervolgens te analyseren op stikstof (N) en fosfor (P) verbindingen.

Uiteindelijk zullen de resultaten van het experiment leiden tot een bestek van een filter welke ingezet kan worden om (algen)deeltjesconcentraties te verminderen en nutriënten te verwijderen in het Volkerak-Zoommeer systeem. De eigenschappen van dit filter zullen worden besproken in hoofdstuk 6.

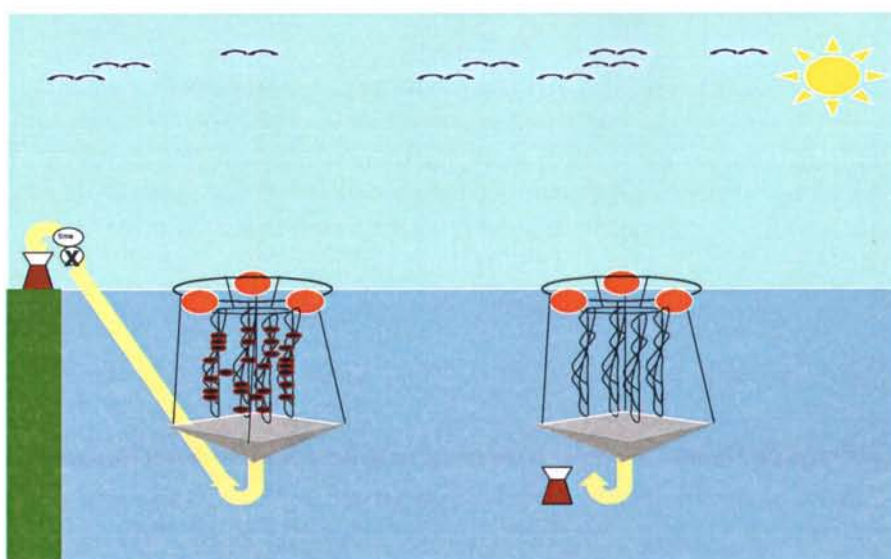
### **5.2 Constructie en installatie**

Op 27 mei 2003 is het geautomatiseerde mosselfilter geïnstalleerd in de Steenbergse Vliet. Er is gekozen voor een locatie binnen de sluis om de verstoring door drijfslagen van toxische algen te voorkomen. Onderstaande figuren geven schematisch weer hoe en waar de twee uiteindelijke filterunits zijn geplaatst. In één filter bevinden zich de mosselen, de ander bevat geen mosselen en dient als controle. Figuur 17 geeft de positie van de filters ten opzichte van de sluis weer.



Figuur 17 Locatie van de filters ten opzichte van de sluis.

De filters bestaan uit een aluminium frame en een trechter (Figuur 18). De roestvrijstalen trechter (115 x 115 x 50 cm) hangt onderaan het frame en dient voor de opvang van slib. De trechter is middels 4 kettingen verbonden aan het frame. Boven deze trechters hangen, aan de aluminium frames, slangvormige netten waarin in de vorm van zakjes de mosselen zijn geplaatst (zoals is weergegeven in Figuur 1D). Deze zakjes zijn ongeveer 50 cm lang, hebben een maaswijdte van 0,5 cm en hangen op een diepte van 50 cm. Om zoveel mogelijk van de geproduceerde feces op te kunnen vangen in de trechters dienen de mosselen zo dicht mogelijk boven de trechters te hangen. Er is in totaal 5 kg mosselen in de ene filterunit gehangen. De andere filterunit dient als controle en bevat geen mosselen.



Figuur 18 Schematische weergave van de filters

Aan de beide filters (met en zonder mosselen) zitten drijvers bevestigd voor extra drijfvermogen (Foto 12). Hierdoor komt de opstelling op de juiste diepte in de waterkolom te hangen. Gedurende het experiment is de bovenkant van de filters afgesloten met een net en het gedeelte onder water met gaas. Deze maatregelen moeten beïnvloeding van het experiment door predatie door duikeinden vogels en vissen voorkomen. De maaswijdte van het gaas is echter wel zo groot gekozen dat het water vrij in en uit kan stromen. Tijdens bemonsteringen is dit gecontroleerd. De opstelling is met touwen bevestigd aan de meerpaal en aan de oever. De meerpalen bieden tevens bescherming tegen het vaarverkeer. Aangezien de opstelling is geïnstalleerd op een locatie waar regelmatig recreatievaartuigen afmeren en passeren, is de opstelling duidelijk gemarkeerd en afgebakend.



Foto 12 Het net als bescherming tegen predatie (foto: TNO-MEP)

De bemonstering van het slib gebeurt semi-automatisch. Eén keer per dag wordt het in de trechter opgehoopte slib met behulp van een klokpomp uit de trechters gepompt. Deze klokpomp staat in de punt van elke trechter. Het slib wordt door een slang overgepompt naar 2 bezinkbakken die op de wal staan opgesteld (Foto 13). Na een bezinktijd van 12 uur wordt automatisch het bovenstaande water tot op 45 cm boven de grond afgepompt. Hierdoor wordt in de bakken het slib (zie box 2) geconcentreerd.

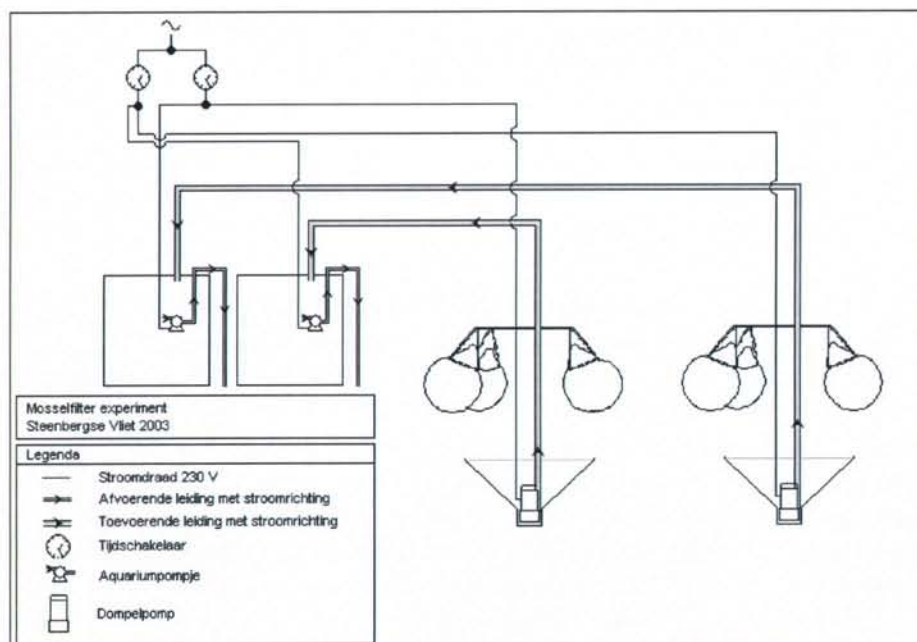




Foto 13 De bezinkbakken met het pompsysteem (foto: TNO-MEP)

De bemonstering van het geconcentreerde slib in de bezinkbakken vindt plaats middels een kraan aan de onderkant van de bakken. Handmatig wordt eerst het laatste bovenstaande water tot een hoogte van 15 cm afgeheveld, waarna het slib uit de bakken verwijderd wordt. Figuur 19 laat schematisch de werking van het automatische pompsysteem zien.

Uit de bezinkbakken is het slib maandelijks bemonsterd. Tevens zijn de conditie van de mosselen in het filter en enkele waterkwaliteitsparameters bepaald. Regelmatig is de werking van het pompsysteem gecontroleerd door de sluiswachter. De opstelling heeft tot half november (bijna 6 maanden) in de Steenbergse Vliet gedraaid.



*Figuur 19* Overzicht van de automatische bemonstering. De tijdschakelaar regelt het aan- en afslaan van de dompelpompen die het water naar de bezinkbakken pompen. Na een bezinkperiode van 12 uur wordt het overtollige water door de aquariumpompen uit de bezinkbakken geheveld waardoor een geconcentreerde laag slib met een beetje bovenstaand water achterblijft.

### 5.3 Bemonstering, meetprotocol en analyses

De ervaring uit 2003 heeft geleerd dat het bemonsteren en analyseren van slib de enige manier is om te kwantificeren hoe efficiënt een mossfilter is om de input van nutriënten in het Volkerak-Zoommeer te verlagen. Middels de bepaalde filtratiecapaciteiten (zie hoofdstuk 4) kan een reductie van nutriënten in de waterkolom worden bepaald, maar deze nutriënten blijven in het systeem aanwezig. Door actief de nutriënten te verwijderen middels het opvangen en afvoeren van slib kan daadwerkelijk een reductie van de nutriënten bereikt worden.

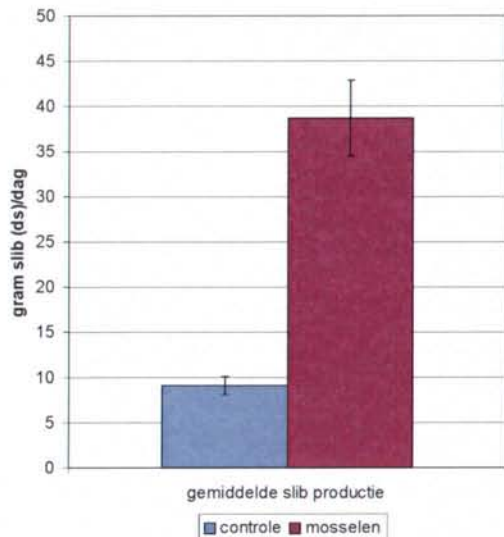
De vernieuwde opstelling is gericht op de opvang van het geproduceerde slib. De bezinkbakken hebben de maten van 116 x 94 x 92,5 cm. Om de 12 uur worden de bakken automatisch volgepompt tot 92 cm hoogte. Na het bezinken wordt het water eveneens automatisch afgepompt tot 45 cm boven de grond. De monsters worden genomen door het water in de bezinkbakken handmatig af te hevelen tot op 15 cm boven de grond. De totale hoeveelheid slib in het systeem is gekwantificeerd waarna vervolgens een deelmonster voor analyse wordt genomen. Deze suspensie wordt via een kraan aan de zijkant van de bezinkbak in potten opgevangen. Per

bemonstering en per bezinkbak is op deze manier telkens 30 liter afgetapt. Het slib wordt geanalyseerd op totaal gehalten N en P.

## 5.4 Resultaten

### 5.4.1 Slibproductie en samenstelling

De slibproductie in het filter is bepaald uit de totale hoeveelheden slib in de bezinkbakken. Een aantal malen bleek er echter te weinig slib in de bakken aanwezig te zijn. Hierdoor was analyse als slib niet mogelijk, maar is er gekozen voor een analyse als 'afvalwater'. De geanalyseerde parameters zijn hierbij hetzelfde al worden de concentraties niet per milligram droog stof aangegeven maar per milliliter monster. Het gehalte zwevend stof is vervolgens gebruikt om de analyseresultaten van water om te rekenen naar de vaste fractie in het 'afvalwater'. Na de bemonstering op 1 oktober 2003 zijn de bezinkbakken gelegeerd en is het pompsysteem stopgezet. Bij de laatste bemonstering op 19 november 2003 werden de slibmonsters direct uit de trechters genomen. Hiermee kan een eventuele invloed van het overpompen op de hoeveelheid en samenstelling van het slib worden vastgesteld.

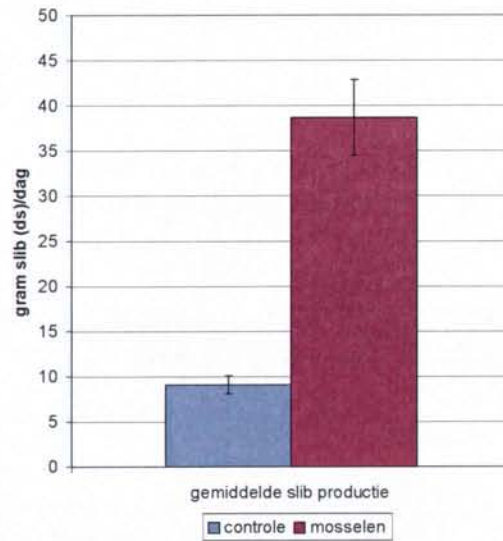


Figuur 20 geeft de gemiddelde slibproductie door de mosselen in het filter per dag gedurende de experimentele periode weer. Dit is de totale productie min de slibproductie in de controle. Er is geen invloed van het overpompen van het slib

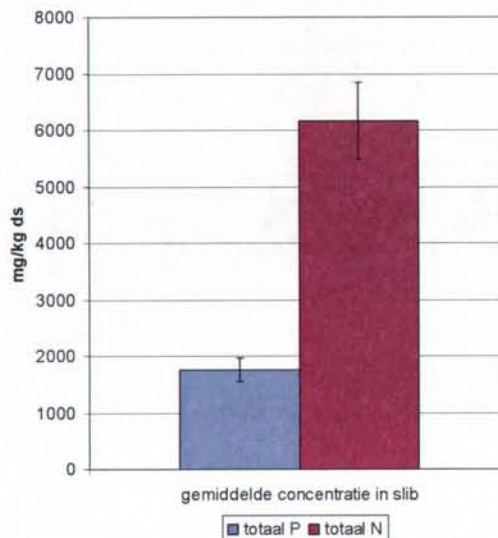
gevonden en daarom zijn de resultaten van alle bemonsteringen gemiddeld. Ook waren de verschillen tussen de verschillende vormen van analyse klein. Dit uit zich

in de relatieve kleine standaarddeviaties van de berekende gemiddelde geproduceerde hoeveelheden slib.

De gemiddelde hoeveelheid N en P in het slib van het mosselfilter staat weergegeven in Figuur 21. Het slib uit het controlefilter is niet geanalyseerd omdat we voornamelijk geïnteresseerd zijn in de nutriënten gehalten in het door mosselen geproduceerde slib.



*Figuur 20 Gemiddelde slibproductie in het filter per dag ten opzichte van de controle. De kolom 'mosselen' geeft de hoeveelheid slib geproduceerd in het filter met mosselen min de hoeveelheid gevonden in de controle filter zonder mosselen weer.*



*Figuur 21 Gemiddelde nutriëntenconcentraties in het slib uit de filterunit met mosselen.*

#### 5.4.2 Overleving

De mosselen die in het filter ingebracht zijn varieerden in grootte tussen 1 en 2,5 cm. Op het eind van de experimentele periode is in een submonster de overleving geanalyseerd. De overleving was ongeveer 84%. Van de dode mosselen had 95% een lengte tussen 1 en 2,3 cm. Dit geeft aan dat sterfte vooral plaatsvindt bij de ingebrachte grote mosselen. Van de overlevende mosselen had 95% een lengte tussen 0,4 en 1,7 cm. Dit geeft aan dat er na de installatie van de mosselnetten veel aanwas vanuit de Steenbergse Vliet heeft plaatsgevonden. Dit blijkt ook uit de dichtheid van mosselen die bij beëindiging van het experiment op de gehele opstelling aangetroffen is. Trechters, pompen, netten en kettingen van beide filters waren dicht begroeid met mosselen (Foto 14). Dit bevestigt het idee dat in de Steenbergse Vliet het ontbreken van geschikt substraat de uitbreiding van de *Dreissena* populatie beperkt.



*Foto 14 Begroeiing van de opstelling met Driehoeksmosselen (Foto: TNO-MEP)*

## 5.5 Analyse en discussie

### 5.5.1 Slib en fecesproductie

De gemeten slibfecesproductie kan met de berekende hoeveelheid, volgens formules 6, 7 en 8 (zie paragraaf 4.4.2), worden vergeleken om een indicatie te krijgen van de filterwerking van de mosselen en het succes waarmee in deze opstelling de geproduceerde hoeveelheid wordt opgevangen en verwijderd. De totale slibproductie is omgerekend naar de dagelijkse slibproductie uitgedrukt ten opzichte van de controle (in mg droge stof (ds) per dag per mossel). Hiervoor is uitgegaan van een mosselgewicht van 1,2 g per standaard mossel en een hoeveelheid van 4200 gram mosselen, wat overeenkomt met de gemeten overleving van 84% van de ingezette mosselbiomassa. Omdat er hier wordt uitgegaan van gelijke mosselen met gelijke lengtes wordt hetzelfde sterftepercentage op biomassa toegepast als is vastgesteld voor individuen. De resultaten van deze berekening staan weergegeven in Tabel 18. Het gaat hierbij om de gemiddelden van alle metingen uit 2003. Tevens is hierin weergegeven de berekende feces productie middels de drie verschillende formules. De zwevend stof concentratie die gebruikt is in de formules is het gemiddelde van metingen uitgevoerd tijdens dit experiment. Hetzelfde geldt voor de temperatuur. De lengte van 15mm is gekozen als maat voor de standaard mossel in het filter.

*Tabel 18 Overzicht van gemeten en berekende slib- en fecesproductie in het filter in de Vliet in 2003. Dagelijkse slibproductie door de mosselen uitgedrukt ten opzichte van de controle. ZS = zwevend stof in mg/L (gemiddelde zwevend stof concentraties over de gehele meetperiode, DONAR database); T is de watertemperatuur (eigen metingen); L = de schelplengte (15 mm als standaard mossel in het filter); gem = gemeten productie in mg ds per dag per mossel; Form. 6-8 = met formule 6, 7 of 8 bepaalde fecesproductie in mg ds per dag per mossel.*

| Periode         | ZS<br>(mg/L) | T<br>(°C) | L<br>(mm) | Slibproductie (mg ds/ mossel/ dag) |         |         |         |
|-----------------|--------------|-----------|-----------|------------------------------------|---------|---------|---------|
|                 |              |           |           | Gem.                               | Form. 6 | Form. 7 | Form. 8 |
| Juni - november | 6,5          | 18,1      | 15        | 8,9                                | 11,8    | 19,2    | 11,1    |

Uit Tabel 18 blijkt dat de gemeten slibproductie in het filter ook in deze opstelling lager is dan de met de verschillende formules geschatte hoeveelheid. Gemiddeld over de gehele periode wordt in 2003 ongeveer 64% van de berekende dagelijkse hoeveelheid geproduceerd slib teruggewonnen. Dit is een verbetering ten opzichte van de opstelling van 2002 waarmee 50% van de berekende dagelijkse hoeveelheid slib teruggewonnen werd.

De hoeveelheid verwijderde deeltjes uit het water is te berekenen door de filtratiecapaciteit van de mosselen te vermenigvuldigen met de zwevendstof concentratie. Tabel 19 laat voor de experimentele periode zien dat de hoeveelheid door mosselen gefilterde deeltjes uit het water, uitgedrukt als hoeveelheid gefilterd stof, lager is dan de hoeveelheid stof dat is gemeten als opgevangen slib. De

gemiddelde hoeveelheid gemeten slib ten opzichte van de berekende gefilterde hoeveelheid stof is namelijk hoger (136%). Dit verschil kan niet verklaard worden uit mechanische bezinking omdat rekening is gehouden met de hoeveelheid slib in de controle. Mogelijk is de gebruikte zwevend stof concentratie (DONAR database) te laag. Een andere verklaring kan zijn dat andere organismen in het filter bijdragen aan actieve bezinking of dat door afsterven van organismen ook biomassa die elders in de Steenbergse Vliet is ontstaan (bijvoorbeeld mobiele epifauna) in het filter terecht komt. Bij een gemiddelde zwevend stof concentratie van 8,8 mg/L zou de hoeveelheid gefilterd stof gelijk zijn aan de hoeveelheid stof opgevangen als slib. Waarschijnlijk is dus de daadwerkelijke gemiddelde zwevend stof concentratie hoger geweest. Deze verhoging kan lokaal zijn opgetreden als gevolg van scheepvaart. De berekende 136% is hoger dan de gemiddelde waarde uit het experiment van 2002, waarin een verhouding tussen gefilterd stof en opgevangen slib van 116% is bepaald. Ook hieruit blijkt dat de nieuwe opstelling beter is in het opvangen van slib.

*Tabel 19 Vergelijking tussen de gefilterde hoeveelheid deeltjes (op basis van zwevend stofgehalte) en hoeveelheid deeltjes teruggewonnen als slib. De laatste kolom geeft de verhouding van de gefilterde hoeveelheid stof en de gemeten hoeveelheid slib aan.*

| Periode           | Filter-capaciteit | Zwevend-stof conc. (DONAR) | Gefilterd stof per kg | Gefilterd stof per mossel | Gemeten slib per mossel | Gemeten tov gefilterd |
|-------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|
|                   | l/u/kg            | mg/l                       | mg/u/kg               | mg/d/msl                  | mg/d/msl                | %                     |
| Gewogen gemiddeld | 35 (23-47)        | 6,5                        | 228 (150-306)         | 6,6 (4,3-8,8)             | 8,9                     | 136 (101-207)         |

## 5.6 Verwijdering van nutriënten

### 5.6.1 Verwijdering uit de waterkolom (filtratie)

Uit de experimenten is gebleken dat de mosselen in de Steenbergse Vliet gemiddeld ongeveer 35 liter per kg per uur kunnen filteren (met een standaard deviatie van 12; paragraaf 4.4.1.) Met de gemiddelde concentraties van het gebonden N en P die tijdens de experimentele periode in het water waarin het filter zich bevond zijn gemeten (eigen metingen), kan de hoeveelheid N en P die per kg mosselen verwijderd wordt, worden berekend (Tabel 20). De concentraties worden vermenigvuldigd met de filtratiecapaciteit om een hoeveelheid “verwijderd uit de waterkolom” te bepalen.

*Tabel 20 Overzicht van de uit het water gefilterde hoeveelheid N en P.*

|                         | Hoeveelheid  | Eenheid         |
|-------------------------|--------------|-----------------|
| Concentratie gebonden P | 0,04         | mg/L            |
| Concentratie gebonden N | 0,5          | mg/L            |
| Filtratiecapaciteit     | 35 (23 - 47) | l/u/kg mosselen |

|                        |                 |                    |
|------------------------|-----------------|--------------------|
| Verwijderd P uit water | 34 (22 – 46)    | mg/kg mosselen/dag |
| Verwijderd N uit water | 396 (260 – 532) | mg/kg mosselen/dag |

Deze hoeveelheid die door mosselfiltratie verwijderd wordt uit de waterkolom zal niet geheel in het slib terecht komen. Van alle nutriënten die de mossel binnenkrijgt zal een deel door de mossel worden vastgelegd. Er zullen door assimilatieprocessen van de mossel omzettingen plaatsvinden waardoor de nutriënten gedeeltelijk vrij worden gemaakt. Dit deel zal in opgeloste vorm worden uitgescheiden. Het overige deel zal in het slib terecht komen.

### 5.6.2 Verwijdering uit het systeem (slibafvoer)

Tabel 21 geeft de gemiddelde samenstelling van het opgevangen slib weer. Door deze samenstelling te vermenigvuldigen met de gemeten slibproductie (Tabel 18) wordt de hoeveelheid verwijderde P en N bepaald. Tabel 22 laat het gemiddelde resultaat van deze berekening zien voor verschillende berekende en de gemeten waarde van de slibproductie.

Tabel 21 Gemiddelde nutriëntenconcentraties in het slib in 2003.

| P in slib (g/kg ds) |       | N in slib (mg/kg ds) |       |
|---------------------|-------|----------------------|-------|
| gemiddeld (P)       | stdev | gemiddeld (N)        | stdev |
| 1,77                | 0,21  | 6,17                 | 0,68  |

Tabel 22 Gemiddelde van de berekende en gemeten verwijdering van nutriënten door mosselfiltratie per kilogram mossel. De gemiddelde zwevend stof concentratie is 6,5 mg/L (Tabel 19). De gemiddelde temperatuur is 17,7 (eigen meting). Voor L is de lengte van de standaard mossel in het filter (15 mm) ingevuld.

| Methode                             | slib productie<br>tov controle | verwijderd P        |       | verwijderd N        |       |
|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|-------|---------------------|-------|
|                                     | g/kg<br>mossel/dag             | mg/kg<br>mossel/dag | stdev | mg/kg<br>mossel/dag | stdev |
| Berekend uit ZS<br>(formule 6)      | 9,8                            | 17,4                | 2,0   | 60,6                | 6,7   |
| Berekend uit ZS<br>en T (formule 7) | 16,0                           | 28,3                | 3,3   | 98,6                | 10,9  |
| Berekend uit L<br>(formule 8)       | 9,3                            | 16,4                | 1,9   | 57,2                | 6,3   |
| Gemeten 2003                        | 7,4                            | 13,1                | 1,5   | 45,6                | 5,0   |

Van de 34 mg P die door 1 kg mosselen dagelijks uit het water gefilterd wordt (Tabel 20) kan met deze opstelling 13,1 mg daadwerkelijk uit het systeem verwijderd worden. Dit is een rendement van gemiddeld 39% (28-58%). Voor N is dit 45,6 mg van de dagelijks gefilterde 396 mg. Het gemiddelde rendement is hier 12% (9-18%). Dit rendement is met de vernieuwde opstelling zowel voor P als voor N verhoogd ten opzichte van 2002.



## 5.7 Conclusies

Met de vernieuwde opstelling is een verhoogde opbrengst van slib bewerkstelligd. Bij vergelijking van de hoeveelheid door mosselfiltratie geproduceerd slib en de hoeveelheid door mosselen gefiltreerd zwevend stof bleek dat de hoeveelheid slib hoger was dan de hoeveelheid die door mosselfiltratie alleen kan worden verklaard. Waarschijnlijk is gedurende het experiment de gemiddelde zwevend stof concentratie hoger geweest dan de waarde die als invoer in de formules is overgenomen uit de DONAR database.

Middels de filtratiecapaciteit is bepaald hoeveel deeltjesgebonden nutriënten er door een hoeveelheid mosselen uit de waterkolom verwijderd kan worden. Voor P en N zijn deze hoeveelheden respectievelijk 34 en 396 mg per kg mosselen per dag. Door de lagere concentratie van gebonden nutriënten binnen de sluis (de experimentele locatie van 2003) is deze hoeveelheid lager dan bepaald in het experiment van 2002 (voor P en N respectievelijk 84 en 806 mg per kg mosselen per dag) dat buiten de sluis is uitgevoerd. Bovendien is in 2003 in de periode juli tot september water vanuit de Maas ingelaten, waardoor de concentraties nutriënten en zwevend stof anders kunnen zijn dan de voorliggende jaren (pers comm. Hoogheemraadschap van West Brabant). De hoeveelheid P en N die door mosselfiltratie uit het water is verwijderd met de huidige opstelling is respectievelijk 39% (28-58%) en 12% (9-18%) van de gefiltreerde concentraties. Dit is duidelijk een verbetering met de opstelling van 2002.

In de geautomatiseerde opstelling is het contact met het water beter waardoor er ook bij stagnant water geen zuurstof- of voedselbeperking van de mosselen in het filter optreedt. Het sterftepercentage is lager en de hoeveelheid aangroei in het filter hoger dan in 2002. Bovendien is het systeem minder arbeidsintensief door de automatische slib-afpompinstallatie. Een dergelijke kleine unit kan eenvoudig worden ingezet op plaatsen waar een probleem met gebonden nutriënten of verontreinigen in een watersysteem optreedt. In het volgende hoofdstuk zal met het bepaalde percentage slib dat teruggewonnen kan worden een massabalans voor nutriënten verwijdering middels mosselfiltratie worden opgesteld.

## 6. Nutriëntenverwijdering middels een mosselfilter

### 6.1 Aanvoer van nutriënten in de Steenbergse Vliet

De nutriëntenconcentraties in de Brabantse riviertjes als de Steenbergse Vliet en de Dintel zijn variabel tijdens de verschillende seizoenen (zie Figuur 25 en Figuur 27 in Bijlage 1). De grootste variatie wordt verklaard door de variatie in de opgeloste fractie van de nutriënten. Zowel de concentratie gebonden N als de concentratie gebonden P blijven gedurende het jaar redelijk constant (Tabel 23).

Tabel 23 *Gemiddelde concentraties gebonden nutriënten voor de verschillende seizoenen in de Steenbergse Vliet (gegevens 1995-2001, Hoogheemraadschap van West Brabant).*

| Seizoen  | Gebonden N | Gebonden P | Percentage gebonden N van totaal N | Percentage gebonden P van totaal P |
|----------|------------|------------|------------------------------------|------------------------------------|
|          | mg/L       | mg/L       | %                                  | %                                  |
| Voorjaar | 2,1        | 0,026      | 20                                 | 24                                 |
| Zomer    | 2,0        | 0,033      | 51                                 | 25                                 |
| Herfst   | 2,4        | 0,048      | 40                                 | 36                                 |
| Winter   | 2,0        | 0,034      | 13                                 | 22                                 |

Niet alleen de nutriëntenconcentratie bepaald de nutriëntenvrucht naar het Volkerak. Ook de watertoevoer, die variabel is per seizoen, is in grote mate verantwoordelijk voor de grote hoeveelheid nutriënten die vanuit de riviertjes in het Volkerak terechtkomt. Tabel 24 geeft een overzicht van de wisselende watertoevoer van de Steenbergse Vliet naar het Volkerak. Ook staat weergegeven hoeveel kilogram gebonden N en P per dag het Volkerak instroomt (product van concentratie en debiet).

Tabel 24 *Gemiddelde afvoer van de Steenbergse Vliet per seizoen (gegevens 1995-2001, Hoogheemraadschap van West Brabant).*

| Seizoen  | Waterafvoer | Toevoer gebonden N | Toevoer gebonden P |
|----------|-------------|--------------------|--------------------|
|          | l/d         | kg/d               | kg/d               |
| Voorjaar | 1,82 E+8    | 382                | 4,7                |
| Zomer    | 1,60 E+8    | 320                | 5,3                |
| Herfst   | 3,96 E+8    | 950                | 19,0               |
| Winter   | 3,36 E+8    | 672                | 11,4               |

### 6.2 Verwijdering van nutriënten door mosselen

#### 6.2.1 Verwijdering uit de waterkolom (filtratie)

Door mosselfiltratie zullen zwevende deeltjes en de stoffen gebonden aan deze zwevende deeltjes uit de waterkolom weggevangen worden. Middels de experimenten is voor een Driehoeksmosselpopulatie in een technisch filter een

filtratiecapaciteit van 35 liter per uur per kilogram mosselen in de Steenbergse Vliet vastgesteld. Deze filtratiecapaciteit geldt echter alleen voor temperaturen hoger dan 5 graden. Beneden deze temperatuur zal de filtratiesnelheid van de mosselen afnemen hetgeen de filtratiecapaciteit van het filter beperkt. In de winter zal het effect van de mosselen op de nutriëntenvracht naar het Volkerak derhalve gering zijn. Tabel 25 geeft een overzicht van de hoeveelheid nutriënten die per kilogram mosselen door filtratie uit de waterkolom verwijderd worden (productie van concentratie en filtratiecapaciteit). Dit is niet voor het winterseizoen gedaan omdat de activiteit van de mosselen dan gering is.

*Tabel 25 Verwijdering van nutriënten uit de waterkolom per kg mosselen per dag voor de drie seizoenen waarin een mosselfilter effectief is (product van concentratie en filtratiecapaciteit). De waarden tussen de haakjes geven de standaard deviatie aan.*

| Seizoen  | Filtratiecapaciteit | Gefilterd N   | Gefilterd P         |
|----------|---------------------|---------------|---------------------|
|          | l/kg/u              | g/kg/dag      | g/kg/dag            |
| Voorjaar | 35 (23 – 47)        | 1,8 (1,2-2,4) | 0,022 (0,014-0,029) |
| Zomer    | 35 (23 – 47)        | 1,7 (1,1-2,3) | 0,028 (0,018-0,037) |
| Herfst   | 35 (23 – 47)        | 2,0 (1,3-2,7) | 0,040 (0,026-0,054) |

De waarden vermeld in Tabel 25 gelden alleen voor constante concentraties gebonden N en P in het water (Tabel 23). Wanneer echter door mosselfiltratie een substantieel deel van de toevoer wordt verwijderd waardoor de nutriëntenconcentratie wordt verlaagd, zal de hoeveelheid die per dag wordt verwijderd afnemen. In het algemeen gelden formules 9 en 10.

**Error! Objects cannot be created from editing field codes.** *Formule 9*

**Error! Objects cannot be created from editing field codes.** *Formule 10*

Waarin:

$N_{\text{gefilterd}}$  = gefilterde hoeveelheid N in g/kg mosselen/dag

$[N_{\text{gebonden}}]$  = concentratie deeltjes gebonden N

Q = filtratiecapaciteit in l/kg mosselen/uur

$P_{\text{gefilterd}}$  = gefilterde hoeveelheid P in g/kg mosselen/dag

$[P_{\text{gebonden}}]$  = concentratie deeltjes gebonden P

## 6.2.2 Verwijdering uit het systeem (slibafvoer)

De fractie van de gefiltreerde deeltjes die de mosselen niet gebruiken wordt als pseudo-feces tezamen met de werkelijke feces uitgescheiden. Deze feces en pseudo-feces bezinken en zullen als slib op de bodem van het filter terechtkomen. Uit het experiment, uitgevoerd in 2003 (hoofdstuk 5), waarbij de nadruk lag op het opvangen van het geproduceerde slib, is een rendement van 39 % (28-58 %) voor P vastgesteld. Dit wil zeggen dat van de hoeveelheid P die dagelijks door 1 kg mosselen uit het water wordt verwijderd, 39 % in het slib wordt teruggevonden. Voor N is dit rendement 12 % (9-18 %). Tabel 26 geeft een overzicht van de

hoeveelheid N en P die door het afvoeren van slib uit het systeem daadwerkelijk per kg mosselen per dag verwijderd kan worden.

*Tabel 26 Verwijdering van nutriënten uit het systeem door verwijdering van het geproduceerde slib per kilogram mosselen per dag voor de drie seizoenen waarin een mosselfilter effectief is. De waarden tussen de haakjes geven de standaard deviatie aan.*

| Seizoen  | Verwijderd N     | Verwijderd P        |
|----------|------------------|---------------------|
|          | g/kg/dag         | g/kg/dag            |
| Voorjaar | 0,21 (0,10-0,43) | 0,009 (0,004-0,017) |
| Zomer    | 0,20 (0,10-0,41) | 0,011 (0,005-0,022) |
| Herfst   | 0,24 (0,12-0,49) | 0,016 (0,007-0,031) |

De waarden vermeld in Tabel 26 gelden alleen voor constante concentraties gebonden N en P (Tabel 23). Wanneer echter door mosselfiltratie de nutriëntenconcentratie substantieel wordt verlaagd, zal de hoeveelheid die per dag wordt verwijderd afnemen. In het algemeen gelden dan formules 11 en 12.

**Error! Objects cannot be created from editing field codes.** *Formule 11*

**Error! Objects cannot be created from editing field codes.** *Formule 12*

Waarin:

$N_{\text{verwijderd}}$  = uit het systeem verwijderde hoeveelheid N in g/kg mosselen/dag

$[N_{\text{gebonden}}]$  = concentratie deeltjes gebonden N

Q = filtratiecapaciteit in l/kg mosselen/uur

$P_{\text{verwijderd}}$  = uit het systeem verwijderde hoeveelheid P in g/kg mosselen/dag

$[P_{\text{gebonden}}]$  = concentratie deeltjes gebonden P

### 6.3 Scenario's voor nutriëntenverwijdering uit de Steenbergse Vliet

#### 6.3.1 Verwijdering uit de waterkolom (filtratie)

Met de berekende waarden voor de gefilterde en verwijderde hoeveelheden N en P per kilogram ingezette mosselen kan berekend worden hoeveel mosselen ingezet moeten worden om een bepaalde reductie in de Vliet te bewerkstelligen. Wanneer voor de reductie van de belasting van het Volkerak een aantal streefwaarden worden vastgesteld, kan het ontwerp van het filter hierop worden afgestemd. Hierbij dient echter wel rekening te worden gehouden met het feit dat de mosselen alleen de hoeveelheid deeltjesgebonden nutriënten kunnen verwijderen. Doordat het percentage van de nutriënten wat zich in gebonden vorm in het water bevindt varieert ten opzichte van de totale nutriëntenvrucht (gebonden en opgelost), zal ook de reductie van het totaal aantal nutriënten variëren. Tabel 27 en Tabel 28 presenteren voor N en P wat het effect van de reductie van de gebonden fracties op de totaal fractie is.

Tabel 27 *Procentuele reductie van het totaal N bij een bepaalde reductie van de hoeveelheid deeltjes gebonden N.*

| Seizoen  | Reductie van tot-N bij 1% reductie gebonden N | Reductie van tot-N bij 5% reductie gebonden N | Reductie van tot-N bij 10% reductie gebonden N |
|----------|---|---|--|
|          | %   | %   | %  |
| Voorjaar | 0,20  | 1,0   | 2,0  |
| Zomer    | 0,51  | 2,6   | 5,1  |
| Herfst   | 0,40  | 2,0   | 4,0  |

Tabel 28 *Procentuele reductie van het totaal P bij een gegeven reductie van de hoeveelheid deeltjes gebonden P.*

| Seizoen  | Reductie van tot-P bij 1% reductie gebonden P | Reductie van tot-P bij 5% reductie gebonden P | Reductie van tot-P bij 10% reductie gebonden P |
|----------|---|---|--|
|          | %   | %   | %  |
| Voorjaar | 0,24  | 1,2   | 2,4  |
| Zomer    | 0,25  | 1,3   | 2,5  |
| Herfst   | 0,36  | 1,8   | 3,6  |

De hoeveelheid mosselen die benodigd zijn om de gepresenteerde reductie te behalen hangt ook af van de inrichting van het filter. Enerzijds kan gekozen worden voor één filterunit die in één keer het water geheel filtert en dus over de hele breedte van de Steenbergse Vliet strekt. Hierbij zal er geen menging mogen optreden van gefilterd met ongefilderd water en zal al het water tegelijkertijd door mosselen gefilterd moeten worden. In praktijk en in de Steenbergse Vliet in het bijzonder zal dit echter niet eenvoudig te realiseren zijn. Met name ook omdat een scheepvaart mogelijk zal moeten blijven. Bovendien zal de weerstand over een dergelijk volledig filter te hoog worden. Bij eerdere berekeningen naar het effect van een volledig biologisch filter op de zwevend stof belasting van het Volkerak is wel uit gegaan van één filter om de gehele water massa te filteren. Ook bij dit volledig filter was het niet mogelijk het water volledig te zuiveren en werd minimaal 20% van het water ongezuiverd doorgelaten (Voogt, 1989). Anderzijds kan worden gekozen voor meerdere filterunits die achter elkaar geschakeld zijn. In dit geval zal er tussen de verschillende units menging van gezuiverd en ongezuiverd water plaats vinden, waardoor dezelfde watermassa meerdere keren gezuiverd zal worden. In dit geval zullen er ook meer mosselen nodig zijn om dezelfde reductie te behalen. Deze uitvoer heeft verschillende voordelen die in hoofdstuk 7 benadrukt zullen worden.

Tabel 29 geeft aan hoeveel mosselen er per filterunit benodigd zijn om respectievelijk 1, 5 en 10 % van de gebonden nutriënten uit de aanvoer van de Steenbergse Vliet te filteren. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat elke mossel binnen deze filterunits wordt blootgesteld aan dezelfde concentraties gebonden N en P in het water, zodat elke mossel een gelijke bijdrage aan de reductie heeft (Welle, 2000). Voor een hogere reductie dan de genoemde 10% zullen verschillende units achterelkaar moeten worden geplaatst.

Tabel 29 Hoeveelheid mosselen (kg) benodigd om respectievelijk 1, 5 en 10 % van de deeltjesgebonden N en P uit de watekolom te filteren.

| Seizoen  | 1% reductie | 5 % reductie | 10 % reductie |
|----------|-------------|--------------|---------------|
| Voorjaar | 2200        | 10820        | 21700         |
| Zomer    | 1900        | 9500         | 19000         |
| Herfst   | 4700        | 23600        | 47100         |

### 6.3.2 Verwijdering uit het systeem (slibafvoer)

De totale hoeveelheid gebonden N en P uit het water wordt gefilterd (Tabel 29) zal niet geheel in het slib terecht komen. Een deel zal in de mosselen worden vastgelegd en een deel zal in opgeloste vorm worden uitgescheiden. Voor N is dit vooral in de vorm van ammonium. Tabel 30 en Tabel 31 geven voor N en P weer hoeveel kilogram mosselen er per filterunit benodigd is om verschillende percentages van de toevoer aan gebonden nutriënten in de Steenbergse Vliet daadwerkelijk met het slib uit het systeem te verwijderen. Ook hierbij wordt ervan uitgegaan dat elke mossel binnen deze filterunits wordt blootgesteld aan dezelfde

Tabel 30 Hoeveelheid mosselen (kg) benodigd om respectievelijk 1, 5 en 10 % van de gebonden N uit het systeem te verwijderen door afvoeren van het geproduceerde slib.

| Seizoen  | 1% reductie | 5 % reductie | 10 % reductie |
|----------|-------------|--------------|---------------|
| Voorjaar | 18000       | 90200        | 180500        |
| Zomer    | 15900       | 79400        | 158700        |
| Herfst   | 39300       | 196300       | 392700        |

Tabel 31 Hoeveelheid mosselen (kg) benodigd om respectievelijk 1, 5 en 10 % van de gebonden P uit het systeem te verwijderen door afvoeren van het geproduceerde slib.

| Seizoen  | 1% reductie | 5 % reductie | 10 % reductie |
|----------|-------------|--------------|---------------|
| Voorjaar | 5500        | 27600        | 55200         |
| Zomer    | 4900        | 24500        | 49000         |
| Herfst   | 12100       | 60400        | 120800        |

Wanneer een reductie van de eutrofiëringsproblemen wordt nagestreefd, zal het reduceren van de hoeveelheid P die het Volkerak in stroomt het meest effectief zijn. De problemen met overmatige algengroei doen zich met name in de zomer voor bij hoge temperaturen. Wanneer een mosselfilter wordt ingezet om de P vracht te reduceren, moet deze dus vooral de hoeveelheid die in het voorjaar en in de zomer door de Steenbergse Vliet wordt aangevoerd verminderen. Tabel 31 laat zien dat voor een verwijdering van 10% van de gebonden fractie P door slibafvoer in het voorjaar ongeveer 55200 kg mosselen benodigd zijn.

Wanneer er vanuit wordt gegaan dat het substraat in dezelfde mate gekoloniseerd is als in het veldexperiment in de Steenbergse Vliet, kan er per m<sup>2</sup> substraatoppervlak ongeveer 5 kg mosselen worden ingezet. Wanneer er voor een mosselfilter in de

vorm van hangcultures wordt gekozen, zoals in het tweede veldexperiment is gedaan, kan ongeveer 10 kg mosselen per m<sup>2</sup> substraat oppervlak worden ingezet.

Het afvalproduct van de filtratie is een hoeveelheid slib die periodiek uit het systeem verwijderd dient te worden. Tabel 32 laat zien dat de hoeveelheid slib die wordt geproduceerd aanzienlijk is. Het vinden van een nuttige bestemming voor dit slib lijkt een vereiste voor het succesvol inzetten van een mosselfilter. Gedacht kan worden aan gebruik als mest- of bouwstof.

*Tabel 32 Slibhoeveelheid geproduceerd door de hoeveelheid mosselen die zouden moeten worden ingezet om 1, 5 en 10 % van de hoeveelheid gebonden P in het voorjaar af te vangen.*

| percentage reductie van de hoeveelheid gebonden P in het voorjaar en zomer | Hoeveelheid mosselen | Hoeveelheid geproduceerd slib |
|--|----------------------|-------------------------------|
|  | kg                   | kg ds/dag                     |
| 1  | 5500                 | 41                            |
| 5  | 27600                | 204                           |
| 10   | 55200                | 408                           |

De in Tabel 32 genoemde hoeveelheden mosselen in een filterunit filteren een percentage van de totale waterstroom. Wanneer er wordt uitgegaan dat de mosselen 35 liter per uur per kg filteren zullen de mosselen in de drie seizoenen dat een mosselfilter effectief is de percentages zoals vermeld in Tabel 33 filteren. Uit deze percentages blijkt dat een filterunit ingericht om 10% van het gebonden P uit het systeem te verwijderen in het voorjaar al 25% van de totale waterstroom moet filteren. Dit verklaart de grote hoeveelheid slib die geproduceerd zal worden.

*Tabel 33 Percentage van de waterstroom die gefilterd wordt door hoeveelheden mosselen die nodig zijn om in het voorjaar 10% van de vracht gebonden P te reduceren.*

| Hoeveelheid mosselen | Percentage van de waterstroom gefilterd |       |        |
|----------------------|---|-------|--------|
|                      | voorjaar                                | zomer | herfst |
| kg                   |   |       |        |
| 5500                 | 2,5                                     | 2,9   | 1,2    |
| 27600                | 13                                      | 14    | 6      |
| 55200                | 25                                      | 29    | 12     |

### 6.3.3 Inrichting van het filter

De ruimte die door een mosselfilter wordt ingenomen hangt af van de kwaliteitseisen die worden gesteld aan het te zuiveren water (bepalend voor de hoeveelheid mosselen) en aan de inrichting van het filter zelf. Bij het ontwerp kan er gekozen worden om meerdere filterunits van verschillende groottes te koppelen dan wel één groot filter te maken. Aangezien het technisch en praktisch moeilijk is om de laatste optie in de Steenbergse Vliet te operationaliseren, zal een eventueel mosselfilter bestaan uit verschillende afzonderlijke filterunits.

Om de invloed van een aantal partiele filters op de concentratie van het gebonden P en N te bepalen is het simulatie programma ModelMaker (Cherwell Scientific, 1993) gebruikt. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de afname van de hoeveelheid P en N door filtratie, plaatsvindt volgens formules 9 en 10. De hoeveelheid N en P die worden opgevangen als slib worden bepaald door de formules 11 en 12. De afname van de dagelijks aangevoerde hoeveelheid N en P door filtratie volgt een eerste orde afnameproces. Formule 13 is gebruikt om de afname van de dagelijks aangevoerde hoeveelheid N en P door mosselfiltratie in het filter te beschrijven.

$$\frac{dX}{dt} = (-Q * 24 * n) * \frac{X}{D} \quad \text{Formule 13}$$

met :

X = totaal hoeveelheid N of P dat dagelijks wordt aangevoerd (mg)

Q = filtratiecapaciteit (liter per uur per kg mosselen)

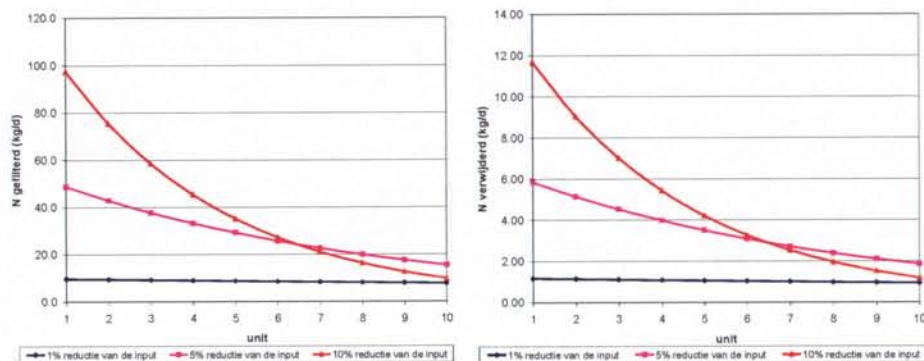
n = hoeveelheid mosselen (kg)

D = Hoeveelheid water die dagelijks wordt aangevoerd (liter)

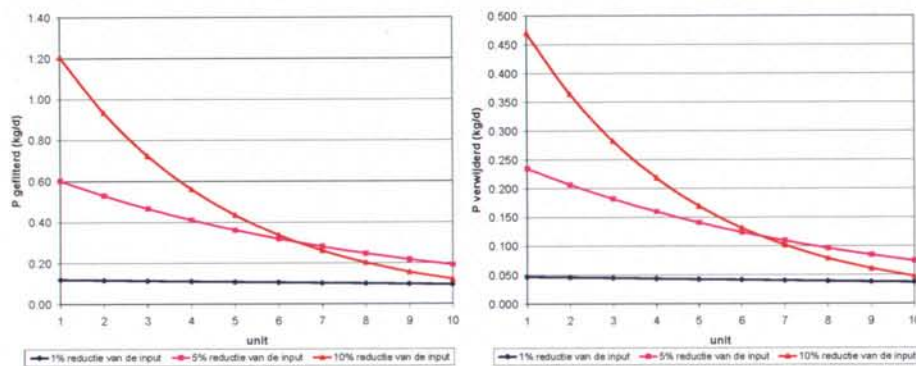
Voor P komt de als slib opgevangen hoeveelheid overeen met 39% van de dagelijkse afname door filtratie (paragraaf 6.2). Voor N is dit 12% (Formule 11 en 12). De hoeveelheid mosselen (n) in de drie filterunits zijn die hoeveelheden die nodig zijn om de in de vorm van slib opgevangen hoeveelheid nutriënten respectievelijk 1, 5 en 10% van de dagelijks aangevoerde hoeveelheid te laten zijn (voorjaarsituatie). Dit betekent dat de afname in de concentraties gebonden P en N veel hoger zullen zijn dan de gekozen percentages.

Middels het simulatieprogramma Modelmaker (Cherwell Scientific, 1993) zijn een aantal simulaties uitgevoerd waarbij meerdere filterunits achter elkaar geschakeld zijn. Tussen de units vindt volledige menging van water plaats. Voor elk filter geldt dat de afname van de hoeveelheid P gebonden in het slib in het voorjaar respectievelijk 1, 5 en 10% van de aangevoerde hoeveelheid is. Figuur 22 geeft voor N de hoeveelheid gefilterd uit het water en verwijderd met het slib weer als de verschillende filterunits achter elkaar geplaatst worden. In Figuur 23 is dit gedaan voor P. Dit is gedaan voor de filterunits die in het voorjaar 1, 5 en 10% van de hoeveelheid aangevoerde P uit de Steenbergse Vliet door vastlegging als slib kunnen verwijderen. Figuur 24 laat vervolgens de afname van de concentraties van gebonden N en gebonden P na passage van verschillende filterunits zien.

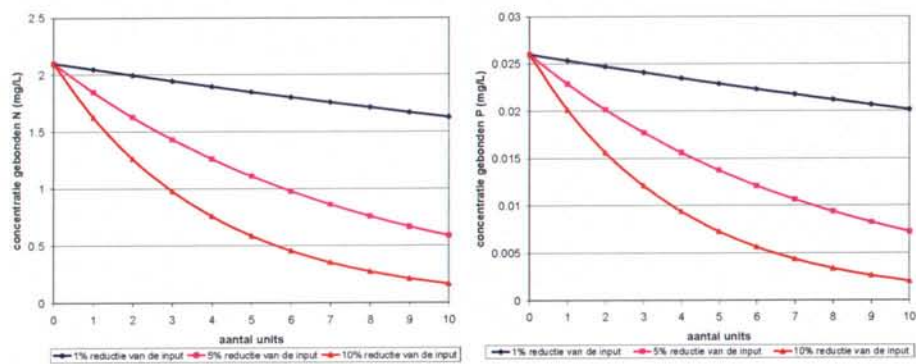




**Figuur 22** Hoeveelheid gefilterd N (uit de waterkolom) en hoeveelheid verwijderd N (met het slib) per dag voor de verschillende filterunits wanneer deze achterelkaar worden geplaatst.



**Figuur 23** Hoeveelheid gefilterd P (uit de waterkolom) en hoeveelheid verwijderd P (met het slib) per dag voor de verschillende filterunits wanneer deze achterelkaar worden geplaatst.



**Figuur 24** Concentratie gebonden N en gebonden P in het water na passage van de verschillende achterelkaar geplaatste filterunits.

## 7. Discussie en conclusies

Uit de experimenten met het mosselfilter die in 2002 en in 2003 zijn uitgevoerd in de monding van Steenbergse Vliet is, evenals in voorgaande experimenten naar het filtergedrag van Driehoeksmosselen, gebleken dat Driehoeksmosselen in staat zijn een grote hoeveelheid water van deeltjes te ontdoen. In een mosselfilter gericht op filtratie van deeltjesgebonden nutriënten, wordt deze eigenschap van de mosselen ingezet om de belasting van nutriënten te verlagen. Zo kan een bijdrage worden geleverd aan de reductie van eutrofiëringsproblemen in het Volkerak. Het uiteindelijke filter zoals het is getest in 2003 heeft de dubbele werking op het verminderen van de algenbloei. Enerzijds wordt door filtratie een groot deel het zwevende stof uit het water verwijderd. Dit verhoogt de helderheid en daarmee de beleving door het publiek. Anderzijds bezinkt een deel van de gefilterde deeltjes (en de hieraan gehechte verbindingen zoals nutriënten) als slib. Door dit slib te verwijderen uit het filter vindt daadwerkelijk een reductie van de deeltjes en nutriënten plaats. Het is mogelijk om mosselen in een technisch filter hun filterende werking te laten uitvoeren en ze daarmee toepasbaar te maken voor de waterzuivering.

Wanneer de gemiddelde concentraties van gebonden N en gebonden P over de jaren 1995-2001 in het voorjaar worden beschouwd, zal bij een filtratiecapaciteit van 35 liter per uur per kg mosselen 1800 mg N en 22 mg P per dag per ingezette kg mosselen uit de Steenbergse Vliet worden gefilterd. Voor de zomerperiode zijn deze hoeveelheden gemiddeld 1700 mg N en 18 mg P. Van deze gefilterde hoeveelheden zal een deel door de mossel en worden vastgelegd in mosselweefsel, een deel zal in opgeloste vorm worden uitgescheiden en een deel zal via de feces in het slib terechtkomen. De hoeveelheden die in het slib terechtkomen bedragen in de voorjaarsperiode voor de Steenbergse Vliet gemiddeld 210 mg N en 9 mg P per dag per ingezette kg mosselen. Voor de zomerperiode is dit gemiddeld 200 mg N en 11 mg P. Hoewel zowel N als P in het slib wordt aangetroffen wordt er ten opzichte van de hoeveelheid die wordt gefilterd veel meer P met het slib verwijderd dan N. Een belangrijk uitscheidingsproduct van mosselen is  $\text{NH}_4$ . Het lijkt waarschijnlijk dat een groot deel van het gebonden N uit het water door mosselen wordt omgezet in opgelost N. Door de filterende werking van de mosselen hoeft dit, wanneer in combinatie met het filter in het Volkerak de Driehoeksmosselpopulatie gestimuleerd wordt, niet te leiden tot een sterkere algengroei. Het water wordt immers ook door de aanwezige mosselen continu gefilterd waardoor ook algen gereduceerd worden (Bak *et al.*, 2004).

Ondanks de hoge filtratiecapaciteit van de Driehoeksmosselen en de reductie van N en P in de Steenbergse Vliet door het opvangen van geproduceerd slib, bestaan er nog verschillende factoren die het succes bepalen van het inzetten van mosselen voor de reductie van de nutriënten naar het Volkerak.

Ten eerste kunnen mosselen door filtratie alleen de hoeveelheid gebonden N en P reduceren. De opgeloste hoeveelheid kan zelfs toenemen, waardoor de beschikbare nutriënten voor algen juist kan toenemen. In de Steenbergse Vliet is in het voorjaar en de zomer ongeveer 25% van de hoeveelheid P in het water in gebonden vorm aanwezig. Ongeveer 75% van de hoeveelheid P kan dus onveranderd het filter passeren. Voor N is deze hoeveelheid in het voorjaar en de zomer gemiddeld 65%. Wanneer in de herfst en de winter de watertemperatuur daalt, zal de filteractiviteit van de mosselen afnemen. Bij temperaturen lager dan 10 graden (Noordhuis *et al.*, 1994), zal een groot deel van het gebonden P en N ook ongefilterd het Volkerak bereiken. Het lijkt derhalve noodzakelijk om een mosselfilter te combineren met andere maatregelen in het Volkerak die enerzijds de hoeveelheid algen verminderen of anderzijds de hoeveelheid beschikbare opgeloste nutriënten reduceren. Voor de reductie van algen kan worden gedacht aan het stimuleren van de mosselpopulatie en het zorgen voor een goede gezonde zooplanktonpopulatie. Een reductie van de opgeloste beschikbare nutriënten kan worden bewerkstelligd door rietaanplant en het stimuleren van ondergedoken waterplanten. Een andere mogelijkheid is om het effluent van de mosselfilterunits na te zuiveren met bijvoorbeeld een zuiveringsmoeras (Holthaus *et al.*, 2002).

Een andere factor die van invloed is op het succesvol inzetten van een mosselfilter in de Steenbergse Vliet is de natuurlijke beschikbaarheid van grote hoeveelheden mosselen. Deze hoeveelheden worden het eenvoudigst verkregen wanneer gebruik kan worden gemaakt van natuurlijke zaadval. Om een substantiële reductie van nutriënten in de Steenbergse Vliet te bewerkstelligen, zullen grote hoeveelheden mosselen moeten worden ingezet (55200 kg mosselen voor verwijdering uit het systeem van 10% van de totale toevoer door de Steenbergse Vliet van gebonden P in het voorjaar). Dit komt enerzijds doordat de mosselen alleen de gebonden fracties N en P afvangen en anderzijds door grote watermassa die dagelijks door de Steenbergse Vliet wordt aangevoerd. Afgezien van de beschikbaarheid van deze mosselen zal er ook ruimte gevonden moeten worden om dergelijke filterunits te plaatsen. Wanneer er naar gestreefd wordt om daadwerkelijk een substantieel deel van de nutriëntenvracht naar het Volkerak middels mosselfilters te reduceren, zullen ook in de andere watergangen die toevoeren aan het Volkerak, vergelijkbare maatregelen moeten worden genomen. Aangezien de afvoer van de Dintel ongeveer 3 maal zo groot is als via de Steenbergse Vliet, zullen ook hier aanzienlijke ruimtes en mosselhoeveelheden beschikbaar moeten zijn. Aangezien deze ruimte niet overal beschikbaar zal zijn, is een mosselfilter alleen niet het antwoord op de eutrofiëringsproblematiek in het Volkerak. Deze zal in samenwerking met andere maatregelen moeten worden ingezet om een bijdrage te leveren aan de oplossing van het probleem.

Omdat grote hoeveelheden mosselen benodigd zijn voor een substantiële reductie van de hoeveelheden P en N, zal ook de hoeveelheid geproduceerd slib aanzienlijk zijn (meer dan 400 kg ds per dag bij verwijdering uit het systeem van 10% van de totale toevoer door de Steenbergse Vliet van gebonden P in het voorjaar). Deze

hoeveelheid zal nog hoger zijn dan aangegeven, omdat de hoeveelheid die door fysische bezinking wordt geproduceerd bij het geproduceerde slib door mosselen komt. In het rapport is alleen de hoeveelheid meegenomen die door de mosselen zelf wordt geproduceerd. Naast dat de extra bezinking van deeltjes in het filter leidt tot een hoger slibvolume zal echter dit echter ook een extra reductie van gebonden N en P betekenen.

Het zal van belang zijn dat dit slib van goede kwaliteit is, waardoor hergebruik als bijvoorbeeld meststof of als bouwstof mogelijk is. Wanneer het slib echter verontreinigd is met microverontreinigingen zal het als afval moeten worden afgevoerd. Hiermee zijn grote bedragen gemoeid hetgeen het inzetten van een mosselfilter onmogelijk zou kunnen maken. Aangezien in de mosselen nagenoeg geen verhoogde concentraties PAKs zijn aangetroffen, wordt verondersteld dat deze zich ook niet in het slib zullen ophopen. Wel bestaat de mogelijkheid op verontreiniging met zware metalen (Cd, Cu en Ni). Met name de concentratie nikkel was in de mosselen na blootstelling sterk verhoogd. Beperkingen die deze mogelijke verontreinigingen voor hergebruik van het slib betekenen, zullen nog nader moeten worden onderzocht.

Eén van de grote voordelen van filtratie met mosselen is dat het nauwelijks energie kost, terwijl toch een groot deel van de watermassa wordt gefilterd. Zeker wanneer gebruik kan worden gemaakt van een natuurlijk aanwezige populatie Driehoeksmosselen. Wanneer dit het geval is, zoals in de Steenbergse Vliet, wordt volstaan met het aanbieden van goed en voldoende substraat in de waterkolom, wat binnen één seizoen gekoloniseerd kan worden. Alleen het afvangen en afvoeren van het geproduceerde slib zal dan energie behoeven. Op plaatsen waar geen natuurlijke populatie Driehoeksmosselen voorkomt kan reeds gekoloniseerd substraat worden gebruikt. Afhankelijk van de overleving op het substraat kan worden gekozen om jaarlijks nieuw gekoloniseerd substraat in het filter aan te brengen.

Wanneer er wordt gekozen voor één grote filterunit met grote hoeveelheden Driehoeksmosselen op één locatie zijn de risico's die het filter bedreigen groter dan wanneer voor verschillende kleinere units wordt gekozen. Schade aan het filter of ziekte of parasieten onder de Driehoeksmosselen kunnen bij één groot filter in één keer de gehele filterwerking teniet doen. Daarnaast heeft grote hoeveelheden mosselen op één locatie nog andere nadelen. Zo kan er interactie optreden tussen bezinkende feces en de filterende werking van de mosselen, waarbij de feces nogmaals gefilterd wordt. Andere problemen die kunnen optreden zijn voedselschaarse, zuurstoftekort en ammoniumproductie. Bovendien zal substraat beter en sterker gekoloniseerd worden wanneer er flinke afstand bestaat tussen de verschillende filterunits. Ook de weerstand die een dergelijk groot filter heeft kan tot problemen met de doorstroming leiden. Aan gezien scheepvaart in de Steenbergse Vliet ook mogelijk moet blijven en men dus al is aangewezen op een partieel filter, heeft een combinatie van enkele kleinere filterunits dan ook sterk de

voorkeur boven één groot filter. In het verleden zijn berekeningen uitgevoerd aan een biologisch filter ter verwijdering van contaminanten uit de instroom van het Volkerak. Hierbij werden verschillende modules vlak bij elkaar geplaatst en werd een rendement van 55% op de filtratie van zwevend stof bereikt (Voogt, 1989). Wanneer streefwaarden voor de nutriënten belasting van het Volkerak via de Steenbergse Vliet worden vastgesteld, kan samen met een inventarisatie van de voor mossel filters beschikbare locaties in de Steenbergse Vliet een gespecificeerd reductie- en inrichtingsplan worden opgesteld. Bovendien kunnen de verschillende benodigde kleinere filters gefaseerd geïnstalleerd worden. Bij succes van een eerste filter kunnen in openvolgende jaren de volgende filters geïnstalleerd worden.

Gezien de ervaringen met het mossel filter in de Steenbergse Vliet kan deze maatregel als succesvol worden beschouwd om bij de verwijdering van gebonden nutriënten uit de waterstroom te worden ingezet. Echter gezien de grote watermassa en de periodiek hoge concentraties opgeloste nutriënten die door de Steenbergse Vliet en de andere rivieren wordt aangevoerd zullen grote hoeveelheden mosselen ingezet moeten worden om een substantiële bijdrage te leveren aan de reductie van de belasting van het Volkerak met nutriënten. Een inventarisatie van het stroomgebied van de Steenbergse Vliet (en de Dintel) zal moeten leiden tot een selectie van locaties waar de inzet van mossel filters het hoogste rendement oplevert. Samen met andere maatregelen draagt een mossel filter, of verschillende mossel filters achter elkaar, echter wel bij aan een reductie van de eutrofiëringsproblemen. Wanneer gewenste streefwaarden voor reductie van de nutriëntenlast naar het Volkerak zijn gedefinieerd kan door het achter elkaar schakelen van verschillenden filterunits en het combineren van verschillende maatregelen de gewenste reductie worden behaald. Bovendien wordt dit met relatief weinig inspanning en op een natuurlijke wijze bereikt. Voorwaarde voor een duurzaam mossel filter is echter wel dat het geproduceerde slib niet verontreinigd is en kan worden hergebruikt als mest- of bouwstof.

## 8. Literatuurlijst

Ackerman J.D. (1999): Effect of velocity on the filter feeding of dreissenid mussels (*Dreissena polymorpha* and *Dreissena bugensis*): implications for trophic dynamics. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 56:1551-1561.

Aldridge D.W., B.S. Payne & A. C. Miller (1995). Oxygen consumption, nitrogenous excretion, and filtration rates of *Dreissena polymorpha* at acclimation temperatures between 20 and 32 degrees C. *C. J. Fish. Aquat. Sci.* 52:1761-1767.

Arnott D.L. & M.J. Vanni (1996): Nitrogen and phosphorus recycling by the Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) in the western basin of Lake Erie. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53(3):646-659.

Bak A., S. Bouma, M. Poot & P. Schouten (2004): Waterzuivering door Driehoeksmosselen (*Dreissena polymorpha*) in het Volkerak-Zoommeer. Het stimuleren van de ontwikkeling van Driehoeksmosselen door het storten van natuurlijk substraat. Rapport Bureau Waardenburg BV 03-231.

Bastviken D.T.E., N.F. Caraco & J.J. Cole (1998): Experimental measurements of Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) impacts on phytoplankton community composition. *Freshwater Biol.* 39:375-386.

Benthem Jutting W.S.S. van (1959): Ecology of freshwater Mollusca in the Netherlands. *Basteria* 23(Suppl.):106-131.

Blankendaal V.G. & M.G.D. Smit (2003): De toepasbaarheid van *Dreissena polymorpha* (Driehoeksmossel) in een waterfilter. TNO rapport, TNO-MEP-R2003/375.

Borcherding J. (1995): Laboratory experiments on the influence of food availability, temperature and photoperiod on gonad development in the freshwater mussel *Dreissena polymorpha*. *Malacologia* 36 (1-2):15-27.

Bruner K.A., S.W. Fisher & P.F. Landrum (1994): The role of the Zebra mussel, *Dreissena polymorpha*, in contaminant cycling: II. Zebra mussel contaminant accumulation from algae and suspended particles, and transfer to the benthic invertebrate, *Gammarus fasciatus*. *J. Great Lakes Res.* 20:735-750.

Bunt C.M., H.J. MacIsaac & W.G. Sprules (1993) Pumping rates and projected filtering impacts of juvenile Zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) in western Lake Erie. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 50:1017-1022.

Cherwell scientific (1993) Modelmaker version 3.0, [www.cherwell.com](http://www.cherwell.com).

Dobson E.P. & C.L. Mackie (1998): Increased deposition of organic matter, polychlorinated biphenyls, and cadmium by Zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) in western Lake Erie. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55(5):1131-1139.

Gossiaux D.C, P.F. Landrum & S.W. Fisher (1998): The assimilation of contaminants from suspended sediment and algae by the Zebra mussel, *Dreissena polymorpha*. *Chemosphere* 36:3181-3197.

Griffiths R.W. (1993): Effects of Zebra mussels on benthic fauna of Lake St. Clair. In: T.F. Nalepa & D.W. Schloesser (eds.), *Zebra mussels. Biology, impacts, and control*. Lewis publishers, Boca Raton.

Holthaus K.I.E., A. Weber, R.H. Jongbloed & M.G.D. Smit (2002): Macrofyten als hulpmiddel bij de verwijdering van fosfaat en stikstof in een gesloten, eutroof watersysteem. TNO rapport TNO-MEP-R2002/637.

Horgan M.J. & E.L. Mills (1997): Clearance rates and filtering activity of Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*): implications for freshwater lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 54:249-255.

Kusserow R. & J. Mählmann (1999): Zebra mussels as a biological filter. Presentatie op het Platform Ecologisch herstel van meren. Bijeenkomst 1999, RIZA te Lelystad.

Kraak M.H.S., M.C.Th. Scholten, W.H.M. Peeters & W.Chr. de Kock (1991): Biomonitoring of heavy metals in the western European rivers Rhine and Meuse using the freshwater mussel *Dreissena polymorpha*. *Environ. Pollut.* 74:101-114.

Kryger J. & H.U. Riisgård (1988): Filtration rate capacities in 6 species of European freshwater bivalves. *Oecologia* 77:34-38.

Leach J.H. (1993): Impacts of the Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) on water quality and fish spawning reefs in Western Lake Erie. In: T.F. Nalepa & D.W. Schloesser (eds.), *Zebra mussels. Biology, impacts, and control*. Lewis publishers, Boca Raton.

Lei J., B.S. Payne & S.Y. Wang (1996): Filtration dynamics of the Zebra mussel, *Dreissena polymorpha*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53:29-37.

MacIsaac H.J. & W.G. Sprules (1991): Ingestion of small-bodied zooplankton by Zebra mussels (*Dreissena polymorpha*): Can cannibalism on larvae influence population dynamics? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 48:2051-2060.

Morton B.S. (1969): Studies on the biology of *Dreissena polymorpha* Pall. III. Population dynamics. *Proc. Malac. Soc. Lond.* 38:471-482.

Nalepa T.F. & D.W. Schloesser (eds) (1993): Zebra mussels. Biology, impacts and control. Lewis publishers. Boca Raton.

Nichols S.J. (1996): Variations in the reproductive cycle of *Dreissena polymorpha* in Europe, Russia, and North America. Am. Zool. 36:311-325.

Noordhuis R., H.H. Reeders & E.C.L. Marteiijn (1992): Possibilities of a biological filter with Zebra mussels *Dreissena polymorpha* in the management of micropollutants. Proceedings of the technical meeting: How an estuary changed into a freshwater lake. Proceedings and information CHO-TNO, no 46.

Noordhuis R., H.H. Reeders & E.C.L. Marteiijn (1994): Inzet van Driehoeksmosselen bij biologisch waterbeheer; resultaten van veldexperimenten. H2O 27:150-160.

Reeders H.H. (1989a): De Driehoeksmossel, *Dreissena polymorpha*, als natuurlijk waterfilter. Onderzoek naar de mogelijkheden voor reductie van de verontreinigde slibblast bij de inlaat van het Volkerak-Zoommeer. RWS RIZA nota nr. 89.052.

Reeders H.H. (1989b): Actief beheer Zoommeer. Biologisch filter: haalbaar of niet? RWS RIZA nota nr. 89.059.

Reeders H.H., A. bij de Vaate & F.J. Slim (1989): The filtration rate of *Dreissena polymorpha* (Bivalvia) in three Dutch lakes with reference to biological water quality management. Freshwater Biol. 22:133-141.

Reeders H.H. (1990): Hangcultures Driehoeksmosselen (*Dreissena polymorpha*) resultaten van onderzoek in 1989. Dienst Binnenwateren/RIZA nota 90.030.

Reeders H.H., A. bij de Vaate & R. Noordhuis (1993): Potential of the Zebra Mussel (*Dreissena polymorpha*) for water quality management. In: T.F. Nalepa & D.W. Schloesser (eds.), Zebra mussels. Biology, impacts, and control. T.F. Nalepa & D.W. Schloesser. Lewis publishers, Boca Raton.

Smit M.G.D. & H. J. P. Vink (2000): Helderheidsbeleving, helderheid en watersamenstelling. TNO rapport, TNO-MEP-R2000/184.

Smit M.G.D. & E.M. Foekema (2000): Massabalansen in relatie tot macrobiologische zuivering in het nieuwe walrussenverblijf van het Dolfinarium. TNO rapport, TNO-MEP-R2000/183.

Smit M.G.D., A. Weber & V.G. Blankendaal (2003): Analyse en biologisch beheer van het watersysteem in het Vogelpark Avifauna. TNO rapport, TNO-MEP-R2003/374.



Sprung M. (1989): Field and laboratory observations of *Dreissena polymorpha* larvae: abundance, growth, mortality and food demands. Arch. Hydrobiol. 115:537-561.

Stanczykowska A. (1977): Ecology of *Dreissena polymorpha* (Pall.) (Bivalvia) in lakes. Pol. Arch. Hydrobiol. 24:461-530.

Stuckey R.L. & D.L. Moore (1995): Return and increase in abundance of aquatic flowering plants in Put-in Bay Harbor, Lake Erie, Ohio. Ohio J. Sci. 95(3):261-266.

Voogt L. (1989): Rendement van een biologisch filter. DBW/RIZA werkdocument 89.036X.

Welle R. van der (2000): CFD berekeningen aan een mosselfilter. TNO-MEP-R2000/029.

Zwart D. de, K.J.M. Kramer & H.A. Jenner (1995): Practical experiences with the biological early warning system "Musselmonitor". Environ. Toxicol. Water Qual. 10:237-247.

## 9. Dankwoord

Voor de samenwerking binnen het project danken wij het projectteam van Bureau Waardenburg bestaande uit de volgende personen:

- drs. Arjenne Bak (projectleider, organisatie en rapportage);
- drs. Sietse Bouma (duiker, labwerk en rapportage);
- drs. Patricia Schouten (duiker, labwerk en rapportage);
- drs. Hans Waardenburg (duiker);
- ing. Lieuwe Anema (GIS medewerker, vervaardigen kaarten).

Voor het project is een begeleidingsgroep samengesteld bestaande uit de volgende personen:

- Suzan Verheijden (Rijkswaterstaat, directie Zeeland; periode 2000-2002);
- Wim de Vos (Rijkswaterstaat, directie Zeeland; periode 2002-2003);
- Frans Schroeijers (Rijkswaterstaat, dienstkring Schelde-Rijn);
- Ruurd Noordhuis (Rijkswaterstaat, RIZA);
- Ruud van Oers (Hoogheemraadschap van West Brabant).

Bureau Waardenburg en TNO-MEP bedanken de leden van de begeleidingsgroep hartelijk voor de enthousiaste medewerking, tijd en moeite die zij in het project hebben gestoken. Het gezamenlijke projectteam van TNO en Bureau Waardenburg hoopt dat de onderzoeksresultaten zullen bijdragen aan het herstelproces van het aquatisch ecosysteem van het Volkerak-Zoommeer.

## 10. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Rijkswaterstaat directie Zeeland  
W.J. de Vos  
Postbus 5041  
4330 KA Middelburg

Namen en functies van de projectmedewerkers:

|                     |   |
|---------------------|---|
| Mathijs Smit        | Projectleiding, onderzoek en rapportage |
| Anke Weber          | onderzoek en rapportage.                |
| Monique Blankendaal | onderzoek                               |
| Roland Bernhard     | onderzoek                               |
| Miriam Collombon    | onderzoeksassistent                     |
| Gerrit Hoornsman    | onderzoeksassistent                     |
| Arnold Bakker       | onderzoeksassistent                     |
| Ronald de Vos       | onderzoeksassistent                     |
| Andrea Sneekes      | onderzoeksassistent                     |
| Pieter Goedhart     | onderzoeksassistent                     |

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

-

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

2000-2003

Ondertekening:



M.G.D. Smit  
Projectleider  
6 februari 2004

Goedgekeurd door:



C.C. Karman  
Afdelingshoofd  
6 februari 2004

## Bijlage 1 Resultaten van de systeemanalyse

De onderstaande tabellen en figuren geven een overzicht van de fysische, chemische en biologische parameters aan die op de monsterpunten zijn gemeten.

### Fysische bepalingen

Tabel 34 zuurstof, temperatuur, troebelheid en geleidbaarheid.

| Monsterpunt       | Locatie | Kenmerken                     | T    | O <sub>2</sub><br>(mg/l) | Turbiditeit | EGV | Stroomsnelheid<br>(m/s) |
|-------------------|---------|-------------------------------|------|--------------------------|-------------|-----|-------------------------|
| Steenbergse Vliet |         |                               |      |                          |             |     |                         |
| 1                 | 1       | waterkant                     | 10,1 | 15,08                    | 8,5         | 804 | 0,50                    |
| 2                 | 1       | oeverkant                     | 10,1 | 14,92                    | 8,6         | 805 | 0,10                    |
| 3                 | 1       | 2 meter van de kant           | 10,2 | 15,61                    | 7,7         | 831 | 0,10                    |
| 4                 | 2       | 2,1 m diepte                  | 10,2 | 15,32                    | 9,8         | 796 | 0,00                    |
| 5                 | 2       | 2,1 m diepte                  | 10,2 | 15,32                    | 9,8         | 796 | 0,01                    |
| Dintel            |         |                               |      |                          |             |     |                         |
| 6                 | 3       | ter hoogte van huis beheerder | 10,2 | 10,31                    | 13          | 533 | 0,16                    |
| 7                 | 3       | ter hoogte van huis beheerder | 10,1 | 10,19                    | 13          | 532 | 0,09                    |
| 8                 | 4       | onder viaduct                 | 10,3 | 9,86                     | 22          | 499 | 0,03                    |
| 9                 | 4       | meer landinwaarts             | 10,4 | 11,71                    | 19          | 496 | 0,04                    |
| 10                | 4       | in de sluis                   |      |                          |             |     | 0,26                    |

### Chemische parameters

Tabel 35 Zwevend stof (24-04-01)

| Monsterpunt       | Locatie | Chlorofyltotaal levend | #deeltjes/ml | Zwevende stof (mg/l) |
|-------------------|---------|------------------------|--------------|----------------------|
| Steenbergse Vliet |         |                        |              |                      |
| 1                 | 1       | 50,19                  | 21,91        | 229000               |
| 2                 | 1       | 47,51                  | 16,26        | 366200               |
| 3                 | 1       | 35,75                  | 12,07        | 275500               |
| 4                 | 2       | 42,48                  | 16,05        | 770700               |
| 5                 | 2       | 39,5                   | 18,42        | 220100               |
| Dintel            |         |                        |              |                      |
| 6                 | 3       | 17,78                  | 5,55         | 135400               |
| 7                 | 3       |                        |              |                      |
| 8                 | 4       | 16,15                  | 4,74         | 301300               |
| 9                 | 4       | 14,75                  | 6,08         | 300800               |

Tabel 36 *Zwevend stof (19-06-01)*

|                                  | zwevende stof |      | organische stof | Chlorofyl-a deeltjes |
|----------------------------------|---------------|------|-----------------|----------------------|
|                                  | mg/l          | mg/l | µg/l            | n/ml                 |
| Steenbergse Vliet paal 4         | 13,5          | 10,1 | 14,13           | 27124                |
| Steenbergse Vliet drijvende paal | 14,2          | 8,5  | 13,46           | 11398                |
| Dinteloord Sluis                 | 15,0          | 9,3  | 18,95           | 29748                |
| Dinteloord Viaduct               | 12,2          | 7,4  | 16,44           | 21536                |

### Nutriënten

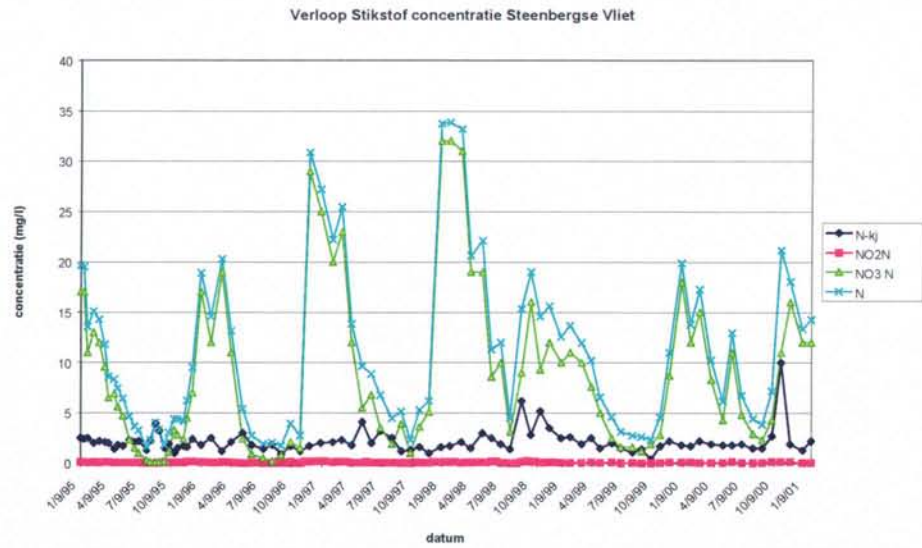
Tabel 37 *Nutriënten in milligram N of P per liter in de Steenbergse Vliet.*

| Locatie     | Steenbergse Vliet |       |       |       |       |
|-------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
|             | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     |
| locatie     | 1                 | 1     | 1     | 2     | 2     |
| Nitraat-N   | 9,5               | 11,4  | 9,1   | 10,3  | 10,6  |
| Nitriet-N   | 0,17              | 0,15  | 0,13  | 0,15  | 0,12  |
| Ammonium-N  | <0,03             | <0,03 | <0,03 | <0,03 | 0,03  |
| o-Fosfaat-P | <0,03             | <0,03 | <0,03 | <0,03 | <0,03 |

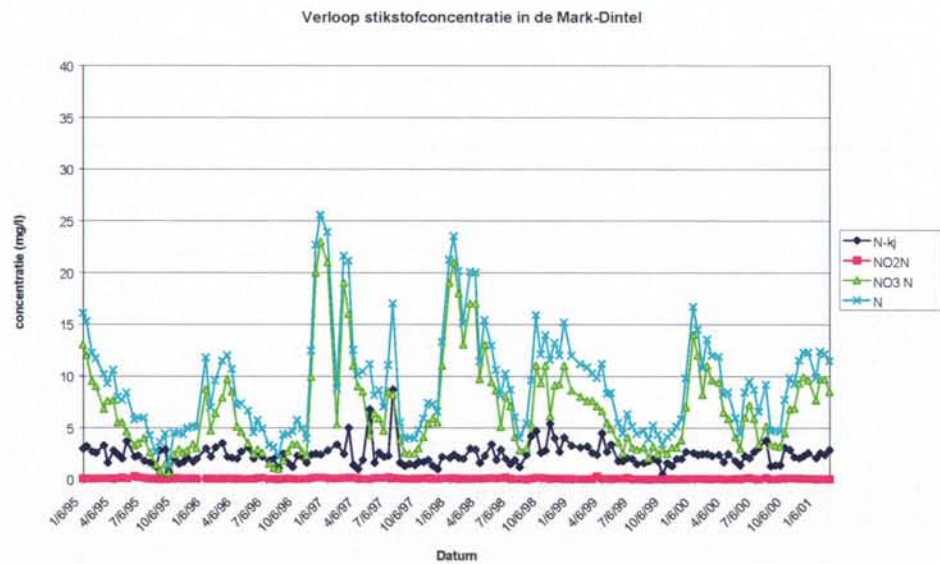
Tabel 38 *Nutriënten in milligram N of P per liter in de Dintel.*

| Locatie     | Mark/ Dintel |      |      |
|-------------|--------------|------|------|
|             | 6            | 8    | 9    |
| locatie     | 3            | 4    | 4    |
| Nitraat-N   | 8            | 9,2  | 9    |
| Nitriet-N   | 0,19         | 0,7  | 0,17 |
| Ammonium-N  | 0,44         | 0,36 | 0,25 |
| o-Fosfaat-P | 0,04         | 0,12 | 0,04 |

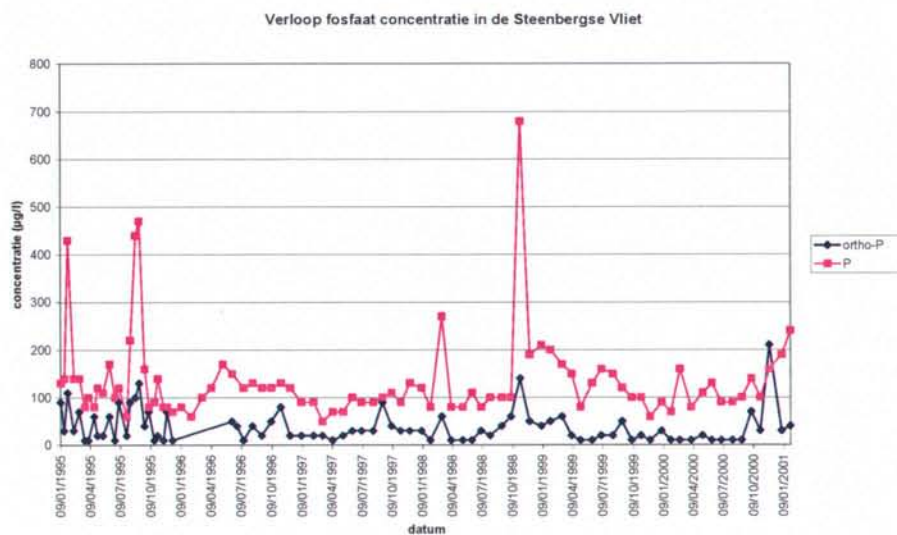
Het Hoogheemraadschap van West Brabant meet de nutriëntenconcentratie in zowel de Steenbergse Vliet als de Mark/Dintel als een standaard parameter. In onderstaande grafieken is het verloop van de stikstofconcentratie in de waterkolom over de periode 1995-2001 weergegeven.



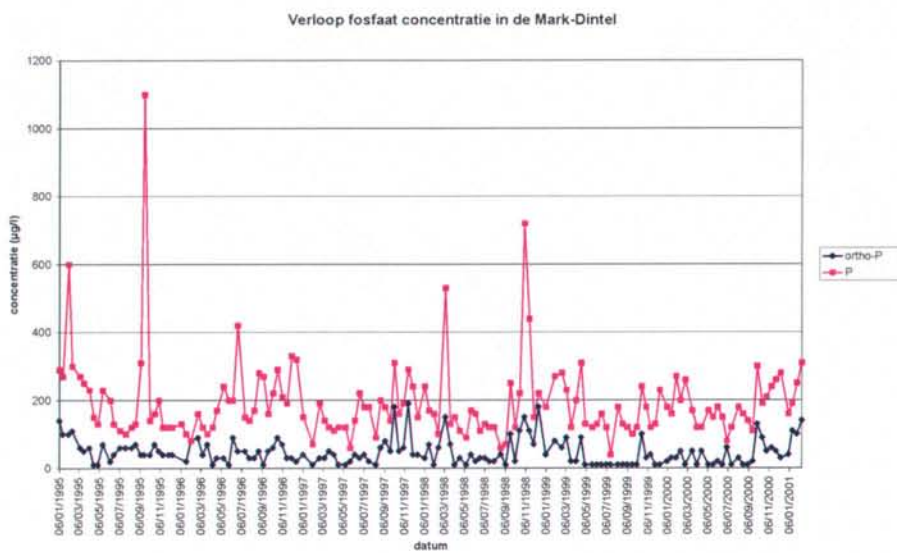
*Figuur 25* Het nutriëntenverloop(N) in de Steenbergse Vliet. In de Steenbergse Vliet is in het begin van het jaar (januari-april) sprake van piek in de concentratie-afvoer van nutriënten.



*Figuur 26* Het nutriëntenverloop (N) in de Mark/Dintel. In de maanden juli-augustus is er sprake van een sterk verminderde afvoer van nutriënten.



Figuur 27 Het nutriëntenverloop(P) in de Steenbergse Vliet.



Figuur 28 Het nutriëntenverloop (P) in de Mark/Dintel.

**Biologische parameters****Zoöplankton***Tabel 39 Resultaten van de zoöplankton bemonstering in aantal getelde zoöplankton per liter.*

| <b>Steenbergse Vliet</b> |      |      |      |      |      |
|--------------------------|------|------|------|------|------|
| <i>Locatie</i>           | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    |
| <i>Monsterpunt</i>       | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Cladocerans              | 23   | 20   | 24   | 13   | 13   |
| Copepods                 | 190  | 268  | 164  | 408  | 153  |
| Rotifers                 | 3625 | 4750 | 1444 | 4225 | 1950 |

| <b>Mark/ Dintel</b> |     |     |     |
|---------------------|-----|-----|-----|
| <i>Locatie</i>      | 3   | 4   | 4   |
| <i>Monsterpunt</i>  | 6   | 8   | 9   |
| Cladocerans         | 10  | 5   |     |
| Copepods            | 153 | 120 | 115 |
| Rotifers            | 850 | 975 | 550 |

**Fytoplankton***Tabel 40 Aantal getelde fytoplanktoncellen per milliliter in de Steenbergse Vliet.*

| <b>Steenbergse Vliet</b> |       |       |       |       |       |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Locatie</i>           | 1     | 1     | 2     | 2     | 2     |
| <i>Monsterpunt</i>       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| Blauwalgen               | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Diatomeeën               | 3253  | 3733  | 4853  | 1653  | 4533  |
| Dino-flagelaat           | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Flagellaten              | 17227 | 20747 | 22293 | 9120  | 11627 |
| Groenalgen               | 427   | 267   | 373   | 160   | 0     |
| Goudalgen                | 0     | 373   | 587   | 0     | 0     |
| Totaal                   | 20907 | 25120 | 28107 | 10933 | 16160 |



*Tabel 41 Aantal getelde fytoplanktoncellen per milliliter in de Dintel.*

|                    | Mark/ Dintel |      |      |
|--------------------|--------------|------|------|
| <i>Locatie</i>     | 3            | 4    | 4    |
| <i>Monsterpunt</i> | 6            | 8    | 9    |
| Blauwalgen         | 0            | 213  | 0    |
| Diatomeeën         | 2080         | 1120 | 853  |
| Dino-flagelaat     | 0            | 0    | 53   |
| Flagellaten        | 6027         | 2827 | 2720 |
| Groenalgen         | 640          | 320  | 1067 |
| Goudalgen          | 0            | 107  | 0    |
| Totaal             | 8747         | 4587 | 4693 |

### Macrofauna

De macrofauna is niet kwantitatief bemonsterd. Er is zo gemonsterd dat een indruk is verkregen van de in het systeem aanwezige macrofauna.

Tabel 42 Macrofauna in de Steenbergse Vliet

| Steenbergse Vliet        |   |   |    |   |   |
|--------------------------|---|---|----|---|---|
| Locatie                  | 1 | 1 | 1  | 2 | 2 |
| monsterpunt              | 1 | 2 | 3  | 4 | 5 |
| <i>Asellus aquaticus</i> |   |   |    |   |   |
| <i>Ceanidae</i>          |   |   |    |   |   |
| <i>Chironomidae</i>      |   |   | 17 |   |   |
| <i>Corophium</i>         | 2 |   |    | 1 |   |
| <i>Dugesia</i>           |   |   | 2  |   |   |
| <i>Gammarus roeselli</i> |   |   | 7  | 1 |   |
| <i>Gammarus tigrinus</i> |   |   |    |   |   |
| <i>Glossiphonia</i>      |   |   | 1  |   |   |
| <i>Stylaria</i>          |   |   |    |   |   |

Tabel 43 Macrofauna in de Dintel

| Mark/ Dintel             |    |   |   |
|--------------------------|----|---|---|
| Locatie                  | 3  | 4 | 4 |
| monsterpunt              | 6  | 8 | 9 |
| <i>Asellus aquaticus</i> |    |   | 1 |
| <i>Ceanidae</i>          | 1  |   |   |
| <i>Chironomidae</i>      |    |   |   |
| <i>Corophium</i>         | 15 |   |   |
| <i>Dugesia</i>           |    |   |   |
| <i>Gammarus roeselli</i> |    |   |   |
| <i>Gammarus tigrinus</i> | 11 |   |   |
| <i>Glossiphonia</i>      |    |   |   |
| <i>Stylaria</i>          | 25 |   |   |

### Driehoeksmossel groei en settlement

Tabel 44 Groei van Driehoeksmosselen op de vier locaties

| Beschrijving                            | Steenbergse Vliet<br>staande paal | Steenbergse<br>Vliet drijvende<br>paal | Dintel sluis | Dintel viaduct |
|---|-----------------------------------|--|--------------|----------------|
| Locatie                                 | 1                                 | 2                                      | 3            | 4              |
| lengte 19/6/2001 (mm)                   | 22,87                             | 23,74                                  | 22,67        | 22,65          |
| lengte 24/4/2001 (mm)                   | 21,35                             | 21,95                                  | 21,84        | 21,94          |
| Gemiddelde<br>wekelijkse<br>toename (%) | 0,85%                             | 0,96%                                  | 0,46%        | 0,39%          |

Tabel 45 Aantal mosselen gesetteld op uitgezet substraat

| Beschrijving    | Steenbergse Vliet<br>staande paal | Steenbergse Vliet<br>drijvende paal | Dintel sluis | Dintel viaduct |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------|----------------|
| Locatie         | 1                                 | 2                                   | 3            | 4              |
| substraat blauw | 5 exempl                          | 1 exempl                            | 0 exempl     |                |
| substraat zwart | 19 exempl                         | 0 exempl                            | 0 exempl     |                |
| Steen           | 25 exempl                         | 19 exempl                           | 0 exempl     | 40 exempl      |

## Bijlage 2 Resultaten van nutriëntenanalyses tijdens het veldexperiment in 2002

Tabel 46 Resultaten van de nutriënten metingen (mg/L) gedurende het doorstroomexperiment.

| datum     | code        | in/uit | NH4(N) | PO4   | NO3(N) | NO2(N) | total N(N) | totalP(P) |
|-----------|-------------|--------|--------|-------|--------|--------|------------|-----------|
| 23-Apr-02 | controle    | in     | <0.1   | <0.04 | 4.9    | 0.01   | 5.8        | 0.1       |
| 23-Apr-02 | controle    | uit    | 0.2    | <0.03 | 4.6    | 0.03   | 5.5        | 0.08      |
| 23-Apr-02 | horizontaal | in     | 0.3    | <0.03 | 4.6    | 0.03   | 5.6        | 0.11      |
| 23-Apr-02 | horizontaal | uit    | <0.1   | <0.03 | 4.8    | 0.01   | 5.5        | 0.08      |
| 23-Apr-02 | verticaal   | in     | 0.2    | <0.03 | 4.4    | 0.04   | 5.5        | 0.08      |
| 23-Apr-02 | verticaal   | uit    | 0.2    | <0.03 | 4.6    | 0.03   | 5.7        | 0.08      |
| 8-May-02  | controle    | in     | 0.2    | <0.03 | 3.1    | 0.03   | 4.2        | 0.06      |
| 8-May-02  | controle    | uit    | 0.2    | <0.03 | 3      | 0.03   | 4.1        | 0.11      |
| 8-May-02  | horizontaal | in     | 0.2    | <0.03 | 3.1    | 0.03   | 4.2        | 0.07      |
| 8-May-02  | horizontaal | uit    | 0.2    | <0.03 | 3      | 0.03   | 4          | 0.08      |
| 8-May-02  | verticaal   | in     | 0.2    | <0.03 | 3.2    | 0.03   | 4.1        | 0.06      |
| 8-May-02  | verticaal   | uit    | 0.2    | <0.03 | 3.1    | 0.03   | 4          | 0.06      |
| 23-May-02 | controle    | in     | 0.2    | 0.04  | 3.8    | 0.06   | 4.6        | 0.11      |
| 23-May-02 | controle    | uit    | 0.1    | 0.05  | 3.8    | 0.06   | 4.6        | 0.14      |
| 23-May-02 | horizontaal | in     | 0.2    | 0.04  | 3.8    | 0.07   | 4.5        | 0.11      |
| 23-May-02 | horizontaal | uit    | 0.1    | 0.04  | 3.8    | 0.06   | 4.6        | 0.13      |
| 23-May-02 | verticaal   | in     | 0.2    | 0.04  | 3.8    | 0.06   | 4.6        | 0.11      |
| 23-May-02 | verticaal   | uit    | 0.1    | 0.04  | 3.8    | 0.06   | 4.6        | 0.15      |
| 12-Jun-02 | controle    | in     | -      | -     | -      | -      | -          | -         |
| 12-Jun-02 | controle    | uit    | 0.1    | <0.03 | 2.4    | 0.04   | 3.5        | 0.08      |
| 12-Jun-02 | horizontaal | in     | 0.1    | <0.03 | 2.4    | 0.03   | 3.4        | 0.10      |
| 12-Jun-02 | horizontaal | uit    | 0.1    | <0.03 | 2.4    | 0.03   | 3.5        | 0.10      |
| 12-Jun-02 | verticaal   | in     | 0.1    | <0.03 | 2.4    | 0.03   | 3.4        | 0.08      |
| 12-Jun-02 | verticaal   | uit    | 0.1    | 0.03  | 2.4    | 0.04   | 3.4        | 0.10      |
| 19-Jun-02 | controle    | in     | 0.1    | <0.03 | 3.4    | 0.05   | 5.2        | 0.08      |
| 19-Jun-02 | controle    | uit    | 0.1    | 0.03  | 3.3    | 0.05   | 4.5        | 0.09      |
| 19-Jun-02 | horizontaal | in     | 0.1    | <0.03 | 3.0    | 0.05   | 4.2        | 0.08      |
| 19-Jun-02 | horizontaal | uit    | 0.1    | <0.03 | 3.0    | 0.05   | 3.9        | 0.09      |
| 19-Jun-02 | verticaal   | in     | 0.1    | <0.03 | 3.1    | 0.05   | 5.3        | 0.09      |
| 19-Jun-02 | verticaal   | uit    | 0.1    | <0.03 | 4.9    | 0.07   | 6.1        | 0.11      |
| 5-Jul-02  | controle    | in     | 0.1    | <0.03 | 1.6    | 0.02   | 2.8        | 0.09      |
| 5-Jul-02  | controle    | uit    | 0.1    | <0.03 | 1.3    | 0.02   | 2.4        | 0.10      |
| 5-Jul-02  | horizontaal | in     | 0.1    | <0.03 | 1.2    | 0.02   | 2.4        | 0.08      |
| 5-Jul-02  | horizontaal | uit    | 0.1    | <0.03 | 1.4    | 0.02   | 2.4        | 0.08      |
| 5-Jul-02  | verticaal   | in     | 0.1    | <0.03 | 1.8    | 0.02   | 2.8        | 0.08      |
| 5-Jul-02  | verticaal   | uit    | 0.1    | 0.03  | 2.0    | 0.03   | 3.2        | 0.09      |
| 17-Jul-02 | controle    | in     | 0.1    | <0.03 | 0.98   | 0.02   | 2.0        | 0.08      |
| 17-Jul-02 | controle    | uit    | 0.1    | <0.03 | 1.0    | 0.03   | 2.3        | 0.09      |
| 17-Jul-02 | horizontaal | in     | 0.1    | <0.03 | 0.94   | 0.02   | 2.2        | 0.09      |
| 17-Jul-02 | horizontaal | uit    | <0.10  | <0.03 | 1.2    | 0.03   | 2.3        | 0.09      |
| 17-Jul-02 | verticaal   | in     | <0.10  | <0.03 | 0.97   | 0.02   | 2.0        | 0.09      |
| 17-Jul-02 | verticaal   | uit    | 0.1    | <0.03 | 1.1    | 0.03   | 2.1        | 0.09      |
| 31-Jul-02 | controle    | in     | 0.1    | <0.03 | 1.3    | 0.03   | 2.4        | 0.09      |
| 31-Jul-02 | controle    | uit    | 0.1    | <0.03 | 1.4    | 0.03   | 2.5        | 0.10      |
| 31-Jul-02 | horizontaal | in     | 0.1    | <0.03 | 1.3    | 0.03   | 2.4        | 0.07      |
| 31-Jul-02 | horizontaal | uit    | 0.2    | <0.03 | 1.6    | 0.04   | 3.0        | 0.09      |
| 31-Jul-02 | verticaal   | in     | 0.1    | <0.03 | 1.4    | 0.04   | 2.4        | 0.09      |
| 31-Jul-02 | verticaal   | uit    | 0.1    | <0.03 | 1.2    | 0.03   | 2.1        | 0.06      |

Tabel 47 *Overzicht over de gedurende het afsluitingsexperiment gemeten nutriënten concentraties. Te onderscheiden zijn 3 periodes: afsluiting I (overdag) en afsluiting II (nacht) en een eindperiode waarbij het filter weer open stond en elk uur monsters werden genomen*

| fase          | tijdcode (h) | code        | in/uit | NH4 (N) | PO4   | NO3(N) | NO2(N) | totaal N(N) | totaal P(P) |
|---------------|--------------|-------------|--------|---------|-------|--------|--------|-------------|-------------|
| afsluiting I  | 0            | controle    | in     | 0,2     | 0,03  | 1,6    | 0,04   | 2,8         | 0,1         |
| afsluiting I  | 0            | horizontaal | in     | 0,1     | <0,03 | 1,6    | 0,05   | 2,7         | 0,1         |
| afsluiting I  | 0            | verticaal   | in     | 0,1     | 0,03  | 1,6    | 0,04   | 2,7         | 0,24        |
| afsluiting I  | 2            | controle    | in     | 0,1     | 0,03  | 1,6    | 0,04   | 2,8         | 0,18        |
| afsluiting I  | 2            | horizontaal | in     | 0,2     | 0,03  | 1,7    | 0,04   | 2,9         | 0,11        |
| afsluiting I  | 2            | verticaal   | in     | 0,2     | 0,04  | 1,6    | 0,03   | 2,9         | 0,10        |
| afsluiting I  | 3            | controle    | in     | 0,1     | 0,03  | 1,6    | 0,04   | 2,8         | 0,17        |
| afsluiting I  | 3            | horizontaal | in     | 0,1     | 0,04  | 1,8    | 0,04   | 2,8         | 0,11        |
| afsluiting I  | 3            | verticaal   | in     | 0,1     | 0,05  | 1,6    | 0,04   | 3,0         | 0,11        |
| afsluiting I  | 4            | controle    | in     | 0,1     | 0,04  | 1,7    | 0,04   | 2,9         | 0,09        |
| afsluiting I  | 4            | horizontaal | in     | 0,1     | 0,04  | 1,8    | 0,04   | 2,9         | 0,09        |
| afsluiting I  | 4            | verticaal   | in     | 0,1     | 0,04  | 1,8    | 0,03   | 2,8         | 0,09        |
| afsluiting I  | 5            | controle    | in     | 0,1     | 0,04  | 1,8    | 0,04   | 2,7         | 0,09        |
| afsluiting I  | 5            | horizontaal | in     | 0,1     | 0,05  | 1,8    | 0,04   | 2,9         | 0,11        |
| afsluiting I  | 5            | verticaal   | in     | 0,1     | 0,06  | 1,8    | 0,04   | 2,8         | 0,10        |
| afsluiting I  | 6            | controle    | in     | 0,1     | 0,06  | 1,8    | 0,05   | 2,8         | 0,10        |
| afsluiting I  | 6            | horizontaal | in     | 0,1     | 0,05  | 1,8    | 0,04   | 2,9         | 0,20        |
| afsluiting I  | 6            | verticaal   | in     | 0,1     | 0,04  | 1,7    | 0,04   | 3,0         | 0,08        |
| afsluiting I  | 7            | controle    | in     | 0,1     | 0,03  | 1,2    | 0,03   | 3,1         | 0,17        |
| afsluiting I  | 7            | horizontaal | in     | <0,1    | 0,04  | 1,3    | 0,03   | 3,0         | 0,19        |
| afsluiting I  | 7            | verticaal   | in     | 0,1     | 0,03  | 1,2    | 0,03   | 3,1         | 0,18        |
| afsluiting I  | 8            | controle    | in     | 0,1     | <0,03 | 1,1    | 0,03   | 2,8         | 0,16        |
| afsluiting I  | 8            | horizontaal | in     | <0,1    | <0,03 | 1,3    | 0,03   | 3,0         | 0,18        |
| afsluiting I  | 8            | verticaal   | in     | 0,1     | 0,03  | 1,2    | 0,03   | 2,9         | 0,13        |
| afsluiting II | 1            | controle    | in     | <0,1    | <0,03 | 1,2    | 0,03   | 2,6         | 0,10        |
| afsluiting II | 1            | horizontaal | in     | 0,1     | 0,04  | 1,4    | 0,03   | 2,6         | 0,10        |
| afsluiting II | 1            | verticaal   | in     | 0,1     | 0,03  | 1,3    | 0,03   | 2,6         | 0,12        |
| afsluiting II | 2            | controle    | in     | <0,1    | 0,03  | 1,3    | 0,03   | 2,8         | 0,12        |
| afsluiting II | 2            | horizontaal | in     | 0,1     | 0,04  | 1,2    | 0,02   | 3,5         | 0,17        |
| afsluiting II | 2            | verticaal   | in     | 0,1     | 0,03  | 1,4    | 0,03   | 2,9         | 0,12        |
| afsluiting II | 3            | controle    | in     | 0,1     | 0,04  | 1,4    | 0,04   | 2,7         | 0,10        |
| afsluiting II | 3            | horizontaal | in     | 0,2     | 0,07  | 1,5    | 0,03   | 3,7         | 0,18        |
| afsluiting II | 3            | verticaal   | in     | -       | -     | -      | -      | -           | -           |
| afsluiting II | 4            | controle    | in     | 0,2     | 0,05  | 1,4    | 0,03   | 2,8         | 0,11        |
| afsluiting II | 4            | horizontaal | in     | 0,2     | 0,07  | 1,6    | 0,04   | 2,7         | 0,13        |
| afsluiting II | 4            | verticaal   | in     | 0,1     | 0,05  | 1,5    | 0,03   | 2,8         | 0,10        |
| afsluiting II | 5            | controle    | in     | 0,2     | 0,06  | 1,4    | 0,04   | 2,7         | 0,11        |
| afsluiting II | 5            | horizontaal | in     | 0,2     | 0,08  | 1,5    | 0,07   | 2,8         | 0,14        |
| afsluiting II | 5            | verticaal   | in     | 0,1     | 0,08  | 1,6    | 0,04   | 2,9         | 0,16        |
| afsluiting II | 6            | controle    | in     | 0,1     | 0,06  | 1,4    | 0,05   | 2,7         | 0,14        |
| afsluiting II | 6            | horizontaal | in     | 0,2     | 0,08  | 1,5    | 0,08   | 2,8         | 0,16        |
| afsluiting II | 6            | verticaal   | in     | 0,2     | 0,08  | 1,4    | 0,11   | 2,7         | 0,17        |
| afsluiting II | 7            | controle    | in     | 0,1     | 0,06  | 1,4    | 0,06   | 2,6         | 0,12        |
| afsluiting II | 7            | horizontaal | in     | 0,2     | 0,05  | 1,3    | 0,14   | 2,7         | 0,11        |
| afsluiting II | 7            | verticaal   | in     | 0,2     | 0,07  | 1,4    | 0,11   | 2,8         | 0,21        |
| open          | 1            | controle    | in     | 0,2     | 0,12  | 1,6    | 0,04   | 8,7         | 0,70        |

| fase | tijdcode (h) | code        | in/uit | NH4 (N) | PO4   | NO3(N) | NO2(N) | totaal N(N) | totaal P(P) |
|------|--------------|-------------|--------|---------|-------|--------|--------|-------------|-------------|
| open | 1            | horizontaal | in     | 0,7     | 0,34  | 1,1    | 0,03   | 19,0        | 1,5         |
| open | 1            | verticaal   | in     | 0,3     | 0,10  | 1,5    | 0,03   | 8,2         | 0,64        |
| open | 2            | controle    | in     | 4,7     | 3,10  | 0,2    | 0,02   | 160,0       | 15,00       |
| open | 2            | horizontaal | in     | 1,9     | 2,00  | 0,2    | 0,02   | 84,0        | 8,40        |
| open | 2            | verticaal   | in     | 4,3     | 1,90  | 0,3    | 0,03   | 110,0       | 10,00       |
| open | 3            | controle    | in     | 0,1     | 0,03  | 1,9    | 0,04   | 3,5         | 0,14        |
| open | 3            | controle    | uit    | 0,1     | <0,03 | 1,8    | 0,05   | 3,6         | 0,18        |
| open | 3            | horizontaal | in     | 0,1     | <0,03 | 1,9    | 0,05   | 3,3         | 0,12        |
| open | 3            | horizontaal | uit    | 0,1     | 0,03  | 1,8    | 0,04   | 4,6         | 0,26        |
| open | 3            | verticaal   | in     | 0,1     | <0,03 | 1,9    | 0,05   | 3,3         | 0,06        |
| open | 3            | verticaal   | uit    | 0,1     | <0,03 | 1,8    | 0,04   | 3,6         | 0,15        |



### Bijlage 3 Overzicht van filtratiecapaciteiten

Tabel 48 Overzicht van verschillende in de literatuur aangetroffen filtratiecapaciteiten.

| Filtratiecapaciteit<br>(ml/mossel/uur) | Schelpenlengte<br>(mm)                                    | temp.      | Plaats   |   |
|--|---|------------|--|---|
| 8-44                                   | 21-22   | –          | Polen  | 1 |
| 135-150                                | –   | –          | Nederland  |   |
| 260-286                                | –   | –          | Denemarken   |   |
| 0,4-516                                | wisselend met de schelpenlengte                           | –          | West Lake Erie   |   |
| 20-120                                 | –   | –          | Veluwemeer   |   |
| 50-100                                 | 21-22   | –          | Veluwemeer   | 2 |
| 15-170                                 | –   | –          | Markermeer   |   |
| 50-163                                 | –   | –          | IJsselmeer   |   |
| 5-180                                  | 29  | –          | Colloïdaal grafiet (Dag 554), verschillende media met micro-organismen, snelheid afhankelijk van het type medium dat werd toegediend. Hoe groter het micro-organisme des te lager de filtratiecapaciteit | 3 |
| 500-700                                | maat is het drooggewicht van de het weefsel van de mossel | 19 - 20 °C | Gevoed met Chlorella, water uit de Ladegards, water in Denemarken  | 4 |
| 0,2-2                                  | 2-7 mm  | 20 °C      | Gevoed met Cryptomonas, mosselen uit Lake Erie   | 5 |
| 20-180                                 | 22 mm   | div.       | Wolderwijd   | 6 |
| 61                                     | Klein   | –          | Oneida Lake, lab experiment met grond spinazie fijn gemalen  | 7 |
| 110                                    | Middel groot  | –          |  |   |
| 217                                    | Groot   | –          |  |   |
| 3,7-7                                  | maat is per ug drooggewicht van het weefsel van de mossel | –          | sediment in lab omstandigheden   | 8 |
| 0,6-8,9                                | –   | –          | algen in lab omstandigheden  |   |
| 493-897                                | –   | –          | sediment in lab omstandigheden   |   |
| 47-143                                 | –   | –          | algen in lab omstandigheden  |   |

1. Leach (1993), 2. Reeders *et al.* (1989), 3. Sprung (1989), 4. Kryger & Riisgård (1988), 5. Bunt *et al.* (1993), 6. Noordhuis *et al.* (1994), 7. Horgan & Mills (1997), 8. Gossiaux *et al.* (1998)