

**A treatment wetland used for polishing  
tertiary effluent from a sewage treatment plant:  
performance and processes**

De nabehandeling van tertiair RWZI-effluent in een moerassysteem:  
zuiveringsrendement en processen

(met een samenvatting in het Nederlands)

**Proefschrift**

ter verkrijging van de graad van doctor  
aan de Universiteit Utrecht  
op gezag van de Rector Magnificus, Prof. Dr. W.H. Gispen,  
ingevolge het besluit van het College voor Promoties  
in het openbaar te verdedigen  
op maandag 8 september 2003  
des ochtends te 10:30

door

**Sylvia Toet**

geboren op 22 maart 1967, te 's Gravenhage

## Samenvatting

Dit proefschrift beschrijft het functioneren van een zuiveringsmoeras voor het nabehandelen van tertiair effluent van een rioolwaterzuiveringsinrichting (RWZI). Het gebruik van moerassen voor het zuiveren van afvalwater is een doeltreffend, relatief goedkoop en duurzaam alternatief voor conventionele afvalwaterzuivering. De verwijdering van verontreinigingen in deze systemen berust op een combinatie van fysische, chemische en biologische processen, die van nature in moerassen voorkomen en geassocieerd zijn met de vegetatie, de bodem en micro-organismen. De laatste decennia zijn vele studies naar de werking van zuiveringsmoerassen uitgevoerd, met het doel het zuiveringsrendement door middel van ontwerpcriteria en beheersmaatregelen te verbeteren. In deze studies betrof het meestal primair of secundair voorbehandeld huishoudelijk afvalwater, soms in combinatie met regenwater. Zuiveringsmoerassen zijn tot nu toe weinig ingezet voor het nabehandelen van tertiair effluent van RWZI's. Dit effluent heeft door de vèrgaande voorbehandeling al lage CZV en BVZ waarden en ook al vrij lage N en P concentraties, maar verdere behandeling kan toch noodzakelijk zijn, wanneer geloosd wordt op oppervlaktewater dat gevoelig is voor eutrofiëring. Voor het nabehandelen van dit zuurstofarme effluent worden meestal vloeivelden gebruikt, welke grote hoeveelheden afvalwater verwerken bij vaak korte verblijftijden.

Het onderzoek dat in dit proefschrift beschreven is, had als hoofddoel het bestuderen van de werking van een vloeiveld met een korte verblijftijd van 2,4 dagen ter verbetering van de kwaliteit van tertiair effluent voor wat betreft N, P, CZV, troebelings, fecale coliformen en de zuurstofritmiek. De evaluatie is gebaseerd op het monitoren van de waterkwaliteit en de hydrologie in de verschillende compartimenten van het moerassysteem, en, voor de nutriënten, ook op studies van relevante verwijderingsprocessen. Het effect van de verblijftijd op het zuiveringsrendement van N, P en fecale coliformen, en op de processnelheden van nutriënten is ook onderzocht in parallelle compartimenten van het zuiveringsmoeras, waarvan de aanvoersnelheid van het effluent onafhankelijk gevarieerd kon worden. Op basis van de verkregen resultaten, is vervolgens de verblijftijd bepaald, waarbij het effluent in het moerassysteem voldoende wordt nabehandeld om aan de huidige en toekomstige lozingsnormen te voldoen. Bovendien zijn aan de hand van de ervaringen met dit moerassysteem de mogelijkheden voor het toepassen van vloeivelden voor het nabehandelen van tertiair effluent van RWZI's aangegeven.

### Beschrijving van het zuiveringsmoeras

Het zuiveringsmoeras is in 1994 aangelegd nabij de RWZI 'Eversteekoog' (maximaal 45.000 i.e.) op Texel voor het nabehandelen van het effluent. Dit laagbelaste actief-slibstelsysteem behandelde het huishoudelijk afvalwater en regenwater van een groot deel van het eiland tertiair, inclusief chemische verwijdering met  $\text{FeSO}_4$ . Desondanks was de kwaliteit van het effluent voor N, P, fecale coliformen en zuurstof nog onvoldoende. Het volume van het ontvangende oppervlaktewater op Texel was klein, waardoor de lozing van het effluent een grote invloed had op de oppervlaktewaterkwaliteit en -kwantiteit. Vóór de aanleg van het moerassysteem werden in de ontvangende sloten, ten

gevolge van de lage zuurstofconcentratie in het effluent, op 1,5-2,0 km vanaf het lozingspunt nog steeds lage zuurstofconcentraties waargenomen. Ook natuurgebieden, die in contact kwamen met het effluent, maakten een verbetering van de effluentkwaliteit noodzakelijk. Een verdere reductie van fecale coliformen in het effluent was ook gewenst, omdat in de toekomst het effluent via een andere watergang zou worden afgevoerd waardoor het water in de nabijheid van Den Burg komt.

Het zuiveringsmoeras was een vloeiveld met een wateroppervlak van 1,3 ha, dat elke dag gemiddeld circa 3.400 m<sup>3</sup> effluent ontving. De verblijftijd van het effluent in het systeem was gemiddeld 2,4 dagen. Het effluent werd eerst in een voorbezinkbassin gepompt en vervolgens verdeeld over negen parallelle sloten. Het water uit deze sloten werd verzameld in een afvoersloot, die het water op het oppervlaktewater van het eiland loosde. De parallelle sloten bestonden uit twee achter elkaar geschakelde compartimenten met ongeveer het zelfde wateroppervlak, maar een verschillende waterdiepte en vegetatie. De voorste, ondiepe helft van de sloten (0,2 m diep) was begroeid met *Phragmites australis* (Riet) of *Typha latifolia* (Grote lisdodde), terwijl de achterste, diepe helften (0,4 m) submerse vegetatie (met name *Elodea nuttallii*, *Potamogeton* spp. en *Ceratophyllum demersum*) bevatten. Een sloot zonder vaatplanten diende als controlesloot.

### Het zuiveringsrendement van het moerassysteem bij de ontwerpverblijftijd

De reductie van troebelings, COD, fecale coliformen, N en P, alsmede de verhoging van de zuurstofdynamiek van het effluent in het moerassysteem werden tussen april 1996 en maart 1997 bepaald bij de ontwerpverblijftijd van 2,4 dagen (hydraulische belasting van 25 cm dag<sup>-1</sup>, hoofdstuk 5). De zuiveringsrendementen voor de verontreinigingen in het moerassysteem als geheel en in de afzonderlijke compartimenten werden berekend door het vergelijken van input en output concentraties, en door het opstellen van massabalansen gebaseerd op maandelijkse waterbalansen en concentraties. Vaak wordt het rendement van zuiveringsmoerassen uitsluitend gebaseerd op het verschil tussen de input- en outputconcentraties van de verontreinigingen, ondanks de aanzienlijke over- of onderschatting van het werkelijke zuiveringsrendement die dit kan opleveren. In dit moerassysteem leverden de twee benaderingen geen duidelijke, consistente verschillen op voor de zuiveringsrendementen op seizoens- of jaarbasis. Dit was gerelateerd aan de specifieke eigenschappen van dit moerassysteem. Vergeleken met de effluentinput en -output van het moerassysteem waren de overige posten van de waterbalansen (neerslag, evapotranspiratie en wegzijging) klein. Incidentele- en seizoensfluctuaties van de effluentaanvoer en van de inputconcentraties van de verontreinigingen leidden ook niet tot systematische verschillen tussen de twee benaderingen. De zuiveringsrendementen in dit zuiveringsmoeras werden echter op grond van de massabalansen berekend, omdat zij nauwkeuriger werden geacht.

De N-verwijdering in het moerassysteem was relatief hoog, zeker gezien de hoge hydraulische belasting en de relatief lage N-concentraties in het toestromende effluent (26% van de N-input, 126 g N m<sup>-2</sup> jr<sup>-1</sup>). De P-verwijdering was zoals verwacht laag (7%, 5,1 g P m<sup>-2</sup> jr<sup>-1</sup>). Het zuiveringsrendement voor fecale coliformen was gedurende het groeiseizoen hoog (95-100%), maar beduidend lager gedurende de herfst-winter periode (79-91%). Het effluent werd troebeler tijdens het passeren van het zuiveringsmoeras. De

samenstelling van de onopgeloste bestanddelen veranderde daarbij echter wel, waardoor deze deeltjes aan het einde van het moerassysteem voor een groot deel bestonden uit (resten van) organismen afkomstig uit het systeem zelf. De zuurstofconcentratie van het effluent, die laag was aan het begin van het moerassysteem, nam sterk toe tijdens het passeren van het systeem, en vertoonde een karakteristiek dag-nachtritme gedurende het hele jaar.

In het voorbezinkbassin werd een aanzienlijk deel van de incidenteel hoge organisch N-aanvoer, en ook behoorlijk wat organisch P en anorganisch P, dat geassocieerd was met deeltjes, opgevangen, zodat circa 10% van de totale jaarlijkse N- en P-aanvoer werd verwijderd. Een belangrijk deel van de verwijdering van fecale coliformen vond ook in dit bassin plaats. De daaropvolgende voorste, ondiepe compartimenten in de parallelle sloten leverden de grootste bijdrage aan de N-verwijdering in het systeem (18%), en ze speelden ook een rol bij de verdere verwijdering van fecale coliformen. De sterke toename van de zuurstofdynamiek in het effluent trad vooral op in de achterste, diepere sloothelften door de aanwezigheid van submerse planten, macro-algen en perifyton. Op jaarbasis werd een kleine netto P-verwijdering in de sloten waargenomen en de sloten waren ook grotendeels verantwoordelijk voor de toename van de troebeling in het effluent. De aanwezigheid van emergente planten had een positief effect op de verwijdering van fecale coliformen, die groter was in de sloothelften met Riet dan die met Grote lisdodde. In de sloothelften met Riet verliep de ammoniumverwijdering ook het efficiëntst, en was de toename van de troebeling het laagst. De effecten van de emergente planten op de verwijdering van verontreinigingen werden waarschijnlijk veroorzaakt door de beschikbare hoeveelheid plantoppervlak in de waterkolom voor interceptie en microbiële activiteit en door de langzamere decompositiesnelheid van de dode Rietstoppels.

De nabehandeling in het moerassysteem leidde er toe dat de kwaliteit van het effluent uiteindelijk meer overeenkomt met die van het ontvangende oppervlaktewater. Het zuiveringsrendement van het systeem was echter nog onvoldoende voor de verwijdering van N en P, en gedurende de herfst-winter periode, van fecale coliformen.

### **Optimalisering van het zuiveringsrendement door verlenging van de verblijftijd**

De invloed van een verlenging van de verblijftijd op de verwijderingsefficiëntie van verontreinigingen in het moerassysteem werd onderzocht van april 1997 tot en met maart 1998 in de parallelle sloten (hoofdstuk 6). Door het specifieke ontwerp van het moerassysteem met de parallelle sloten, waarvan de aanvoersnelheid van het effluent onafhankelijk geregeld kon worden, was het mogelijk om het zuiveringsrendement bij vier verschillende verblijftijden (0,3; 0,8; 2,3 en 9,3 dagen) tegelijkertijd te bestuderen. Twee verblijftijden, langer dan de ontwerpverblijftijd van 0,8 dagen, werden geïntroduceerd om te onderzoeken of het zuiveringsrendement voor N, P, en, gedurende de herfst-winter periode, voor fecale coliformen verhoogd kon worden. De verblijftijd korter dan die van het ontwerp maakte het mogelijk om te bekijken of de verwijdering van fecale coliformen tijdens het groeiseizoen dan nog steeds toereikend was. De zuiveringsrendementen van de verontreinigingen werden berekend door het opstellen van massabalansen gebaseerd op maandelijkse waterbalansen en concentraties.

De verwijderingsefficiënties voor totaal N, ammonium, nitraat en fecale coliformen

waren aanzienlijk hoger bij de twee verblijftijden langer dan 0,8 dagen, wat resulteerde in beduidend lagere concentraties van deze verontreinigingen aan het einde van de sloten. De verblijftijd van 0,3 dagen was te kort voor voldoende verwijdering van fecale coliformen tijdens het groeiseizoen (slechts 46-73% van de jaarlijkse slootinput). Een groot deel van de verwijdering van N en fecale coliformen vond gewoonlijk in de voorste sloothelften plaats, omdat de al afgenomen concentraties in het aangevoerde effluent naar de achterste sloothelften logischerwijs lagere zuiveringsrendementen tot gevolg hadden. Gedurende perioden dat de verwijdering van N en fecale coliformen in de voorste sloothelften relatief laag was, speelden de achterste sloothelften bij de kortere verblijftijden regelmatig een belangrijkere rol bij de verwijdering. De P-verwijdering in de sloten was op jaarbasis gering, zelfs wanneer de verblijftijd verhoogd werd tot 9,3 dagen. Dit was waarschijnlijk het gevolg van de nog steeds hoge P- en hydraulische belasting (respectievelijk  $14 \text{ g P m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$  en  $3,1 \text{ cm dag}^{-1}$ ) bij deze HRT. De HRT zal minstens tot 15 dagen verlengd moeten worden om duidelijke P-verwijdering in de sloten te bereiken. Een toename van de verblijftijd leidde ook tot een toename van de troebelings- en CZV in het effluent tijdens het groeiseizoen. De troebelings- en CZV waren aan het eind van de sloten met de langste verblijftijd echter nog steeds relatief laag (voorjaar-zomer gemiddelden van respectievelijk 9,62 fte en  $40,7 \text{ mg l}^{-1}$ ).

Sloothelften met Riet vertoonden, net zoals het voorgaande jaar, voor verschillende verontreinigingen seizoensgebonden hogere zuiveringsrendementen of lagere relatieve verliezen dan sloothelften met Grote lisdodde. De omvang van dit verschil hing af van de mate waarin het zuiveringsrendement werd beïnvloed door de verblijftijd. De gewoonlijk bescheiden verschillen tussen de sloothelften met Riet en Grote lisdodde qua zuivering, waren het duidelijkst bij matige zuiveringsrendementen. De vegetatie-effecten, die werden gevonden voor de verwijdering van ammonium en fecale coliformen gedurende de herfst-winterperiode bij de kortere verblijftijden, waren veel minder duidelijk bij de langere verblijftijden. De langere tijd dat er contact mogelijk was tussen het effluent en de vegetatie en bodem in de sloten bij de langere verblijftijden compenseerde waarschijnlijk voor de lagere verwijderings-efficiëntie in de Grote lisdoddevegetatie.

### Verwijderingsprocessen van nutriënten

Het belang van relevante processen voor de verwijdering van N en P werd bepaald voor het gehele moerassysteem en de afzonderlijke compartimenten gedurende het eerste jaar (hoofdstuk 5) en voor de sloten met een verblijftijd van 0,8 en 9,3 dagen gedurende het tweede jaar (hoofdstuk 6). De processen, die verantwoordelijk zijn voor de verwijdering van verontreinigingen in zuiveringsmoerassen zijn niet vaak gekwantificeerd, alhoewel een betere kennis van de transformatie- en translocatieprocessen kan bijdragen aan het verbeteren van de inrichting en het beheer van deze moerassystemen. Directe metingen werden verricht ter kwantificering van de jaarlijkse nutriënteninput door atmosferische depositie en de jaarlijkse nutriëntenoutput door wegzijging, het oogsten van emergente-, submerse- en drijvende vegetatie, accumulatie in de bodem, en voor N, ook door denitrificatie. De totale N- en P-verwijdering in het moerassysteem en de afzonderlijke compartimenten werd bepaald door het optellen van de snelheden van deze individueel gemeten processen. Het jaarlijkse zuiveringsrendement voor N en P

op basis van de processtudies kwam echter meestal niet goed overeen met de rendementen bepaald op grond van de massabalansen (hoofdstuk 5 en 6). De totale N-verwijdering door alle gemeten processen bedroeg meestal slechts maximaal 30% van de verwijdering zoals die was berekend op grond van de massabalansen. Dit werd waarschijnlijk voornamelijk veroorzaakt door aanzienlijke onderschatting van het belang van de denitrificatie door de metingen, wat vermoedelijk verband hield met het moeilijk te bepalen totale plantoppervlak dat in de waterkolom aanwezig was voor de aanhechting van perifyton, de extrapolatie van de denitrificatiemetingen op een beperkt aantal tijdstippen naar het hele jaar en de gebruikte methoden (hoofdstuk 4 en 5). De schattingen van de andere processen waren vrij nauwkeurig, terwijl twee niet-gemeten processen van de N-kringloop, ammoniakverluchting en nitrificatie, waarschijnlijk veelal onbelangrijk waren in dit moerassysteem (hoofdstuk 5 en 6). Denitrificatie was daarom zeer waarschijnlijk het belangrijkste N-verwijderingsproces in dit moerassysteem, wat ook vaak in andere moerassen is gevonden. In het voorbezinkbassin werd denitrificatie waarschijnlijk voor een belangrijk deel voorafgegaan door andere processen, aangezien de N-verwijdering met name het gevolg was van de interceptie van enkele hoge inputs van organisch N, die vervolgens geleidelijk aan gemineraliseerd, genitrificeerd en gedenitrificeerd werden. De verwijdering van ammonium en organisch N in de parallelle sloten vond waarschijnlijk ook tenminste voor een aanzienlijk deel via deze reeks van processen plaats.

Voor P, werden vaak grote verschillen gevonden tussen de zuiveringsrendementen gebaseerd op de gesommeerde processtudies en die gebaseerd op de massabalansen, omdat de nauwkeurigheid van de metingen van de lage P-processnelheden en absolute P-fluxen in de compartimenten van het moerassysteem waarschijnlijk ontoereikend was. Het voorbezinkbassin, dat goed functioneerde voor de sedimentatie van P-rijke slibdeeltjes en organisch materiaal, vormde hierop een uitzondering, want 79% van de jaarlijkse P-verwijdering berekend op grond van de massabalansen kon verklaard worden door de gemeten P-accumulatie in de bodem. De belangrijkste processen voor de P-dynamiek in de sloten waren de P-fluxen naar en van de bodem, het oogsten van de emergente vegetatie en, gedurende het tweede jaar, wegzijging.

De absolute N-verwijdering door de individuele processen was in het algemeen lager in de sloten met de verblijftijd van 9,3 dagen dan in die met de verblijftijd van 0,8 dagen. Dit was het gevolg van de lagere N-concentraties van het effluent en de lagere N-belasting in de sloten met de langere verblijftijd. De relatieve bijdrage van de N-verwijdering door de verschillende processen steeg bij een toename van de verblijftijd, zodat de zuiveringsefficiënties ten gevolge van deze processen ook stegen. Een vergelijkbaar effect van de verblijftijd werd waargenomen voor de P-verwijdering door het oogsten van de emergente vegetatie. De P-verwijdering door wegzijging werd echter slechts weinig beïnvloed door de verblijftijd, omdat de verschillen van de jaargemiddelde P-concentraties van het oppervlaktewater tussen de sloten met de verschillende verblijftijden gering waren. Een toename van de verblijftijd had geen of zelfs een negatief effect op de absolute P-verwijdering door het oogsten van de submerse- en drijvende vegetatie. Dit werd veroorzaakt door de hogere ortho-fosfaat concentraties, die tijdens het groeiseizoen in het oppervlaktewater van de achterste sloothelften met de langere verblijftijd aanwezig waren, waardoor de P-concentraties van de geoogste planten hier ook hoger waren. De negatieve invloed van de verblijftijd op

de N- en P-verwijdering ten gevolge van accumulatie in het sediment hield waarschijnlijk verband met de eerdere hydraulische belasting van de sloten, zodat waarschijnlijk eerst een nieuw evenwicht tussen het sediment en het water zal moeten ontstaan alvorens weer opslag van nutriënten in het sediment kan plaats vinden.

### ***Het oogsten van de emergente vegetatie***

De verwijdering van nutriënten door het oogsten van emergente planten is vaak gering ten opzichte van de nutriënteninput van zuiveringsmoerassen, maar kan mogelijk een substantiëlere rol spelen in laagbelaste moerassystemen, zoals die voor het nabehandelen van tertiair afvalwater. Deze mogelijkheid van nutriëntenverwijdering door het jaarlijks maaien en oogsten van de bovengrondse emergente vegetatie in oktober werd in ons moerassysteem gedurende twee opeenvolgende jaren onderzocht (hoofdstuk 2). Het seizoensverloop van de bovengrondse biomassa en de daarin aanwezige nutriënten, alsmede de nutriëntenverwijdering door het oogsten werden bestudeerd in de compartimenten met Riet en die met Grote lisdodde van sloten met de vier verschillende verblijftijden (0,3; 0,8; 2,3 en 9,3 dagen), die corresponderen met een N- en P-belasting variërend van laag- tot hoogbelaste zuiveringsmoerassen ( $122 - 4190 \text{ g N m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$  and  $28,3 - 994 \text{ g P m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$ ).

De afvoer van N en P door het oogsten van Riet en Grote lisdodde was marginaal ten opzichte van de nutriënteninput bij de drie kortste verblijftijden, maar liep op tot respectievelijk 7,0 - 10% en 4,5 - 9,2% bij de langste verblijftijd. Het jaarlijks oogsten van de emergente vegetatie voor het verwijderen van nutriënten is dus een zinvolle beheersmaatregel bij N- en P-belastingen lager dan circa  $120 \text{ g N m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$  and  $30 \text{ g P m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$ , wat overeenkomt met een verblijftijd van ongeveer 9 dagen in de sloten van dit zuiveringsmoeras. Het oogsten van de Grote Lisdodde in oktober leverde een grotere N- en P-verwijdering op dan het oogsten van Riet. Dit was hoofdzakelijk het gevolg van de lagere resorptie-efficiëntie voor de nutriënten en de lagere afname van de bovengrondse biomassa tussen augustus en oktober bij Grote lisdodde. De vitaliteit van Riet en Grote lisdodde nam niet af door de twee opeenvolgende oogsten in oktober. Hieruit blijkt dat voor het optimaliseren van de nutriëntenverwijdering de oogst zonder problemen vervroegd kan worden van de winter naar oktober. De afvoer van nutriënten door het oogsten van Riet kan waarschijnlijk nog verdubbeld worden zonder afname van de vitaliteit van de vegetatie door zelfs al half september te oogsten, hetgeen voor Grote lisdodde niet mogelijk is. Dit zou dan 30% meer N-verwijdering en ongeveer evenveel P-verwijdering opleveren in vergelijking tot het oogsten van de Grote lisdoddespruiten in October. Riet is waarschijnlijk ook geschikter voor toepassing in zeer laagbelaste systemen, omdat de vitaliteit van Grote lisdodde waarschijnlijk achteruitgaat wanneer het N- en P-aanbod lager wordt dan de hierboven aangegeven waarden.

### ***De tijdelijke opslag in perifyton***

Over de rol van perifyton bij de nutriëntenverwijdering in zuiveringsmoerassen is slechts weinig bekend, ondanks dat er op planten en het sediment vaak veel aanhechtingsoppervlak aanwezig is. De temporele en ruimtelijke dynamiek van perifyton werd in dit moerassysteem bestudeerd om de functie van het perifyton voor de

nutriëntopname uit het oppervlaktewater op de korte termijn te bepalen (hoofdstuk 3). Daarnaast werd de N-verwijdering door denitrificatie in perifyton, dat gehecht is aan plantoppervlakken, gekwantificeerd, en vergeleken met die in de bodem en het water (hoofdstuk 4 en 6).

Het seizoensverloop van de biomassa, en het N- en P-gehalte van het perifyton werd in het moerassysteem tussen april 1996 en februari 1998 bestudeerd (hoofdstuk 3). Perifyton op plantoppervlakken en de bodem werd bemonsterd in de sloothelften met emergente planten, submerse planten en in vergelijkbare sloothelften zonder vaatplanten (controle). Deze sloothelften maakten onderdeel uit van sloten met de verblijftijden van 0,8 en 9,3 dagen. Veranderingen van het N- en P-gehalte van het perifyton per eenheid van slootoppervlak gedurende het jaar leidden in de sloothelften met Riet en Grote lisdodde tot de opname van nutriënten uit het oppervlaktewater in de winter en de afgifte van nutriënten in het voorjaar en de zomer. Deze nutriëntenopname en -afgifte bedroeg gedurende perioden van 2-4 maanden minder dan 6% van de nutriënteninput van de sloothelften met de korte verblijftijd, terwijl die in de sloothelften met de langere verblijftijd tussen de 4 en 30% lag. Het perifyton geassocieerd met de bodem speelde een veel belangrijker rol bij deze N- en P-fluxen dan het perifyton op de spruiten van de emergente planten. Temporele veranderingen van de perifytonbiomassa kunnen zodoende een substantiële invloed hebben op de nutriëntendynamiek van het oppervlaktewater wanneer de belasting lager is dan ongeveer 250 g N and 60 g P m<sup>-2</sup> jr<sup>-1</sup>, wat overeenkomt met een verblijftijd van minimaal 5 dagen in de sloten van dit moerassysteem.

De lichtbeschikbaarheid in de waterkolom was waarschijnlijk doorslaggevend voor het seizoensverloop van de biomassa, en N- en P-gehalte van het perifyton. Gedurende de winter en het voorjaar waren de biomassa en de nutriëntengehalten van het perifyton hoog, waarna een sterke daling van de lichtbeschikbaarheid in de waterkolom gedurende het groeiseizoen door de aanwezigheid van de emergente vegetatie of de submerse- en drijvende vegetatie leidde tot een daling van de hoeveelheid perifyton. Na het afsterven en oogsten van de emergente vegetatie in de herfst, namen zowel de lichtbeschikbaarheid als de perifytonbiomassa weer toe. De biomassa van perifyton in de sloothelften zonder vaatplanten bereikte in de zomer het maximum. Het chlorofyl-*a* gehalte van het perifyton geassocieerd met de bodem (142 - 2006 mg m<sup>-2</sup> substraatoppervlak) was altijd veel hoger dan dat op de spruiten van de planten, ondanks de lagere lichtbeschikbaarheid op het bodemoppervlak. Het verschil hield waarschijnlijk verband met de hogere nutriëntenbeschikbaarheid, de lagere blootstelling aan de stroming en/of de langere overleving van de algen in de bodem. De maximale gehalten aan levende biomassa en nutriënten van het perifyton waren hoger op de Riet- dan op de Grote lisdoddespruiten (maximale chlorofyl-*a* gehalten van respectievelijk 327 en 93,0 mg m<sup>-2</sup>). De verblijftijd in de sloten had ook invloed op de biomassa- en nutriëntengehalten van het perifyton op Riet en Grote Lisdodde, maar via verschillende processen. De N- en P-gehalten van het perifyton op Riet waren hoger bij de kortere- dan bij de langere verblijftijd. Dit was waarschijnlijk het gevolg was van de hogere nutriënteninput bij de kortere verblijftijd, waardoor een hogere invang van nutriënten door de dichte Rietvegetatie mogelijk was. Aan de andere kant werden de levende biomassa- en nutriëntengehalten van het perifyton op Grote lisdodde bevorderd door de langere verblijftijd. De lagere stroomsnelheid bij deze verblijftijd voorkwam



waarschijnlijk het wegspoelen van het aangehechte perifyton van de Grote lisdoddespruiten. De langere verblijftijd leek ook een positief effect te hebben op de perifytonbiomassa geassocieerd met de bodem.

### **Denitrificatie in perifyton op plantoppervlakken en in het sediment**

De bijdrage van denitrificatie, plaatsvindend in de bodem, in het perifyton op de spruiten van planten en in het water, aan de verwijdering van nitraat uit het effluent werd bepaald in een sloot met een verblijftijd van 0,8 dagen en met in de voorste helft Riet en in de achterste helft voornamelijk *Elodea nuttallii* (hoofdstuk 4).

Denitrificatie bleek in dit zuiveringsmoeras het belangrijkste proces voor de verwijdering van nitraat te zijn. De dagelijkse denitrificatiesnelheden in het perifyton op de spruiten van Riet ( $44,4\text{--}121 \text{ mg N m}^{-2} \text{ slootoppervlak dag}^{-1}$ ) en *Elodea nuttallii* ( $14,8\text{--}33,1 \text{ mg N m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ ) waren duidelijk hoger dan die in de bodem ( $0,5\text{--}25,5 \text{ mg N m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ ) of het water ( $0,4\text{--}3,9 \text{ mg N m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ ). Het seizoensverloop van de denitrificatiesnelheid op de spruiten correleerde met het chlorofyl-*a* gehalte van het perifyton, doordat de algen in het perifyton de denitrificerende bacteriën van aanhechtingsoppervlak en mogelijk ook van organische stoffen voorzagen. De afname van de biomassa en de denitrificatiesnelheid van perifyton op de spruiten van Riet en *Elodea nuttallii* gedurende het groeiseizoen werden veroorzaakt door overschaduwning door respectievelijk de Rietspruiten en een drijvende laag van macro-algen en *Lemna* spp.. De lichtbeschikbaarheid in de waterkolom en de denitrificatiesnelheid van het perifyton namen vervolgens weer toe nadat de Rietspruiten in oktober geoogst waren. De lagere denitrificatiesnelheden van het perifyton op de *Elodea nuttallii*- dan op de Rietspruiten was waarschijnlijk het gevolg van de vaak lagere nitraatbeschikbaarheid in de achterste sloothelft. De denitrificatiesnelheid in de bodem leek gelimiteerd te worden door de beschikbaarheid van nitraat, en de denitrificatiesnelheid in het water mogelijk door de beschikbaarheid van aanhechtingsoppervlak of organisch koolstof.

### **Vloevelden voor het nabehandelen van tertiair effluent: mogelijkheden en beperkingen**

Uit de resultaten van dit proefschrift blijkt, dat vloevelden geschikt kunnen zijn voor het nabehandelen van tertiair RWZI-effluent. De eenvoudige benadering voor het bepalen van de zuiveringsrendementen van verontreinigingen in de compartimenten van het zuiveringsmoeras op grond van de input- en outputconcentraties benaderde in het algemeen sterk die berekend aan de hand van massabalansen gebaseerd op maandelijkse waterbalansen en concentraties. De verblijftijd en hydraulische belasting waren belangrijke ontwerpparameters, die het zuiveringsrendement van de meeste verontreinigingen in de parallelle sloten van het moerassysteem in belangrijke mate bepaalden. Dit moerassysteem was zeer geschikt voor onderzoek naar het effect van de verblijftijd op de verwijdering van verontreinigingen, doordat in de parallelle sloten het effect van vier verschillende verblijftijden tegelijkertijd kon worden bestudeerd. De gedetailleerde studies van processen die verantwoordelijk waren voor de verwijderingsefficiëntie in het moerassysteem leverden bewijs voor het nut van het oogsten van emergente planten voor het verwijderen van nutriënten bij lange verblijftijden, de aanzienlijke toename van de nutriëntenverwijdering door het tijdstip

van het oogsten te vervroegen van de wintermaanden naar oktober, het grote belang van het perifyton voor de denitrificatie, en de substantiële, tijdelijke opslag van nutriënten in het met de bodem geassocieerde perifyton bij de langere verblijftijden. Uit een vergelijking van het functioneren van ons moerassysteem met die van andere zuiveringsmoerassen bleek dat dit systeem N en fecale coliformen efficiënt uit het effluent verwijderde. De capaciteit voor P-verwijdering was in dit moerassysteem laag. Dit werd met name veroorzaakt door de hoge P-belasting ( $14 \text{ g P m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$  in de sloten met de langste verblijftijd) en de relatief lage P-input concentraties. De zuiveringsresultaten van andere zuiveringsmoerassen geven aan dat hoge zuiveringsrendementen voor P alleen mogelijk zijn bij een P- en hydraulische belasting lager dan respectievelijk circa  $10 \text{ g P m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$  en  $10 \text{ cm dag}^{-1}$ . Het lage zuiveringsrendement van het moerassysteem voor P werd ook mogelijk mede veroorzaakt door een lage P-adsorptiecapaciteit van de bodem en de tegengestelde seizoensdynamiek voor P in het oppervlaktewater.

Het ontwerp en beheer van vloeivelden voor de nabehandeling van tertiair effluent kan met behulp van ons moerassysteem worden geëvalueerd. De huidige lozingsnormen voor de RWZI 'Everstekeog' op Texel (tot maximaal 45.000 i.e.) waren vrij vergelijkbaar met de EU-normen voor het lozen van stedelijk afvalwater op wateren die gevoelig zijn voor eutrofiëring (Besluit 91/271/EEC), voor wat betreft Kjeldahl N ( $15 \text{ mg l}^{-1}$ , totaal N voor de EU-norm), totaal P ( $2 \text{ mg l}^{-1}$ ), onopgeloste bestanddelen ( $30 \text{ mg l}^{-1}$ ) en BZV<sub>5</sub> ( $15 \text{ mg l}^{-1}$ ). Voor de RWZI was nog geen lozingsnorm voor CZV van kracht, ( $125 \text{ mg l}^{-1}$ ), maar wel nog een extra norm voor de pH (6.5-8.5). Strengere richtlijnen voor het lozen van het effluent van de RWZI zijn in voorbereiding.

De resultaten van ons moerassysteem laten zien dat vloeivelden zeer effectief kunnen zijn voor het verwijderen van totaal N, ammonium, nitraat en fecale coliformen uit tertiair RWZI-effluent bij betrekkelijk korte verblijftijden. Een voorbezinkbassin met een verblijftijd van 1,4 dagen gevolgd door sloten met een verblijftijd van 4 dagen zijn nodig om aan de toekomstige lozingsnorm voor ammonium ( $1 \text{ mg N l}^{-1}$ ) gedurende het hele jaar te voldoen. Deze verblijftijd in de sloten kwam overeen met een N-belasting van  $150 \text{ g N m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$ . De Kjeldahl N- en totaal N-concentraties van de input van het moerassysteem bleven meestal al beneden respectievelijk de huidige en de toekomstige norm. De efficiëntie van het zuiveringsmoeras kan mogelijk nog verder verhoogd worden door meer afwisseling van compartimenten met emergente vegetatie en compartimenten met submerse vegetatie, waarin successievelijk anoxische condities voor denitrificatie en oxische condities voor nitrificatie worden gecreëerd. Hierdoor zou de verblijftijd van sloten mogelijk nog korter kunnen worden. Voor het voldoen aan de gewenste zwemwaternorm voor fecale coliformen van  $10^3 \text{ kve } 100 \text{ ml}^{-1}$  gedurende het hele jaar zijn dezelfde verblijftijden in het voorbezinkbassin en de sloten nodig als hierboven vermeld voor ammonium. Gedurende het voorjaar en de zomer is een verblijftijd van 0,8 dagen in de sloten al afdoende.

De verwijdering van P uit effluent met al relatief lage P-concentraties is in vloeivelden alleen mogelijk bij zeer lange verblijftijden. De verblijftijd zal waarschijnlijk minimaal 15 dagen moeten zijn om aanzienlijke P-verwijdering in de sloten te bewerkstelligen. Dit is echter niet haalbaar voor dit moerassysteem, omdat het teveel landoppervlak vereist. Het toepassen van een infiltratieveld of wortelzonesysteem zou het benodigde landoppervlak voor afdoende P-verwijdering wel verminderen, maar

ondanks de hogere intrinsieke P-verwijderingsefficiëntie van deze typen zuiveringsmoerassen en de mogelijkheid om P-adsorberende stoffen aan de bodemmatrix toe te voegen, zal het vereiste landoppervlak nog steeds aanzienlijk zijn. Aan de toekomstige lozingsnorm van  $1 \text{ mg l}^{-1}$  kan daarom alleen worden voldaan door aanvullende chemische behandeling in de RWZI.

Een verlenging van de verblijftijd in de sloten naar 4 dagen ter optimalisatie van de verwijdering van ammonium en fecale coliformen zou geen negatief effect voor de zuurstofdynamiek in de sloten tot gevolg hebben. Ook zou het geen problemen opleveren voor CZV, BZV<sub>5</sub> en onopgeloste bestanddelen, aangezien deze verontreinigingen ruim onder de respectievelijk huidige en toekomstige normen zullen blijven bij deze verblijftijd. De pH in de outputs van de sloten was gedurende een deel van de dag hoger dan de bovenste grenswaarde van de lozingsnorm (8,5). Zulke hoge pH-waarden zijn echter karakteristiek voor zeer productief, natuurlijk oppervlaktewater met algen en submerse vegetatie, waardoor aan de doelstelling van het moerassysteem om de kwaliteit van het effluent meer te laten aansluiten op die van het oppervlaktewater wordt voldaan.

Een toename van de verblijftijd impliceert dus dat een verhoudingsgewijs groter landoppervlak vereist is voor het aanleggen van een zuiveringsmoeras, wanneer de waterdiepte constant wordt gehouden. In het hier onderzochte moerassysteem, zou voor een verlenging van de verblijftijd in de sloten van 0,8 tot 4 dagen een 2,5 keer groter landoppervlak nodig zijn. Een dergelijke oppervlaktevergroting zou voor Nederland waarschijnlijk nog rendabel zijn, maar afdoende P-verwijdering bij veel langere verblijftijden zou te veel landoppervlak vergen. De verblijftijd die voor zulke vloeivelden in andere landen nog gerealiseerd kan worden, hangt af van de omvang van de dagelijkse aanvoer van het effluent, de doelstellingen voor de waterkwaliteit en de beschikbaarheid van land. De aanleg- en exploitatiekosten van zuiveringsmoerassen zijn gewoonlijk laag ten opzichte van die voor conventionele afvalwaterzuivering. Andere voordelen van zuiveringsmoerassen met betrekking tot het verbeteren van de waterkwaliteit zoals de buffercapaciteit bij incidentele piekaanvoeren van effluent of bij storingen in de RWZI, en nadelen zoals de minder directe sturing van de zuiveringsprocessen en de lagere zuiveringsrendementen in de winter in gematigde streken moeten ook in beschouwing worden genomen. In een dichtbevolkt land als Nederland, zal het nabehandelen van tertiair RWZI-effluent met vergelijkbare doelstellingen als voor het Eversteekoog-systeem daarom met name kunnen worden toegepast voor kleine tot middelgrote RWZI's. Door zuiveringsmoerassen niet alleen voor waterkwaliteitsverbetering maar ook voor andere functies, waaronder natuurbehoud, recreatie en berging van water, in te zetten, kunnen echter uitgestrektere moerassen gebruikt worden.