

TEN GELEIDE	1
INHOUDSOPGAVE	2-3
OVERZICHT TABELLEN EN FIGUREN	4
1. Inleiding	5
1.1 Leeswijzer	6
2. Zuiveringsmoerassen voor licht verontreinigd water	7
2.1.1 Beleidskader: waterkwaliteitsverbetering	7
2.1.2 Zuiveringsmogelijkheden voor licht verontreinigd water	7
2.1.3 Herkomst water	8
2.2 PRAKTIJKTOEPASSINGEN ZUIVERINGSMOERASSEN	10
2.2.1 Nederland	10
2.2.2 Europa	12
2.2.3 Verenigde Staten	13
3. Keuze voor een zuiveringsmoeras	14
3.1 FUNCTIES EN NEVEFFECTEN VAN ZUIVERINGSMOERASSEN	14
3.2 ZUIVERINGSPROCESSEN IN ZUIVERINGSMOERASSEN	16
3.3 TYPE ZUIVERINGSMOERAS	18
3.3.1 Vloeveld	18
3.3.2 Infiltratieveld	19
3.3.3 Wortelzonesysteem	19
3.4 INRICHTINGSCONCEPTEN	20
3.4.1 Veldsystemen	20
3.4.2 Slotensysteem	21
3.4.3 Zoomsysteem	22
3.4.4 Gecombineerde systemen	22
4. Ontwerp van zuiveringsmoerassen	23
4.1 RANDVOORWAARDEN VOOR HET ONTWERP	23
4.1.1 Bodem en geohydrologie van de omgeving	23
4.1.2 Hydrologie van zuiveringsmoeras	23
4.2 STURING VAN ZUIVERINGSPROCESSEN DOOR MIDDEL VAN BEHEER	24
4.2.1 Verblijftijd	24
4.2.2 Peilbeheer	24
4.2.3 Vegetatie	25
4.2.4 Vegetatiebeheer	26
4.2.5 Toevoeging bindende stoffen	26
4.3 SECUNDAIRE FUNCTIES	27
5. Technische aanleg, inrichting en onderhoud	28
5.1 VOORONTWERP	28
5.2 AANLEG EN INRICHTING	29

5.2.1	Vloeveld	29
5.2.2	Infiltratieveld	29
5.2.3	Voorbezinkbassin	30
5.2.4	Voorbeelden moerassystemen	30
5.3	ISOLATIE VAN OMGEVING	32
5.4	BODEM	32
5.5	AAN- EN AFVOER VAN WATER	33
5.6	VERMEERDERING EN AANPLANT VAN VEGETATIE	33
5.7	ONDERHOUD	35
5.7.1	Vegetatiebeheer	35
5.7.2	Sanering bodem	36
5.8	KOSTEN	36
5.8.1	Aanleg & inrichting	37
5.8.2	Jaarlijkse kosten	37
6.	Monitoring functionering	39
6.1	MONITORING ZUIVERINGSMOERAS	39
6.1.1	Veldwaarnemingen	39
6.1.2	Beperkte monitoring	40
6.1.3	Uitgebreide monitoring	40
6.2	BEREKENING RESULTATEN VAN ZUIVERING	41
6.2.1	Eenvoudige berekening	41
6.2.2	Water- en stoffenbalans	41
6.3	SIGNALEREN VAN PROBLEMEN	42
7.	Discussie, conclusies en aanbevelingen	44
7.1	DISCUSSIE	44
7.2	CONCLUSIES	46
7.3	AANBEVELINGEN	46
	<i>Bijlage I</i> Relevante processen voor verontreinigingen	48
I.1	NUTRIËNTEN	48
I.1.1	Stikstof	48
I.1.2	Fosfaat	50
I.2	ORGANISCHE MICROVERONTREINIGINGEN	51
I.3	ZWARE METALEN	52
I.4	PATHOGENEN	52
I.5	ORGANISCHE STOF (BZV EN CZV)	54
I.6	ZWEVEND STOF	55
I.7	ZUURSTOFRITMIEK	56
I.8	MACRO-IONEN	56
	LITERATUUR	58
	TREFWOORDENLIJST	62
	BRONVERMELDING FIGUREN	65

Overzicht tabellen en figuren

	1. INLEIDING	
<i>Figuur</i>	1.1 Schematisch overzicht informatie in rapport en DSS	6
	2. ZUIVERINGSMOERASSEN VOOR LICHT VERONTREINIGD WATER	
<i>Figuur</i>	2.1 Zuiveringsmoeras bij rwzi Eversteekooog	9
<i>Figuur</i>	2.2 Detail van zuiveringsmoeras bij rwzi Eversteekooog	9
	3. KEUZE VOOR EEN ZUIVERINGSMOERAS	
<i>Figuur</i>	3.1 Voorbeeld van zuiveringsmoeras waarbij de natuurwaarde een secundaire functie is...	15
<i>Tabel</i>	3.1 Overzicht van de belangrijkste zuiveringsprocessen per verontreiniging	17
<i>Figuur</i>	3.2 Wijze van doorstroming in de drie verschillende typen zuiveringsmoerassen	18
<i>Tabel</i>	3.2 Overzicht belangrijkste eigenschappen vloeiveld, infiltratieveld, wortelzonesysteem	20
<i>Figuur</i>	3.3 Inrichting van een moeras in de vorm van veldsysteem	21
<i>Figuur</i>	3.4 Schakeling van slotensystemen	21
<i>Figuur</i>	3.5 Impressie van een ecologisch herstelproject met aanleg van veldmoeras naast een meer.	22
	4. ONTWERP VAN ZUIVERINGSMOERASSEN	
<i>Figuur</i>	4.1 Overzicht beheersfactoren die zuiveringsprocessen sturen	24
<i>Figuur</i>	4.2 Grote lisdodde	26
	5. TECHNISCHE AANLEG, INRICHTING EN ONDERHOUD	
<i>Figuur</i>	5.1 Schematische doorsnede vloeiveld	29
<i>Figuur</i>	5.2 Schematische doorsnede infiltratieveld	30
<i>Figuur</i>	5.3 Overzicht van slotensysteem en waterplantenvijvers bij rwzi Land van Cuijk	30
<i>Figuur</i>	5.4 Overzicht slotensystemen met helofyten en waterplanten bij rwzi Evertsekoog, Texel .	31
<i>Figuur</i>	5.5 Overzichtstekening slotensysteem met waterplanten De Meije	31
<i>Figuur</i>	5.6 Overzichtstekening vloeiveld + wortelzonesysteem Erasmusgracht	32
<i>Figuur</i>	5.7 Peilbeheer door middel van stuwen bij zuiveringsmoeras rwzi Land van Cuijk	33
<i>Figuur</i>	5.8 Maaien van drooggelegd infiltratieveld Lauwersoog	36
<i>Tabel</i>	5.1 Overzicht van kosten van verschillende zuiveringsmoerassen in Nederland	38
	6. MONITORING FUNCTIONERING	
<i>Tabel</i>	6.1 Te meten fysisch-chemische parameters in verschillende delen zuiveringsmoeras	40
<i>Tabel</i>	6.2 Posten op waterbalans zuiveringsmoeras (in m ³ /ha/jr)	42
<i>Tabel</i>	6.3 Posten op massabalansen stikstof en fosfaat	42
	1. BIJLAGE: RELEVANTE PROCESSEN VOOR VERONTREINIGINGEN	
<i>Figuur</i>	1.1 Stikstofkringloop in een zuiveringsmoeras, uit Wienk et al. 2000	48
<i>Figuur</i>	1.2 Omzetting van ammonium naar stikstofgas	49
<i>Figuur</i>	1.3 Kringloop van fosfor in een zuiveringsmoeras, uit Wienk et al. 2000	51
<i>Figuur</i>	1.4 Omzettingen van koolstof in een zuiveringsmoeras, uit Wienk et al. 2000	55

1. Inleiding

Zuiveringsmoerassen worden in Nederland vooral toegepast voor de individuele behandeling van afvalwater (IBA) van woningen en bedrijven die niet op de riolering zijn aangesloten (VROM/KIWA 1998). Dit zijn moerassystemen voor afvalwater met hoge concentraties verontreinigingen. Met de toepassing van zuiveringsmoerassen voor de zuivering van water met lage concentraties verontreinigingen, zoals rwzi-effluent, oppervlaktewater of neerslagafvoer, is in Nederland nog maar weinig praktijkervaring opgedaan. Dit type moerassen wordt aangelegd om de waterkwaliteit te verbeteren. Dit handboek, bestaande uit een rapport en een bijbehorend beslissingsondersteunend systeem (Decision Support System: DSS) richt zich op zuiveringsmoerassen voor water met lage concentraties verontreinigingen.

Het doel van het handboek is tweeledig:

1. het inventariseren, ordenen en selecteren van relevant referentieonderzoek in voor Nederland vergelijkbare omstandigheden;
2. het karakteriseren en beschrijven van deze moerassystemen en het toegankelijk maken van de verworven kennis voor de regionale waterbeheerders.

Een nevendoelstelling is ook om inzicht te verkrijgen in de leemten in kennis om zo ook een stimulans te zijn voor praktijkonderzoek.

Deze doelen zijn omgezet in:

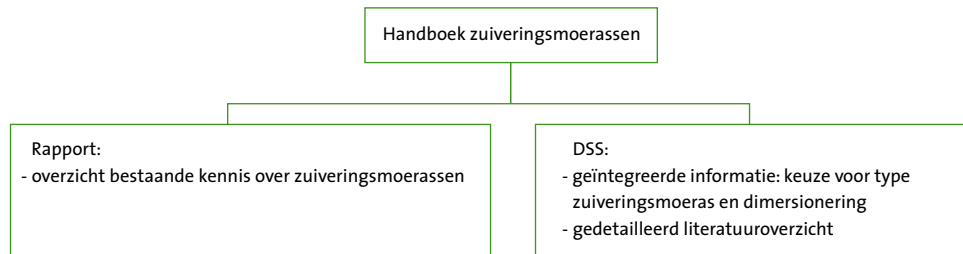
- een rapport met een overzicht van de huidige inzichten ten aanzien van het functioneren van zuiveringsmoerassen;
- een beslissingsondersteunend systeem (DSS) dat de regionale waterbeheerders een handvat geeft voor de afweging om een zuiveringsmoeras al dan niet in te zetten, de keuze van het type moeras en het bepalen van de grootte en het beheer ervan.

Gedetailleerde informatie over de ontwerpfase van een zuiveringsmoeras valt buiten het bereik van dit handboek. Wel wordt in hoofdstuk 4 een globaal overzicht gegeven van technische eisen ten aanzien van de aanleg, inrichting en het onderhoud van zuiveringsmoerassen.

Het DSS is gebaseerd op recente literatuur en is een handreiking aan de waterbeheerder. De huidige kennis is niet toereikend om een sluitend, bedrijfszeker advies te geven voor een brede range van omstandigheden. De handreiking blijft noodzakelijkerwijs beperkt tot een set van omstandigheden, waarvoor voldoende gegevens voorhanden zijn. De STOWA is niet aansprakelijk voor ontwerpen die op basis van de rekenregels worden gemaakt en vervolgens niet goed functioneren.

Het rapport vormt de achtergrondinformatie voor het DSS. Het DSS bestaat uit een beslisboom die op basis van het doel van de zuivering, de hydraulische belasting en de waterkwaliteit van het te zuiveren water een type zuiveringsmoeras adviseert. Vervolgens kan met behulp van rekenregels de benodigde oppervlakte en het beheer van het aan te leggen moeras bepaald worden. De rekenregels zijn alleen voor die typen zuiveringsmoeras afgeleid, die goed onderzocht en hierdoor voldoende betrouwbaar zijn. Daarnaast bevat het DSS een overzicht van rele-

vante literatuur in de vorm van een matrix van kenmerken van zuiveringsmoerassen en de literatuurbronnen. In figuur 1.1 is weergegeven welke informatie in het rapport en welke in het DSS is opgenomen.



Figuur 1.1: schematisch overzicht informatie in rapport en DSS.

1.1 LEESWIJZER

Hoofdstuk 2 schetst de doelen voor de inzet van zuiveringsmoerassen voor licht verontreinigd water en beschrijft voor een aantal situaties de herkomst van het 'licht verontreinigde water'. Verder worden er voorbeelden gegeven van moerassystemen die in Nederland en onder vergelijkbare omstandigheden in het buitenland zijn toegepast. Hoofdstuk 3 bespreekt in het kort de processen waarmee verschillende verontreinigingen in zuiveringsmoerassen verwijderd kunnen worden. Vervolgens wordt ingegaan op de verschillende typen zuiveringsmoerassen en de verschillende wijzen van inrichting van het moeras. Hoofdstuk 4 gaat in op het ontwerp van zuiveringsmoerassen. Belangrijk voor het ontwerp zijn enkele hydrologische en geologische randvoorwaarden, de sturing van zuiveringsprocessen door middel van het beheer en de hoeveelheid stof, die gezuiverd moet worden. In hoofdstuk 5 wordt een globaal overzicht gegeven van de technische aanleg, het onderhoud en de inrichting en de kosten van zuiveringsmoerassen. Hoofdstuk 6 bespreekt hoe het functioneren van zuiveringsmoerassen door middel van monitoring gevolgd kan worden. In hoofdstuk 7 staan de discussie, de leemten in de kennis en de conclusies.

2 Zuiveringsmoerassen voor licht verontreinigd water

2.1.1 Beleidskader: waterkwaliteitsverbetering

Het milieu- en waterbeleid heeft in Nederland in de afgelopen 25 jaar een sterke ontwikkeling doorgemaakt. Met name de emissies van puntbronnen zijn teruggebracht, de aanpak van diffuse bronnen vanuit landbouw, bebouwd gebied en verkeer vraagt meer inzet en tijd. Het waterbeleid is nu voornamelijk gebiedsgericht, hetgeen betekent dat problemen, die lokaal of regionaal spelen, ook op dat niveau worden aangepakt (NW4 1998). De huidige normstelling voor nutriënten en andere kwaliteitsparameters geeft verschillende normen voor verschillende typen water. Voor eutrofiëringgevoelige, stagnante wateren wordt een minimumkwaliteitsniveau voor stikstof en fosfaat aangehouden, voor overige oppervlaktewateren is deze norm richtinggevend. Ook is er nu meer aandacht voor het herstel van watersystemen. In de Vierde Nota Waterhuishouding wordt de Delta Schuivenbeek genoemd als voorbeeld waar mogelijk een zuiveringsmoeras een bijdrage kan leveren aan een vermindering van de nutriëntenbelasting van de randmeren. Hier is door middel van Actief Biologisch Beheer geprobeerd om het water weer helder te krijgen (NW4 1998, Meijer et al. 1999).

Om op lokale schaal waterkwaliteitsproblemen aan te pakken kan de inzet van een zuiveringsmoeras overwogen worden. Een waterkwaliteitsprobleem zal altijd samenhangen met de functie van een bepaald watersysteem. Zuiveringsmoerassen voor licht verontreinigd water worden ingezet voor de waterkwaliteitsverbetering van oppervlaktewater en afvalwater. De doelstellingen voor zuivering van licht verontreinigd water kunnen zijn:

- het behalen van de normen voor de kwaliteit van oppervlaktewater;
- het verminderen van de vervuiling door overstorten op het oppervlaktewater;
- de beperking van de negatieve effecten van de inlaat van gebiedsvreemd water op de waterkwaliteit en ecologie van het ontvangende water. Het water wordt in de meeste gevallen ingelaten om de verdroging te beperken;
- het ecologische herstel van geëutrofiëerde meren, waarbij door de aanleg van een moeras de nutriëntenbelasting verminderd kan worden.

2.1.2 Zuiveringsmogelijkheden voor licht verontreinigd water

De te gebruiken techniek voor de zuivering van (afval)water hangt sterk af van de verontreinigingsgraad van het water. Rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi's) zuiveren verontreinigd afvalwater. In de rwzi's wordt een reeks fysische en biologische processen toegepast die in de installatie goed beheersbaar en regelbaar zijn, zodat voldaan kan worden aan effluenteisen. Voor de nabehandeling van effluent is een groot aantal technieken beschikbaar, waaronder chemische oxidatie en verschillende filtertechnieken (Witteveen+Bos 2001).

Voor de zuivering van licht verontreinigd afvalwater of oppervlaktewater kan de aanleg van een zuiveringsmoeras overwogen worden. De werking van een zuiveringsmoeras wordt bepaald door de aanleg, het waterbeheer en het maaibeheer. De sturingsmogelijkheden zijn in een zuiveringsmoeras aanzienlijk beperkter dan bij een rwzi. Zuiveringsmoerassen kunnen een alternatief vormen voor andere methoden die bestaan om de genoemde waterkwaliteitsproblemen aan te pakken. Een aantal van deze methoden zal als voorbeeld beschreven worden.

Om verdroging van natuurgebieden te voorkomen is het soms nodig om water aan te voeren

met een hogere belasting van nutriënten of andere verontreinigende stoffen. Dan doet zich de noodzaak tot zuivering voor, die met verschillende technieken kan worden gerealiseerd. Daarvoor kan aan een moerassysteem worden gedacht, maar als het om bijvoorbeeld specifieke verontreiniging met fosfaten gaat zou ook kunnen worden gedacht aan chemische defosfatering met behulp van ijzerzouten. De frequentie van het optreden van overstortingen zou beperkt kunnen worden door het vergroten van de berging in een rioolstelsel of het afkoppelen van verhard oppervlak. Afspoelend wegwater kan worden gezuiverd in een rioolwaterzuivering of met bijvoorbeeld oliescheiders onder het wegdek. Zware metalen en organische microverontreinigingen kunnen ook met verschillende biologische, chemische en fysische en thermische processen verwijderd worden (Cha et al. 1996).

Als alternatief voor deze technieken kan voor de zuivering van lichtverontreinigd afvalwater of oppervlaktewater een zuiveringsmoeras worden aangelegd. Een opvallend verschil met de genoemde technieken is dat een zuiveringsmoeras aanzienlijk minder sturingsmogelijkheden heeft. Het zuiveringsmoeras heeft echter wel een aantal kenmerken die bij meer technologische oplossingen ontbreken. Het is vaak beter inpasbaar in het landschap, aanleg en onderhoud kunnen soms tegen veel geringere kosten plaatsvinden. Veel zuiveringsprocessen in het moerassysteem kosten geen fossiele brandstof maar werken op zonne-energie.

Aan al deze maatregelen zijn een bepaalde hoeveelheid ruimte en kosten voor aanleg en onderhoud verbonden. De kosten, het ruimtebeslag en de baten (in de vorm van zuiveringsprestaties en mogelijke nevenfuncties) van zowel het zuiveringsmoeras als de alternatieven moeten steeds tegen elkaar worden afgewogen.

2.1.3 Herkomst water

Dit rapport behandelt alleen de inzet van zuiveringsmoerassen voor de verbetering van de waterkwaliteit van water met een lage concentratie verontreinigingen. Onder verontreinigingen worden zowel nutriënten, BZV (Biochemisch zuurstofverbruik), CZV (Chemisch zuurstofverbruik), microverontreinigingen en bacteriële verontreiniging verstaan. De herkomst van het water en het doel van de zuivering bepalen of het water gezuiverd kan worden met zuiveringsmoerassen voor licht verontreinigd water. De meest voorkomende bronnen zijn:

- *effluent van een rwzi*. Het kan zijn dat het effluent nog niet aan de normen voldoet of dat door lozing van het effluent vervuiling van het ontvangende water zal optreden;
- *oppervlaktewater* (o.a. rivier- en boezemwater) dat gebruikt wordt om in de zomer verdampings- en wegzijgingsverliezen in natuurgebieden te compenseren. De kwaliteit van het inlaatwater is in dat geval slechter of anders (gebiedsvreemd water) dan de kwaliteit van het ontvangende water;
- *neerslagafvoer* van verhard oppervlak, dat van het rioolstelsel is afgekoppeld. Dit water bevat verontreinigingen die van wegen afspoelen, zoals uitlaatgassen, olie en hondenontlasting. Om de belasting van het oppervlaktewater te verminderen kan deze neerslagafvoer eerst over een zuiveringsmoeras worden geleid;
- *overstortwater* dat bij veel neerslag uit het riool direct in het oppervlaktewater zou komen. Dit rioolwater kan over een zuiveringsmoeras geleid worden, voordat het overstort op het oppervlaktewater. De verontreinigingsgraad van overstortwater hangt onder meer af van de frequentie en de intensiteit van de overstort en de aanwezigheid van randvoorzieningen, zoals bergbezinkbassins.



Figuur 2.1: zuiveringsmoeras bij rwzi Eversteekweg (Simon Smit Aerial Photography, Texel).



Figuur 2.2: detail van zuiveringsmoeras bij rwzi Eversteekweg.

Zuivering van water met hoge concentraties verontreinigingen, zoals ongezuiverd huishoudelijk afvalwater, industrieel en agrarisch afvalwater, valt buiten het bereik van dit handboek. Hiervoor wordt verwezen naar het Handboek helofytenfilters voor IBA-systemen (VROM/KIWA 1998).

In tabel 1 van de samenvatting worden de concentratieranges van verontreinigingen in water van een bepaalde herkomst weergegeven, die zijn bepaald op basis van literatuur en 'expert judgement'. Met behulp van deze tabel kan worden bepaald welke concentraties in dit handboek als 'laag' worden beschouwd.

2.2.1 Nederland

De aanleg van zuiveringsmoerassen belast met licht verontreinigd water heeft enkele jaren geleden een grote vlucht genomen, met name voor de nabehandeling voor rwzi-effluent en voor de zuivering van inlaatwater. Hierdoor zijn ook moerassen aangelegd, waarvan het zuiveringsrendement in de praktijk tegenviel. Als reactie hierop is het onderzoek naar het functioneren van zuiveringsmoerassen voor licht verontreinigd water versterkt en zijn enkele langdurige en grondige studies verricht (o.a. Meuleman 1999, Toet 2001). Het doel van dit handboek is deze kennis te bundelen en toegankelijk te maken voor de waterbeheerder. Hieronder worden enkele voorbeelden gegeven van bekende zuiveringsmoerassen die licht verontreinigd water ontvangen en zuiveren.

Rwzi-effluent

Elburg en Zeewolde

In Nederland zijn momenteel vier zuiveringsmoerasssystemen voor de zuivering van effluent operationeel en is er één in aanleg. Het zuiveringsmoeras bij de rwzi van Elburg functioneerde wegens een te hoge hydraulische belasting niet goed; na reductie van de hydraulische belasting is de fosfaatverwijdering verbeterd (Gleichman-Verheijen et al. 1992, Butijn 1988). Ook in Zeewolde werd een zuiveringsmoeras gebruikt voor de zuivering van effluent van een afvalwaterzuiveringsinstallatie met een capaciteit van 1.200 inwonerequivalenten (i.e.). Dit moerassysteem is in 1996 opgeheven, omdat de prestaties onvoldoende waren.

Eversteekoog, Texel

Het effluent van de rioolwaterzuiveringsinrichtingen op Texel wordt geloosd op kleine oppervlaktewateren, waaraan vaak hoge (natuur)doelstellingen zijn verbonden. Dit is aanleiding geweest om op de grootste rwzi, de rwzi Eversteekoog, nazuivering toe te passen door middel van een moerassysteem, zie figuur 2.1 en 2.2. Met de huidige inspanningen wordt een kwart van de aangevoerde stikstof en 8% van het aangevoerde fosfaat verwijderd en wordt een robuuste zuurstofdynamiek in het geloosde water gerealiseerd. Het systeem levert ook een zeer goede prestatie op het gebied van desinfectie, waarbij E.coli concentraties worden teruggebracht tot normwaarden voor het oppervlaktewater (Schreijer et al, 2000)

Sint Maartensdijk

Ook in Sint Maartensdijk is in mei 2000 voor de nabehandeling van rwzi-effluent een zuiveringsmoeras aangelegd (Ton 2000). Dit terrein heeft de bestemming groenvoorziening en om daarnaast ook een recreatiefunctie te kunnen vervullen zijn er waterpartijen, een voetpad, open water en permanente begroeiing in het ontwerp geïntegreerd. Dit zuiveringsmoeras is pas in bedrijf en er zijn nog geen resultaten beschikbaar.

Land van Cuijk

Bij de rwzi Land van Cuijk wordt een zuiveringsmoeras aangelegd. Ook dit systeem is dus nog in de realisatiefase.

Met zuiveringsmoerassen voor de nazuivering van rwzi-effluent zijn tot nu toe heel wisselende resultaten behaald. Duidelijk is dat er grenzen zijn aan de maximale belasting van de zuiveringsmoerassen.

Afstromend wegwater

Langs de A1 bij Laren is een infiltratieveld voor de zuivering van wegwater aangelegd (Volkskrant 4 maart 2000). Ook in Zeeland is een ontwerp gemaakt voor een zuiveringsmoeras langs de A58 bij de Vlaketunnel. Het afstromend wegwater moet daar gezuiverd worden, voordat lozing op het Kanaal door Zuid-Beveland plaatsvindt (Waardenburg 1999).

Oppervlaktewater

De Meije

In de provincie Utrecht is een slotensysteem aangelegd om de kwaliteit van het gebiedsvreemde oppervlaktewater te verbeteren, voordat dit water in het blauwgraslandreservaat De Meije wordt ingelaten (Meuleman 1999). Dit water wordt ingelaten om verdroging van het reservaat te voorkomen. De inlaat leidt echter tot eutrofiëring van de kwetsbare blauwgraslandvegetatie, omdat het inlaatwater relatief hoge concentraties aan macro-ionen en nutriënten bevat. De zuivering van het inlaatwater is zeer efficiënt; de nutriëntenconcentraties bij het inlaatpunt voldoen aan de waterkwaliteitsnormen. Met het zuiveringsmoeras wordt de externe eutrofiëring voorkomen, maar de interne eutrofiëring niet. Aangezien de concentraties aan macro-ionen door het slotensysteem niet worden gewijzigd, heeft het moeras geen effect op het interne eutrofiëringsproces, waarbij nutriënten vrijkomen door stimulering van interne kringloopprocessen.

Ook in de Aalkeetpolder in Zuid-Holland, De Rottige Meente en het Nanneveld in Friesland wordt oppervlaktewater eerst gezuiverd in een moeras voordat het in een natuurgebied wordt ingelaten (Meuleman 1990). In Alkmaar zijn plannen om een bestaand moeras in te richten voor de zuivering van boezemwater.

Overstortwater

Houten

In Houten zijn in 1986 biezenvelden als randvoorziening bij een overstort in gebruik genomen. De bedoeling was dat door de buffering en zuivering van het overstortwater de belasting op het oppervlaktewater zou verminderen. Hoewel de toen geldende waterkwaliteitsnormen niet werden gehaald, was het effect op de waterkwaliteit voldoende. Er is besloten een tweede biezenveld aan te leggen (Van Oorschot 1990, Grontmij 1988). Vanwege de ruime dimensionering van het rioolstelsel in Houten vindt er echter maar 1 à 2 keer per jaar een overstort plaats, waardoor de vegetatie in het tweede biezenveld met zeer weinig voedingsstoffen wordt belast. Het zuiveringsmoeras heeft echter wel een hoge visuele waarde. Mede vanwege de lage kosten wordt in een nieuw te bouwen wijk in Houten een derde biezenveld aangelegd. Vanwege de minder grote berging in het rioleringsstelsel zal de overstortingsfrequentie op dit derde biezenveld hoger liggen. Ook in Velsen en in Driebergen zijn biezenvelden aangelegd bij een overstort.

Erasmusgracht, Amsterdam

In Amsterdam aan de Erasmusgracht is een zuiveringsmoeras aangelegd als randvoorziening bij een overstort van een gescheiden rioolstelsel (Bronius et al. 1995, Van Dijk & Boekee 1999). In het moeras wordt het afstromend regenwater gezuiverd.

Huishoudelijk afvalwater

Lauwersoog

Nabij Lauwersoog is sinds 1975 een infiltratieveld in gebruik dat huishoudelijk afvalwater ontvangt van bebouwing, een jachthaven, een camping en een aantal kleine recreatieve voorzieningen (Meuleman 1999). Dit huishoudelijk afvalwater bevat wel hoge concentraties verontreinigingen en er is dus geen sprake van een laagbelast systeem. Het wordt in dit handboek wel als voorbeeld behandeld, omdat het het enige voorbeeld is van een relatief goed functionerend infiltratieveld in Nederland. In de winter is de belasting laag, aangezien de recreatieve voorzieningen in die periode minder gebruikt worden. Het infiltratieveld verwijdert zeer efficiënt organische stof en pathogene micro-organismen. De zuiveringsefficiëntie van nutriënten is daarentegen relatief laag. De lozingsnormen voor rioolwaterzuiveringsinstallaties worden regelmatig overschreden, wat leidt tot eutrofiëring van het ontvangende oppervlaktewater. De beperkte vastlegging van nutriënten in de bodem leidde ook tot eutrofiëring van het grondwater.

2.2.2 Europa

Binnen Europa zijn in de volgende landen zuiveringsmoerassen aangelegd: Denemarken, Noorwegen, Duitsland, Zwitserland, Oostenrijk, België, Groot-Brittannië, Spanje, Tsjechië en de Oekraïne. Hieronder worden enkele in verschillende landen toegepaste zuiveringsmoerassen kort beschreven. Het merendeel van deze moerassystemen worden echter belast met hoge concentraties verontreinigingen.

In Duitsland is in de jaren zeventig begonnen met de aanleg van zuiveringsmoerassen voor het zuiveren van huishoudelijk afvalwater. De meeste zuiveringsmoerassen zijn aangelegd voor de zuivering van water met hoge concentraties verontreinigingen. Er zijn rietwortelsystemen met grof (Seidel-type) of fijn filtermateriaal (Kickuth-type) aangelegd in Zwitserland. In Oostenrijk is met soortgelijke systemen voor de behandeling van afvalwater van meer dan 100 inwonerequivalenten ervaring opgedaan (Geller 1997).

In Groot-Brittannië zijn de meeste zuiveringsmoerassen aangelegd om overstortwater en effluent van rioolwaterzuiveringsinstallaties te zuiveren. Daartoe zijn vooral wortelzonesystemen en infiltratievelden en combinaties daarvan in gebruik (Magmedov et al. 1996). In de afgelopen vijf jaar is begonnen met de aanleg van zuiveringsmoerassen voor de behandeling van wegwater en van hemelwaterafvoer uit het stedelijk gebied (Shutes et al. 1997).

In Spanje worden zuiveringsmoerassen onder meer gebruikt voor de zuivering van afspoelend water van voormalige rijstvelden (Comin et al. 1997). In Tsjechië worden zuiveringsmoerassen sinds 1989 vooral ingezet voor de secundaire zuivering van afvalwater uit rurale gebieden. Verder zijn er vier zuiveringsmoerassen voor tertiaire zuivering aangelegd en één voor de zuivering van overstortwater en afspoeling (Vymazal 1996). In de Oekraïne zijn sinds 1986 moe-

rassen ingezet voor de zuivering van afspoelings- en drainagewater van landbouwgebieden en fabrieken. Er wordt een combinatie van vloeivelden en wortelzonesystemen gebruikt (Magmedov et al. 1996).

2.2.3 Verenigde Staten

In de Verenigde Staten worden van oorsprong natuurlijke wetlands gebruikt om afvalwater te zuiveren. Men is sinds de jaren zeventig begonnen met het aanleggen van zuiveringsmoerassen. Deze moerassystemen zijn toegepast voor ongezuiverd of secundair (huishoudelijk) afvalwater. Ook worden er zuiveringsmoerassen ingezet om afvalwater van stortplaatsen en metaalmijnen te zuiveren (Kadlec & Knight 1996). In Noord-Amerika wordt de nazuivering van rwzi-effluent met behulp van moerassen voor vooral grote populaties (> 1000 i.e.) ingezet (Cooper 1993).

website <http://www.epa.gov/owow/wetlands/construc/content.html>

3. Keuze voor een zuiveringsmoeras

In dit hoofdstuk wordt de theorie over functies en neveneffecten, zuiveringsprocessen en inrichtingsconcepten van zuiveringsmoerassen beschreven.

3.1 FUNCTIES EN NEVENEFFECTEN VAN ZUIVERINGSMOERASSEN

De belangrijkste functie van een zuiveringsmoeras is de zuivering van oppervlaktewater en afvalwater, zodat een waterkwaliteitsverbetering gerealiseerd wordt. Daarnaast kunnen dergelijke moerassen nog andere functies hebben, zoals (De Ridder 1996):

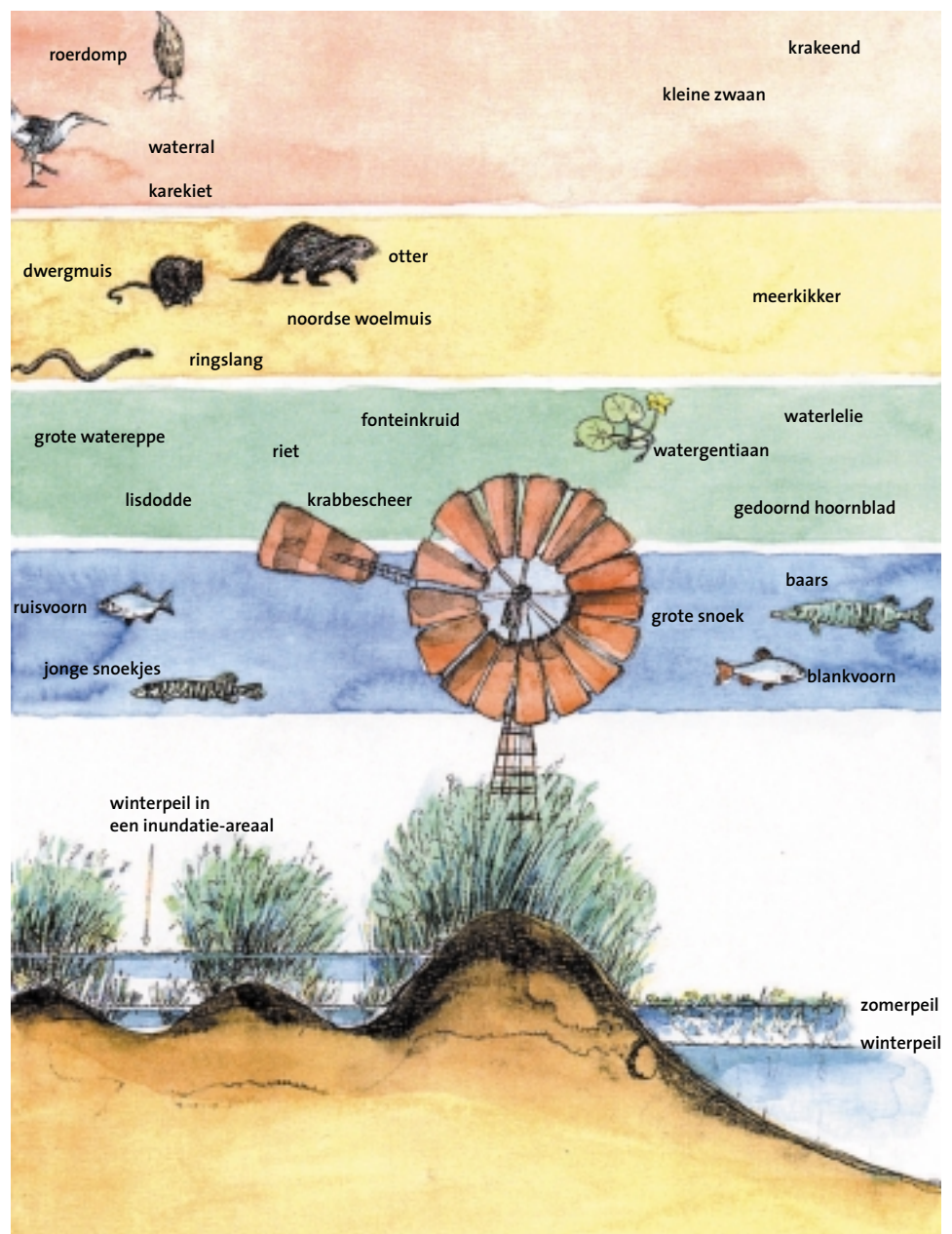
- *retentie van water*. Zuiveringsmoerassen kunnen gebruikt worden om water tijdelijk in een gebied vast te houden of voor een tijdelijke buffering van piekaanvoeren te zorgen;
- *natuurwaarde*. Aan zuiveringsmoerassen kan een ecologische functie worden toegekend, bijvoorbeeld indien ze worden aangelegd in natuurontwikkelingsgebieden (zie figuur 3.1). De bijdrage aan de natuurontwikkeling is tweeledig. In de eerste plaats zorgt het moeras zelf voor een waterkwaliteitsverbetering in het ontvangend systeem. In de tweede plaats fungeert het moeras als broed- en foerageerplaats voor vogels en andere diersoorten. De verontreinigingen in het zuiveringsmoeras kunnen echter door het optreden van bioaccumulatie de fauna negatief beïnvloeden, hetgeen tot een beperking van de natuurwaarde van een zuiveringsmoeras kan leiden;
- *recreatie*. Vanwege de landschappelijke waarde kan aan zuiveringsmoerassen ook een recreatieve functie worden toegekend. Zeker als de moerassen worden afgewisseld met open water, kunnen aantrekkelijke gebieden gecreëerd worden voor wandelaars en fietsers;
- *riet- en biezenteelt*. Als Riet of Mattenbies uit het zuiveringsmoeras gemaaid en afgevoerd wordt, kan deze gebruikt worden door rietdekkers. De vegetatie moet in dat geval wel makkelijk te oogsten en van goede kwaliteit zijn;
- *landschap- en cultuurhistorie*. Voedselrijke moerassen zijn goed in te passen in het landschap. Van oudsher vormen moerassen een vast deel van het landschap, zowel in de vorm van rietoevers, als in de vorm van uitgestrekte moerassen.

De verschillende functies kunnen niet zonder meer met elkaar gecombineerd worden. Elke functie stelt andere eisen aan het ontwerp en beheer. Doelstellingen kunnen met elkaar conflicteren. Ophoping van verontreinigingen in een zuiveringsmoeras kan bijvoorbeeld de natuurwaarde van dat zuiveringsmoeras verminderen. Ook kunnen de ontwerp- en beheerseisen voor de zuivering een beperking vormen voor secundaire functies. Zo is het voor een gevarieerde, vogelrijke rietbegroeiing beter om niet jaarlijks (geheel) te maaien, dit kan echter in conflict zijn met de verwijderingsdoelstelling.

Naast de functies kunnen bij zuiveringsmoerassen ook ongewenste neveneffecten optreden:

- *stankoverlast*. Stankoverlast kan optreden door de productie van zwavel en methaan in het moeras en de blootstelling van rioolwater aan de open lucht. Dit laatste aspect speelt bij overstorten, waar gedurende korte tijd op korte afstand van het zuiveringsmoeras een riool-lucht kan worden waargenomen. Bij de biezenvelden in Houten zijn daarover echter geen klachten gekomen (Grontmij 1988);

-overlast door muggen. Moerassen zijn de natuurlijke habitat van muggen, waardoor de kans bestaat dat door de aanleg van een moeras overlast ontstaat. Op inspraakavonden voor natuurontwikkelings- en herinrichtingsprojecten blijkt dat dit voor lokale bewoners een bron van zorg is. In de Verenigde Staten en Australië worden bij de aanleg en het beheer van zuiveringsmoerassen maatregelen genomen om de ontwikkeling van muggenpopulaties zo veel mogelijk te beperken. Ondiep stilstaand water en dichte vegetatie bevorderen de groei van muggenpopulaties. De integratie van diepere delen en meer open water in het moeras, aëratie en droogval van het moeras in het voorjaar kunnen tot een vermindering van muggenlarvendichtheden zorgen. Een ander voorbeeld van een maatregel tegen muggenoverlast is de inzet van predatoren, zoals de muggenlarvenetende vis *Gambusia* (Russell 1999). De beschreven maatregelen zijn niet altijd in overeenstemming met een op de zuivering afgestemd beheer van een moeras. In de literatuur over Europese zuiveringsmoerassen is de overlast door muggen niet beschreven. In zuiveringsmoerassen voor lage concentraties veront-



Figuur 3.1: voorbeeld van zuiveringsmoeras waarbij de natuurwaarde een secundaire functie is: de aanwezigheid van verschillende soorten in een meerbegeleidend moeras.

reinigingen zal de muggenoverlast vanwege de relatief korte verblijftijden waarschijnlijk meevallen. In zuiveringsmoerassen waarin bovengronds geen water stroomt, bestaat dit probleem niet;

- *uitspoeling of accumulatie van verontreinigingen*. Nutriënten die niet door het zuiveringsmoeras verwijderd worden, kunnen uitspoelen. Als het zuiveringsmoeras niet door een ondoorlatende laag geïsoleerd is van het watervoerend pakket, kunnen de uitspoelende nutriënten in het grondwater terechtkomen. Met name op zandgronden is uitspoeling een probleem, omdat nutriënten daarin minder goed worden gebonden. Metalen en organische microverontreinigingen hopen op in de bodem en kunnen toxisch worden voor organismen. Bij het ontwerp en de aanleg van zuiveringsmoerassen kan met dit probleem rekening worden gehouden door bijvoorbeeld een ondoorlatende laag aan te brengen.

3.2 ZUIVERINGSPROCESSEN IN ZUIVERINGSMOERASSEN

Een zuiveringsmoeras is een biologisch systeem, waarin een aantal mechanismen verantwoordelijk is voor de omzetting en eventuele verwijdering van verschillende componenten in het (afval)water. In deze paragraaf worden deze verwijderingsmechanismen besproken en worden de relevante processen per component samengevat. De volgende zuiveringsprocessen spelen in zuiveringsmoerassen een rol:

Microbiële afbraak en omzetting

Microbiële processen spelen een belangrijke rol in de verwijdering van verontreinigingen in zuiveringsmoerassen. Zowel in het water als in de bodem zorgen bacteriën voor de omzetting en afbraak van organisch materiaal, nitraat, ammonium en organische microverontreinigingen. De mate van zuivering hangt af van de hoeveelheid bacteriën, de processnelheid en het aanbod van om te zetten stof. Milieufactoren, zoals de temperatuur, het zuurstofgehalte, de pH en het organisch stofgehalte, beïnvloeden de mate van zuivering door micro-organismen.

Opname door vegetatie en perifyton

Zowel planten als algen kunnen voedingsstoffen (stikstof en fosfaat) en verontreinigingen (metalen) uit het water opnemen. Bij planten gaat het in de meeste gevallen om helofyten (bijv. Riet) of ondergedoken waterplanten (bijv. Smalle waterpest). Bij sterfte en afbraak van vegetatie of algen komen de opgenomen voedingsstoffen weer vrij. Het perifyton, een laagje algen dat als een biofilm op oppervlakken aanwezig is, zal vooral in winter en voorjaar nutriënten invangen en tijdelijk vasthouden, wanneer andere processen minder actief zijn (Toet 2001). Door de afvoer van de vegetatie worden de nutriënten en verontreinigingen uit het systeem verwijderd. De hoeveelheid verontreinigingen die op deze manier verwijderd wordt, hangt af van de opname van stoffen door de vegetatie en algen, en van de frequentie van het maaien en afvoeren van de vegetatie.

Filtratie, sedimentatie, adsorptie, precipitatie en complexering

Filtratie is het proces, waarbij aan deeltjes gebonden verontreinigingen worden ingevangen door waterplanten of bodemdeeltjes. Bij sedimentatie bezinken deeltjes onder invloed van de zwaartekracht bij een lage stroomsnelheid. Adsorptie treedt op als verontreinigingen, zoals fosfaten of zware metalen, reversibel aan mineralen in zwevend stof of sediment binden. Deze binding treedt op als er voldoende bindingsplaatsen aanwezig zijn. Precipitatie houdt in dat onoplosbare neerslagen worden gevormd als gevolg van chemische binding tussen twee

oplosbare stoffen. Complexering is de binding van metaalionen aan negatief geladen (organische) deeltjes, en is van invloed op de opgeloste hoeveelheid van een metaal. Voor de binding van stoffen aan het sediment zijn de redoxpotentiaal, de pH en de aanwezigheid van bindingsplaatsen van belang.

Chemische reacties

Belangrijke chemische reacties in zuiveringsmoerassen zijn oxidatie-reductiereacties. Deze beïnvloeden met name de bindingscapaciteit van metalen, zoals de binding van ijzer met fosfaat.

Overige afbraakprocessen

Naast bovenstaande processen treden er in het water en de bodem van een zuiveringsmoeras ook andere afbraakprocessen op. Voorbeelden hiervan zijn de sterfte van pathogene micro-organismen en foto-oxidatie van organische microverontreinigingen.

De verwijderings- en omzettingsprocessen per verontreiniging staan samengevat in tabel 3.1. Een gedetailleerde beschrijving van de verschillende processen per verontreiniging staat in bijlage I.

Verontreiniging	Dominant zuiveringsproces
N	- Bacteriële omzetting van organisch N, NO_3^- of NH_4^+ tot N_2 via de processen mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie. Perifyton speelt hierbij een belangrijke rol.
P	- N-opname door hogere planten en verwijdering via maaien en afvoeren - Adsorptie, complexering en precipitatiereacties met mineralen in het sediment. - Opname uit het water door algen en micro-organismen en opname uit sediment door planten. Verwijdering van P door maaien en afvoeren.
PAK	- Fysische en chemische processen, zoals vervluchtiging, uitspoeling en foto-oxidatie. - Afbraak door micro-organismen en opname door plant.
Zware metalen	- Opname door plant en verwijdering door maaien en afvoeren. - Sedimentatie en adsorptie aan de bodem.
Pathogenen	- Fysische en chemische processen, zoals fotolyse en sedimentatie. - Biologische processen, zoals predatie, uitscheiding van stoffen door planten en natuurlijke sterfte.
Organisch stof	- Sedimentatie. - Decompositie door micro-organismen in het sediment.
Zwevend stof	- Sedimentatie en filtratie.
Zuurstofritmiek	- O_2 -productie en consumptie door waterplanten.
Macro-ionen	- Reductie en oxidatie van SO_4^{2-} .

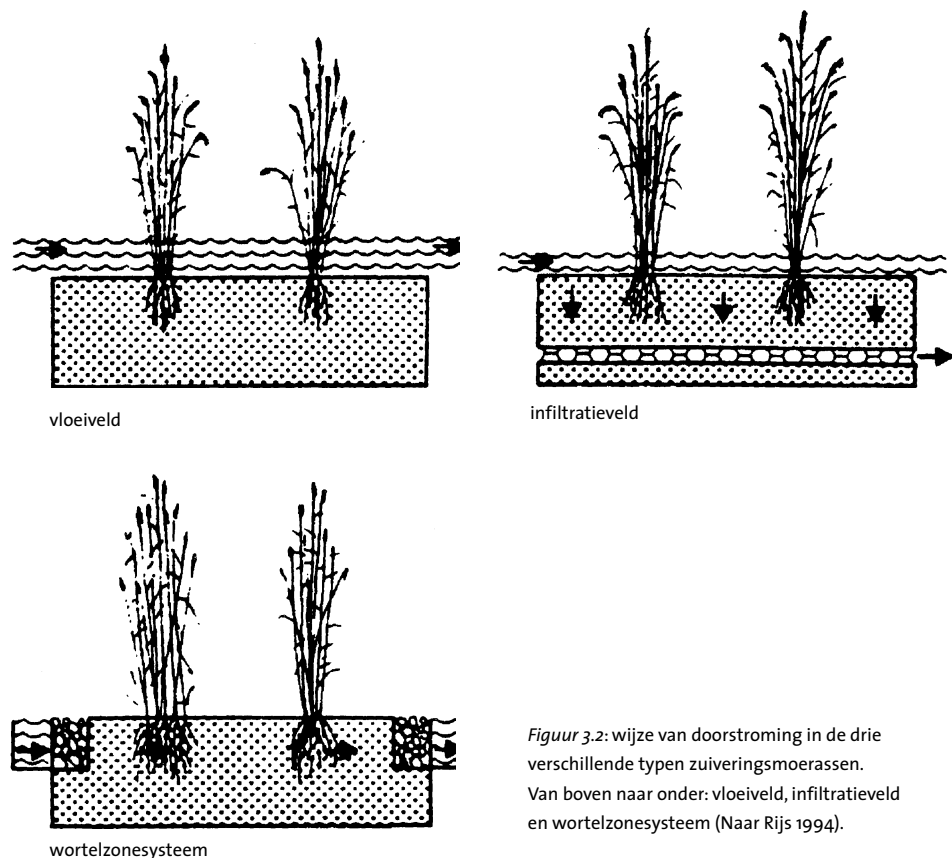
Tabel 3.1: overzicht van de belangrijkste zuiveringsprocessen per verontreiniging.

3.3 TYPE ZUIVERINGSMOERAS

Er bestaan drie typen zuiveringsmoerassen, die verschillen in de wijze van doorstroming van het water (figuur 3.2):

- het vloeiveld;
- het infiltratieveld;
- het wortelzonesysteem.

De doorstroming beïnvloedt de zuiveringsprocessen. Deze drie typen worden hieronder kort beschreven (Verhoeven & Meuleman 1999). Hierbij zal eerst de doorstroming en de inrichting beschreven worden, vervolgens de belangrijkste processen en de stoffen die verwijderd worden.



Figuur 3.2: wijze van doorstroming in de drie verschillende typen zuiveringsmoerassen. Van boven naar onder: vloeiveld, infiltratieveld en wortelzonesysteem (Naar Rijs 1994).

3.3.1 Vloeiveld

In een vloeiveld stroomt het water horizontaal langs de bovengrondse plantendelen. Vloeivelden bestaan vaak uit een voorbezinkbassin gevolgd door enkele zuiveringssloten, waarin Riet of Mattenbies en/of ondergedoken waterplanten groeien. De waterdiepte is meestal 0,2-0,5 m. Het te zuiveren water heeft in de sloten een verblijftijd tot ongeveer 10 dagen. De processen die in een vloeiveld voor zuivering zorgen zijn:

- het bezinken van zwevend stof met daaraan gebonden verontreinigingen;
- diffusie van opgeloste stoffen naar de bodem;
- afbraak van organisch materiaal;
- opname van nutriënten door vegetatie en micro-organismen;
- bacteriële omzettingen;
- vastlegging in de bodem.

De zuivering van organisch stof vindt voornamelijk in het water plaats, terwijl de vastlegging of verwijdering van nutriënten met name in de bodem plaatsvindt. Aangezien het water in een vloeiveld vooral over en niet door de bodem stroomt, is het zuiveringsrendement van BZV en CZV en bacteriële verontreinigingen hoger dan het verwijderingsrendement van nutriënten (10-15%). Met name fosfaat is moeilijk te verwijderen in een vloeiveld. In vloeivelden vormt de biofilm, die op de stengelbasis van helofyten en op de bodem voorkomt en waarin micro-organismen groeien, het substraat voor nutriëntenverwijdering. Als in vloeivelden ondergedoken waterplanten worden aangeplant kan ook een belangrijke bijdrage geleverd worden aan het terugbrengen van de zuurstofdynamiek in het water.

Voorbeelden van vloeivelden zijn Eversteekoog en Land van Cuijk, zie 5.2.4 (Schreijer Et al. 2000, Witteveen+Bos 1998).

3.3.2 Infiltratieveld

In een infiltratieveld stroomt het water verticaal door de bodem of het zandpakket en wordt het water afgevoerd via drains. De zwaartekracht zorgt voor het transport van water door het systeem. De diepte van de bodemlaag van een infiltratieveld varieert van 0,6 tot 1 meter.

De processen die voor zuivering zorgen in een infiltratieveld zijn:

- filtratie van zwevend stof met daaraan gebonden verontreinigingen;
- afbraak van organisch materiaal;
- opname van nutriënten door vegetatie en micro-organismen;
- bacteriële omzettingen;
- vastlegging in de bodem.

In een infiltratieveld spelen opname van nutriënten door de vegetatie, microbiële activiteit en vastlegging in de bodem een belangrijke rol in de zuivering. Vastlegging of zuivering van nutriënten en metalen in de bodem speelt in infiltratievelden een grotere rol dan in vloeivelden. Dit proces wordt gestimuleerd door wisselende zuurstofcondities in de bodem door middel van het afwisselend laten droogvallen en onder water zetten van het infiltratieveld. Daarom lenen infiltratievelden zich goed voor de zuivering van water dat niet continu wordt aangevoerd, zoals overstortwater of wegwaterfilters. De zuiveringsmoerassen bij Lauwersoog en langs de A2 zijn voorbeelden van verticale zuiveringsmoerassen (Meuleman 1999).

3.3.3 Wortelzonesysteem

In een wortelzonesysteem stroomt het water horizontaal door de bodem (of het zandpakket) langs de ondergrondse plantendelen. Het wordt via drains weer afgevoerd. Hierbij werd aangenomen dat door het sterk vertakte wortelsysteem van riet het water gemakkelijk door het veld zou worden getransporteerd. Door het afsterven van wortels ontstaan buisvormige kanaaltjes, waardoor het water horizontaal zijn weg zou vinden in de bodem. In de praktijk blijkt deze hydraulische doorlaatbaarheid tegen te vallen.

In een wortelzonesysteem spelen dezelfde processen een rol in de zuivering als in een infiltratieveld. Dit betekent dat met name nutriënten en metalen worden verwijderd. Bij een wortelzonesysteem is, net zoals bij een infiltratieveld, de samenstelling van de bodem van belang in verband met de benodigde doorlaatbaarheid. In zandige bodems kunnen de gevormde kanaaltjes instabiel zijn en in bodems met veel klei of organisch stof kan de doorlatendheid laag zijn.

Een nadeel van veel wortelzonesystemen is de ongunstige verdeling van het water over het beschikbare bodemoppervlak. De ondergrondse stroming van water is moeilijk te reguleren. In de praktijk treedt er vaak oppervlaktestroming op. Door het ontstaan van preferente stroombanen is het contact van het water met de bodem korter dan benodigd voor een goede zuivering. In Nederland worden deze systemen om bovenstaande redenen niet veel toegepast. Het zuiveringsmoeras in de Erasmusgracht in Amsterdam is een klein wortelzone-systeem, zie 5.2.4 (Van Dijk & Boeke 1999).

In tabel 3.2 worden de belangrijkste eigenschappen van de drie typen filters samengevat.

Type filter	Doorstroming	Dominant zuiveringsproces	Zuivering stof	Belangrijke factor
Vloeveld	Horizontaal in waterkolom	- Sedimentatie - Opname in vegetatie en algen - Afbraak organisch stof	Organisch stof Stikstof	Verblijftijd
Infiltratieveld	Verticaal door bodem	- Vastlegging in bodem - Opname door vegetatie en algen - Bacteriële omzetting	Stikstof Fosfaat Metalen	Wisselende zuurstofcondities Doorlaatbaarheid bodem
Wortelzone-systeem	Horizontaal door bodem	-Vastlegging in bodem -Opname door vegetatie en algen -Bacteriële omzetting	Stikstof Fosfaat Metalen	Wisselende zuurstofcondities Doorlaatbaarheid bodem

Tabel 3.2: overzicht van belangrijkste eigenschappen van een vloeveld, infiltratieveld en wortelzonesysteem: de wijze van doorstroming, het dominante zuiveringsproces, de stof die relatief het beste gezuiverd wordt en de factoren die belangrijk zijn voor de zuivering.

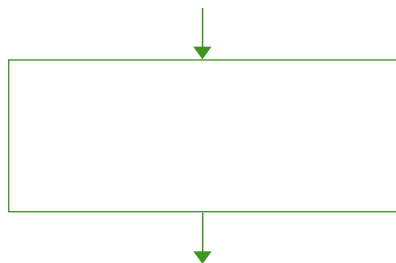
3.4 INRICHTINGSCONCEPTEN

De hierboven beschreven typen zuiveringsmoerassen kunnen op verschillende wijze ingericht worden. De volgende inrichtingconcepten zijn mogelijk: een veldsysteem, slotensysteem, zoomsysteem of een gecombineerd systeem. Deze systemen worden in de volgende paragrafen nader beschreven. Naast de keuze voor de inrichting, kan ook een voorbezinksloot worden aangelegd, die een groot deel van het zwevend stof en het organisch stof laat bezinken en eventuele pieken in de aanvoer buffert.

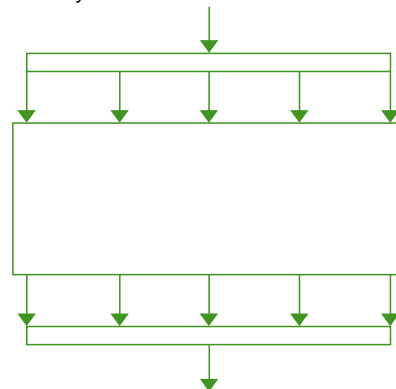
3.4.1 Veldsystemen

In figuur 3.3 wordt een schematische weergave gegeven van verschillende inrichtingsvormen voor vloevelden en infiltratievelden, waarbij water over een veld wordt ingelaten. Om voorkeursstroming te voorkomen kan het water via een verdeel- en verzamelsloot het veld worden in- en uitgelaten. Een voorbeeld van een zuiveringsmoeras met een veldsysteem is het vloeveld bij het Nanneveld.

Veldsysteem met enkelvoudige in- en uitlaat



Veldsysteem met verdeel- en verzamelsloot



Figuur 3.3: inrichting van een moeras in de vorm van een veldsysteem.

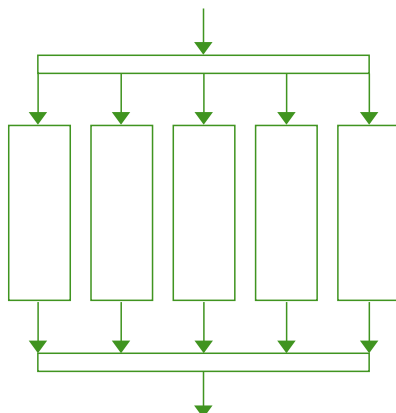
3.4.2 Slotensysteem

In figuur 3.4 wordt een overzicht gegeven van verschillende inrichtingen van slotensystemen. Slotensystemen kunnen alleen voor vloeivelden worden gebruikt. De vloeivelden achter de rwzi's van Eversteekoog en Land van Cuijk zijn ingericht in de vorm van parallelle sloten met een voorbezinksloot. Daarnaast kan over een groot gebied één lange sloot of een aantal in serie geschakelde sloten aangelegd worden, waardoor een verlengde aanvoerweg naar een natuurgebied of ander ontvangend oppervlaktewater ontstaat (Meuleman 1999, Grontmij 1988). Een in serie geschakeld slotensysteem kan ook aangelegd worden door aanpassing van bestaande sloten, zoals bij De Meije is gedaan.

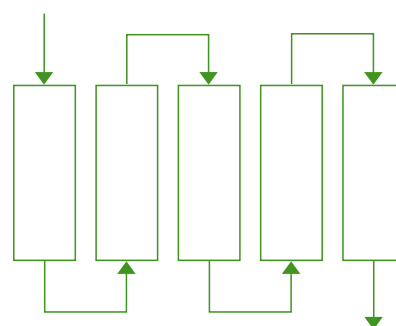
De sloten kunnen zowel begroeid zijn met helofyten (bijv. Riet, Mattenbies en Grote Iisdodde) als met (ondergedoken) waterplanten. In een slotensysteem kan de stroming van water beter gereguleerd worden dan in een veldsysteem, waardoor preferente stroombanen en kortsluitingen voorkomen kunnen worden.

Het voordeel van een parallelgeschakeld systeem ten opzichte van een seriegeschakeld systeem is dat er bij calamiteiten een of meerdere compartimenten kunnen worden afgesloten. Bij relatief korte verblijftijden (in de orde tot 10 dagen) wordt een parallelgeschakeld systeem aanbevolen. Bij langere verblijftijden zijn beide systemen mogelijk.

Parallelgeschakeld slotensysteem met verdeel- en verzamelsloot



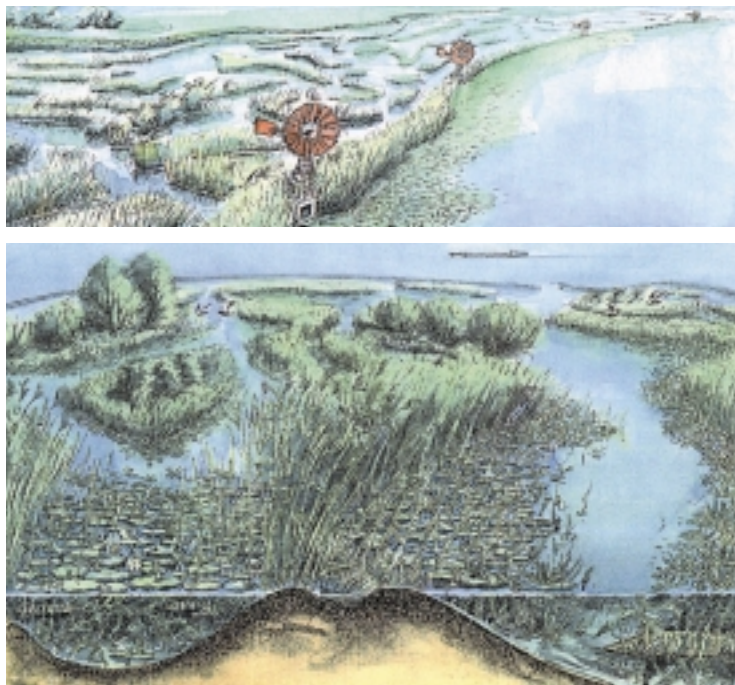
Seriegeschakeld slotensysteem



Figuur 3.4: schakeling van slotensystemen (naar Bak et al. 1998 en De Ridder 1996).

3.4.3 Zoomsysteem

In principe kan aan de oevers van een meer of plas een zuiveringsmoeras worden aangelegd (zie figuur 3.5). Een zoomsysteem is het best te vergelijken met een brede rietoever met een flauw talud. Zulke rietmoerassen komen ook van natuurlijke oorsprong voor. Nadeel van dit soort systemen is dat de oppervlakte die beschikbaar is aan de rand van een meer vaak vrij beperkt is, waardoor het zuiveringsrendement klein zal zijn. De Neusiedler See is een groot meer in het grensgebied tussen Hongarije en Oostenrijk dat voor een groot deel uit een rietmoeras bestaat. Er zijn plannen gemaakt om het water van een toestromende rivier met behulp van een distributiesysteem over het riet te leiden, waardoor de zuiveringscapaciteit van dit natuurlijke moeras beter benut en verdere eutrofiëring van het meer voorkomen wordt (Löffler en Gunatilaka 1994).



Figuur 3.5: impressie van een ecologisch herstelproject met aanleg van een veldmoeras naast een meer. Het moeras heeft een zuiverende werking en vormt een habitat voor roofvis.

3.4.4 Gecombineerde systemen

De aanleg van verschillende typen zuiveringsmoerassen na elkaar wordt vaak toegepast om specifieke zuiveringsprocessen te combineren. Een voorbeeld hiervan is de combinatie van een vloeiveld en een infiltratieveld bij het onlangs aangelegde zuiveringsmoeras bij de rwzi in Sint Maartensdijk (Ton 2000). Met een vloeiveld worden organisch stof en ammonium geoxideerd en wordt de geur van effluent verwijderd. In een nageschakeld horizontaal doorstroomd wortelzonelfilter of een verticaal doorstroomd zuiveringsmoeras wordt de nitraatverwijdering bevorderd.

In Cooper (1999) worden combinaties van horizontale en verticale systemen besproken. Eventueel wordt het water gerecycled als nog denitrificatie benodigd is. Horizontale systemen bevorderen de bezinking van zwevend stof en de denitrificatie. Verticale systemen bevorderen de nitrificatie. In Oostenrijk zijn niet continu belaste verticale systemen gebouwd, waarin het water gerecycled wordt om de nitrificatie en denitrificatie te verbeteren. Het is nog niet duidelijk welk systeem vooraan geplaatst moet worden; het horizontaal of het verticaal doorstroomde. Het plaatsen van een klein vloeiveld voor een infiltratieveld zou het verstopping van de verticale component kunnen voorkomen, omdat in het vloeiveld een groot deel van het zwevend stof zal bezinken.

4. Ontwerp van zuiveringsmoerassen

In dit hoofdstuk worden de randvoorwaarden voor het ontwerp van zuiveringsmoerassen besproken en wordt ingegaan op de sturing van zuiveringsprocessen door middel van het beheer.

4.1 RANDVOORWAARDEN VOOR HET ONTWERP

Er zijn verschillende randvoorwaarden voor het ontwerp van een zuiveringsmoeras, welke hieronder behandeld worden.

4.1.1 Bodem en geohydrologie van de omgeving

De eerste groep randvoorwaarden gaat over de bodem en hydrologie van de omgeving van het zuiveringsmoeras.

Bij het ontwerp van zuiveringsmoerassen kan gebruik worden gemaakt van de natuurlijke helling en het hydraulische verval van een terrein om de doorstroming van een zuiveringsmoeras te bevorderen. Bij wortelzonesystemen kan een helling van de bovenkant van het moeras gemakkelijk tot oppervlaktestroming leiden. Dit is ongewenst, aangezien hierdoor het contact van het water met de bodem, waar de zuiveringsprocessen plaatsvinden, vermindert.

Het type bodem in het zuiveringsmoeras is van belang voor de binding van bepaalde verontreinigingen en de doorstroming van het zuiveringsmoeras. Bij wortelzonesystemen en infiltratievelden die geïsoleerd van hun omgeving worden aangelegd, kan voor een verschillend medium (grind, zand of organische bodem) gekozen worden (zie hoofdstuk 5).

Om te voorkomen dat de hydrologie van het gebied bepaalt of er kwel of wegzijging in het zuiveringsmoeras optreedt en welk peil er in sloten zal staan, kan een zuiveringsmoeras hydrologisch geïsoleerd worden van zijn omgeving (door middel van een isolatielaag en de inzet van kunstwerken, zoals pompen en stuwen). Om bij infiltratievelden natuurlijke drainage te bevorderen kunnen om het veld sloten met een lager waterpeil worden aangelegd. Om de verspreiding van verontreinigingen naar het grondwater te voorkomen moet een ondoorlatende laag aanwezig zijn. Als deze niet van nature aanwezig is, dan moet de ondoorlatende laag worden aangelegd.

4.1.2 Hydrologie van zuiveringsmoeras

Een tweede randvoorwaarde is de hydrologie van het zuiveringsmoeras zelf. Hierbij zijn de volgende voorwaarden van belang (Persson et al. 1999). Ten eerste moet het zuiveringsmoeras voldoende water kunnen opvangen en bergen. Het hydrologische regime kan worden gereguleerd door middel van kunstwerken (zie hoofdstuk 5). Ten tweede moet het water goed over het moeras verdeeld worden (de zogenaamde hydraulische efficiëntie), zodat er:

- maximaal gebruik wordt gemaakt van de beschikbare berging;
- goede menging optreedt;
- geen preferente stroombanen ontstaan die de verblijftijd verkorten.

Hydraulisch efficiënte vloeivelden zijn systemen, die een goede verdeling van instroompunten over de breedte en een grote lengte-breedteverhouding hebben, eventueel bewerkstelligd door het plaatsen van schotten. Algemeen wordt aangenomen dat de verhouding lengte-

breedte van een vloeiveld groter dan 1 moet zijn, en bij voorkeur groter dan 10:1. Bij het ontwerp van een infiltratieveld moet gezorgd worden dat het water goed over het hele veld verdeeld wordt en dat, indien er geen drains over de volle lengte van het veld worden gebruikt, geen erosie optreedt bij het inlaatpunt.

4.2 STURING VAN ZUIVERINGSPROCESSEN DOOR MIDDEL VAN BEHEER

Er zijn verschillende beheersfactoren, waarmee zuiveringsprocessen in een moeras gestuurd kunnen worden (zie figuur 4.1):

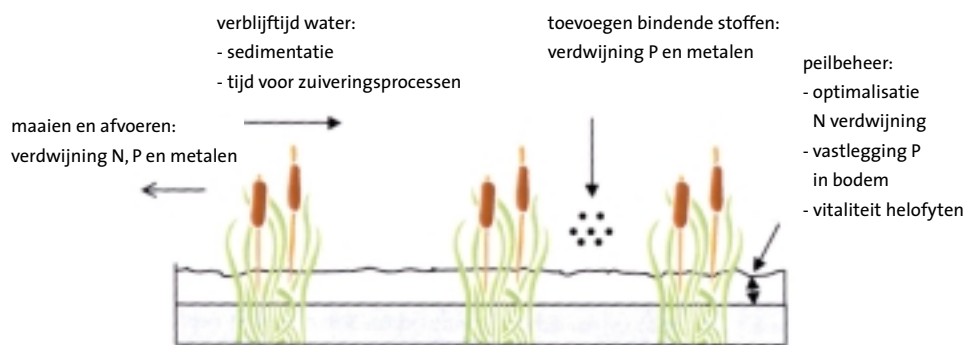
- de verblijftijd;
- het peilbeheer;
- de vegetatie;
- het vegetatiebeheer;
- de toevoeging van bindende stoffen.

Deze factoren worden hieronder besproken.

4.2.1 Verblijftijd

De verblijftijd van het water in een systeem is een belangrijke factor voor de zuiveringsefficiëntie van een moeras. De verblijftijd van het water bepaalt mede de stroomsnelheid en daarmee de kans op sedimentatie. Verder kunnen allerlei processen, zoals opname van stoffen door planten en bacteriële omzettingen, gedurende een langere tijd plaatsvinden, waardoor meer stof uit het water gezuiverd wordt. De verblijftijd hangt af van:

- De belasting in relatie tot de breedte en lengte van een systeem;
- de vegetatie;
- de porositeit en doorlatendheid van het sediment;
- de waterdiepte;
- de helling van het terrein;
- het peilbeheer.



Figuur 4.1: overzicht beheersfactoren die zuiveringsprocessen sturen.

4.2.2 Peilbeheer

Het peilbeheer stuurt de zuiveringsprocessen van nutriënten en metalen. Voor de zuivering van stikstof kan een regime van afwisselend bevoeien en droogvallen in zowel horizontale als verticale systemen zorgen voor optimalisatie van de cyclus van nitrificatie en denitrificatie. Aangezien de beschikbaarheid van nitraat meestal beperkend is voor het optreden van denitrificatie, moet er een voldoende lange zuurstofrijke periode gecreëerd worden om nitrificatie van ammonium op te laten treden. Met een peilbeheer van afwisselende droogval en over-

stroming kan in ijzerrijke bodems ook de vastlegging van fosfaat bevorderd worden. Het peil-beheer heeft invloed op de verblijftijd: verhoging van het waterpeil geeft een langere verblijftijd. De vitaliteit van de helofyten is groter bij peilfluctuaties (Duyve 1986, Lenssen et al. 1997).

4.2.3 Vegetatie

De keuze voor een bepaalde vegetatie beïnvloedt de werking van het zuiveringsmoeras. In een zuiveringsmoeras worden alleen helofyten of ondergedoken waterplanten of een combinatie van beide ingeplant. De eigenschappen van deze plantengroepen en hun specifieke soorten worden hieronder besproken.

Helofyten

Helofyten zijn planten die in de bodem wortelen en waarvan de onderste delen ondergedoken zijn en de bladeren en bloemen boven het water uitsteken. De in Nederland en West-Europa meest gebruikte soort is Riet (*Phragmites australis*). Daarnaast worden in zuiveringsmoerassen soorten als Mattenbies (*Scirpus lacustris*), Grote lisdodde (*Typha latifolia*; zie figuur 4.2) en Gele lis (*Iris pseudacorus*) gebruikt.

De voordelen van helofyten zijn dat:

- ze een gevestigde vegetatie bescherming bieden tegen waterbeweging en erosie;
- ze voor een effectieve beschaduwing zorgen in verband met het tegengaan van algenbloei;
- ze voor gunstige omstandigheden voor de bezinking van deeltjes zorgen.

Lange tijd is gedacht dat de helofyten bij zouden dragen aan het proces van zuurstoftransport naar de wortels en het lekken van zuurstof naar de bodem, hetgeen de verwijderingsprocessen in de bodem zou stimuleren. Of dit proces werkelijk voor een betere zuivering zorgt, staat nog niet vast (Brix 1993b, Kadlec & Knight 1996). Lokaal is er bij de groeipunten van de wortels wel zuurstofafgifte aan de bodem.

De voordelen van de verschillende soorten zijn:

- soorten als Riet en Mattenbies zijn weinig vorst- en windgevoelig;
- Riet heeft een grotere zouttolerantie dan andere soorten (De Graaf et al. 1997). Dit is belangrijk bij de zuivering van wegwater, waarin de chlorideconcentratie hoog kan zijn door de inzet van strooizout bij gladheidbestrijding;
- Grote lisdodde heeft een 2-3 keer hogere opnamecapaciteit voor fosfaat dan Riet. De stikstofverwijdering is gelijk (Toet 2001).

Ondergedoken waterplanten

In vloeivelden worden naast helofyten ook ondergedoken en drijvende waterplanten gebruikt. Zij groeien meestal op grotere diepte dan helofyten. Ondergedoken en drijvende waterplanten kunnen ook effectief nutriënten opnemen. Als de waterplanten afgevoerd worden, kunnen zij bij lage nutriëntenbelasting een significante bijdrage aan de stikstof- en fosfaatverwijdering leveren. In het zuiveringsmoeras bij de rwzi Eversteekooog op Texel was de afvoer van nutriënten door waterplanten echter een factor 2-5 kleiner dan die door helofyten. In dat zuiveringsmoeras zijn waterplanten uit omringende sloten uitgezet, met name Grof hoornblad (*Ceratophyllum demersum*) en Smalle waterpest (*Elodea nuttallii*). Deze soorten zijn tolerant voor schaduw en meststoffen. Daarnaast kwamen ook Bultkroos (*Lemna gibba*), Schedefonteinkruid (*Potamogeton pectinatus*), Tenger fonteinkruid (*P. pusillus*) en Gekroesd fonteinkruid (*P. crispus*) tot ontwikkeling. In het slotensysteem bij De Meije kwamen bij de



Figuur 4.2: Grote lisdodde

inlaat vooral indicatorsoorten voor voedselrijk water tot ontwikkeling, zoals Veelwortelig kroos (*Spirodela polyrhiza*), Wortelloos kroos (*Wolffia arrhiza*), Klein kroos (*Lemna minor*) en Bultkroos. Op het eind van de sloot, waar een deel van de nutriënten gezuiverd zijn, worden soorten gevonden die duiden op minder eutroof water, zoals Drijvend fonteinkruid (*P. natans*) en Waterviolier (*Hottonia palustris*). In de VS is het gebruik van Klein kroos als enige soort zeer algemeen in vloeivelden (vijvers). Door de Lemna Corporation worden deze zuiveringsmoerassen commercieel geëxploiteerd. Bij het gebruik van Klein kroos in een vloeiveld wordt met behulp van rasters het wateroppervlak in compartimenten onderverdeeld, omdat het risico bestaat dat de laag kroos onder invloed van de wind naar een bepaalde hoek wordt gedreven. In Nederland wordt de groei van Klein kroos in vloeivelden met ondergedoken waterplanten juist tegengegaan, omdat bedekking met kroos de waterplanten laat afsterven en het water zuurstofloos wordt.

Een voordeel van het gebruik van ondergedoken waterplanten is dat dichte vegetaties van ondergedoken waterplanten de natuurlijke zuurstofritmiek van ondiepe aquatische ecosystemen terug kunnen brengen.

4.2.4 Vegetatiebeheer

De opname door de vegetatie kan geoptimaliseerd worden door te oogsten in het seizoen met de hoogste nutriëntenopslag in de bovengrondse plantendelen. Voor de nutriënten stikstof en fosfaat is dat voor Riet de maanden oktober tot januari. Voor zware metalen is dat minder eenduidig. Daarom is de beste maaiperiode de herfst, omdat dan in ieder geval de meeste nutriënten verwijderd worden. Eerder maaien kan leiden tot verlies van de vitaliteit van de vegetatie en verstoring van broedende vogels.

4.2.5 Toevoeging bindende stoffen

Voor de verwijdering van fosfaat en zware metalen kunnen verschillende bindende stoffen aan de bodem toegevoegd worden, zoals ijzer. In de praktijkvoorbeelden van zuiveringsmoerassen in Nederland (zoals beschreven in paragraaf 2.2) zijn geen stoffen toegevoegd om verontreinigingen te binden.

4.3 SECUNDAIRE FUNCTIES

Het is moeilijk om algemeen geldende principes voor de afstemming van het ontwerp van zuiveringsmoerassen en de secundaire functies te geven. Hieronder wordt per secundaire functie enkele opmerkingen geplaatst:

Waterretentie

Berging van water in een zuiveringsmoeras stelt eisen aan de grootte van het systeem. Het ontwerp zal rekening moeten houden met de aanvoer van extreem grote hoeveelheden water.

Natuurwaarde

In het algemeen hangt de diversiteit aan fauna van de vegetatiediversiteit af. Toch is de dierlijke diversiteit in zuiveringsmoerassen met maar één soort vegetatie relatief hoog (Knight 1997). De natuurwaarde hangt grotendeels af van de waterkwaliteit in het zuiveringsmoeras, met name de voedselrijkdom en de mogelijke toxiciteit. De fauna in een voedselrijk rietmoeras bevat karakteristieke vogelsoorten (bijv. Rietgors) en zoogdieren (bijv. Dwergmuis). Elke soort stelt andere habitateisen wat betreft broedgelegenheid, aanwezigheid van voedsel en rust. Om verschillende habitats te creëren moet structuurvariatie (zoals open water, riet, slikkige drassige bodems) worden aangebracht en kunnen verschillende vormen van vegetatiebeheer toegepast worden. Zonering van de recreatie wordt aanbevolen om de verstoring van de fauna te beperken (De Ridder 1996).

Recreatie

Om een zuiveringsmoeras aantrekkelijk te maken voor recreatie zijn er vele mogelijkheden, zoals de aanleg van wandelpaden, het creëren van stukken open water en het vergroten van de educatieve waarde door het plaatsen van informatieborden over de functies van het moeras. Voor de recreant is de esthetische waarde, de toegankelijkheid en de afwezigheid van stank en overlast, van belang.

Riet- en biezenteelt

Voor de verwerking van Riet en Biezen als bouw materiaal is een goede kwaliteit van de planten vereist. Daarom moet een te lage nutriëntenbelasting voorkomen worden. Door niet te vroeg in het groeiseizoen te oogsten, kan voorkomen worden dat de kwaliteit van de vegetatie in het volgende seizoen minder wordt. Ook moet het zuiveringsmoeras voldoende toegankelijk zijn voor de gewenste vorm van maaibeheer.

Landschappelijke waarde

Het vormgeven van de landschappelijke waarde van een zuiveringsmoeras hangt sterk af van de gekozen locatie; een zuiveringsmoeras in de stad stelt andere eisen dan een zuiveringsmoeras in het buitengebied.

5. Technische aanleg, inrichting en onderhoud

Dit hoofdstuk heeft tot doel een globaal overzicht te geven van technische eisen ten aanzien van de aanleg, inrichting en het onderhoud van moerassystemen. Eerst worden de onderdelen besproken die van belang zijn bij het opstellen van een voorontwerp voor een zuiveringsmoeras. Vervolgens wordt de opbouw van verschillende typen zuiveringsmoerassen beschreven en daarna wordt ingegaan op verschillende inrichtingsaspecten.

5.1 VOORONTWERP

Voordat een zuiveringsmoeras wordt aangelegd, wordt eerst een voorontwerp gemaakt. In een voorontwerp wordt op basis van de uitgangspunten van het zuiveringsmoeras een technologisch ontwerp en een overzichtstekening gemaakt. Een technologisch ontwerp bevat een schematische voorstelling van het zuiveringsmoeras en de benodigde aan- en afvoerwegen, de regelapparatuur en de capaciteit van de verschillende onderdelen. De overzichtstekening (lay-out) toont de verschillende onderdelen van het zuiveringsmoeras zoals ze zullen worden ingepast in het terrein (zie voor voorbeelden figuur 5.3 t/m 5.6).

De uitgangspunten voor het ontwerp van het zuiveringsmoeras zijn:

Geohydrologische situatie

Als er op het terrein onvoldoende hydraulisch verval bestaat, zal met pompen extra verval moeten worden gerealiseerd en door middel van (pers)leidingen water moeten worden aangevoerd. Als er gedurende bepaalde tijden te weinig water aangevoerd wordt, kan het beschikbare water in het zuiveringsmoeras rondgepompt worden. Als er vanwege de grondwaterstand infiltratie optreedt of sprake is van verontreinigde kwel, moet het zuiveringsmoeras van de omgeving afgeschermd worden.

Type zuiveringsmoeras

Vloevelden, vijvers en infiltratievelden hebben een verschillend ruimtebeslag en kunnen verschillende volumes water verwerken. De diepte van een vloeiveld wordt bepaald door de maximale waterdiepte voor de helofyten, waterplanten hebben over het algemeen een grotere diepte nodig dan helofyten. In infiltratievelden wordt de diepte van het filtermedium mede bepaald door de worteldiepte van de gekozen vegetatiesoort.

Gewenste verblijftijd

De voor een bepaald zuiveringsrendement vereiste verblijftijd zal de dimensies van een zuiveringsmoeras mede bepalen.

Eisen vanuit beheer en onderhoud

Voor het maaien van de vegetatie moet het zuiveringsmoeras toegankelijk zijn voor het benodigde materieel. Er moet ruimte zijn voor de machines (i.v.m. kantelgevaar) en de paden moeten goed begaanbaar zijn. Dit heeft bij slotensystemen invloed op de maximale breedte van de sloten. Daarnaast moet met het materieel het gehele oppervlak van het zuiveringsmoeras bereikt kunnen worden. Ook moet onderhoud aan eventuele (technische) installaties (bijv. pompen en leidingen) mogelijk zijn.

Beschikbare ruimte

De beschikbare ruimte en de vorm van een terrein hebben invloed op de keuze voor een type zuiveringsmoeras. Daarnaast zal de landschappelijke inpasbaarheid een rol spelen.

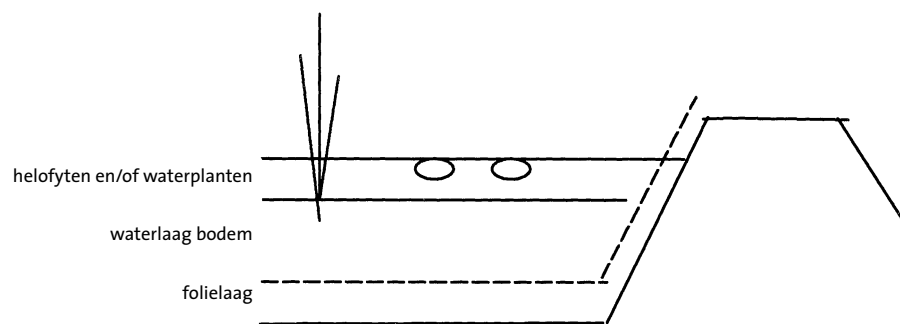
5.2 AANLEG EN INRICHTING

In deze paragraaf wordt de opbouw van een vloeiveld en een infiltratieveld beschreven en worden voorbeelden gegeven van de inrichting van in Nederland aangelegde moerassystemen.

5.2.1 Vloeiveld

Een vloeiveld is schematisch van boven naar beneden als volgt opgebouwd (figuur 5.1):

- helofyten en/of waterplanten;
- waterkolom;
- toplaag organisch materiaal;
- bodem;
- eventueel afdichtende laag.



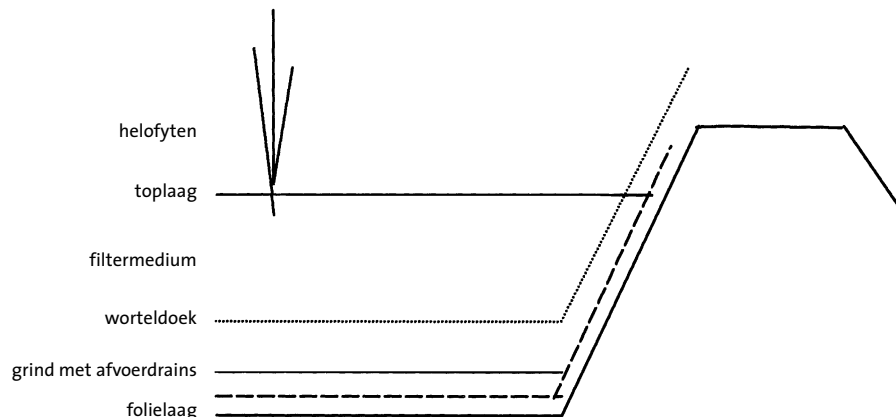
Figuur 5.1: schematische doorsnede vloeiveld.

Bij vloeivelden is de hoogte van de waterlaag meestal 20-50 cm. Vloeivelden kunnen ook in de vorm van vijvers aangelegd worden, waarin al dan niet wortelende waterplanten groeien. De waterdiepte kan dan hoger zijn dan bij beplanting met helofyten, afhankelijk van het soort planten. Ondergedoken waterplanten kunnen een waterdiepte van 1 m verdragen en drijvende waterplanten groeien ook nog bij een grotere diepte. Bij grote dieptes kan licht echter een limiterende factor worden.

5.2.2 Infiltratieveld

Een infiltratieveld bestaat van boven naar beneden uit de volgende lagen (figuur 5.2):

- helofyten;
- toplaag bestaande uit open materiaal;
- aanvoerdrainageleiding in toplaag;
- filtermedium (zand of grind);
- worteldoek;
- afvoerdrainageleiding in grindlaag;
- vloeistofdichte afdichting (bijv. folie).



Figuur 5.2: schematische doorsnede infiltratieveld.

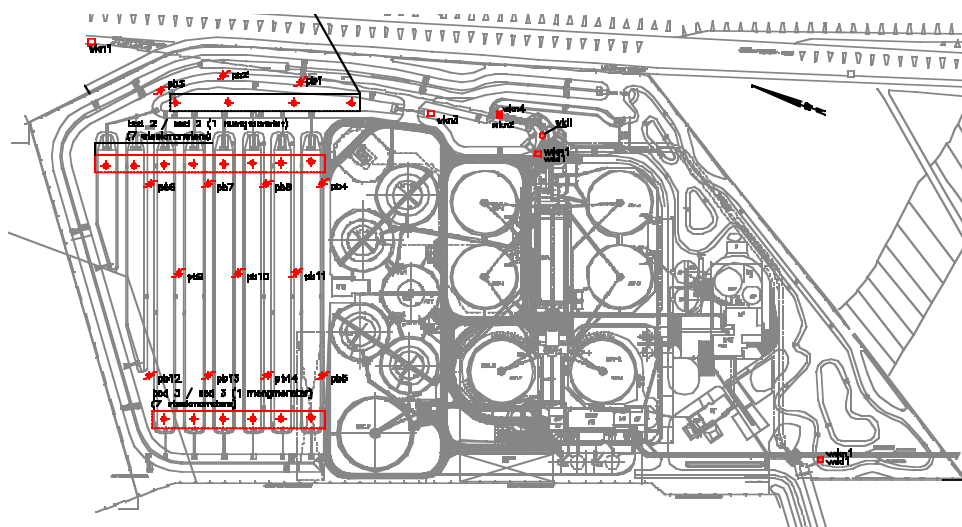
In de meeste Europese moerassystemen is de diepte van een zuiveringsmoeras met ondergrondse stroming vastgesteld op de bewortelingsdiepte van Riet, namelijk 0.60 m (Cooper et al. 1996). Deze diepte wordt in horizontaal doorstroomde zuiveringsmoerassen gekozen, omdat bij deze diepte al het water langs de wortels zal stromen. Voor infiltratievelden liggen de afvoerdrains meestal niet veel dieper dan deze diepte.

5.2.3 Voorbezinkbassin

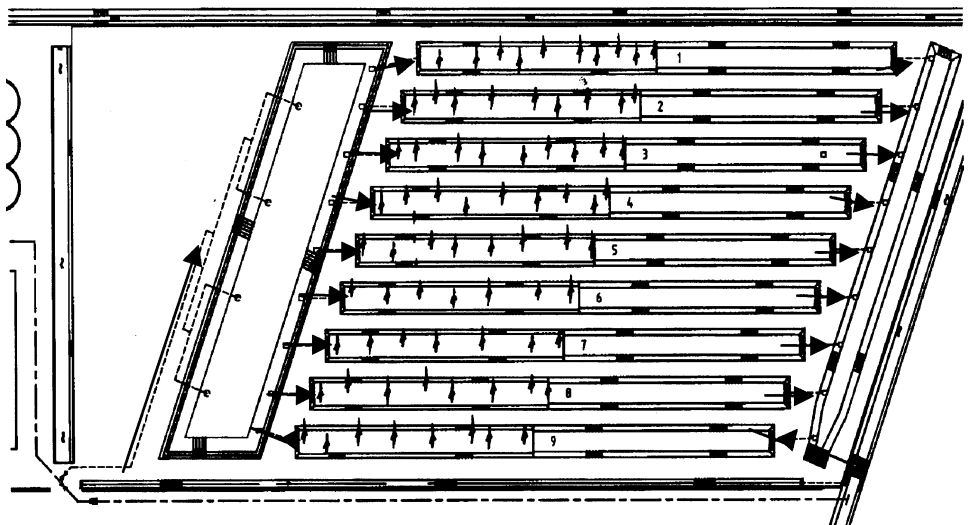
Het voorbezinkbassin dient als tijdelijke opvang van het te zuiveren water en als buffer van pieken in de stofbelasting. In het voorbezinkbassin zullen onopgeloste deeltjes, zoals zwevend stof en de daaraan gebonden verontreinigingen fosfaat en zware metalen, bezinken en zal een deel van het organisch stof afgebroken worden. Een voorbezinkbassin kan daarom een zeer belangrijke bijdrage leveren aan de zuivering. Ter bevordering van de sedimentatie en een goede menging voor de buffering van pieken zijn lage stroomsnelheden ($< 0.3\text{--}0.5\text{ m/s}$) vereist. Het voorbezinkbassin kan de vorm van een sloot hebben, indien het bassin ook gebruikt wordt voor de aanvoer en verdeling van water (zoals bij een vloeiveld).

5.2.4 Voorbeelden moerassystemen

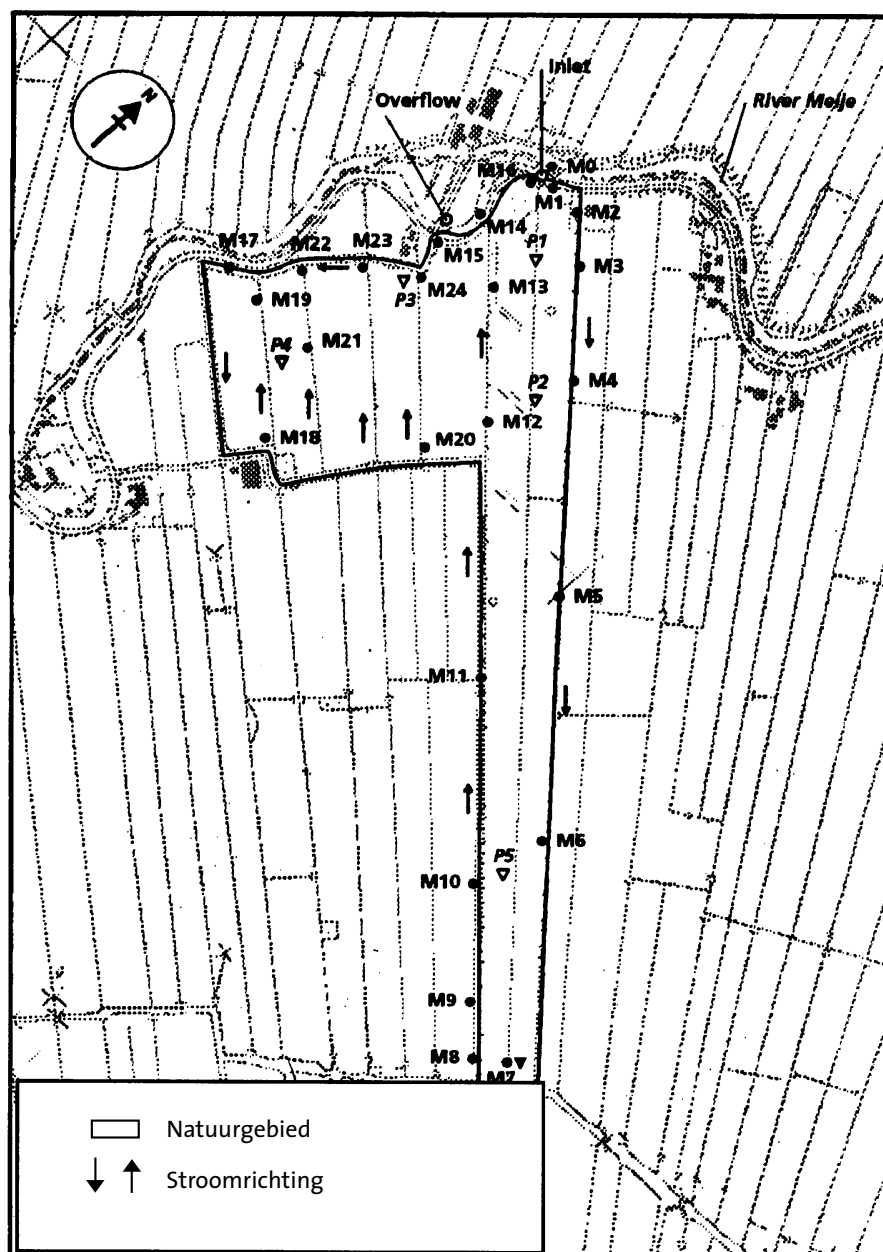
Hieronder volgen een aantal overzichtstekeningen van zuiveringsmoerassen die in Nederland zijn aangelegd. Een beknopte beschrijving van deze moerassystemen is te vinden in paragraaf 2.2. Van een aantal van deze systemen zijn rekenregels afgeleid en toegepast in het DSS.



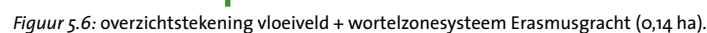
Figuur 5.3: overzichtstekening van slotensysteem en waterplantenvijvers bij rwzi Land van Cuijk (3,9 ha).



Figuur 5.4: overzichtstekening van slotensystemen met helofyten en waterplanten bij rwzi Evertsekoog op Texel.



Figuur 5.5: overzichtstekening slotensysteem met waterplanten De Meije.



De hydraulische doorlatendheid van de bodem van een zuiveringsmoeras wordt bepaald door:

- de mediaan korreldiametergrootte;
- de variatie in de korrelgrootteverdeling;
- de korrelvorm;
- de porositeit.

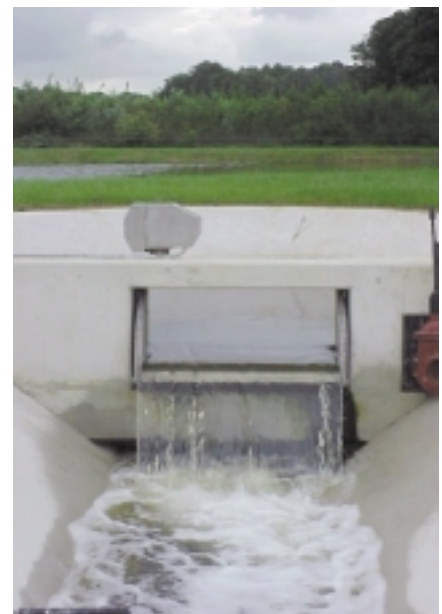
Door de depositie van deeltjes, sediment en detritus, kan het zuiveringsmoeras gaan verstopen. Daardoor zal de hydraulische doorlatendheid afnemen. Ook door de ontwikkeling van de microbiële populatie kan de doorlatendheid afnemen, maar het aantal bacteriën zal zich na enkele maanden van belasting van het zuiveringsmoeras met afval(water) stabiliseren.

5.5 AAN- EN AFVOER VAN WATER

Het aan- en afvoersysteem dient zo te worden ontworpen, dat het water gelijkmatig over het zuiveringsmoeras wordt verdeeld (zie figuur 5.7). Bij het gebruik van pompen zullen ook (pers)leidingen nodig zijn. De dimensies van de aan- en afvoersystemen zijn afhankelijk van de hydraulische belasting van het systeem. Bij een vloeiveld is een gelijkmatige verdeling over de breedte van het veld van belang en bij een infiltratieveld een gelijkmatige verdeling over de oppervlakte. Er moet bij de aanleg rekening mee gehouden worden dat het leidingensysteem schoongemaakt moet kunnen worden.

5.6 VERMEERDERING EN AANPLANT VAN VEGETATIE

De vegetatie van een zuiveringsmoeras kan uit helofyten en/of waterplanten bestaan. Over de aanplant en ontwikkeling van waterplanten is in de literatuur weinig informatie gevonden. De waterplanten kunnen in overleg met het waterschap uit naburige sloten worden gehaald. Deze zullen zich vegetatief vermeerderen en aanhangende zaden zullen tot ontkieming kunnen komen. Over de aanplant en ontwikkeling van helofyten is meer bekend. De meest gebruikte soort helofyt in Nederland is Riet, daarnaast worden nog Mattenbies, Grote lisdodde en Gele lis gebruikt. Riet heeft de grootste tolerantie voor chloride en zal in gebieden met hoge chlorideconcentraties en bij de zuivering van wegwater de voorkeur genieten. Liesgras (*Glyceria maxima*) heeft ook een grote biomassa productie, maar is in Nederland nog niet gebruikt in zuiveringsmoerassen vanwege de zwakte van de stengels.



Figuur 5.7: peilbeheer door middel van stuwen bij zuiveringsmoeras rwzi Land van Cuijk.

Helofyten zijn in de handel verkrijgbaar, maar kunnen ook worden verzameld in de omgeving van het zuiveringsmoeras. Het is namelijk van belang dat lokaal plantmateriaal wordt gebruikt, dat past bij de bodemsoort en de voedselrijkdom van het zuiveringsmoeras. De verschillende methoden voor de aanplant van Riet zijn:

Zaaien

Zaad kan worden gebruikt om rietplantjes (in de kas) op te kweken, deze kunnen vervolgens handmatig of machinaal worden uitgeplant. Voordeel van deze methode is dat tot half juli kan worden doorgeplant (Duyve 1986). Enkele voorwaarden voor kieming van rietzaad zijn (De Ridder 1996):

- met water verzadigd substraat op lichte open plek;
- maximaal enkele millimeters water;
- minerale bodem of bij veenbodem de aanvoer van voedselrijk water;
- voorkomen van uitdroging, overspoeling, overschaduwning en vorst; temperatuur boven 15°C.

Stekken poten

Rietstekken worden vervaardigd uit jonge scheuten die minimaal 10 cm onder de grond zijn afgestoken. Op de koppen kunnen zich nieuwe wortels gaan vormen. Met behulp van een pootijzer worden 2-4 stekken in een gat geplant (Duyve 1986).

Planten van rietplanten

Riet wordt geplant als uitgestoken stukken wortelstok. Deze moeten ten behoeve van de luchtvoorziening worden geplant met een boven water uitstekende oude stengel eraan (maximaal 30 cm waterdiepte). Rietplanten kunnen in de winter gewonnen en onder water bewaard worden. Het benodigde aantal planten is 4-10 per m² (Duyve 1986).

Planten van wortelstokken of zoden

De wortelstokken van Riet kunnen worden uitgegraven. Zoden (15x15x20 cm) kunnen worden uitgesneden uit bestaande moerassen (Duyve 1986). Uitgegraven zoden met wortelstokken zijn ook commercieel verkrijgbaar. Uitgesneden wortelstokken, in stukken van ten minste drie knopen en twee onbeschadigde internodiën, kunnen op dezelfde manier als rietplanten geplant worden. Als gebruik gemaakt wordt van zoden uit een bestaand moeras hangt de plantafstand af van de grootte van de zoden, dit zal meestal 4 per m² zijn (Duyve 1986).

De weersomstandigheden tijdens en na planten bepalen ook het resultaat. De plantdichtheid van Riet bepaalt alleen in de aanloopfase van het zuiveringsmoeras (de eerste drie jaar) de vegetatiedichtheid. Daarna zal de vegetatiedichtheid gelijk zijn, als er geen vraat door watervogels of muskusratten of concurrentie van onkruid optreedt. De waterstand en stroming zijn van invloed op de ontwikkeling van de vegetatie. Biezen en Lisdodden kiemen ook onder water. Overige soorten kiemen alleen op nat substraat. Bij de aanplant moet het water dus minder diep zijn dan bij een ontwikkelde vegetatie. Bij een waterstand hoger dan 50 cm zal Riet geen nieuwe scheuten meer vormen, waardoor de vegetatie minder dicht wordt (Lenssen et al. 1997). De stroomsnelheid mag niet te hoog zijn (< 0.7 m/s) om fysieke schade aan de planten te voorkomen. Daarnaast kan het van belang zijn om gedurende de eerste drie maanden van de ontwikkeling van de rietvegetatie de groei van onkruid te bestrijden door het waterpeil op 5 cm te houden (Cooper 1993). Vraat door watervogels kan eveneens worden bestreden door een niet te laag waterpeil aan te houden (Bezuijzen 1996). Naast onkruid en vraat kunnen ook insecten, zoals rietstengelboorder en wortelstokboorder, de vitaliteit van het riet aantasten (Lenssen 1997).

Op lange termijn zal zich een helofytenvegetatie ontwikkelen, die aangepast is aan de lokale situatie en aan de belasting van het zuiveringsmoeras. Daarin kunnen andere soorten dominant zijn in plaats van de soorten die oorspronkelijk aangeplant zijn.

5.7 ONDERHOUD

Het beheer en onderhoud van een zuiveringsmoeras moet erop gericht zijn de watergangen (behalve die met helofyten) open te houden, inwaaivuul te verwijderen, nutriënten af te voeren, verruiging van dijken en paden tegen te gaan en ophoping van verontreiniging tegen te gaan. Het beheer omvat de vegetatie en de bodem. Daarnaast zal er periodiek onderhoud aan eventuele technische installaties moeten plaatsvinden. Dit wordt niet in het handboek behandeld.

5.7.1 Vegetatiebeheer

Helofyten

Om de verwijdering van nutriënten te stimuleren wordt geadviseerd de vegetatie jaarlijks te maaien en af te voeren. Mattenbies kan tweemaal per jaar gemaaid worden. De meest gebruikte machine in dit verband is de kraan met daaraan een maaibalk en maaikorf. Bij het maaien mogen niet te veel bovengrondse delen van de helofyten weggehaald worden. Er dient boven de waterlijn (of het maximale peil) gemaaid te worden. Dit voorkomt zuurstofgebrek bij de wortels door het vollopen van afgemaaide stengels. Het verwijderen van de vegetatie kan invloed hebben op de diversiteit van de plantpopulatie. Bij lage nutriëntenbelasting (zoals bij weg- en hemelwater) moet de vegetatie niet elk jaar verwijderd worden, omdat dan een nutriëntentekort de ontwikkeling van de vegetatie kan remmen. Voor Riet is het noodzakelijk dat het moeras één keer in de vijf jaar helemaal droogvalt, om ophoping van toxines te voorkomen.

Waterplanten en kroos

Waterplanten worden verwijderd om:

- de doorstroming in het waterplantencompartiment veilig te stellen;
- nutriënten te verwijderen;
- kroos te verwijderen.

De waterplantenvegetatie wordt maar ten dele verwijderd. Het achtergebleven deel zal het volgende seizoen weer uitgroeien. Er moet voorkomen worden dat de hele sloot met kroos bedekt raakt. Dit kan door bij meer dan 80% bedekking, het kroos tot 20% bedekking terug te brengen. Waterplanten kunnen met een maaibalk verwijderd worden, kroos met een maaibalk met kippengaas.

Dijken en paden

Ook de begroeiing op dijken en paden moet twee keer per jaar (zomer en herfst) gemaaid worden om verruiging tegen te gaan en de bereikbaarheid te waarborgen.

Materieel

Het vegetatiebeheer kan het best zoveel mogelijk machinaal gebeuren. Varend onderhoud zal in vloeivelden alleen mogelijk zijn als de diepte minimaal 0,50 m is, de breedte groter dan 5 m is en de afstand minstens 400 m bedraagt. Daarom zal vaak worden gewerkt met rijdend materieel, zoals een kraan of trekker met een maaibalk of maaikorf (STOWA 1996). De vegetatie kan gemaaid en verwijderd worden door met rijdend materieel over het zuiveringsmoeras te rijden, nadat het is drooggelegd (figuur 5.8).

Om met rijdend materieel te kunnen werken, moet de breedte van het zuiveringsmoeras niet te groot zijn en moet een onderhoudspad aanwezig zijn. Het onderhoudspad moet (afhanke-



Figuur 5.8: maaien van drooggelegd infiltratieveld Lauwersoog.

lijk van het materieel) een minimale breedte hebben in verband met kantelgevaar. Ook aan de bodemgesteldheid worden speciale eisen gesteld (STOWA 1996). Een kraan in combinatie met een maaikorf heeft meestal een bereik van ± 10 m vanuit de insteek en een trekker in combinatie met een maaikorf van 7,5 m. Het soort materieel, dat bij onderhoud ingezet zal worden, is dus van belang bij het ontwerp van de dimensies van het zuiveringsmoeras. Er komen ook technieken beschikbaar om te maaien als er een waterlaag op het veld staat.

5.7.2 Sanering bodem

Over het algemeen wordt aangeraden om de sedimentlaag na verloop van tijd te verwijderen vanwege de ophoping van nutriënten en verontreinigingen in de (water)bodem van een zuiveringsmoeras en de verhoogde kans op nalevering en toxiciteit. De spreiding in de verwachte effectieve levensduur van een moeras is nogal groot, namelijk 10 tot 35 jaar. Als gemiddelde levensduur van een zuiveringsmoeras kan 25 jaar worden aangehouden. Bij verzadiging of toxiciteit moet de waterbodem gesaneerd worden. Door regelmatige bemonstering van metalen, organische microverontreinigingen en fosfaat kan het tijdstip van sanering beter vastgesteld worden. Dit kan betekenen dat over een lange periode sediment en waterkwali-teit bemonsterd moeten worden, hetgeen hoge kosten met zich meebrengt. In de praktijk zal het zuiveringsmoeras alleen in de eerste jaren intensief gemonitord worden. Ook in het sediment van een voorbezinkbassin zullen zich verontreinigingen ophopen en zal het sediment daarom periodiek gesaneerd moeten worden.

De kosten van een waterbodemsanering zijn hoog, maar moeten worden afgezet tegen de kosten van het saneren van het veel grotere oppervlak van de waterbodem in het ontvangende systeem. De concentraties aan verontreinigingen in de bodem van het zuiveringsmoeras zullen hoger zijn, maar de verontreiniging is geconcentreerd over een (veel) kleiner oppervlak.

5.8 KOSTEN

De kosten van een zuiveringsmoeras zijn onder te verdelen in eenmalige investeringskosten voor de aanleg en inrichting van het zuiveringsmoeras en de jaarlijkse kosten voor beheer en onderhoud. Daarnaast kunnen de secundaire functies van het zuiveringsmoeras extra kosten bij de inrichting en/of het beheer met zich mee brengen.

5.8.1 Aanleg & inrichting

Hieronder wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste kostenposten bij de aanleg en inrichting van een zuiveringsmoeras.

- voorbereiding en ontwerp;
- aanleg: de aankoop van grond kan hoge kosten met zich meebrengen. De grondprijs verschilt regionaal en kan afhangen van de bestemming van de grond. Daarnaast zijn er kosten voor het grondverzet; het uitgraven van de locatie en de eventuele aanleg van dijkjes;
- kunstwerken en leidingen: afhankelijk van de hydraulische belasting en het type zuiveringsmoeras zal met behulp van leidingen, pompen en stuwen het waterpeil in het zuiveringsmoeras gereguleerd moeten worden. Verder zal een folielaag en/of worteldoek aangekocht moeten worden;
- vegetatie: de kosten van de vegetatie omvatten de aankoop van zaad of stekjes en de aanplant.

5.8.2 Jaarlijkse kosten

De jaarlijkse kosten worden bepaald door:

- vegetatiebeheer (zoals maaien, verwijderen kroos, vuilverwijdering);
- sanering waterbodem: afhankelijk van de levensduur van een zuiveringsmoeras zal eens in de 10-20 jaar de bodem van het moeras gesaneerd moeten worden;
- monitoring (bemonstering, analyse en verwerking resultaten);
- overig onderhoud (leidingen, kunstwerken, etc.);
- energiekosten (pompen);
- kapitaallasten.

De meeste van de beschreven posten bestaan voor een belangrijk deel uit personele lasten.

Voor de kosten van het vegetatiebeheer wordt verwezen naar literatuur over natuurvriendelijk oeverbeheer (STOWA 1996).

Op basis van verschillende literatuurbronnen is een overzicht gemaakt van de investerings- en onderhoudskosten van zuiveringsmoerasen in Nederland (tabel 5.1 volgende pagina). Niet in elke studie worden dezelfde kostenposten onderscheiden; sommige posten overlappen gedeeltelijk bij de verschillende bronnen. Op basis van deze tabel kan slechts een indruk worden verkregen van de kosten van een zuiveringsmoeras. Daarbij moet erop gelet worden dat ook het prijspeil van de verschillende studies afwijkt.

De eisen die de secundaire functies stellen aan het ontwerp en beheer van zuiveringsmoerasen, zullen ook kosten met zich meebrengen (zoals de aanleg van bankjes voor de recreatieve functie). Hiervoor kunnen echter moeilijk algemene richtlijnen opgesteld worden.

De eisen die de secundaire functies stellen aan het ontwerp en beheer van zuiveringsmoerasen zullen ook kosten met zich meebrengen (zoals de aanleg van bankjes voor de recreatieve functie). Hiervoor kunnen echter moeilijk algemene richtlijnen opgesteld worden.

Literatuurbron	Scherijeretal 2000	Van Dijk & Boeke 1999	Bezuijen 1996	o.a Witteveen+Bos 1998	De Ridder 1996
herkomst water	rwzi-efluent	overstorten	oppervlaktewater	rwzi-efluent	algemeen
type filter	vloeiveld	rietwortel-zonesysteem	vloeiveld	vloeiveld	vloeiveld
prijspeil jaar	1994	1993	1992	2000	1996
in- of excl. BTW	exclusief?	exclusief	exclusief	exclusief	exclusief
oppervlakte zuiveringsmoeras (ha)	1,3	0,14	24	3,9	1

aanleg & inrichting					
voorbereiding		38.500	91.000		p.m.
aanleg	200.000	10.400			
grond	n.v.t.		1.990.000		11.000-27.000
grondwerk			446.000		7.000-11.000
leidingen					
duikers, stuwen, pompen					11.000-23.000
folielaag					60.000
vegetatie			134.000		11.000-23.000
aanplant			72.000		
instrumentale t.b.v. onderzoek	45.000				
<i>totale investering</i>	<i>245.000</i>	<i>48.900</i>	<i>2.733.000</i>	<i>500.000</i>	<i>99.000-143.000</i>
<i>investering per ha.</i>	<i>188.500</i>	<i>349.000</i>	<i>115.000</i>	<i>128.000</i>	<i>99.000-143.000</i>

onderhoud (jaarlijks)				32.000	
vegetatiebeheer	11.500	1.000			
sanering waterbodemb		500			
inwaaivuil		2.200			
monitoring onderzoek		40.000			
toezicht	11.500				
kapitaalkosten	22.700				
personele lasten (maaien, onderhouden, beheer)					3.000-4.500
onderhoud materiaal					
energiekosten				1.400	niet bekend.
<i>totaal jaarlijkse kosten</i>	<i>45.700</i>	<i>43.700</i>	<i>niet bekend</i>	<i>33.400</i>	<i>>3.000-4.500</i>
<i>kosten per ha.</i>	<i>35.200</i>	<i>312.000</i>	<i>niet bekend.</i>	<i>8.600</i>	<i>>3.000-4.500</i>

Tabel 5.1: overzicht van kosten van verschillende zuiveringsmoerassen in Nederland in EURO.

6. Monitoring functioneren

Voor het beheer van een zuiveringsmoeras is het noodzakelijk informatie te verzamelen over het functioneren van het systeem. Het doel van het zuiveringsmoeras bepaalt van welke verontreinigingen de beheerder de zuiveringsresultaten wenst te weten. Om inzicht te krijgen in het functioneren van een zuiveringsmoeras, zullen echter ook andere aspecten in de monitoring moeten worden betrokken.

6.1 MONITORING ZUIVERINGSMOERAS

Er zijn verschillende redenen om het functioneren van het zuiveringsmoeras te volgen:

- inzicht in het beheer van het zuiveringsmoeras;
- inzicht in de werking van het zuiveringsmoeras;
- inzicht in de invloed van het zuiveringsmoeras op de omgeving.

Afhankelijk van de doelstelling van het zuiveringsmoeras, de secundaire functies en het risico van het optreden van neveneffecten zal meer of minder gedetailleerd onderzoek nodig zijn. De concentraties aan verontreinigingen in water en sediment geven informatie over de zuiveringsprestaties van het moeras. Bovendien kunnen de gehalten aan normen (zoals Maximaal Toelaatbaar Risico en streefwaarde) en aan de gestelde doelen voor het zuiveringsmoeras worden getoetst. De monitoring van de biologische kwaliteit omvat het meten van de aanwezigheid van pathogene micro-organismen en ecotoxicologische risico's in water en sediment. Daarnaast kunnen veldwaarnemingen belangrijke informatie leveren over het algehele functioneren van het systeem en het optreden van ongewenste neveneffecten, zoals stankoverlast. Een goed monitoringsplan zal alle drie aspecten (fysisch-chemische kwaliteit, biologische kwaliteit en veldwaarnemingen) omvatten.

In de eerste jaren na de aanleg van een zuiveringsmoeras zal de monitoring intensiever zijn dan bij een goed ontwikkeld moeras, waarvan de zuiveringsresultaten bekend zijn. Bij een ouder systeem zal de monitoring vooral gericht zijn op het vaststellen van nalevering, calamiteiten en overlast. In de volgende paragrafen wordt onderscheid gemaakt tussen een beperkte monitoring voor het beheer van het zuiveringsmoeras en een uitgebreider pakket, waarmee inzicht wordt verkregen in het functioneren en de optimalisatie van het zuiveringsmoeras.

6.1.1 Veldwaarnemingen

In het veld kunnen visueel waarnemingen gedaan worden, die informatie geven over de ontwikkeling van de vegetatie en het optreden van ongewenste verschijnselen, zoals:

- soortenontwikkeling vegetatie (diversiteit/(on)gewenste soorten);
- gebrekverschijnselen in de vegetatie (bijv. verkleuring vegetatie of slechte ontwikkeling door nutriëntentekort);
- toxiciteitsverschijnselen (bijv. verkleuring vegetatie of slechte ontwikkeling door aanwezigheid verontreinigingen in toxische hoeveelheden);
- algenbloei in het ontvangende watersysteem;
- muggenplagen in de nabije omgeving;
- stankproductie (ammoniak of sulfide).

Deze waarnemingen leveren belangrijke informatie voor het beheer van het zuiveringsmoeras.

6.1.2 Beperkte monitoring

Een beperkte monitoring richt zich op het beheer van het zuiveringsmoeras en het zuiveringsrendement van de doelstoffen. De beperkte monitoring bestaat uit veldwaarnemingen (zie paragraaf 6.1.1) en de meting van doelstoffen in het in- en effluent. Voor de frequentie van de metingen wordt verwezen naar tabel 6.1. Op basis van deze informatie kunnen problemen in beheer en zuivering gesignaleerd worden.

6.1.3 Uitgebreide monitoring

Een uitgebreide monitoring biedt twee voordelen, ten eerste kan daarmee controle op de effluentconcentraties van het zuiveringsmoeras plaatsvinden (tabel 6.1). Ten tweede levert uitgebreide monitoring inzicht in het functioneren van het moerassysteem op. Als het doel van het moeras de zuivering van nutriënten is, dan is ook de meting van processen van belang om een stoffenbalans op te kunnen stellen (zie paragraaf 6.2.2). Daarnaast kan daarmee de kennis over zuiveringsmoerassen in Nederland vergroot worden, aangezien er op dit moment nog belangrijke leemten in kennis bestaan (zie hoofdstuk 7). In tabel 6.1 wordt aangegeven welke parameters in welke compartimenten van het systeem gemeten moeten worden als een uitgebreide monitoring gewenst is.

Afhankelijk van het doel van de zuivering en de herkomst van het water zullen de chemische parameters gekozen moeten worden. Het is daarbij aan te bevelen de volledige kwaliteit van het te zuiveren water te onderzoeken. Bij een zuiveringsmoeras dat is aangelegd om stikstof te verwijderen, kunnen door ophoping bijvoorbeeld ook zware metalen een probleem gaan vormen.

	parameter	eenheid	locatie	frequentie
hydrologie	debiet	m ³ /s	voorbezinkslot zuiveringsmoeras	continu
	waterstanden	m	voorbezinkslot zuiveringsmoeras	maandelijks
waterkwaliteit	totaal N	mg/l	influent, effluent	twewekeleijks +jaarlijks intensief **
	totaal P	mg/l	influent, effluent	twewekeleijks +jaarlijks intensief **
	zwevend stof	mg/l	influent, effluent	twewekeleijks +jaarlijks intensief **
	BZV ₅	mg/l	influent, effluent	twewekeleijks +jaarlijks intensief **
	CZV	mg/l	influent, effluent	twewekeleijks +jaarlijks intensief **
	temperatuur	C	influent, effluent	twewekeleijks +jaarlijks intensief **
	pH	-	influent, effluent	twewekeleijks +jaarlijks intensief **
	zuurstof gehalte	mg/l	influent, effluent	twewekeleijks +jaarlijks intensief **
	selectie zware metalen *	ug/l	influent, effluent	twewekeleijks +jaarlijks intensief **
	bacteriën	#/ml	influent, effluent	twewekeleijks +jaarlijks intensief **
sediment	redoxpotentiaal	mV	zuiveringsmoeras	3-maandelijks
	pH	-	zuiveringsmoeras	3-maandelijks
	organische stof	mg/kg	zuiveringsmoeras	jaarlijks
	aangroei snelheid sedimentlaag	cm/jr	zuiveringsmoeras	jaarlijks
	totaal P, N	mg/kg	zuiveringsmoeras	3-maandelijks
	selectie zware metalen	ug/kg	zuiveringsmoeras	1 x per twee jaar
	organische microveront- reiniging	ug/kg	zuiveringsmoeras	1 x per twee jaar

Tabel 6.1: te meten fysisch-chemische parameters in verschillende delen van een zuiveringsmoeras.

(*: Selectie afhankelijk van doelstoffen, **: 24- uren meting waarbij elk uur gemeten wordt).

De gehalten in water en sediment in het zuiveringsmoeras kunnen aanvullend over een profiel in de lengterichting van het zuiveringsmoeras gemeten worden. Dit geeft informatie over de locatie waar de verschillende processen plaatsvinden.

6.2 BEREKENING RESULTATEN VAN ZUIVERING

6.2.1 Eenvoudige berekening

Er zijn verschillende manieren om inzicht te krijgen in de werking van een zuiveringsmoeras. De meest gebruikte methode is het meten van de concentraties van het in- en uitgaande water op verschillende tijdstippen. Op basis daarvan kan het verwijderingsrendement berekend worden:

$$\% \text{ concentratiereductie} = 100 \times \frac{C_{\text{in}} - C_{\text{uit}}}{C_{\text{in}}}$$

In deze vergelijking zijn C_{in} en C_{uit} de in- en uitgaande concentraties.

Aangezien de in- en uitgaande concentraties nogal kunnen fluctueren (afhankelijk van het seizoen en extreme gebeurtenissen), zullen gemiddelde concentraties over een representatieve periode gebruikt moeten worden. Als ook de in- en uitgaande debieten bekend zijn kan het percentage massaverwijdering berekend worden:

$$\% \text{ massaverwijdering} = 100 \times \frac{C_{\text{uit}} \times Q_{\text{uit}} - C_{\text{in}} \times Q_{\text{in}}}{C_{\text{in}} \times Q_{\text{in}}}$$

In deze vergelijking zijn Q_{in} en Q_{uit} de in- en uitgaande debieten.

Voor BZV, CZV en pathogene micro-organismen kan met deze methode een redelijke inschatting worden verkregen over het zuiveringsrendement van een systeem. Voor de overige componenten is het echter raadzaam gedetailleerdere water- en massabalansen op te stellen. Het nadeel van de eenvoudige methode op basis van in- en uitgaande concentraties is dat een afname van de concentraties ook veroorzaakt kan worden door andere processen, zoals verdunning met bijvoorbeeld regenwater en uitspoeling naar het grondwater. Als alleen naar in- en uitgaande concentraties gekeken wordt, komt de eventuele slechte werking van het zuiveringsmoeras niet aan het licht.

De verdunning door een neerslagoverschot kan verdisconteerd worden in de berekeningen. Met een stof die niet aan omzettingen onderhevig is (bijv. chloride) kan een verdunningsfactor berekend worden op basis van het chloridegehalte in de verschillende aan- en afvoertermen van het zuiveringsmoeras.

6.2.2 Water- en stoffenbalans

Voor het berekenen van het zuiveringsrendement van nutriënten wordt aangeraden een balans van de in- en uitgaande stromen van nutriënten op te stellen. In deze stoffenbalans moeten ook de belangrijkste processen worden meegenomen (Meuleman 1999, Toet 2001). Hiervoor is uitgebreide monitoring van nutriënten en relevante processen noodzakelijk (zie paragraaf 6.1.3).

De eerste stap in het opstellen van een stoffenbalans is het opstellen van een waterbalans. Hiervoor moet het systeem en de tijdsperiode gedefinieerd worden. Alle aan- en afvoerposten van het systeem moeten in kaart worden gebracht. Een goede waterbalans omvat de volgende posten (tabel 6.2):

in	uit
aanvoer	verdamping
neerslag	infiltratie
berging	afvoer

Tabel 6.2: posten op waterbalans zuiveringsmoeras (in m³ / ha / jr).

Voor nutriënten is het ook van belang de natte en droge depositie te weten. Op basis van een sluitende waterbalans en de gegevens over de concentraties van het water, kunnen de balansposten voor de componenten ingevuld worden. Ook de accumulatie in de bodem moet gemeten worden, omdat het een opslagpost voor nutriënten is. Verder moet de hoeveelheid nutriënten in de afgevoerde plantendelen bepaald worden. Een belangrijke post op de balans voor stikstof is denitrificatie in de verschillende delen van het systeem. Dit is een lastig te kwantificeren proces en kan eventueel ook als restpost worden meegenomen. De infiltratie zal op basis van metingen van de waterstand met peilbuizen berekend moeten worden. Stikstof kan ook met de atmosfeer uitgewisseld worden door atmosferische depositie, binding van atmosferische stikstof, of emissie van N₂ en N₂O naar de atmosfeer. Een goede balans voor de nutriënten stikstof en fosfaat bevat de volgende posten (tabel 6.3).

	stikstof (kg N/ha/jr)	fosfor (kg P/ha/jr)
aanvoer	aanvoer in water	aanvoer in water
	atmosferische depositie	atmosferische depositie
	N-fixatie	
afvoer	afvoer in water	afvoer in water
	infiltratie	infiltratie
	denitrificatie in water, perifyton en sediment	
	maaien helofyten/ waterplanten	maaien helofyten/ waterplanten
	accumulatie in sediment	accumulatie in sediment
restpost	verschil tussen aanvoer en afvoer	verschil tussen aanvoer en afvoer

Tabel 6.3: posten op massabalansen stikstof en fosfaat.

6.3 SIGNALEREN VAN PROBLEMEN

Op basis van de resultaten van de verschillende waarnemingen kan geconcludeerd worden dat er in bepaalde compartimenten van een zuiveringsmoeras problemen zijn. Hieronder wordt een aantal van deze problemen en mogelijke oplossingen beschreven.

Stikstof

Hoge ammoniumconcentraties in de afvoer duiden op remming van de omzetting van ammonium tot nitraat (nitrificatie). Dit leidt tot een lager verwijderingspercentage voor stikstof. De oorzaak kan zijn dat er op te weinig plaatsen of gedurende een onvoldoende lange periode zuurstofrijke condities heersen in het zuiveringsmoeras. Als het een infiltratieveld betreft kan dit bijgestuurd worden door de periode van droogstand te verlengen. Hierdoor krijgt zuurstof

langer de tijd om in de bodem door te dringen en nitrificatie te stimuleren. Het gevormde nitraat kan dan in de daarop volgende periode van bevoeiing gedenitrificeerd worden.

Fosfaat

Lage verwijderingspercentages voor fosfaat en lage accumulatiewaarden in het sediment wijzen er op dat de bodem met fosfaat verzadigd is en dat er verder geen fosfaat opgeslagen kan worden. De fosfaatverwijdering kan bevorderd worden door het instellen van een regime van afwisselend bevoeien en laten droogvallen.

BZV en CZV

Lage verwijderingspercentages voor BZV en CZV duiden op een te korte verblijftijd van het water.

Metalen en organische microverontreinigingen

Hoge concentraties van bepaalde metalen en organische microverontreinigingen in het effluent van het zuiveringsmoeras duiden op een verzadiging van de opslagcapaciteit van de bodem. Daarnaast kan toxiciteit van bepaalde verontreinigingen leiden tot schade aan de vegetatie en effecten op organismen in water en sediment. Of dit een probleem is, zal afhangen van de functie van het ontvangende water.

Stank

Stankoverlast kan veroorzaakt worden door het vrijkomen van ammoniak en sulfide.

Insecten

Overlast door dansmuggen in vloeivelden kan worden tegengegaan door het stimuleren van de natuurlijke vijanden (macrofauna, vogels en vissen), het bevorderen van de stroming in het zuiveringsmoeras en het droogleggen van het zuiveringsmoeras in het voorjaar.

De rietstengelboorder kan worden bestreden door te maaien. De rietwortelboorder wordt geremd door het nat houden van Riet in de winter, waardoor het insect niet kan overwinteren (Duyve 1986).

Algenbloei

Bij lage stroomsnelheden en een hoge nutriëntenbelasting kan in vloeivelden ongewenste algenbloei optreden.

Planten

Planten kunnen gebreksverschijnselen, zoals een lage productie of verkleuringen, vertonen bij een tekort aan nutriënten. Vergiftiging van planten door te hoge concentraties verontreinigingen kan zich eveneens uiten in effecten op de bladeren en in sterfte van de planten.

Hydraulica

Infiltratievelden kunnen verstopt raken door zwevend stof, bodemdeeltjes en organisch stof. In vloeivelden kan de vrije stroming van water beperkt worden door het verstopt raken met waterplanten, met name Klein kroos.

7. Discussie, conclusies en aanbevelingen

7.1 DISCUSSIE

Het doel van het handboek voor zuiveringsmoerassen voor water met lage concentraties verontreinigingen is tweeledig:

1. het inventariseren, ordenen en selecteren van relevant referentieonderzoek in voor Nederland vergelijkbare omstandigheden;
2. het karakteriseren en beschrijven van deze moerassystemen en het toegankelijk maken van de verworven kennis voor de regionale waterbeheerders.

Nevendoelstelling is ook inzicht te verkrijgen in beschikbare referentie-informatie en leemten in kennis om zo ook een stimulans te zijn voor nader praktijkonderzoek.

Advies 1: inventarisatie van relevant referentieonderzoek

De inventarisatie van referentieonderzoek heeft in totaal 75 bruikbare referenties opgeleverd. Het overzicht in het handboek is gebaseerd op een combinatie van wetenschappelijke literatuur en meer toegepaste, op het beheer gerichte literatuur met een verhouding van 2:1. Met name de onderzoeksresultaten uit de wetenschappelijke literatuur waren soms moeilijk naar praktische en voor waterbeheerders relevante informatie te vertalen.

Advies 2: karakterisering en beschrijving van zuiveringsmoerassen en het toegankelijk maken van de verworven kennis voor de regionale waterbeheerders

De punten waarop deze studie zich heeft toegespitst zijn:

- de zuiveringsmechanismen van de componenten;
- de typen zuiveringsmoerassen;
- ontwerp en randvoorwaarden voor het beheer.

De inventarisatie geeft een goed beeld van zuiveringsmechanismen van CZV, stikstof en fosfaat en metalen, echter over de te realiseren zuiveringssnelheden is nog weinig bekend. Over de verwijdering van oestrogenen, sulfaat en de verschillende PAK's en overige organische microverontreinigingen bestaat nog een tekort aan kennis (zoals beschreven in hoofdstuk 3).

De basisprincipes ten aanzien van het functioneren van de verschillende typen zuiveringsmoerassen (inrichting, dominant zuiveringsproces) zijn bekend. Er zijn ook enkele langdurige en grondige studies verricht naar de functionaliteit van vloeivelden en infiltratievelden. Er bestaat in Nederland echter een tekort aan praktijkervaring met gecombineerde systemen, rietwortelzonesystemen en zuiveringsmoerassen voor overstorten. Voor de bepaling van de herkomst van het water en de afleiding van rekenregels zijn alleen resultaten van onderzoek aan Nederlandse moerassystemen gebruikt, aangezien de buitenlandse literatuur vooral hoogbelaste moerassystemen beschrijft en geen uitgebreide stoffenbalansen bevat. De zuiveringsrendementen van moerassen voor wegwater, zijn gebaseerd op een literatuurstudie, waarin vooral aan buitenlandse moerassystemen wordt gerefereerd (studie van de Graaf et al. 1997).

Ten aanzien van het ontwerp, de randvoorwaarden en het beheer van zuiveringsmoerassen (zoals besproken in hoofdstuk 4) wordt geconcludeerd dat nog te weinig kwantitatieve informatie over het gedrag van zuiveringsmoerassen beschikbaar is om de sturing van zuiverings-

processen goed in rekenmodellen met een algemene geldigheid te beschrijven. De richtlijnen voor ontwerp en beheer blijven daarom noodzakelijkerwijs gebaseerd op een beperkt aantal situaties waar in het verleden goede resultaten zijn bereikt. Een probleem hierbij is dat in de meeste studies naar zuiveringsmoerassen de invloed van de beheersfactoren die de zuiveringscapaciteit bepalen (zoals vegetatie, vegetatiebeheer, verblijftijd, peilbeheer, bindende stoffen) niet bepaald is voor een brede range van mogelijke situaties. Hierdoor blijft onduidelijk hoe de zuiveringsefficiëntie beïnvloed wordt door de verschillende componenten van het systeem (bijv. de vegetatie, het bodemsediment) en door de wijze waarop deze beheerd worden (bijv. frequentie en tijdstip van maaien).

Ten aanzien van de invloed van het ontwerp en beheer worden de volgende leemten in kennis geconstateerd:

- de optimale duur van de cyclus van bevoeien en droog laten vallen voor de bevordering van volledige nitrificatie en denitrificatie en de vastlegging van fosfaat. Voor stikstof wordt in vloeivelden over het algemeen een goede verwijdering behaald. Voor fosfaat zijn de mogelijkheden voor verwijdering echter beperkt;
- de mogelijkheden om de fosfaatverwijdering te optimaliseren door het toevoegen van P-adsorberende stoffen aan de bodem (bijv. ijzervijlsel);
- de rol van de vegetatie bij de verwijdering van pathogene micro-organismen;
- de mogelijkheden tot sturing van de verwijderingsprocessen voor zware metalen en organische microverontreinigingen;
- het effect van helofyten op zuurstof in bodem en de bijdrage hiervan aan aërobe verwijderingsprocessen;
- relatie tussen verwijdering in het voorbezinkbassin en in het helofyten/waterplantendeel in het zuiveringsmoeras;
- de richtlijnen ten aanzien van de levensduur van een zuiveringsmoeras en de termijn voor de sanering van de waterbodem;
- de bijdrage van verschillende soorten ondergedoken waterplanten aan de nutriëntenverwijdering en de zuurstofdynamiek.

Nieuw aan te leggen zuiveringsmoerassen zouden zo moeten worden ontworpen, dat de mogelijkheid bestaat om met de verschillende beheersfactoren te experimenteren. Hierdoor is optimalisatie van het beheer mogelijk en wordt nieuwe kennis gegenereerd over de invloed van het beheer op de zuivering.

Als handvat voor de waterbeheerder is voor het DSS een beslisboom ontwikkeld voor de keuze van een type zuiveringsmoeras op basis van het doel van de zuivering en de herkomst van het water. Verder zijn er op basis van een aantal uitgebreide studies voor enkele typen zuiveringsmoerassen rekenregels voor de dimensionering (oppervlakte) afgeleid. De toepasbaarheid van deze rekenregels is echter slechts beperkt tot de range van omstandigheden en randvoorwaarden van die moerassen, die voor het opstellen van de regels zijn gebruikt. De rekenregels zijn door de beperkte beschikbaarheid van uitgebreide onderzoeksstudies veelal slechts gebaseerd op de resultaten van één object. Dit is een zeer smalle basis, die noopt tot een duidelijk voorbehoud ten aanzien van de betrouwbaarheid van de rekenregels. Enkele aanvullende, gedetailleerde studies van vergelijkbare zuiveringsmoerassen op andere locaties lijken geen overbodige luxe. Hierdoor zou de betrouwbaarheid vergroot en de bandbreedte van de rekenregels uitgebreid kunnen worden.

Dit handboek bevat geen gedetailleerde informatie voor het ontwerp van een zuiveringsmoe-

ras, maar geeft wel een globaal overzicht van technische eisen ten aanzien van de aanleg, de inrichting en het onderhoud van moerassystemen. Er is getracht om op basis van beschreven ervaringen een handreiking aan de beheerder te doen. De keuze of een eenmalige ervaring bij een bepaald zuiveringsmoeras vertaald mag worden naar een algemeen geldende richtlijn voor alle zuiveringsmoerassen was hierbij soms moeilijk te maken.

In hoofdstuk 6 is nader ingegaan op de monitoringsinspanning die noodzakelijk is voor de controle op de werking van de zuivering (beperkte monitoring) en voor het vergaren van kennis over de werking van zuiveringsmoerassen (uitgebreide monitoring). Een uitgebreide monitoring is zeer intensief en kan problematisch zijn vanwege de hoeveelheid werk en hogere kosten. Indien goed uitgevoerd, kan een dergelijk monitoringsprogramma echter een belangrijke bijdrage vormen aan het opvullen van bovenstaande leemten in kennis.

7.2 CONCLUSIES

Het is mogelijk geweest om op basis van referentieonderzoek (goed onderzochte) Nederlandse moerassystemen te beschrijven en voor enkele daarvan rekenregels af te leiden voor de bepaling van de oppervlakte. Deze rekenregels zijn gebaseerd op een hydraulische belasting, een ingaande en uitgaande concentratie van een stof en een zuiveringscapaciteit. De zuiveringscapaciteit van een moeras wordt bepaald door de inrichtings- en beheersfactoren, zoals de soortensamenstelling en het beheer van de vegetatie, de verblijftijd en het peilbeheer. De toepasbaarheid van de rekenregels is slechts beperkt tot de range van randvoorwaarden, waarvoor de rekenregels zijn afgeleid.

De belangrijkste leemten in kennis ten aanzien van zuiveringsmoerassen voor water met lage concentraties verontreinigingen zijn:

- gebrek aan Nederlandse praktijkervaring met de toepassing van een combinatie van verschillende types moerassen, rietwortelzonesystemen en zuiveringsmoerassen voor overstorten;
- geen kwantitatieve gegevens over de invloed van de inrichtings- en beheersfactoren op de zuiveringscapaciteit;
- geen gegevens van meerdere, uitgebreide onderzoeksstudies van een bepaald type zuiveringsmoeras, zodat de betrouwbaarheid van rekenregels vergroot kan worden.

Om deze leemten in kennis aan te vullen zijn uitgebreide monitoring en onderzoek naar bestaande en nieuwe zuiveringsmoerassen essentieel.

7.3 AANBEVELINGEN

Voor de toekomst worden de volgende aanbevelingen ten aanzien van toepassingen en onderzoek gedaan:

- gezien de vele onzekerheden en leemten in kennis is het beter om zuiveringsmoerassen voor water met lage concentraties verontreinigingen met name toe te passen in die situaties waar wel een waterkwaliteitsverbetering nodig is, maar waar niet aan harde prestatie-eisen moet worden voldaan;
- zorg bij de aanleg van een zuiveringsmoeras voor sturingsmogelijkheden in het ontwerp, zoals variatie in hydraulische belasting en stofbelasting en zorg voor monitoring van de zuivering. Op basis daarvan kan de werking in praktijk worden verbeterd en kan de kennis over de invloed van het beheer op de zuivering worden vergroot;

- combineer onderzoek en praktijk door de aanleg en het beheer van nieuwe zuiveringsmoerassen samen te laten gaan met uitgebreide studies uitgevoerd door kennisinstituten, zoals bij Eversteekooog en Lauwersoog is gebeurd;
- zorg voor een centraal verzamelpunt voor informatie over praktijkervaringen met zuiveringsmoerassen, zodat deze kennis snel en integraal beschikbaar komt voor waterzuiverend Nederland.

Bijlage I Relevante processen voor verontreinigingen

I.1 NUTRIËNTEN

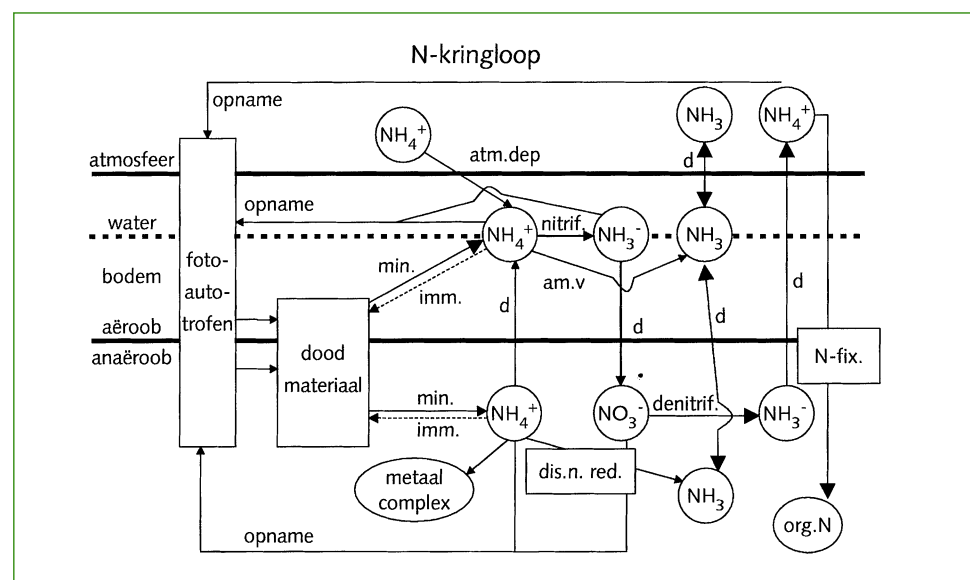
I.1.1 Stikstof

In deze bijlage ligt de nadruk op de mogelijkheden om de verwijderingsprocessen voor stikstof in zuiveringsmoerassen te stimuleren. De belangrijkste vormen van stikstof in moerassen zijn: ammonium (NH_4^+), nitriet (NO_2^-), nitraat (NO_3^-), lachgas (N_2O) en opgelost stikstofgas (N_2). Stikstof kan in moerassen ook in de vorm van organische verbindingen zoals aminozuren en amines aanwezig zijn. Ammonium is belangrijk in zuiveringsmoerassen om drie redenen (Kadlec & Knight 1996):

1. stikstof wordt door planten en foto-autotrofe bacteriën preferent opgenomen in de vorm van ammonium;
2. ammonium kan in water geoxideerd worden waarbij zuurstof wordt gebruikt. Hierdoor kan zuurstofloos water ontstaan, dat niet aan de waterkwaliteitsdoelstellingen na zuivering voldoet;
3. ammoniak (NH_3) is toxisch voor een aantal aquatische organismen. Dit kan de natuurwaarde van het moeras negatief beïnvloeden.

Twee soorten processen spelen een rol bij de stikstofkringloop in zuiveringsmoerassen (figuur I.1):

- processen die stikstof verplaatsen van de ene naar een andere locatie in het moeras. Deze processen zijn: bezinken en opwoelen van particulier materiaal, diffusie van opgeloste stikstofvormen, translocatie van N binnen de plant, strooiselvorming, ammonium vervluchtiging, sorptie van oplosbaar stikstof aan substraten, zaadzetting en migratie van organismen;
- processen die stikstofverbindingen omzetten in een andere vorm: mineralisatie, nitrificatie, denitrificatie, stikstoffixatie, stikstofassimilatie en dissimilatieve reductie van nitraat tot ammonium.



Figuur I.1: stikstofkringloop in een zuiveringsmoeras, uit Wienk et al. 2000 (d = diffusie, min. = mineralisatie, am.v. = ammoniakvervluchtiging, denitrif. = denitrificatie, nitrif. = nitrificatie, dis.nit.red. = dissimilatieve nitraatreductie, opname = opname door vegetatie, atm. dep. = atmosferische depositie).

De processen die leiden tot de uiteindelijke verwijdering van N zijn:

- de omzetting van organisch N, nitraat of ammonium tot stikstofgas via de bacteriële processen mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie (zie figuur 1.2);
- de opname van N door de plant en verwijdering via maaien.

Het zuiveringsrendement kan verhoogd worden door stimulatie en optimalisatie van bovenstaande processen. Deze processen worden hieronder verder besproken.

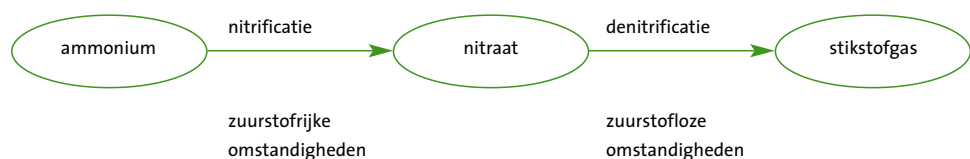
Mineralisatie of ammonificatie is de transformatie van organisch stikstof tot ammonium. Deze transformatie vindt plaats door:

- afbraak van organisch weefsel door bacteriën en schimmels;
- uitscheiding door planten en dieren;
- hydrolyse van ureum.

Een groot deel van de organische stikstof wordt in een zuiveringsmoeras snel omgezet tot ammonium. De optimale zuurgraad voor ammonificatie is 6,5-8,5 (Kadlec & Knight 1996).

Nitrificatie is een microbieel proces, waarbij ammonium omgezet wordt via nitriet tot nitraat. De eerste stap wordt verzorgd door bacteriën van het genus *Nitrosomonas* en de tweede door *Nitrobacter*. Beide stappen kunnen zowel in het water als in de bodem alleen plaatsvinden in aanwezigheid van zuurstof. Zuurstof kan worden aangevoerd vanuit de lucht via diffusie of door transport vanuit het wortelstelsel van planten. Hoge zuurstofgehalten en relatief hoge watertemperaturen stimuleren nitrificatie.

Denitrificatie zorgt voor de reductie van nitraat of nitriet tot stikstofgas (N_2) of lachgas (N_2O). Deze gasvormige stikstofcomponenten zullen het zuiveringsmoeras verlaten. Denitrificatie treedt op onder zuurstofarme condities zowel in de water- als in de bodemfase. Voorts stimuleert de aanwezigheid van organische stof het denitrificatieproces.



Figuur 1.2: omzetting van ammonium naar stikstofgas door de opeenvolging van nitrificatie en denitrificatie.

De benodigde oxidatie- en reductiestappen betekenen dat voor een effectieve omzetting van organisch N of ammonium naar gasvormig stikstof afwisselend een zuurstofrijk en zuurstofloos milieu nodig is (Zie figuur 1.2). Dit kan bereikt worden door het tijdelijk laten droogvallen en overstroom van het zuiveringsmoeras. Vaak is de beschikbare hoeveelheid nitraat beperkend voor het optreden van denitrificatie en daarmee voor de verwijdering van stikstof uit het systeem. Het ontwerp en het peilbeheer van een zuiveringsmoeras zullen dus afgestemd moeten worden op de condities voor het optreden van nitrificatie. Er zullen gedurende een voldoende lange tijd zuurstofrijke condities moeten heersen. Over de optimalisatie van deze processen is nog onvoldoende kwantitatieve informatie beschikbaar.

Dissimilatieve reductie van ammonium tot nitraat treedt op onder anaërobe omstandigheden. Dit proces kan optreden in plaats van denitrificatie, waarschijnlijk als er veel koolstof aanwezig is in verhouding tot de hoeveelheid nitraat (Bowden 1984, Tiedje 1988). Bij dit proces wordt geen nitraat verwijderd en blijft stikstof in het zuiveringsmoeras aanwezig in de vorm van ammonium. Dit proces zou op kunnen treden in zuiveringsmoerassen met lage concentraties verontreinigingen, waarin relatief weinig nitraat aanwezig is.

Opname van stikstof in planten en inbouw in biomassa. Bij het oogsten van de bovengrondse plantendelen wordt stikstof uit het systeem verwijderd. Bij het afsterven van bovengrondse plantendelen zal stikstof weer in de vorm van organisch stikstof op de bodem van het zuiveringsmoeras terechtkomen. Vervolgens kan het organische stikstof weer mineraliseren.

I.1.2 Fosfaat

Fosfor is in oppervlaktewater vooral in de vorm van orthofosfaat of organisch gebonden fosfor aanwezig.

De processen die fosfor ondergaat in een zuiveringsmoeras zijn:

- adsorptie aan sediment;
- opname uit het water door algen en micro-organismen;
- opname uit sediment door planten;
- precipitatie vanuit water.

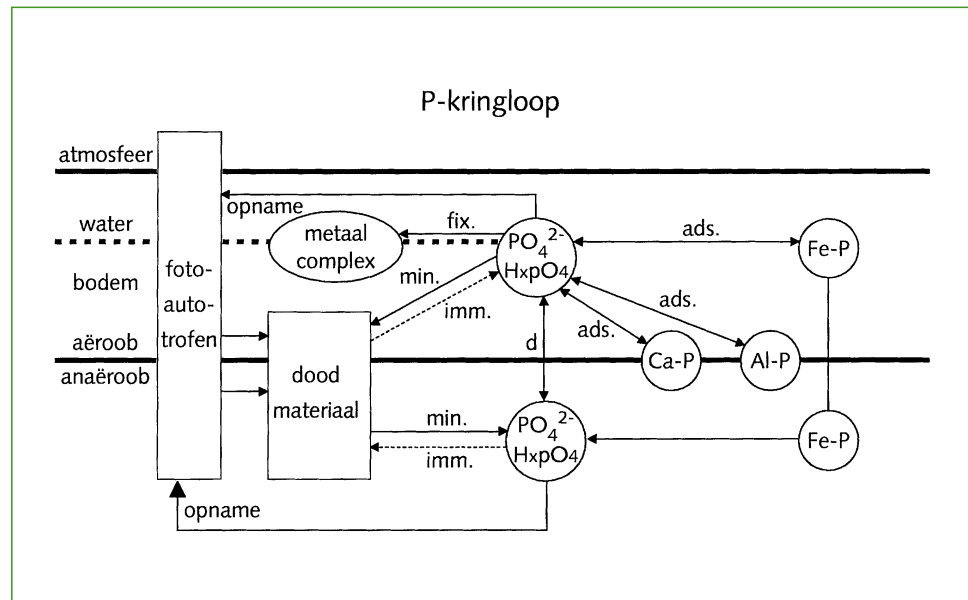
Verwijdering van fosfor uit het water berust in een zuiveringsmoeras vooral op het optreden van adsorptie, complexering en precipitatiereacties met aluminium-, ijzer-, calcium en kleimineralen in het sediment (figuur I.3) (Brix 1993a). Ortho-P kan geadsorbeerd worden aan bindingsplaatsen (Al, Fe of Ca in kleimineralen, in organische stof). Ook kan ortho-P neerslagen vormen met Fe(3+), Al- en Ca-ionen. Deze processen zijn afhankelijk van de pH, de redoxpotentiaal en de aanwezigheid van de genoemde mineralen.

Adsorptie van fosfaten aan calcium vindt alleen plaats onder basische en neutrale omstandigheden. Adsorptie en *precipitatie* met ijzer- en aluminiumcomplexen is veel langzamer. Geoxideerd ijzer (3+) kan meer fosfor binden dan ijzer(2+). Maar door een afwisselende redoxstatus (als gevolg van peilvariatie in de bodem) kan de binding van fosfor aan ijzer(2+) bevorderd worden.

Particulair gebonden P sedimenteert goed in zowel een verticaal doorstroomd zuiveringsmoeras als een horizontaal doorstroomd vloeiveld. Hierdoor is particulier gebonden P beter te verwijderen dan opgelost orthofosfaat of opgelost organisch P. Opgelost organisch P (Dissolved Organic P, DOP) is het moeilijkst te vangen (Nichols 1983).

De opslag van fosfor in het sediment wordt vooral gereguleerd door een reversibele binding in opslag-compartimenten. Als de concentraties in het water afnemen, zal het sediment de opgeslagen fosfor weer vrijgeven (Koerselman 1990). Ook bij droogvallen van het sediment, en dus verandering van de redoxstatus van het sediment, zal fosfor uit ijzercomplexen vrijkomen. De initiële opslag van fosfor in een zuiveringsmoeras kan vrij hoog zijn, maar de opslag van dit element kan op lange termijn alleen plaats vinden door de vorming van nieuw gevormd organisch sediment (Richardson & Craft 1993).

De bijdrage van de vegetatie aan de verwijdering van fosfaat in een zuiveringsmoeras hangt af van de belasting van het systeem en het maaibeheer. Als de vegetatie niet wordt geoogst zullen de nutriënten door uitloging en mineralisatie weer vrijkomen. Algen kunnen orthofosfaat direct uit het water opnemen, bij afsterving van de algen zal het fosfaat echter weer in water of sediment terecht komen.



Figuur 1.3: Kringloop van fosfor in een zuiveringsmoeras, uit Wienk et al. 2000 (d. = diffusie, min. = mineralisatie, imm. = immobilisatie, opname = opname door vegetatie, ads. = adsorptie, fix. = fixatie). Sedimentatie veroorzaakt verplaatsing van particulier P van het water naar de bodem.

1.2 ORGANISCHE MICROVERONTREINIGINGEN

Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) behoren tot een groep van apolaire, hydrofobe en neutrale verbindingen. Daardoor is slechts een klein deel van deze verbindingen in water oplosbaar. Het grootste deel is gebonden aan organische stof in de bodem. Daarnaast kunnen PAK ook gebonden zijn aan opgelost organisch koolstof.

De verwijdering van PAK's vindt plaats op twee wijzen:

- *Fysische en chemische processen*, zoals vervluchtiging, uitspoeling en foto-oxidatie. Vervluchtiging en uitspoeling zijn verwaarloosbaar voor PAK's met meer dan drie ringen. Foto-oxidatie wordt beïnvloed door zonnestraling, temperatuur en opgelost zuurstof. Foto-oxidatie maakt de PAK's geschikter voor microbiële degradatie.
- *Biologische verwijdering* door middel van planten of micro-organismen. De directe opname door planten speelt een ondergeschikte rol. Ophoping van PAK's in het sediment vormt waarschijnlijk geen beperking voor plantengroei. De rhizosfeer van planten vormt een gunstig milieu voor de groei van verschillende micro-organismen (vanwege de groei van mycorrhiza's, de uitscheiding van exudaten, de aanwezigheid van organisch koolstof en de beschikbaarheid van zuurstof). Een brede range van bacteriën, schimmels en algen bezit de mogelijkheid om PAK's te metaboliseren, onder zowel aërobe als anaërobe condities. De afbraak van PAK's met meer dan drie aromatische ringen verloopt langzamer dan de afbraak van PAK's met een lager molecuulgewicht (De Graaf et al. 1997).

De verwijdering van lage concentraties PAK's is in een verticaal doorstroomd zuiveringsmoeras waarschijnlijk vrijwel volledig (De Graaf et al. 1997, Machate et al. 1996). De PAK's worden uit de waterkolom verwijderd door sedimentatie en binding aan de bodem. Verwijdering uit het zuiveringsmoeras vindt plaats door microbiële afbraak.

I.3 ZWARE METALEN

Tot de groep van zware metalen worden de stoffen cadmium, koper, chroom, kwik, nikkel, zink, arseen en lood gerekend. Onder normale omstandigheden zullen de metalen kwik, cadmium en zink in het bodem-sedimentsysteem mobiel zijn. Nikkel, chroom en koper zijn matig mobiel en lood is het minst mobiel (De Graaf et al. 1997). De beschikbaarheid wordt het sterkst bepaald door de pH van de bodem en de hoeveelheid zuurstof (redoxpotentiaal). In het algemeen zijn metalen mobieler bij een lage pH en in een aëroob milieu.

De processen waardoor metalen in een zuiveringsmoeras verwijderd kunnen worden, zijn:

Plantopname

Planten zijn in staat grote hoeveelheden zware metalen te accumuleren. Te hoge concentraties van metalen kunnen schadelijk zijn voor de plant, maar de negatieve effecten kunnen door verschillende mechanismen in de plant worden gereduceerd. De omstandigheden in de rhizosfeer kunnen een verhoging van de beschikbaarheid van metalen voor de plant veroorzaken. Er is een seizoensvariatie in de plantopname; de hoogste concentraties in de plant worden gevonden in de zomer, gevolgd door het voorjaar en de winter en de concentraties zijn het laagst in de herfst. Er is ook een verschil in plantopname tussen Riet (*Phragmites australis*) en Grote lisdodde (*Typha latifolia*). Riet heeft een langer groeiseizoen, waardoor de opname door Grote lisdodde in zomer en voorjaar het grootst is en Riet pas in herfst en winter. Om de opname te bevorderen zouden meerdere soorten in een zuiveringsmoeras opgenomen kunnen worden (Scholes et al. 1999).

Sedimentatie en adsorptie

Door sedimentatie en binding aan de bodem worden metalen uit het water verwijderd en in een zuiveringsmoeras opgeslagen. Het in de bodem aanwezige AVS (acid volatile sulfide) immobiliseert metalen tot de maximale bindingscapaciteit aan sulfide is bereikt. Daarna worden metalen aan organische stof gebonden. Voor de lange-termijnopslag van metalen in de bodem is dus de opbouw van organische koolstofbindingsites in de bodem van belang (Wood & Shelley 1999). Bij verzadiging van de bindingsites worden er geen metalen meer opgenomen.

Voor metalen zijn redelijke tot zeer goede reductiepercentages behaald in zuiveringsmoerasen. Bij lage concentraties metalen, zoals die voorkomen in wegwater, zijn reductiepercentages behaald die liggen tussen de 15 en 75% (De Graaf et al. 1997, Dombeck et al. 1998, Scholes et al. 1999).

I.4 PATHOGENEN

Menselijke pathogenen (ziekteverwekkers) kunnen in vijf groepen onderverdeeld worden: bacteriën, virussen, schimmels, protozoën en wormen. Pathogene bacteriën zijn onder andere aanwezig in menselijke uitwerpselen (faeces). Pathogene organismen leven ten koste van

waard-organismen. Voor het meten en beoordelen van de hygiënische kwaliteit van water wat betreft pathogene organismen wordt gebruik gemaakt van indicatororganismen, zoals coliforme bacteriën. *Escherichia coli* bacteriën zijn afkomstig van menselijke faeces en hebben dus een relatie met de herkomst uit afvalwater. Ook streptokokken worden gebruikt als indicatororganismen, omdat deze eveneens afkomstig zijn van menselijke faeces, maar langer overleven in water en bodem. Fecale coliformen zijn geen geschikte indicatororganismen voor virussen, omdat virussen veel persistenter zijn. Als indicator voor virussen worden bacteriofagen (virussen die bacteriën infecteren) gebruikt, zoals MS2 (Havelaar 1986, Kadlec & Knight 1996).

De in Nederland geldende normen voor de aanwezigheid van pathogene organismen in oppervlaktewater, zijn 20 MPN/ml (Most probable number/ml; 80%iel) voor thermotolerante coli's en de afwezigheid van enterovirussen en fagen (NW4 1998). Afvalwater bevat aanzienlijke hoeveelheden bacteriën, voornamelijk afkomstig van menselijke darmflora. Ook kunnen bacteriën gegroeid zijn in de rwzi, de bacteriën zullen dan vooral in vlokken aan elkaar gehecht zijn.

De mechanismen die verantwoordelijk zijn voor de verwijdering van pathogenen in zuiveringsmoerassen zijn:

- fotolyse (afbraak onder invloed van licht);
- sedimentatie;
- predatie (door o.a. nematoden);
- uitscheiding van stoffen door wortels van macrofyten;
- natuurlijke sterfte.

De desinfectie in een zuiveringsmoeras is afhankelijk van de volgende factoren:

Verblijftijd en stroomsnelheid

In het zuiveringsmoeras op Texel werden bij een verblijftijd vanaf twee dagen reeds concentraties van 10 MPN/ml behaald. Een verblijftijd van drie dagen lijkt voldoende te zijn om aan de zwemwaternorm voor het ontvangende oppervlaktewater te voldoen (Schreijer et al. 2000). In tegenstelling tot vloeivelden en infiltratievelden is de invloed van de verblijftijd op de verwijdering in een wortelzonesysteem niet duidelijk (Decamp & Warren 2000). Zuiveringsmoerassen die zwevend stof verwijderen, worden ook geacht pathogene organismen te verwijderen. Bij het ontwerp van zuiveringsmoerassen is het primaire doel zelden de verwijdering van pathogenen, maar als de condities voor zwevend-stofbezinking goed zijn, zullen ook pathogenen verwijderd worden (Butler 1993, Kadlec & Knight 1996). Actiefslibvlokken, die gegroeid zijn in een rwzi en uitspoelen met het effluent, zullen wegens hun grootte en dichtheid gemakkelijk bezinken in een voorbezinksloot of een moerassysteem.

Vegetatie

De rol van de vegetatie bij desinfectie is niet geheel duidelijk. Mogelijk speelt de vergroting van het oppervlak waaraan bacteriën zich kunnen hechten een rol, omdat ook de toediening van stro op niet met waterplanten begroeide stukken de verwijdering van pathogene bacteriën in een vloeiveld bevordert (Perkins & Hunter 2000). In het helofytendeel van het zuiveringsmoeras bij de rwzi Evertsekoog was de desinfectie groter dan in het waterplantendeel. Maar ook in de sloten zonder vegetatie was de desinfectie minstens zo goed als in de sloten

met helofyten (Schreijer et al. 2000). Ook in wortelzonesystemen worden hoge verwijderingspercentages van coliforme bacteriën behaald (> 95%), waarbij de desinfectie wordt toegeschreven aan de uitscheiding van exudaten door wortels en de bevordering van de groei van antibiotische bacteriën in de rhizosfeer (Decamp & Warren 2000).

Seizoen

Desinfectie is ook seizoensafhankelijk; zo is de afbraak onder invloed van licht minder in de winter dan in de zomer.

I.5 ORGANISCHE STOF (BZV EN CZV)

Het biochemisch zuurstofverbruik (BZV) is een maat voor de zuurstofconsumptie van micro-organismen tijdens de afbraak van organisch materiaal. Het chemisch zuurstofverbruik (CZV) is een maat voor de hoeveelheid zuurstof die nodig is voor de chemische oxidatie van de in water aanwezige stoffen. Zowel het BZV- als het CZV-gehalte worden gebruikt om aan te geven hoeveel zuurstof nodig is om organische stof in (afval)water af te breken. Hoe hoger de CZV- en BZV-gehalten, hoe groter de kans op zuurstofloze condities.

De processen die in een zuiveringsmoeras voor verwijdering van organisch materiaal kunnen zorgen zijn (zie figuur I.4):

- *fysische processen* zoals sedimentatie;
- *biologische processen* zoals afbraak door micro-organismen.

Factoren die de zuivering van organische stof kunnen beïnvloeden, zijn:

Temperatuur

De BZV-verwijdering heeft een beperkte temperatuurafhankelijkheid. Er spelen namelijk verschillende processen een rol, die een verschillende temperatuurafhankelijkheid hebben. Door de combinatie van processen is de invloed van de temperatuur niet erg groot. In een zuiveringsmoeras wordt zowel organische stof geproduceerd als afgebroken: de decompositie neemt af met de temperatuur, maar de microbiële afbraak ook. Bij elke temperatuur ontstaat een evenwicht tussen productie en afbraak (Kadlec & Knight 1996). Aërobe afbraak is afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid zuurstof in water, en die neemt toe met afnemende temperatuur. Er wordt dan ook geen grote seizoensvariatie gevonden in de verwijdering van organische stof (Vymazal 1999).

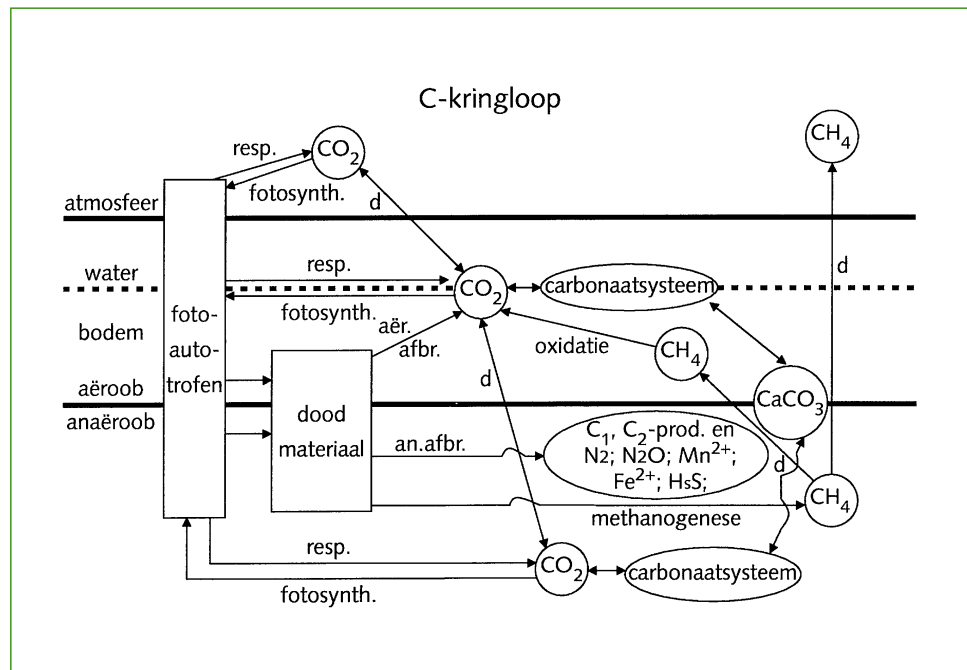
Verblijftijd

Aangezien de verwijdering van organische stof uit het water afhankelijk is van sedimentatie, is de verblijftijd en de bijbehorende stroomsnelheid van belang. In veel zuiveringsmoerassen wordt een groot deel van de organische belasting al verwijderd in een voorbezinksloot.

Concentratie

Ook bij lage concentraties organische stof worden goede verwijderingsresultaten behaald, waar door de lage stroomsnelheid veel organische stof sedimenteert (Vymazal 1999).

In zuiveringsmoerassen worden meestal hoge reductiepercentages bereikt voor CZV en BZV (Verhoeven & Meuleman 1999).



Figuur I.4: omzettingen van koolstof in een zuiveringsmoeras, uit Wienk et al. 2000 (d. = diffusie, an. = anaërobe afbraak, aër. = aërobe afbraak, resp. = respiratie, fotosynth. = fotosynthese).

I.6 ZWEVEND STOF

Zwevend stof is de verzamelnaam voor alle niet-opgeloste delen in water. Zwevend stof kan zowel organisch als anorganisch materiaal bevatten. De belangrijkste factoren bij de verwijdering van zwevend stof in een zuiveringsmoeras zijn de verblijftijd en stroomsnelheid. Het zwevend stof dat aangevoerd wordt in een zuiveringsmoeras, kan verschillende processen ondergaan (Kadlec & Knight 1996):

Sedimentatie en resuspensie

Sedimentatie van zwevend-stofdeeltjes treedt op als de stroomsnelheid van het water in het zuiveringsmoeras laag genoeg is. In veel zuiveringsmoerassen bezinkt het grootste deel van het zwevend stof vanwege de lage stroomsnelheden al vlakbij het inlaatpunt. Resuspensie van bezonken zwevend stof kan optreden als de stroomsnelheid een kritische waarde overschrijdt (0.3-0.5 m/s). In zuiveringsmoerassen zal dit echter door de lage stroomsnelheden niet vaak optreden. Resuspensie kan ook veroorzaakt worden door windgeïnduceerde golven, bioturbatie door fauna en gasvorming. Vissen die in de bodem woelen, zoals karpers, kunnen een aanzienlijke resuspensie van bodemmateriaal veroorzaken. Het uittreden van gas uit de bodem, door bijvoorbeeld zuurstof- of methaanproductie in de bodem, kan leiden tot het losraken van bodemdeeltjes. De vegetatie in een zuiveringsmoeras geeft meestal een goede bescherming tegen resuspensie. Helofyten zorgen ervoor dat de stroomsnelheden laag blijven en de zwevende deeltjes kunnen door de stengels van de planten ingevangen worden. Drijvende waterplanten zorgen voor bescherming tegen windgolven. Ingevangen zwevend stof zal met het organisch materiaal dat in het moeras wordt geproduceerd op de bodem sedimenteren.

Filtratie

Dit is een fysisch proces, waarbij onopgeloste bestanddelen door vegetatie of bodemdeeltjes worden ingevangen.

Productie

Wanneer rwzi-effluent een zuiveringsmoeras binnenkomt, bestaat het zwevend stof uit voornamelijk vlokken met bacteriën. In het zuiveringsmoeras wordt ook zwevend stof geproduceerd, dat bestaat uit fijn organisch materiaal, afkomstig van planten en algen. Het inkomend zwevend stof in een zuiveringsmoeras kan dus bezinken of afgebroken worden, maar het uitgaande water hoeft door productie niet minder zwevend stof te bevatten, wel zal dit van een andere kwaliteit zijn. De troebelheid van het water hoeft dus in een zuiveringsmoeras niet af te nemen, terwijl de kwaliteit wel duidelijk verandert (Toet 2001).

Niet al deze processen zijn even belangrijk in alle typen zuiveringsmoerassen. Zo zullen resuspensie en productie van zwevend stof in een zuiveringsmoeras waarbij het (afval)water langs de ondergrondse plantendelen stroomt, geen belangrijke rol spelen, terwijl dit in een slotensysteem wel het geval is. Bij de meeste zuiveringsmoerassen wordt een voorbezinkbassin aangelegd, waarin het grootste deel van het zwevend stof door sedimentatie verwijderd wordt.

I.7 ZUURSTOFRITMIEK

In het effluent van rwzi's of overstortwater uit een rioolstelsel kan, zoals hierboven beschreven, nog een aanzienlijke zuurstofvraag (BZV) aanwezig zijn. Hierdoor kan op het lozingspunt het zuurstofgehalte van het water laag zijn. Door het inzetten van ondergedoken waterplanten in een deel van het zuiveringsmoeras (vloeiveld) kan een natuurlijke dag-nachtritmiek in het water teruggebracht worden. In infiltratievelden is dit niet mogelijk omdat er geen permanente waterlaag is, waarin waterplanten kunnen groeien.

In oppervlaktewater vertoont de zuurstofhuishouding een dag-nachtritmiek. Overdag wordt door waterplanten zuurstof geproduceerd, dat wordt geconsumeerd door in water aanwezige organismen. Deze zuurstofritmiek is een kenmerk van een gezond aquatisch ecosysteem. De intensiteit van deze zuurstofritmiek wordt bepaald door de productiviteit en voedselrijkdom van het water. Er is ook een seizoensfluctuatie in de zuurstofhuishouding in zuiveringsmoerassen waarneembaar. In het voorjaar is de zuurstofproductie het grootst, terwijl in de zomer de zuurstofconsumptie groter is door de afbraak van afstervende biomassa.

I.8 MACRO-IONEN

In oppervlaktewater en afvalwater komen naast stikstof en fosfor ook de macro-ionen natrium, kalium, sulfaat, silica, calcium, magnesium en chloride voor. Natrium en kalium zijn belangrijke elementen in de fysiologie van planten en dieren. Zwavel kan in oppervlaktewater in twee vormen voorkomen: sulfaat (SO_4^{2-}) onder aërobe en waterstofsulfide (H_2S , HS^-) onder anaërobe omstandigheden. Waterstofsulfide is toxisch en kan bij vrijkomen tot stankproblemen leiden. De sulfaatverwijdering kan bevorderd worden door toevoeging van ijzer(3^+) aan het sediment, waarbij $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ gevormd wordt.

Sulfaatreductie van sulfaat naar sulfide treedt op onder anaërobe en nitraatarme omstandigheden. Verder is reductie van sulfaat afhankelijk van de temperatuur, de pH en de saliniteit. Het gevormde sulfide zal worden gebonden door ijzer (Fe^{2+}). Door deze interactie met de ijzercyclus kan de fosfaatbeschikbaarheid toenemen, omdat het ijzer daarvoor aan P gebonden was. Sulfaatreductie is hiermee één van de processen die tot interne eutrofiering leiden

(Caraco et al. 1989, Meuleman & Sinke 1990). Interne eutrofiëring is een proces waarbij de beschikbaarheid van nutriënten toeneemt door een verhoogde afbraak van organisch materiaal en een verandering in adsorptie/bindingsprocessen.

De overige macro-ionen zijn in zuiveringsmoerassen nauwelijks aan omzettingen onderhevig (Meuleman 1999, Kadlec & Knight 1996). Het gebiedsvreemde karakter van inlaatwater blijft na zuivering in een moeras onveranderd en kan ondanks de gereduceerde nutriëntengehaltes voor interne eutrofiëring in natuurgebieden zorgen.

LITERATUUR

- Bak, A., T.J. Boudewijn & A.J.M. Meijer, 1998. Aanvullende maatregelen of dweilen met de kraan open? Onderzoek aanvullende maatregelen stroomgebied Volkerak-Zoommeer. Rapport fase 1. Bureau Waardenburg bv, Rapportnummer 98.025A, Culemborg.
- Brix, H. 1993a. Waste water treatment in constructed wetlands: Systems Design, Removal Processes, and Treatment Performance. In: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Ed. G.A. Moshiri. Boca Raton.
- Brix, H. 1993b. Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates. In: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Ed. G.A. Moshiri. Boca Raton.
- Bezuijen, C. 1996. Evaluatie van het REGIWA project Nanneveld. Het verloop van een integraal water-beheerproject bij Oudehaske (Fr.) uitgedrukt in werk, resultaat, tijd, kosten en effect. Stageverslag Van Hall Instituut Groningen. Waterschap Friesland Leeuwarden.
- Bowden, W.B. 1984. A nitrogen-15 isotope dilution study of ammonium production in a tidal freshwater wetland. *Limnology and Oceanography* 29:1004-1015.
- Bronius, T., J. Koedood, Y. Scheffer, R. Sukkar, E. Jacobs 1995. Meetplan helofytenfilter. Riolerings en water-huishouding Amsterdam.
- Butler, J.E., M.G Ford, E. May, R. F. Ashworth, J. B. Williams, A. Dewadar, M. El-Housseini, M.M.M. Baghat, 1993. Gravel bed hydroponic sewage treatment: performance and potential. In: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Ed. G.A. Moshiri. Boca Raton.
- Butijn, G.D. 1988. Evaluatie nareinigingsveld rioolwaterzuiveringsinstallatie Elburg. Intern rapport Directie Flevoland. RWS.
- Caraco, N.F, J.J. Cole, G.E. Likens 1989. Evidence for sulphate-controlled phosphorus release from sediments of aquatic systems. *Nature*, Vol 341. pp 316-318.
- Cha, D.K., J.S. Song, D. Sarr 1996. Treatment technologies. Hazardous wastes. *Water Environment Research*, Vol. 69, No. 4.
- Comin., F.A., J.A. Romero, V. Astorga, C. Garcia, 1997. Nitrogen removal and cycling in restored wetlands as filters of nutrients for agricultural run-off. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35, No. 5, pp. 255-261.
- Cooper, P.F. 1993. The use of reed bed systems to treat domestic sewage: the european design and operations guidelines for reed bed treatment systems. In: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Ed. G.A. Moshiri. Boca Raton.
- Cooper, P. 1999. A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems. *Wat. Sci. Tech.* Vol 40, No. 3, pp. 1-9.
- Decamp, O., A. Warren, 2000. Investigation of *Escherichia coli* removal in various designs of subsurface

flow wetlands used for waste water treatment. *Ecological Engineering* 14 pp. 293-299.

De Graaf, I., J.T.A. Verhoeven, G.B.J. Rijs, 1997. Helofytenfilters voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afstromend wegwater (literatuurstudie). RIZA 97.154x.

De Ridder, R.P. 1996. Helofytenfilters - Integratie van oppervlaktewaterzuivering, natuur en andere functies in moerassen. LBL-mededeling. Utrecht.

Dombeck, G.D., M.W. Perry & J.T. Phinney 1998. Mass balance on water column trace metals in a free-surface water-flow-constructed wetland in Sacramento, California. *Ecol. Engineering* 10 (1998) 313-339.

Duyve, P. 1986. Literatuurrapport rietoevers. Een literatuurstudie naar de waarden, functies, achteruitgang, herstel- en aanlegmogelijkheden van rietoevers in Nederland. Stichting Landelijk Overleg Natuur- en Landschapsbeheer, Utrecht.

Geller, G. 1997. Horizontal subsurface flow systems in the german speaking countries: summary of long-term scientific and practical experiences; recommendations. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35, No. 5, pp. 157-166.

Gillespie, W.B. Jr., W.B. Hawkins, J.H. Rodgers, M.L. Cano, P.B. Dorn, 1999. Transfers and transformations of Zinc in flowthrough wetland microcosms. *Ecotoxicol. and Environm. Safety* 43, pp. 126-132.

Gleichman -Verheijen E.C., W.H. van der Putten, L. van Liere, 1992. Afvalwaterzuivering met helofytenfilters in Nederland. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Directoraat-Generaal Milieubeheer. Publikatiereeks Milieutechnologie Nr. 1992/13.

Grontmij 1988. De biezenvelden bij Houten. Onderzoek naar het functioneren in mei t/m oktober 1987. Grontmij, De Bilt.

Hansen, D., P.J. Duda, A. Zayed, N. Terry, 1998. Selenium removal by constructed wetlands: role of biological volatilization. *Environ. Sci. Techn.* 32, 591-597.

Havelaar, A.H. 1986. F-specific RNA bacteriophages as model viruses in treatment processes. Rijksuniversiteit Utrecht.

Kadlec, R.H. en R.L. Knight 1996. Treatment wetlands. Boca Raton VS.

Knight, R.L. 1997. Wildlife habitat and public use benefits of treatment wetlands, *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35, No. 5 pp 35-43.

Koerselman, W. 1990. Bepaling van de efficiëntie van moerassen met betrekking tot verwijdering van nutriënten. In : The Utrecht Plant Ecology News Report no. 11. PAO cursus Moerassen voor de zuivering van water.

Lenssen 1997. Soortenrijke oevers: sturen tussen riet en ruigte. DWW, RIZA, NIOO. DWW rapport P-DWW-97-071.

Löffler, H. & Gunatilaka, A. 1994. The shallow lake and reed (*Phragmites australis*) wetland of Neusiedlersee (Austria). In: Patten, B.C., Jörgensen, S.E. and Dumont, H. *Wetlands and shallow continental waterbodies*. Volume 2. Case studies. pp.183-202.

Machate T., H. Noll, H. Behrens, A. Kettrup 1996. Degradation of phenanthrene and hydraulic characteristics in a constructed wetland *Wat. Res.* Vol 31, no3 pp 554-560.

Magmedov, V.G., M.A. Zakharenko, L.I. Yakovleva, M.E. Ince, 1996. The use of constructed wetlands for the treatment of run-off and drainage waters: the UK and Ukraine experience. *Wat. Sci. Tech.* Vo. 33, No. 4-5, pp. 315-323.

Meijer, M-L., R. Portielje, R. Noordhuis, W. Joosse, M. van den Berg, E. Lammens, H. Coops, D. van der Molen 1999. Stabiliteit van de Veluwevloedmeren. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat. Rijksinstituut voor Integraal Waterbeheer en Afvalwaterbehandeling. RIZA rapport 99.054, BOVAR rapport 99.06.

Meuleman, A.F.M. 1990. Zuiveringsmoerassen ten behoeve van de natuurbescherming. The Utrecht Plant Ecology News Report No 11. PAO-cursus 'Moerassen voor de zuivering van water'. Utrecht.

Meuleman, A.F.M., A. Sinke 1990. De rol van sulfaatreductie in de decompositie van organisch materiaal. The Utrecht Plant Ecology News Report No 10. Workshop interne eutrofiëring. Utrecht.

Meuleman A.F.M. 1999. Performance of treatment wetlands. PhD thesis. Utrecht University.

NW4 1998. Vierde Nota Waterhuishouding. Regeringsbeslissing. Den Haag, Sdu.

NWRW 1989. Eindrapportage en evaluatie van het onderzoek. Nationale Werkgroep Riolerings en Waterkwaliteit. I.o.v VROM/DBW.

Perkins, J., C. Hunter, 2000. Removal of enteric bacteria in a surface flow constructed wetland in Yorkshire, England. *Wat. Res.* Vol. 34, No.6, pp. 1941-1947.

Persson, J., N.L.G. Somes, T.H.F. Wong 1999 Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. *Wat Sci Tech.* Vol. 40, No. 3 291-300.

Richardson, C.J., C.B. Craft, 1993. Effective Phosphorus Retention in Wetlands: Fact or Fiction? In: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Ed. G.A. Moshiri. Boca Raton.

Rijs, G.B.J. 1994. Het toepassen van helofytenfilters bij de zuivering van kleinschalige afvalwaterlozingen, het einde...! Of ?. pp. 1-8 Studiedag Individuele Behandeling Afvalwater. Van Hall Instituut, Leeuwarden.

Russel, R.C. 1997. Constructed wetlands and mosquitoes: Health hazards and management options - an australian perspective. *Ecol. Engineering* 12, 107-124.

Scholes, L.N.L., R.B.E. Shutes, D.M. Revitt, D. Purchase, M. Forshaw, 1999. The removal of urban pollutants by constructed wetlands during wet weather. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 40, No3, pp. 333-340.

Schreijer, M., R. Kampf, J.T.A. Verhoeven, S. Toet 2000. Nabehandeling van rwzi-effluent tot bruikbaar oppervlaktewater in een moerassysteem. 1995-1998. STOWA 2000-10. RIZA 2000.006.

Shutes, R.B.E., D.M. Revitt, A.S. Mungur, L.N.L. Scholes, 1997. The design of wetlands systems for the treatment of urban run-off. *Wat. Sci. Tech.* Vol.35, No. 5, pp. 19-25.

STOWA 1996. Onderhoud op maat. Gedifferentieerd onderhoud in beeld gebracht. STOWA rapport 96-27, Utrecht.

Tiedje, J.M. 1988. Ecology of denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium. In: Zehnder A.J.B. (ed) *Biology of anaerobic organisms*. John Wiley & Sons, New York, 179-244.

Toet, S. (in progress, 2001) A constructed wetland used for polishing effluent from a sewage treatment plant: processes and performance. Proefschrift Universiteit Utrecht.

Ton, M. 2000. Aanleg helofytenfilter. *Neerslag 2000/II*.

Tweede Rioleringsnota 1999. Werkgroep Riolering West-Nederland (1999). Tweede Rioleringsnota. Definitief. Witteveen+Bos, Tauw.

Van Dijk, J., B. Boekee, 1999. Helofytenfilter Erasmusgracht. Onderzoek naar de toepasbaarheid van een helofytenfilter met bezinkbassin als randvoorziening bij gescheiden stelsels. Dienst Waterbeheer en Riolering, Amsterdam.

Van Oorschoot, M.M.P. 1990. De biezenvelden bij Houten-Oost. Samenvatting van het onderzoeksrapport. In: The Utrecht Plant Ecology News Report no. 11. PAO cursus Moerassen voor de zuivering van water.

Verhoeven, J.T.A. en A.F.M. Meuleman, 1999. Wetlands for wastewater treatment: opportunities and limitations. *Ecological Engineering* 12 pp 5-12.

Volkskrant 2000. Het wegwaterfilter wuift in de wind. Wetenschapsbijlage 4 maart 2000.

VROM/KIWA 1998. Handboek helofytenfilters voor IBA-systemen. Aanvulling op de IBA-richtlijn 1991. VROM/KIWA, 's Gravenhage, Rijswijk.

Vymazal, J. 1996. Constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic the first 5 years experience. *Wat Sci. Tech.* Vol 34 No.11, pp159-164.

Vymazal J. 1999. Removal of BOD₅ in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: Czech experience. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 40, No3, pp. 133-138.

Waardenburg, 1999. Ontwerp helofytenfilter voor de zuivering van wegwater uit de Vlaketunnel: voorstudie en ontwerpplan. Culemborg.

Wienk, L., J.T.A. Verhoeven, H. Coops, R. Portielje, 2000. Peilbeheer en nutriënten. Literatuurstudie naar de effecten van peildynamiek op de nutriëntenhuishouding van watersystemen. RIZA rapport 2000.012, Lelystad.

Witteveen+Bos 1998. Addendum₁ definitief ontwerp Helofytensysteem rwzi Land van Cuijk. In opdracht van Waterschap De Maaskant. Witteveen+Bos Deventer.

Witteveen+Bos 2001. Compendium rwzi-effluent als bron. In opdracht van STOWA. Deventer.

Wood, T. S., M.L. Shelley, 1999. A dynamic model of bioavailability of metals in constructed wetland sediments. *Ecol. Eng.* 12 pp. 231-252.

TREFWOORDENLIJST

Adsorptie: reversibele binding van verontreinigingen, zoals fosfaten of zware metalen, aan andere stoffen in bodem of water, zoals zwevend stof, sediment, metalen. Het aantal bindingsplaatsen is voor dit proces van belang.

Complexering: complexering is de binding van metaalionen aan negatief geladen (organische) deeltjes, en vergroot veelal de oplosbaarheid.

Decompositie: afbraak van organische stof door bacteriën en schimmels.

Denitrificatie: microbiel proces, waarbij nitraat of nitriet gereduceerd wordt tot stikstofgas (N_2) of lachgas (N_2O). Denitrificatie treedt op onder zuurstofarme condities.

Fotolyse: afbraak van pathogenen onder invloed van licht.

Foto-oxidatie: oxidatie van PAK's onder invloed van licht. Het proces wordt gestimuleerd door zonnestraling, temperatuur en opgelost zuurstof.

Gecombineerd systeem: aanleg van verschillende typen zuiveringsmoerassen na elkaar, zoals horizontaal en verticaal doorstroomde systemen.

Helofyten: planten die in de bodem wortelen en waarvan de onderste delen ondergedoken zijn en de bladeren en bloemen boven het water uitsteken, zoals Riet, Mattenbies en Grote lisdodde.

Herkomst water: bron van het te zuiveren water, dat de eigenschappen van het water, zoals de hydraulische belasting, de frequentie van de belasting, de stoffen in het water en hun concentraties bepaalt. In het handboek zijn de belangrijkste herkomsten van water: rwzi-effluent, oppervlaktewater, overstortwater, neerslagafvoer en afstromend wegwater.

Hydraulische belasting: volume water per tijdseenheid dat door het zuiveringsmoeras gezuiverd moet worden.

Hydraulische efficiëntie: optimale verdeling van het water over het moeras, zodat er maximaal gebruik wordt gemaakt van de beschikbare berging, geen preferente stroombanen ontstaan en goede menging optreedt.

Infiltratieveld: zuiveringsmoeras waarbij het water verticaal door de bodem of het zandpakket stroomt en via drains wordt afgevoerd.

Inlaatwater: oppervlaktewater dat in een (natuur)gebied wordt ingelaten om, vooral 's zomers, verdampings- en wegzijgingsverliezen te compenseren.

Maaibeheer: frequentie, tijdstip en de wijze van maaien van de vegetatie in het zuiveringsmoeras. Het maaibeheer bepaalt onder meer hoeveel verontreinigingen het moeras via de afvoer van vegetatie verlaten.

Mineralisatie: omzetting van organisch gebonden stikstof- en fosfornutriënten door de afbraak van organische stof door micro-organismen.

Monitoring: regelmatige metingen van kenmerken van een zuiveringsmoeras met als doel het functioneren van het zuiveringsmoeras te volgen.

Neerslagafvoer: hemelwaterafvoer van verharde oppervlakken (zoals daken en straten) in woonwijken.

Nitrificatie: microbieel proces, waarbij ammonium omgezet wordt via nitriet in nitraat. Beide stappen kunnen alleen plaatsvinden in aanwezigheid van zuurstof.

Opname: van verontreinigingen door hogere planten en/of algen. Verontreinigingen, zoals nutriënten en metalen, worden onder invloed van fotosynthese in biomassa vastgelegd.

Overstortwater: water dat bij hevige regenval vanuit het rioolstelsel op oppervlaktewater wordt geloosd.

Overzichtstekening: tekening van de verschillende onderdelen van het zuiveringsmoeras, zoals deze zullen worden ingepast in het terrein.

Peilbeheer: de beheersing van het waterpeil. Het peilbeheer stuurt de zuiveringsprocessen. Een regime van afwisselend bevoeien en droogvallen kan in zowel horizontale als verticale systemen zorgen voor optimalisatie van de cyclus van nitrificatie en denitrificatie en voor optimalisatie van de vastlegging van fosfaat in ijzerrijke bodems.

Perifyton: een laagje algen dat als een biofilm op de oppervlakken van steen of vegetatie aanwezig is.

Precipitatie: neerslaan van fosfaatverbindingen en metaalsulfides.

Reductie- en oxidatieprocessen: reductie is een energievragende chemische reactie waarbij elektronen worden opgenomen, oxidatie is een energieleverende chemische reactie waarbij elektronen worden afgestaan.

Rwzi-effluent: water dat gezuiverd is in een rioolwaterzuiveringsinrichting.

Resuspensie: opwervelen van op de bodem bezonken deeltjes in de waterkolom. Resuspensie neemt toe bij hogere stroomsnelheden en het opwoelen van de bodem door organismen, zoals brasem.

Sedimentatie: bezinken van deeltjes in de waterkolom van het zuiveringsmoeras (waaronder verontreinigingen) onder invloed van de zwaartekracht. Sedimentatie neemt toe bij een lagere stroomsnelheid van het water.

Slotensysteem: inrichtingsconcept voor zuiveringsmoerassen in de vorm van parallelle of in serie geschakelde sloten.

Technologisch ontwerp: schematische voorstelling van het zuiveringsmoeras en de benodigde aan- en afvoerwegen, de regelapparatuur en de capaciteit van de verschillende onderdelen.

Veldsysteem: inrichting van een zuiveringsmoeras in de vorm van een veld.

Verblijftijd: tijd die het te zuiveren water in het moeras verblijft. De verblijftijd van het water bepaalt mede de stroomsnelheid en daarmee de kans op sedimentatie. Verder kunnen allerlei processen, zoals opname van stoffen door planten en bacteriële omzettingsprocessen, gedurende een langere tijd plaatsvinden, waardoor het water beter gezuiverd wordt.

Vervluchting: verdamping van gasvormige verontreinigingen, zoals ammoniak.

Vloeiveld: zuiveringsmoeras waarbij het water in horizontale richting langs de bovengrondse plantendelen stroomt.

Voorbezinkbassin: bassin dat wordt aangelegd vóór het zuiveringsmoeras en dat dient als tijdelijke opvang van het te zuiveren water en als buffer van pieken in de stofbelasting. In het voorbezinkbassin zullen door de lage stroomsnelheden onopgeloste deeltjes, zoals zwevend stof en de daaraan gebonden verontreinigingen fosfaat en zware metalen, bezinken en zal een deel van het organisch stof afgebroken worden.

Water- en stoffenbalans: balans van de in- en uitvoer van water- en stofstromen in het zuiveringsmoeras.

Wegwater: neerslag die van wegoppervlakken afstroomt.

Wortelzone systeem: zuiveringsmoeras, waarbij het water horizontaal door de bodem of het zandpakket langs de ondergrondse plantendelen stroomt en via drains wordt afgevoerd.

Zoomsysteem: Inrichtingsconcept van een zuiveringsmoeras in de vorm van een brede helofytenoever van een meer of plas.

Zuiveringscapaciteit: hoeveelheid verontreiniging per tijd- en oppervlakte-eenheid die een bepaald zuiveringsmoeras met een bepaald ontwerp en beheer kan zuiveren.

Zuiveringsmoeras: moeras dat aangelegd is en/of beheerd wordt om water te zuiveren van verontreinigingen.

Zuurstofritmiek: ritme van hogere zuurstofgehaltes overdag en lagere gehalten 's nachts in het gezuiverde water, veroorzaakt door de fotosynthese en ademhaling van waterplanten in het zuiveringsmoeras.

BRONVERMELDING FIGUREN

figuur	titel	bron
figuur 1.1	Schematisch overzicht informatie in rapport en DSS.	W+B
figuur 2.1	Zuiveringsmoeras bij rwzi Eversteekoog: luchtfoto.	Uitwaterende Sluizen
figuur 2.2	Detail van zuiveringsmoeras bij rwzi Eversteekoog.	R. Kampf, Uitwaterende Sluizen
figuur 3.1	Voorbeeld van zuiveringsmoeras waarbij de natuurwaarde een secundaire functie is.	W+B
figuur 3.2	Wijze van doorstroming in de drie verschillende typen zuiveringsmoerassen: van boven naar onder: vloeiveld, infiltratieveld en wortelzonesysteem (Naar Rijs 1994).	Universiteit Utrecht
Figuur 3.3	Inrichting van een moeras in de vorm van een veldsysteem.	W+B
figuur 3.4	Schakeling van slotensystemen.	W+B, naar Bak et al 1998 en De Ridder 1996
figuur 3.5	Impressies van een ecologisch herstelproject d.m.v. aanleg van veldmoeras naast een meer.	W+B
figuur 4.1	Overzicht beheersfactoren die zuiveringsprocessen sturen.	W+B
figuur 4.2	Grote lisdodde	J.J. Eijer- de Jong, W+B
figuur 5.1	Schematische doorsnede vloeiveld.	W+B
figuur 5.2	Schematische doorsnede infiltratieveld.	W+B
figuur 5.3	Overzichtstekening van slotensysteem en waterplantenvijvers bij rwzi Land van Cuijk.	W+B
figuur 5.4	Overzichtstekening van slotensysteem met helofyten en waterplanten bij rwzi Eversteekoog op Texel.	Uitwaterende Sluizen
figuur 5.5	Overzichtstekening slotensysteem met waterplanten De Meije.	Meuleman 1999
figuur 5.6	Overzichtstekening vloeiveld + wortelzonesysteem Erasmusgracht.	Van Dijk & Boekee 1999
figuur 5.7	Peilbeheer door middel van stuwen bij zuiveringsmoeras rwzi Land van Cuijk.	D. Jacobs, Waterschap De Maaskant
figuur 5.8	Maaien van drooggelegd infiltratieveld bij Lauwersoog.	A.F.M. Meuleman
figuren in Bijlage 1		
figuur I.1.	Stikstofkringloop in een zuiveringsmoeras.	Wienk et al 2000
figuur I.2	Omzetting van ammonium naar stikstofgas door de opeenvolging van nitrificatie en denitrificatie.	W+B
figuur I.3	Omzetting van fosfaat in een zuiveringsmoeras.	Wienk et al 2000
figuur I.4	Omzetting van koolstof in een zuiveringsmoeras.	Wienk et al 2000