

stowa

VAN EFFLUENT TOT BRUIKBAAR OPPERVLAKEWATER

WATERHARMONICA'S IN NEDERLAND (1996-2012)



RAPPORT

2013

07



WATERHARMONICA'S IN NEDERLAND

1996-2012: VAN EFFLUENT TOT BRUIKBAAR OPPERVLAKTEWATER

RAPPORT

2013

07

ISBN 978.90.5773.608.7



COLOFON

AUTEURS Rob van den Boomen (Witteveen+Bos)
Ruud Kampf (rekel/water, Vrije Universiteit)

MET MEDEWERKING VAN

Theo Claasen (Wetterskip Fryslân)
Victor Claessen (Waterschap De Dommel)
Edwin Foekema (IMARES)
Sybren Gerbens (Wetterskip Fryslân)
Joost Kappelhof (Waternet)
Bram Mulling (Universiteit Amsterdam)
Dick de Vente (Waterschap Regge en Dinkel)
Peter van der Wiele (Waterschap Regge en Dinkel)
Rolf te Velde (Waterschap Regge en Dinkel)

COVER PHOTO Ruud Kampf

PRINT Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA STOWA 2013-07

ISBN 978.90.5773.608.7

Dit rapport is een bewerkte uitgave van Stowa-2012-12: Waterharmonica's in Nederland; 1996-2011: van effluent tot bruikbaar oppervlaktewater

This report has been translated into English: Stowa report nr. 2013-08 'Waterharmonicas in the Netherlands 1996-2012; natural constructed wetlands between well-treated waste water and usable surface water'.

Deze uitgave is ondersteund door het Waterschap Regge en Dinkel, Almelo.

Copyright De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

Disclaimer Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.

DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoeksuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n 6,5 miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 033 - 460 32 00.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 2180, 3800 CD Amersfoort.

Email: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl

WATERHARMONICA'S

INHOUD

	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
2	EFFLUENT VAN EEN RWZI IS NOG GEEN BRUIKBAAR WATER	3
3	DE WATERHARMONICA, VAN STOWA PRIJS TOT TOEPASSING	5
4	ONDERZOEKEN IN DE LAATSTE 15 JAAR	11
5	WATERHARMONICA'S IN NEDERLAND EN ELDERS	15
6	HOE VERANDERT HET EFFLUENT?	32
7	WAT LEVERT EEN WATERHARMONICA NOG MEER OP BEHALVE NATUUR, RECREATIE EN WATERBUFFERING?	63
8	WAT KOST EEN WATERHARMONICA?	67
9	BEHEER EN ONDERHOUD	73
10	ONTWERPRICHTLIJNEN	76
11	WAT IS HET BELANG VAN DE WATERHARMONICA?	83
	REFERENTIES	86

1

INLEIDING

Natuurlijke zuiveringssystemen worden in Nederland al jaren gebruikt om de kwaliteit van afvalwater te verbeteren vóór lozing of hergebruik. Een eerste opzet van de “Waterharmonica” als schakel tussen Waterketen en Watersysteem werd door de Stowa beloond bij het 25-jarig bestaan in 1996. Sindsdien zijn er op diverse plaatsen in Nederland Waterharmonica's aangelegd, eerst op kleine schaal maar nu ook op grote schaal. In deze eerste 15 jaar van de Waterharmonica heeft uitgebreid onderzoek plaatsgevonden naar de werking en effectiviteit van deze systemen en ook nu nog is onderzoek gaande (Uijterlinde, 2012). Onderliggend overzicht geeft een samenvattend beeld van toepassingen en onderzoek in die 15 jaar aan de hand van de volgende hoofdstukken:

- 1 Effluent van een RWZI is nog geen bruikbaar water
- 2 De Waterharmonica, van Stowa prijs tot toepassing
- 3 Onderzoeken in de laatste 15 jaar
- 4 Waterharmonica's in Nederland en elders
- 5 Hoe verandert het effluent?
- 6 Wat levert een Waterharmonica nog meer op behalve natuur, recreatie en waterbuffering?
- 7 Wat kost een Waterharmonica?
- 8 Beheer en onderhoud
- 9 Ontwerprichtlijnen
- 10 Wat is het belang van de Waterharmonica?



2

EFFLUENT VAN EEN RWZI IS NOG GEEN BRUIKBAAR WATER

In Nederland wordt grond- en oppervlaktewater gebruikt om drink- en proceswater te maken. Na gebruik in de Waterketen wordt dit uiteindelijk als afval bestempeld. Lozing of hergebruik zijn dan de opties. Vóór lozing of hergebruik dienen diverse stoffen uit het water te worden verwijderd. In Nederland zijn industriële lozingen en lozingen uit zuiveringsinstallaties sinds de 70er jaren van de vorige eeuw in de Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren Wvo gereguleerd. Op 22 december 2009 is de Waterwet van kracht geworden waarin de Wvo is opgegaan met nog zeven andere waterwetten. Zowel in deze wet als in aanpalende wetten (zoals de Kader Richtlijn Water) en onderliggende AMvB, ministeriële regeling, verordening en plannen en dus ook het “Lozingenbesluit Wvo huishoudelijk afvalwater”, zijn normen opgenomen voor lozingen, agrarisch gebruik, ontvangend oppervlaktewater, grondwater en hergebruik van afvalwater als proceswater.

Door deze wet- en regelgeving is de kwaliteit van het oppervlaktewater net als in de ons omringende landen sterk verbeterd. Bij de toetsing van de huidige oppervlaktewaterkwaliteit aan de doelstellingen uit de Kader Richtlijn Water (KRW), lijken de meeste waterlichamen redelijk op orde met betrekking tot fysische chemie. Echter bij lange na niet met betrekking tot ecologie (in het KRW spraakgebruik “geen GEP/GET, dus geel, oranje of rood”). Per watersysteem wordt vastgesteld of verdere reductie van stoffen noodzakelijk is of dat maatregelen in het watersysteem efficiënter zijn. Bij de lozing van gezuiverd afvalwater kan hier nog veel winst worden behaald. In de meeste rioolwaterzuive-

ringsinstallaties (RWZI's) wordt het afvalwater en regenwater mechanisch en biologisch gezuiverd. Het water dat de RWZI verlaat voldoet grotendeels aan de lozingsnormen voor zwevend stof en voedingsstoffen (fosfaat en stikstof). Het gezuiverde afvalwater is echter niet echt natuurlijk: de zuurstofconcentratie is laag, het zwevend stof bevat relatief veel losse bacteriën, de biodiversiteit is laag en er zijn relatief hoge nutriënten gehaltes. Dus wel redelijk schoon maar geen ecologisch gezond water (Schreijer, Kampf et al, 2000).

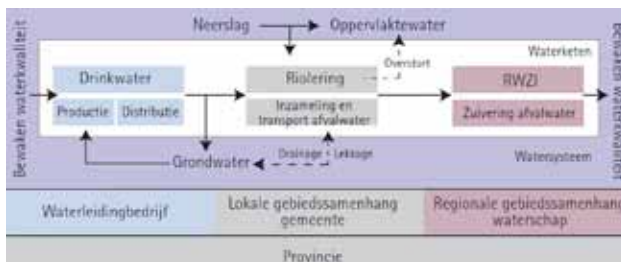
3

DE WATERHARMONICA, VAN STOWA PRIJS TOT TOEPASSING

In beleidsplannen van de meeste waterbeheerders werd en wordt nog steeds de Waterketen centraal gesteld. Afbeelding 1 is ontleend aan het “Achtergronddocument: Beschrijving watersysteem en wettelijk kader” in (Fryslân leeft met water, 2009). Het schema is opgesteld vanuit de Waterketen, waarbij het Watersysteem zowel de bron is van het water als de ontvanger. Vanuit een probleem aanpak logisch omdat het ook het duurste deel van de watercyclus is, voor heel Nederland ca. drie miljard euro per jaar. Deze kosten zijn ongeveer gelijk verdeeld over de drie onderdelen van de Waterketen: drinkwater, riolering en zuivering van afvalwater. Het achtergrond document beschrijft een nauwe samenhang tussen Watersysteem en Waterketen zoals ont-trekking van grondwater voor de drinkwatervoorziening, lozing van milieubezwaarlijke stoffen op het riool, lozing vanuit riooloverstorten en de RWZI's op het oppervlaktewater, afvoer van grondwater door drainerende riolen en lozing vanuit lekkende riolen.

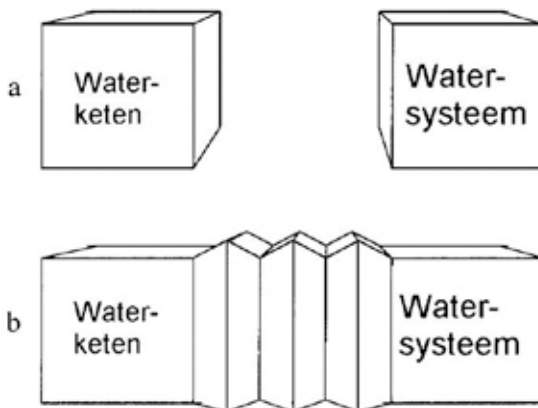
AFBEELDING 1

DE KLASIEKE BENADERING VAN DE PLAATS VAN DE WATERKETEN, ONTLEEND AAN (FRYSLÂN LEeft MET WATER, 2009)



Theo Claassen herkende de kloof (afbeelding 2a) tussen Waterketen en Watersysteem lang geleden. Hij won in 1996 de 2e prijs bij het jubileumsymposium van de Stowa met de inzending van het concept van “het 3 D-schakelsysteem: met behulp van technologie en ecologie worden restlozingen gereduceerd of geëlimineerd in fysieke overgangszones tussen Waterketen en Watersysteem, het schakelsysteem als harmonicamodel. Als de RWZI of het oppervlaktewater de taak van de nazuivering van het afvalwater niet aan kan, maak dan een oppervlaktewater tussen het lozingspunt van het effluent van de RWZI en het overige oppervlaktewater. Zulk een oppervlaktewater kan dan zo ingericht worden dat het zijn taak zo goed mogelijk aan kan. Het ingerichte systeem kan door procesoptimalisatie efficiënt beheerd worden: “beheerde natuur” (Klapwijk, 1996). Met behulp van de inzet van een natuurlijk systeem worden de scherpe, abrupte overgangen tussen emissies en het ontvangend aquatisch ecosysteem verzacht. In afbeelding 2b is deze overgang tussen Waterketen (met het emissiespoor) en Watersysteem (met het waterkwaliteitsspoor) schematisch weergegeven.

AFBEELDING 2 EEN HARMONICA ALS KOPPELING VAN WATERKETEN (EMISSIONSPOOR) AAN WATERSYSTEEM (WATERKWALITEITSSPOOR): DE WATERHARMONICA (CLAASSEN, 1996)



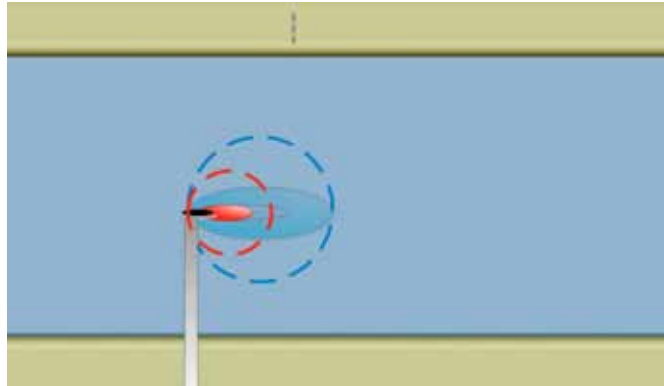
Dit theoretische model is verder praktisch uitgewerkt door Ruud Kampf en Theo Claassen in de Waterharmonica: de natuurlijke schakel tussen Waterketen en Watersysteem (afbeelding 3). Voor het veranderen van de kwaliteit van het effluent van RWZI's naar "bruikbaar oppervlaktewater" zijn zuiveringsmoerassen een bruikbare oplossing. Natuurlijke moerassen zijn ondiepe, waterrijke gebieden met een hoge productiviteit en grote biodiversiteit en met een grote buffer- en zuiveringscapaciteit. "Man-made, artificial" ofwel constructed wetlands kunnen echter zo vorm gegeven en ingericht worden dat de zuiverende en zelfreinigende werking optimaal wordt benut.

AFBEELDING 3 DE WATERHARMONICA ALS SCHAKEL TUSSEN WATERKETEN EN WATERSYSTEEM IN EVERSTEKOOG



De plaats van een Waterharmonica tussen Waterketen en Watersysteem is vanuit Europese regelgeving gezien ook logisch. Het is voor industrie en RWZI's namelijk niet haalbaar en ook erg duur om direct aan het einde van de lozingspijp al te voldoen aan de scherpe milieukwaliteitsnormen voor oppervlaktewater (Waterforum, 2008). In de Kader Richtlijn Water wordt dan ook ruimte gegeven aan een zogenaamde "mixing zone" (Baptist en Uijttewaal, 2005, Bleninger en Jirka, 2009, Bleninger en Jirka, 2010), zie afbeelding 4. Deze mengzones zijn beschreven als dat deel van een watersysteem dat een lozing inneemt in een waterlichaam voordat de lozing opgemengd is en waar de concentratie van een stof hoger mag zijn dan de geldende norm uit die richtlijn.

AFBEELDING 4 DE MENGZONE VAN EEN PUNTLOZING SCHEMATISCH WEERGEGEVEN, NAAR (BAPTIST EN UIJTTEWAAL, 2005)



De rode gestippelde cirkel geeft de ZID (Zone of Initial Dilution) aan. Hierin mag de concentratie van de geloosde stoffen veel hoger zijn dan in het waterlichaam en zijn acute en chronische toxische effecten toegelaten. In de blauwe gestippelde cirkel daarbuiten (AIZ, Allocated Impact Zone) moet de verdunning zorgen dat acute effecten vermeden worden. Chronische effecten zijn wel toegelaten. Buiten de blauwe cirkel moet echter aan de kwaliteit van het waterlichaam voldaan worden. Op foto 1 is deze opmenging met behulp van een kleurstof te zien.

FOTO 1 EFFLUENTPLUIM VAN DE RWZI KATWOUDE, 10 MINUTEN NA START VAN DOSERING VAN



Voorgaande leidt tot de volgende conclusies:

- Het effluent van de RWZI hoeft niet te voldoen aan de eisen gesteld vanuit het KRW waterlichaam;
- De lozingspluim wordt gezien als de mengzone;
- De Waterharmonica kan de functie van de mengzone overnemen. De kwaliteit van het water aan het eind van een (laag belaste) Waterharmonica kan de geldende kwaliteitseis voor het ontvangende waterlichaam benaderen.

Bij de meeste Waterharmonica's in Nederland ligt voor het Lozingenbesluit Wvo huishoudelijk afvalwater het lozingspunt direct na de nabezinktank van de RWZI. Bij sommige Waterharmonica's is nog een tweede overdrachtslocatie aangewezen. Zo bestaat bij Land van Cuijk na de rietsloten een tweede lozingslocatie (volgens het Lozingenbesluit) waar dezelfde eisen gelden als bij de afloop van de nabezinktank. Bij de RWZI Kaatsheuvel bestaat naast het meetpunt bij de aflat van de daar aanwezige zandfilter, een tweede locatie na het verticale rietfilter van Klaterwater. Op deze tweede locatie zijn "gebruiksnormen" geformuleerd voor gebruik van het water in het golf- en pretpark.

Afgezien van zwevend stof gedurende RWA-aanvoer kunnen de moderne RWZI's, en dan vooral de zeer laag-belaste, eenvoudig voldoen aan de lozingseisen van het Lozingenbesluit WVO huishoudelijk afvalwater. En zelfs meer bij een slibbelasting van 0,05 kg BZV/kg d.s. per dag, of lager (Bentem, Buunen et al, 2007). Het is zelfs bij kleine RWZI's eenvoudig om vergaande stikstofverwijdering te bereiken. Al 20 jaar geleden bereikten de vijf oxidatiesloten op Texel gemiddelde gehalten aan NH_4 van 0,6 tot 1,8 mg/l en N-totaal 4 tot 8 mg/l. Vanuit een praktisch oogpunt kan gesteld worden dat als bij een goed ontworpen zeer laag belaste RWZI (oxidatiesloten) het NH_4 -gehalte lager is dan 1 mg/l, dat het dan "met de rest ook wel goed zit" (Kampf, 2008a).

Het lijkt verstandig de "lozingseisen" uit het Lozingenbesluit bij de afloop van de nabezinktank (of eventueel na een nageschakeld systeem zoals een zandfilter) te laten gelden. Het gaat tegenwoordig echter in toenemende mate om het omzetten van het afvalwater in een voor allerlei bestemmingen bruikbaar water. De ontwikkeling lijkt in twee

richtingen te gaan. De hoofdrichting is een direct hergebruik van het (opgewerkte) effluent in industrie, spoelwater en sproeiwater in steden, golfbanen, irrigatie of zelfs direct naar drinkwater. De tweede richting is “terug geven van water aan de natuur”, maar ook toepassing in stedelijk gebied. Afhankelijk van het gebruik van het water “uit” de Waterharmonica kunnen dan ook specifieke eisen gesteld worden aan ontwerp en het beheer en onderhoud ervan. Dit kunnen bijvoorbeeld voor de natuur van belang zijnde parameters zijn zoals NO_2 , NO_3 , NH_4 (en vrij ammoniak, afhankelijk van pH en temperatuur) en BVZ vanuit oogpunt van vistoxiciteit, zuurstofverbruik en opname door algen en (water)planten. Er kunnen dus locatie specifieke “gebruikseisen” worden opgesteld aan het water dat de Waterharmonica verlaat.

De Waterharmonica heeft zich in Nederland en daarbuiten een plaats verworven en wordt meer en meer in de praktijk toegepast, zoals in de volgende paragrafen beschreven wordt. In beleidsplannen van bijvoorbeeld Schieland en Krimpenerwaard (HHSK, 2012), Regge en Dinkel (Regge en Dinkel, 2005), Rijn en IJssel (Rijn en IJssel, 2009) en De Dommel (De Dommel, 2010a) is de Waterharmonica in beleidsplannen opgenomen. Maar ook bij waterbeheerders waar de Waterharmonica niet met zoveel woorden in de beleidsdocumenten is vastgelegd, is en wordt de Waterharmonica toegepast. Voor mogelijke toepassing bij verdrogingsbestrijding wordt verwezen naar (Slootjes, 2004). Ook in het STOWA onderzoek naar de RWZI 2030 (NEWater) wordt de Waterharmonica als deel van de Waterfabriek voor levering aan “de natuur” als element meegenomen (Roeleveld, Roorda et al, 2010).

4

ONDERZOEKEN IN DE LAATSTE 15 JAAR

STOWA heeft de afgelopen jaren op diverse wijzen de ontwikkeling van de Waterharmonica ondersteund. Dit betreft onder andere de volgende gerelateerde onderzoeken/studies:

- Ondersteuning onderzoek Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier naar nabehandeling van RWZI-effluent tot bruikbaar oppervlaktewater in een moerassysteem, monitoring Waterharmonica Everstekooog 1995-1999 (Schreijer en Kampf, 1995, Kampf, Schreijer et al, 1996, Schreijer, Kampf et al, 2000 en Toet, 2003);
- Handboek zuiveringsmoerassen voor licht verontreinigd water (Sloot, Lorenz et al, 2001);
- Ecotoxicologische aspecten bij de nabehandeling van RWZI-effluent met behulp van biomassa kweek (Blankendaal, Foekema et al, 2003);
- Praktijkonderzoek moerassysteem RWZI Land van Cuijk (Boomen, 2004);
- Waterharmonica, de natuurlijke schakel tussen Waterketen en Watersysteem (Schomaker, Otte et al, 2005);
- Waterharmonica in the developing world (Mels, Martijn et al, 2005);
- Stowa Waterharmonica Workshops in Hapert en Almelo (Jacobi, 2004), zie foto 2;
- Vergaande verwijdering van fosfaat met helofytenfilters (Blom en Maat, 2005);

FOTO 2

STEMPEL “WATERHARMONICA PROOF” IS DOOR STOWA UITGEDEELD TIJDENS DE WORKSHOPS IN HAPERT EN ALMELO IN 2004



Parallel is in een los samenwerkingsverband tussen het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Wetterskip Fryslân, Waternet, Consorci de la Costa Brava in Girona, de Vrije Universiteit, Universiteit van Amsterdam en Universiteit van Girona, met grote inbreng van TNO in Den Helder en NIOZ vanaf 1998 onderzoek uitgevoerd naar processen in met effluent gevoede vijvers in Waterharmonica's. Het onderzoek begon op Everstekooog, Texel, later in Horstermeer, Grou, Girona en ook (Kampf, Jak et al, 1999, Kampf, 2009, Kampf, Geest et al, 2007, Kampf, 2001, Foekema en Kampf, 2005, Kampf en Claassen, 2004, Kampf en Sala, 2009, Bales, 2008, Vidal, 2008, Colon, Sala et al, 2008, Pallarès, 2009, Boomen, Kampf et al, 2012a, Hoorn en Elst, 2011 en Hoorn, Elst et al, 2012). Dit onderzoek heeft geleid tot een promotieonderzoek bij de Vrije Universiteit van Amsterdam en Technische Universiteit Delft.

In 2007 is in opdracht van de STOWA een visiedocument opgesteld waarin de bestaande en ontbrekende kennis rondom waterharmonica systemen is samengebracht. De ontbrekende informatie is geordend in onderzoeksvragen en deze zijn geprioriteerd voor beantwoording op korte en lange termijn. Dit heeft geresulteerd in een selectie van onderzoeksvragen. Deze vragen zijn in de periode 2008-2011 onderzocht en de resultaten zijn verwoord in de STOWA-rapporten 2012-10 en 2012-11 Onderzoek naar zwevend stof en pathogenen, hoofdrapport en deelstudierapporten (Boomen, Kampf et al, 2012c en Boomen, Kampf et al, 2012b).

In dit traject heeft tevens ondersteuning plaatsgevonden van een promotie onderzoek van de UvA, Waternet en STOWA naar “Suspended particle dynamics in wetland systems: driving factors on concentration and composition”. Verder is het KRW Innovatie project “Moeraszuiver afvalwater”, omgedoopt tot WIPE (Waterharmonica, Improving Purification Effectiveness) afgerond (Foekema, Oost et al, 2011 en Foekema, Roex et al, 2012), waarin de risico's en effecten zijn onderzocht van milieuvreemde stoffen in Waterharmonica's.

Het navolgende is gebaseerd op deze onderzoeken plus informatie beschikbaar gesteld door de waterschappen in Nederland met een of meer Waterharmonica's.



5

WATERHARMONICA'S IN NEDERLAND EN ELDERS

In Nederland zijn sinds 1985 verschillende moerassystemen als nazuivering aangelegd. De eerst Waterharmonica, met een oppervlakte van 15 ha en ingeplant met riet, lag bij Elburg. Deze heeft jaren gefunctioneerd maar de verwijderingsrendementen voor nutriënten vielen tegen, vooral vanwege de toenmalig hoge ammoniumgehalten in het effluent van de RWZI en hydraulische kortsluitstromen.. Het is nu als natuurgebied ingericht. In 1994 is bij de RWZI Eversteekoog op Texel het eerste moerassysteem aangelegd naar het waterharmonica-concept bestaande uit een grote buffervijver waarna de waterstroom verdeeld wordt over negen parallelle sloten. Deze sloten zijn vooraan ondiep en met helofyten ingeplant en verderop dieper en begroeid met waterplanten. Het in een eindsloot verzamelde schone water stroomt vervolgens de polder in.

Na Eversteekoog volgden Waterharmonica's onder meer bij Tilburg-Noord en Klaterwater te Kaatsheuvel in 1997, het Land van Cuijk te Haps in 1999, Sint-Maartensdijk (2000), het Waterpark Groote Beerze te Hapert in 2001, Aqualân te Grou in 2006, Ootmarsum in 2010 en Sint-Oedenrode in 2011. De Waterharmonica's Soerendonk en Kristalbad (tussen Hengelo en Enschede) zijn in de loop van 2012 in gebruik genomen (zie ook www.waterharmonica.nl). In 2012 is na een lange voorbereidingsperiode de uitbreiding van de Waterharmonica Eversteekoog gereed gekomen. Op foto 3 is een impressie gegeven van de uitgevoerde of in uitvoering zijnde systemen. Elburg is weliswaar in 1994 buiten gebruik genomen, maar is het zeker gezien de uitgebreide rapportages en de motiveringen over het buiten gebruik stellen waard

om beschouwd te worden (Butijn, 1990, Butijn, 1994 en Hut en Veen, 2004). Tilburg-Noord is 19 ha groot (bruto ruim 20 ha) en in gebruik gesteld in 1997. Het is ondanks de grootte een tamelijk anonieme, onopvallende Waterharmonica (Jouwera, 1994) geweest. Vanwege de grote hoeveelheid beschikbare informatie over Empuriabrava (Costa Brava, noordoost Spanje), is deze Waterharmonica als referentie systeem ook in dit rapport opgenomen (Sala, Serra et al, 2004, Pallarès, 2009 en Sala en Kampf, 2011).

FOTO 3

IMPRESSIE WATERHARMONICA'S



Op foto 4 zijn de locaties van Waterharmonica's in Nederland weergegeven. Meer foto's van Waterharmonica's kunnen gevonden worden op <http://www.flickr.com/photos/waterharmonica/>

FOTO 4

WATERHARMONICA SYSTEMEN IN NEDERLAND (KAART GOOGLE EARTH)



Daarnaast zijn diverse plannen voor Waterharmonica's in ontwikkeling. Voor Biest-Houtakker zijn de plannen zeer concreet (De Dommel, 2010a en De Dommel, 2011b). Verder zijn plannen in ontwikkeling voor o.a. Amstelveen, Garmerwolde, Marum, Haarlo en Dinxperlo, Ameland, Wetterlânren, Bergumermeer, Berkenwoude, Kerkwerpe en de Diezemonning. De status van de geplande Waterharmonica's varieert van "dagdromen" tot ver uitgewerkte plannen. Het betreft ook plannen die door diverse oorzaken (nog) niet zijn uitgevoerd. Ter illustratie, voor de RWZI Apeldoorn zijn in een workshop plannen voor een Waterharmonica in een "groen-blauwe" wig uitgewerkt (NN, 2004 en Veluwe, 2005) en de geplande Waterharmonica van Wervershoof is niet doorggegaan, ondanks dat het bestuur van het hoogheemraadschap de benodigde gelden had gereserveerd (Graansma en Schobben, 2002 en Durand-Huiring, 2005). Een mogelijke Waterharmonica in

Raalte (Otte, Blom et al, 2009) is (nog) niet uitgevoerd vanwege de huidige financiële situatie. In (Haijkens, 2004) is een inventarisatie gepresenteerd van RWZI's in Noord-Nederland en waar Waterharmonica's toegepast zouden kunnen worden, zie ook (Wijngaard, 2003). Zie in deze context ook de verkenning van mogelijke Waterharmonica's Friesland (Kampf en Boomen, 2013).

Elke Waterharmonica is met een specifiek doel aangelegd of ontworpen. Tabel 1 geeft voor de Waterharmonica's de belangrijkste doelen of redenen van aanleg. In de tabel zijn niet alleen de gerealiseerde Waterharmonica's opgenomen, maar ook die gepland waren of zijn, met de voornaamste verwijzingen naar literatuurbronnen. Zie www.waterharmonica.nl voor nadere informatie, www.helpdeskwater.nl is geraadpleegd voor beleidsplannen van de waterbeheerders.

TABEL 1 OVERZICHT WATERHARMONICA'S
NR. 0 IS UIT GEBRUIK GENOMEN, WEGENS HOGE NATUURWAARDEN NIET MEER IN WERKING GESTELD
NRS. 1 T/M 14 GEREALISEERD (IN VOLGORDE VAN INGEBUIKSTELLING), A T/M R DIVERSE STADIA
VAN PLANVORMING (ALFABETISCH)

nr	naam	voornaamste reden(en) aanleg
0	Elburg	1978: verlaging nutriëntengehalte in effluent RWZI, uit gebruik genomen (Butijn, 1990 en Butijn, 1994). Niet meer in gebruik genomen wegens "hoge natuurwaarden" (Hut en Veen, 2004)
1	Eversteekoo, Texel	1994: bron zoet water voor landbouw op het eiland (Kleiman, 2006, desinfectie wegens passeren woonwijk (Kampf, Schreijer et al, 1996), Uitbreiding en renovatie is eind 2012 gereed gekomen (VBK-groep, 2011, NN, 2012a)
2	Empuriabrava, Spanje	1995: leveren water voor natuurgebied / plaatselijke natuurwaarde creëren (Sala en Romero de Tejada, 2007)
3	Klaterwater te Kaatsheuvel	1997: produceren water voor de Efteling met laag gehalte nutriënten en pathogenen (Wel, 2005, Schomaker, 2010, Schomaker, 2011)
4	Tilburg-Noord	1997: Buffering effluent tijdens RWA om maximaal toegelaten effluent debiet niet te overschrijden wegens beperkte capaciteit van de beek de Zandleij, ecologiseren bij basisafvoer (Jouwera, 1994)
5	Land van Cuijk	1999: levering water aan landbouw/natuur en verminderen lozing op rijkswater (Eijer-de Jong, Willers et al, 2002, Boomen, 2004)
6	Sint Maartensdijk	2000: reductie nutriënten, inzicht in functioneren helofytenfilter, recreatie (Ton, 2000)
7	Waterpark Groote Beerze te Hapert	2001: beekherstel Groote Beerze, bevorderen natte natuur (Buskens, Luning et al, 1998, Haan en Horst, 2001)

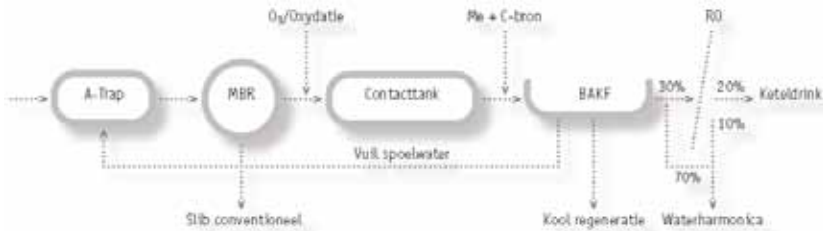
nr	naam	voornaamste reden(en) aanleg
8	Aqualân Grou	2006: ontwikkeling natuur en paaivijver, demonstratieproject (Claassen, Gerbens et al, 2006, Boomen, Kampf et al, 2012a en Claassen en Koopmans, 2012) en Urban Water Cycle Project (NN, 2009c en Provinsje Fryslân, 2007)
9	Ootmarsum	2010: "ecologiseren" effluent voor lozing op een kleine beek (Vente en Swart, 2008) en Urban Water Cycle Project (NN, 2009c en NN, 2009b)
10	Sint-Oedenrode	2011: Ecologische verbinding, "natuurlijk water", opgenomen in wandelroute, vogelreservaat met uitkijktoren (Smits, 2011 en Smits, Scheepens et al, 2011)
11	Kristalbad (Enschede/ Hengelo)	2012: regionale buffering water, recreatie groen bufferzone, ecologiseren, waterkwaliteitsverbetering (Regge en Dinkel, 2011b en Regge en Dinkel, 2011a) en KWR subsidie (Agentschap NL, 2011, NN, 2009a)
12	Soerendonk	2012: waterbuffer, recreatie, ontwikkeling natuur, paaivijver/ vismigratie (De Dommel, 2010b en Janssen, Zandt et al, 2010) en KWR subsidie (Agentschap NL, 2011 en NN, 2009a)
13	Tilburg Moerenburg	2011-2012: buffering "influent", inclusief natuurwaarden, recreatie, voorkomen van overstort (Boomen, 2007 en De Dommel, 2012a) en www.moerenburg.nl
14	Vollenhove	2012: "zuiverende oever" (Blom en Sollie, 2009)
a	Ameland	aanvulling grondwater in verdroogde duinen, lokstroom voor vispassage, natuurbouw, in voorbereiding (Kroes, 1997, Min, 2002 en Lange en Veenstra, 2007)
b	Amstelveen	leveren water aan stedelijk gebied, in voorbereiding (AGV, 2011 en Zanten, 2012)
c	Apeldoorn	haalbaarheidsstudie, kostenbatenanalyse, "Groen blauwe wig", planning en uitwerking, niet uitgevoerd (NN, 2004, Prakken, 2003 en Veluwe, 2005)
d	Arnhem	gebruik als stadswater, nog niet gerealiseerd (Arcadis, 2004)
e	Bergumermeer-Wetterlân	natuurlijk water, waterbuffer, KRW- subsidie (Projectgroep Wetterlân, 2011a en Projectgroep Wetterlân, 2011b en Agentschap NL, 2011, NN, 2009a)
f	Berkenwoude	nutriëntenverwijdering, maken "levend" water, buffering, in voorbereiding (HHSK, 2011 en HHSK, 2012)
g	Biest-Houtakker	"maken natuurlijk en levend" water, zwevend stofverwijdering tijdens RWA (bypass zandfilter), landschappelijke inrichting, in ontwerp (De Dommel, 2011b)
h	De Cocksdorp	Kwekelbaarsjessysteem: bestuurlijke goedkeuring, niet uitgevoerd (Kampf, 2002, Blankendaal, Foekema et al, 2003, Foekema en Kampf, 2002 en Jak, Foekema et al, 2000)
i	Dinxperlo	Watertuin en groenzone (Waterforum, 2012 en Oosterhuis en Schyns, 2013)
j	Dreumel	levering water aan toekomstig natuurgebied Over de Maas (Marsman, 2006)

nr	naam	voornaamste reden(en) aanleg
k	Garmerwolde	vermindering zwevend stoflozing, voorbereidend onderzoek (Hoorn, Elst et al, 2011 en Hoorn, Elst et al, 2012)
l	Geldermalsen	waterberging, visstand en migratie, recreatie, procedure na voorontwerp tijdelijk stilgelegd (Marsman, 2006 en Graaf en et al, 2010)
m	Gieten	Natuurlijk water, nutriënten verwijdering (Haijken, 2004)
n	Kerkwerpe	"Perpetuum Mobile", voorontwerp (Hoekstra, 2011)
o	Marum	levering water aan natuurgebied, in voorbereiding (Haijken, 2004 en Oranjewoud, 2010)
p	Raalte	haalbaarheidsstudie, Kostenbatenanalyse, natuurlijk water, uitgesteld (Otte, Blom et al, 2009)
q	Vlieland	hergebruik RWZI-effluent voor drinkwatervoorziening, natuur, grondwater, afgeraden maar wel weer in overweging (pers. med. Theo Claassen (IWACO, 1993), (Vlaski, Hoeijmakers et al, 2006)
r	Wervershoof	vijvers voor desinfectie, bestuurlijke goedkeuring, niet uitgevoerd (Graansma en Schobben, 2002 en Durand-Huizing, 2005)

De functionele doelen van een Waterharmonica zijn dus vaak verschillend en het ontwerp is dan ook steeds "maatwerk". Bij het ontwerp kan een keuze worden gemaakt uit verschillende componenten en ook de daadwerkelijke afmetingen en belasting bepalen de werking van het systeem. Ook krijgen niet alle bestaande systemen het hele debiet van de RWZI (zie tabel 2). Zo krijgen Aqualân Grou en Land van Cuijk ca. 25 % van het debiet van de hele RWZI. In beide gevallen was deze keuze ingegeven doordat er niet genoeg ruimte beschikbaar was. In Land van Cuijk was dit ook genoeg om de Laarakkerse Waterleiding van water te voorzien. Tilburg-Noord is in 1997 op de plaats van de voormalige vloeivelden als waterberging gerealiseerd omdat de afvoer-capaciteit van de Beek de Zandleij bij regen condities te klein is om het hele effluent af te voeren.

Een uiting aan de hergebruikskant van het water is de situering van een Waterharmonica als afnemer van water uit de Waterfabriek. Ter illustratie is een voorbeeld configuratie gepresenteerd uit de tweede NEWater workshop op 14 oktober 2009 (Roeleveld, Roorda et al, 2010) afbeelding 5.

AFBEELDING 5 **VOORBEELDCONFIGURATIE VAN DE WATERFABRIEK, GEMAAKT TIJDENS EEN NEWATER WORKSHOP (ROELEVELD, ROORDA ET AL, 2010)**



Waterharmonica systemen worden dus op diverse wijzen ingericht. Land van Cuijk Cuijk (Eijer-de Jong, Willers et al, 2002) en Grou (Claassen, Gerbens et al, 2006) zijn gebaseerd op Eversteekoo. Soerendonk is weer afgeleid van Grou (Sluis, Westerink et al, 2009).

Deze Waterharmonica's zijn alle opgebouwd zoals in afbeelding 3 is weergegeven, eerst een bezinkvijver/watervlooienvijver, dan rietsloten gevolgd door een dieper gedeelte met waterplanten:

- een bezinkvijver om slibuitspoeling bij RWA uit de RWZI op te kunnen vangen en (eventueel) na droogzetting eenvoudig te kunnen afvoeren. De vijver diende ook om het water over de verschillende sloten te verdelen. Hierbij moet rekening worden gehouden met wind met betrekking tot ongelijke verdeling en opwerveling van slib. In Eversteekoo werden grote aantallen watervlooien (tot ca. 300/l) gemeten. Hoge dichtheden bleven in stand door ontbreken van predatoren in het voorbezinkbassin (Schreijer, Kampf et al, 2000). Het gehalte aan algen, uitgedrukt in chlorofyl-A, was door de predatie door de watervlooien in Eversteekoo laag ($< 8 \mu\text{g/l}$). Deze waarnemingen waren aanleiding tot het begin van onderzoek naar de rol van watervlooien bij biologische filtratie van zwevend stof, inclusief pathogenen en algen (Kampf, Jak et al, 1999).
- ondiepe sloten met waterplanten. Onderzoek wees uit dat riet wegens een aanzienlijk groter oppervlakte voor biofilms is te verkiezen boven lisdodde (Schreijer, Kampf et al, 2000);
- een sloten/vijversysteem met ondergedoken waterplanten aan het einde van het Waterharmonica zorgt voor de opbouw van een min of meer compleet functionerend aquatisch ecosysteem. In Grou

en Soerendonk is dit laatste compartiment ingericht als een vispaaivijver die in open verbinding staat met het oppervlaktewater (Claassen, Gerbens et al, 2006 en Claassen en Koopmans, 2012). De gelijkenis van Empuriabrava in Spanje heeft geleid tot een intensieve samenwerking (Sala en Kampf, 2011). In plaats van vispaaivijvers, zoals in Grou en Soerendonk is het laatste gedeelte als een zeer vogelrijk dras weiland ontwikkeld. (Sala, Serra et al, 2004).

Het Waterpark Groote Beerze in Hapert heeft een vergelijkbare opbouw, maar met de aanwezigheid van een moerasbos.

Naast bovenvermelde gestructureerde Waterharmonica's zijn diverse low-budget uitvoeringen aangelegd. Ootmarsum heeft geen "vlooienvijver", maar wel riet en een vijver (Vente en Swart, 2008). Sint-Maartensdijk heeft een ondergronds doorstroomd rietbed, een zogenaamd "wortelfilter" (Ton, 2000). Een derde in 2012 gerealiseerde Waterharmonica is die van Vollenhove. Deze is net als Sint-Maartensdijk, Sint-Oedenrode en Elburg een "low-budget" Waterharmonica, waarbij getracht is om met eenvoudige middelen een Waterharmonica te verwezenlijken, zie foto 3.

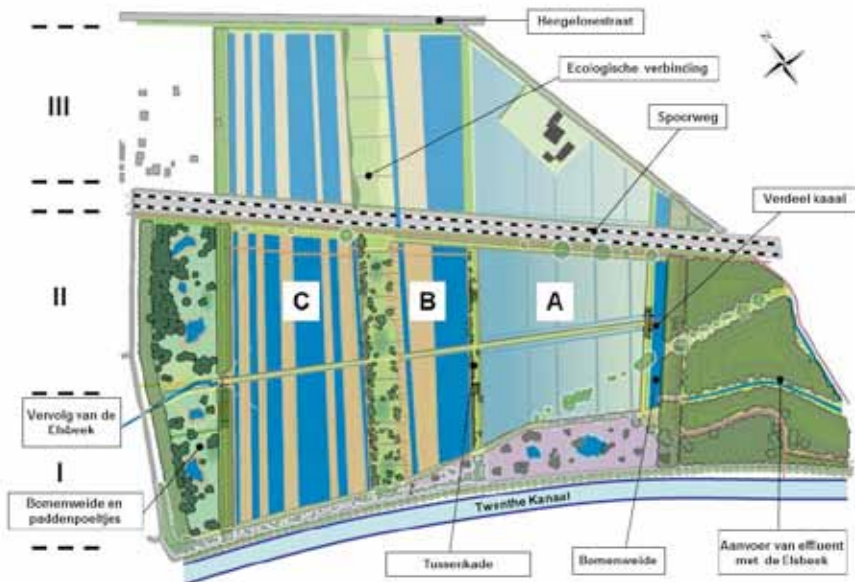
Klaterwater is afwijkend omdat deze wordt gevoed met effluent (ca. 10 % van het debiet) dat op de RWZI Kaatsheuvel reeds onderworpen is aan een continue zandfiltratie, met een vrij hoge Fe-dosering voor een zo goed mogelijke P-verwijdering. Dit wordt gevolgd door een verticaal rietfilter en een systeem van vijvers op de golfbaan (Smits, 2006) en in de Efteling (Schomaker, 2011). Ook in Land van Cuijk en Soerendonk wordt het effluent onderworpen aan een zandfiltratie voordat het naar de Waterharmonica geleid wordt. In Ootmarsum wordt de Waterharmonica gevoed met effluent van een hybride RWZI met een actief-slibinstallatie, een zandfilter en een membraanfilter. Bij regenwataeraanvoer wordt het effluent om het zandfilter heen geleid.

Dan bestaan er ook Waterharmonica systemen die zijn ontworpen voor de buffering van pieken in neerslag. De stad Tilburg heeft twee Waterharmonica's voor de buffering van RWA, hoge aanvoer van

regen/afvalwater tijdens regenperiodes. Achter de rwzi Tilburg-Noord is in 1997 een Waterharmonica aangelegd om bij RWA aanvoer het effluent te bufferen. Dit omdat door toegenomen effluent debieten het ontvangende watersysteem de lozing niet meer aankon. Door de opheffing van de RWZI Tilburg-Oost en het transport van het regen- en afvalwater naar Tilburg-Noord, zou deze belasting nog groter worden. Om dit te voorkomen is de oude rwzi Tilburg-Oost omgebouwd tot een grote natuurlijke buffer van ongezuiverd afvalwater (Moerenburg). De gezamenlijke bergingscapaciteit van Tilburg in Moerenburg en op Noord is ca. 300.000 m³. Opvallend is dat in ca. de helft van de tijd de kwaliteit in de Waterharmonica Moerenburg zo goed wordt, dat het voldoet aan de lozingseisen ter plaatse. Om onderscheid te maken en de plaats in de Watercyclus te verankeren, wordt het begrip *StormWaterharmonica* geïntroduceerd (Boomen, Kampf, 2013, in voorbereiding).

SCHEMA 1

SCHEMATISCHE WEERGAVE KRISTALBAD



Recent is Kristalbad aangelegd (2012), zie schema 1. Deze Waterharmonica kan tevens piekaanvoeren opvangen en is in ontwerp een “omgedraaide” Empuriabrava: een drasland is de eerste stap in de Waterharmonica, gevolgd door een afwisseling van vijvers en riet, de “streepjescode van het Kristalbad” (Tubantia, 2011 en Regge en Dinkel, 2011b).

Het effluent van de rwzi Enschede stroomt langs het voetbalstadion van FC Twente en de ijsbaan naar het verdeelkanaal van waaruit het wordt verdeeld in drie stromen. In de toevoer naar elke overstromingsvlakte (A I, II en III) is een afsluiter aangebracht, waardoor het mogelijk is om de lijnen afwisselend te belasten. De eerste lijn wordt gedurende 4 uur gevuld. In de daaropvolgende 8 uur loopt de betreffende overstromingsvlakte leeg en staat deze droog (of dras). Tijdens deze 8 uur worden na elkaar de tweede en derde lijn gevuld. Na een periode van 12 uur herhaalt de cyclus zich, behalve tijdens periodes met hoge aanvoer debieten, want dan stroomt het water via drempels van het verdeelkanaal naar de overstromingsvlakte of zal zelfs heel Kristalbad volstromen om als waterberging te functioneren. Vanaf de overstromingsvlakte (A) stroomt het water via het rietfilter (B) naar de wetlands (C). Uiteindelijk stroomt het water via de overstort naar de Elsbeek. Doordat Kristalbad gemiddeld vrij diep is, is de hydraulische verblijftijd (4 dagen bij gemiddelde afvoer) betrekkelijk lang. De verblijftijd loopt bij RWA terug naar 2,4 dag, maar dit gebeurt pas nadat de totale bergingscapaciteit van ruim 254.000 m³ gebruikt is. Als de basisaanvoer naar Kristalbad van 40.000 m³/dag toeneemt tot de maximale toevoer van 140.000 m³/dag, duurt het twee en een halve dag voordat de berging gevuld is.

Er is nog geen standaard welke van de componenten en in welke volgorde het beste achter elkaar geschakeld kunnen worden, het is nog steeds een leerproces. Enkele aspecten:

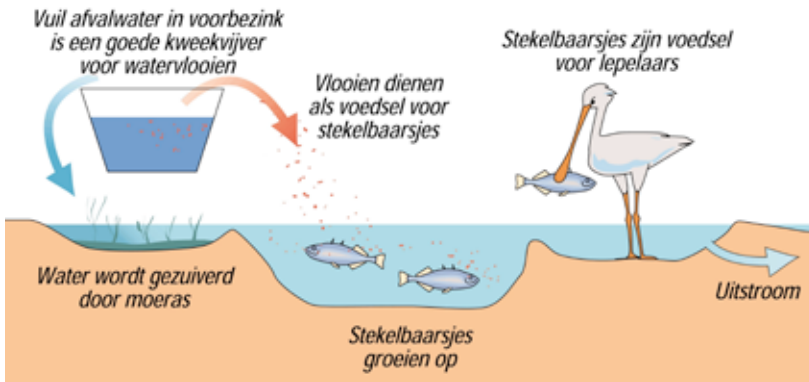
- Het is duidelijk dat actief-slibvlokken vooral door bezinking verwijderd worden en dat losse bacteriën een aantrekkelijke voedselbron vormen voor watervlooien (en ander zoöplankton), op zich weer het begin voor een actieve voedselketen in de Waterharmonica. Daarnaast zorgen deze grote aantallen watervlooien ervoor dat

er geen algenbloei optreedt en het water ondanks de voedselrijkdom zeer helder blijft (Kampf, Jak et al, 1999). Of een filtratiestap vóór de Waterharmonica (technisch, MBR, zandfiltratie) of in de Waterharmonica (natuurlijk of een zeer laag belaste zandfiltratie) in alle gevallen aantrekkelijk is, is nog onduidelijk. De filtratiestap kan in combinatie met chemicaliën wel leiden tot lage fosfaatgehalten, zoals in Klaterwater waar het water in de vijvers minder dan 0,1 mg P-totaal bevat). In Klaterwater is de pathogenen verwijdering in het verticale helofytenfilter (dat na het zandfilter komt) betrekkelijk gering. Ook “produceert” het helofytenfilter zwevend stof dat incidenteel uitspoelt (vergelijk het “ruien van oxidatiebedden”) (Boomen, Kampf et al, 2012b, deelstudie 4).

- De rietsloten zijn in de meeste systemen lijnvormige elementen die parallel aan elkaar zijn geschakeld om dode zones te voorkomen en propstroom te creëren. Deze zijn relatief ondiep (20-50 cm). De breedte van de sloten wordt bepaald door de reikwijdte van de machines voor onderhoud.
- Voor Kristalbad was dat door de grootte van het systeem geen optie. Daar is gekozen om het systeem zodanig te maken dat het in zijn geheel onderwater gezet kan worden en maaïen plaats kan vinden met maaiboten.

Voor de RWZI de Cocksdorp was in de herfst van 2000 het “kwekelbaarsjessysteem” in combinatie met de vispassage bij het gemaal gedacht. In de watervlooienvijver worden watervlooien gekweekt. De watervlooien zijn voedsel voor de met de vispassage binnengebrachte stekelbaarsjes. Vervolgens stroomt het water door een ondieper moeras systeem waar lepelaars zich tegoed kunnen doen aan de stekelbaarsjes. De uitstroom wordt vervolgens gebruikt als lokstroom voor de vispassage (zie afbeelding 6). Ondanks de grote publicitaire aandacht voor dit concept (Texelse Courant, 2001, De Volkskrant, 2002, Noord-Hollands Dagblad, 2002, Foekema en Kampf, 2002 en Kampf, Eenkhoorn et al, 2003), was de tijd er toen nog niet rijp voor, wellicht nu wel, maar dan wel elders.

AFBEELDING 6 DE WATERHARMONICA ALS “VOEDSELKETEN” BENADERING, VAN DEELTJES IN AFVALWATER, VIA WATERVLOOIEN EN STEKELBAARSJES NAAR LEPELAARS (DE VOLKSKRANT, 2002)



Verder zijn de voornemens van het Wetterskip Fryslân voor Waterharmonica's op de Waddeneilanden nog steeds concreet, vooral voor Ameland. De Waddeneilanden zijn één van de parels van Friesland. Het streven is een duurzame, gesloten waterketen op de eilanden te realiseren. Er wordt daarom met alle partijen een uitvoeringsprogramma opgesteld (Min, 2002 en Lange en Veenstra, 2007). In 2012 is voor het Wetterskip Fryslân een verkenning uitgevoerd naar de mogelijkheden van Waterharmonica's in de provincie Friesland (Kampf en Boomen, 2013). Hierbij zijn nut, noodzaak en mogelijkheden van Waterharmonica's vanuit twee richtingen beschouwd. Enerzijds vanuit de waterschapstaken van het Wetterskip, beheer van waterkwaliteit en waterkwantiteit. Aan de andere kant is gekeken vanuit het beschikbare landschap, ruimtelijke ordening, natuur en landschap. De uitkomst was tamelijk verrassend; er is op de langere termijn (2012-2027) mogelijkheid om achter vrijwel elke rwzi een Waterharmonica aan te leggen. Hiervoor is uiteraard een nauwe samenwerking met naburige landgebruikers, aanwonende, natuurbeheerders, gemeentes en andere overheden nodig. Zie ook hoofdstuk 10.

In tabel 2 zijn karakteristieken van Nederlandse Waterharmonica systemen die in 2011 in bedrijf waren (Elburg geweest) weergegeven (Boomen, Kampf et al, 2012b, deelstudie 4). De hydraulische belasting is gegeven voor de netto oppervlaktes die voor de “zuiverings” processen in de Waterharmonica zijn ingericht.

TABEL 2 ENKELE KARAKTERISTIEKEN VAN NEDERLANDSE WATERHARMONICA SYSTEMEN

Systeem	Oppervlakte (ha)		Debiet (m ³ /dag)	Netto hydraulische belasting (m/dag)	Verblijftijd (dag)	Deel van effluent (%)
	bruto	netto				
Aqualân te Grou	1,3	0,8	1.200	0,15 ^a	3,3 ^a	ca. 25 ^a
Elburg	18,9	15	10.000	0,07	15	100
Eversteekooij te Texel	2,7	1,3	3.500	0,27	2b	100
Klaterwater te Kaatsheuvel	Zie ad ^c	7,1	1.380	0,02	105	ca. 10 ^c
Kristalbad	40	21,5	35.750	0,18 ^d	4,6	100
Land van Cuijk te Haps	7,7	3,6	8.650	0,24	4	ca. 25
Ootmarsum	4,4	2,3	3.030	0,13	3,7	100
Sint Maartensdijk	4,8	1,0	2.400	0,24	1,5	100
Sint-Oedenrode	4,7	-	16.000	-	-	-
Soerendonk	6,6	2,8	5.000	0,18	4	100
Tilburg-Moerenburg ^e	7,5	5	0 - 54.500	ca. 1	2	n.v.t
Tilburg-Noord ^f	20	19,5	41.500-275.000	0,75-1,4	2-1,2	100
Vollenhove	1,2	1,0	1.500	0,15	4,3	100
Waterpark Groote Beerse te Hapert	5,2	3,8	7.200	0,19	2,8	100

a: Aqualân: vanaf 2012 is de belasting verminderd tot 480 m³/dag, daarbij is de verblijftijd ruim 8 dagen en wordt slechts 10 % van het effluent door de Waterharmonica geleid. Bij deze lage aanvoer is de belasting ca. 0,06 m/dag.

b: Eversteekooij: Tijdens onderzoek 1995-1999 verblijftijden tussen 1,6 en 11 dagen.

c: Klaterwater: ca. 10 % van effluent wordt afhankelijk van de waterbehoefte van de Efteling op de RWZI behandeld in zandfiltratie met vergaande P-verwijdering. Er is geen bruto oppervlakte opgegeven omdat Klaterwater een onderdeel vormt van het pretpark en de golfbaan.

d: Kristalbad: Tijdens RWA-buffering is het natte oppervlakte 28,5 ha, dan wordt 160.000 water gebufferd. Het duurt bij RWA bijna 2 dagen voordat de buffer vol is. Zie voor uitleg over Kristalbad de tekst.

e: Tilburg-Moerenburg. Dit systeem is een geïsoleerd watersysteem dat alleen tijdens RWA een bufferfunctie vervult. In het buffersysteem kan ca. 54.500 m³ tijdelijke worden opgeslagen.

f: Tilburg-Noord. De vermelde debieten en hydraulische belastingen zijn resp. tijdens DWA en RWA. Bij RWA stijgt het waterpeil namelijk met maximaal 1,6 tot een maximale waterberging van 240.000 m³.

Waterharmonica's in Nederland beslaan dus één of meerdere hectares. Kristalbad is de grootste, 40 ha in aanleg, doordat in de groene bufferzone tussen Hengelo en Enschede meer functies aan de geplande waterberging werden toegekend. De dieptes van de verschillende onderdelen zijn tussen de 0,2 en 2 m. Enkele Waterharmonica's worden gevoed met een deel van het effluent debiet (Grou, Land van Cuijk en Klaterwater), maar de meeste krijgen het gehele debiet van de RWZI (en dus ook RWA aanvoer). Tilburg-Noord en Kristalbad zijn specifiek ontworpen voor waterberging.

De meeste Waterharmonica's worden belast met een waterlaag van 10 tot 30 cm per dag en hebben een verblijftijd van twee tot vier dagen. Elburg werd met slechts 0,07 m per dag belast en had door de grote diepte een lange verblijftijd van vijftien dagen. Een uitzondering is de lage belasting van Klaterwater, waar een aantal grote vennen zijn nageschakeld. Tilburg-Noord, ontworpen als waterberging, wordt het hoogst belast. In hoofdstuk 9, Ontwerprichtlijnen, wordt nader ingegaan op de relatie van deze afmetingen en belasting met het bereiken van de doelen.

Om detailonderzoek mogelijk te maken, is bij meerdere Waterharmonica's mesocosm-onderzoek uitgevoerd. Onder deze gestructureerde omstandigheden werden bijvoorbeeld grotere afnamen in P en N bereikt. Deze mesocosms zijn geplaatst bij Eversteekoo, Horstermeer, Grou, Empuriabrava in Spanje (Kampf, 2009) en Garmerwolde (Hoorn, Elst et al, 2011 en Hoorn, Elst et al, 2012), zie foto 5.

FOTO 5

MESOCOSMS OPSTELLINGEN WATERHARMONICA ONDERZOEK, MET PERIODEN VAN ONDERZOEK



Eversteekoog 1998-2006



Horstermeer 2006-2010



Grou 2007-2010



Empuriabrava vanaf 2007



Garmerwolde vanaf 2010

De focus van dit rapport is gericht op Nederland. Er zijn echter diverse relaties met het buitenland. Het waterschap Regge en Dinkel heeft voor het ontwerp van Ootmarsum en Kristalbad ondersteuning gekregen vanuit Zweden (WRS Uppsala, Universiteit van Linköping) vanwege de ervaring met moerassystemen die veel kenmerken van Waterharmonica's vertonen (Andersson en Kallner, 2002, Andersson,

Ridderstolpe et al, 2010 en Flyckt, 2010). Die systemen zijn vergelijkbaar in grootte 1,6 - 28 ha en zijn al langere tijd in bedrijf (tot 20 jaar). Empuriabrava (Costa Brava, noordoost Spanje) is volgens Waterharmonica principes aangelegd, dit vormde de basis van een duurzame samenwerking met het watercyclus bedrijf Consorci de la Costa Brava en de Universiteit van Girona (Sala en Kampf, 2011). Tijdens een symposium in 2011 Zuid-Korea werden door Jung-Hoon experimentele en full-scale Waterharmonica's beschreven (Jung-Hoon, 2011). De afgelopen jaren is de Waterharmonica bij diverse EU-gelegenheden aan de orde geweest, zoals de Water reuse group van EUREAU. Tijdens een workshop van het EU-Neptune project in Varna in Bulgarije (Kampf, 2008a) bleek dat de Waterharmonica in oostelijk Europa een goedkoop alternatief kan zijn voor het verbeteren van de effluent kwaliteit van een minder goede RWZI. Voorbeelden zijn Põltsamaa in Estland (vijvers 1,2 ha en verblijftijd 10 dagen, voornaamste doel vermindering zwevend stof en BZV in het effluent) en Yulievsky, Oekraïne (goedkoop alternatief van uitbreiding slecht functionerende RWZI). Zie voor een overzicht van lezingen op internationale congressen en bijeenkomsten www.waterharmonica.nl/conferences.

Door de eenvoud is de Waterharmonica ook zeer bruikbaar voor toepassing in ontwikkelingslanden. Het blijkt een goede voorzetting van een traditionele eenvoudige benadering van afvalwaterzuivering, de oxidatiesloot (Pasveer, 1957 en Kampf, 2008b). Het Stowa rapport Waterharmonica in the developing world (Mels, Martijn et al, 2005) geeft een goed overzicht. In 2005 gaf Chanzi Hamidar een voordracht (Chanzi, 2005a en Chanzi, 2005b) over het potentieel voor toepassing in Tanzania als alternatief voor Ecosanitatatie: "als iemand rijk genoeg is om de WC met drinkwater te spoelen, laat ze dan betalen voor inzameling en zuivering van afvalwater met als doel om het water weer in een goede staat terug te geven aan de natuur of anderszins nuttig te gebruiken". Het waterschap De Dommel heeft samen met Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden en met ondersteuning van Aqua for All de suggesties uit het Stowa rapport voor Nicaragua overgenomen (Aqua for All, 2009 en De Dommel, 2011a).



6

HOE VERANDERT HET EFFLUENT?

Een belangrijke doelstelling van de Waterharmonica is de verandering van het water zowel in fysisch chemische als in ecologische zin. Om vast te stellen of en hoe dit plaatsvindt in een Waterharmonica, zijn in de afgelopen jaren diverse onderzoeken uitgevoerd, in binnen- en buitenland, van routinematige monitoring tot praktijkonderzoeken, maar ook tot enkele promotie onderzoeken: Sylvia Toet (Universiteit Utrecht), Ruud Kampf (Vrije Universiteit Amsterdam / Technische Universiteit Delft) en van Conxi Pau (Universiteit va Girona, Spanje). Daarnaast zijn ook aan de nieuwe Waterharmonica's monitoringprogramma's gekoppeld waaruit de komende jaren eveneens nieuwe kennis naar voren komt.

De nu bestaande kennis wordt onderstaand samengevat met aandacht voor:

- de verandering van zwevend stof;
- het functioneren onder piekbelasting;
- nutriënten;
- organische stof en zuurstofhuishouding;
- pathogenen;
- ecotoxicologie en milieuvreemde stoffen;
- ecologie.

ZWEVEND STOF VERANDERING (ZWEVEND STOF PARADOX)

Tijdens een bijeenkomst in 2007, vastgelegd in het Visiedocument Waterharmonica (Boomen, 2008), bleek dat zwevend stof het meest nijpende vraagstuk betrof. Dit had drie redenen:

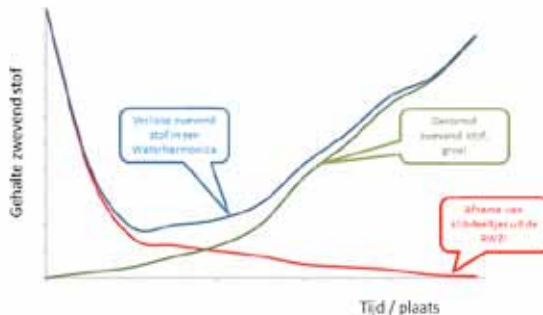
- 1 de bredere aandacht voor verwijdering van zwevend stof van effluent-filtratie technieken op RWZI's: kunnen Waterharmonica systemen dit beter, goedkoper, of leidt het tot een aanvullende verwijdering?
- 2 wat is het effect van slibuitspoeling van een RWZI onder RWA condities. Wordt de uitspoeling gebufferd?
- 3 desinfectie, en hoe kan dit geoptimaliseerd worden.

De kennis van de aard van het zwevend stof en de bruikbaarheid van gangbare analysemethoden (met een hoge detectie grens) levert onvoldoende informatie om deze vragen te beantwoorden. Dit heeft geleid tot zowel het Stowa onderzoek Waterharmonica, onderzoek naar zwevend stof en pathogenen (Boomen, Kampf et al, 2012c), als tot een vierde promotieonderzoek: Bram Mulling (Universiteit van Amsterdam).

Uit de verschillende onderzoeken is gebleken dat de totale hoeveelheid zwevend stof in een Waterharmonica meestal gelijk blijft of toeneemt. Dit komt door twee processen. In het begin neemt het zwevend stof uit de RWZI in de Waterharmonica af door bezinking, consumptie en afbraak. Gelijktijdig wordt er zwevend stof gevormd: algen en zoöplankton (watervlooien), macrofauna, etc. De watervlooien zorgen ervoor dat er geen overmatige algen groei optreedt.

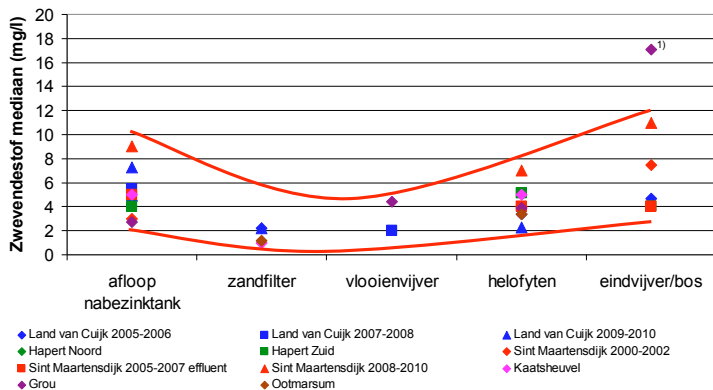
De totale hoeveelheid zwevend stof neemt als gevolg van deze processen mogelijk midden in een Waterharmonica af, maar aan het einde is de hoeveelheid mogelijk weer toegenomen. Dit is de zogenaamde zwevend stof paradox (Schreijer, Kampf et al, 2000 en Kampf, 2009). Afbeelding 7 geeft dit weer.

AFBEELDING 7 ZWEVEND STOF HYPOTHESE (KAMPF, 2009)



In afbeelding 8 zijn de resultaten weergegeven van metingen aan zwevend stof van verschillende Waterharmonica's in Nederland in de afgelopen jaren (Boomen, Kampf et al, 2012c). Hierin kan worden gezien dat de aanwezigheid van watervlooienvijvers, rietsloten of een zandfilter in het begin van de Waterharmonica de mediaanwaarden van het zwevend stof verlagen. Dit is maar beperkt en in de laatste onderdelen van de Waterharmonica's (waterplantenvijvers, moerasbos of paaivijvers) neemt de absolute hoeveelheid zwevend stof weer toe, maar is nog altijd laag.

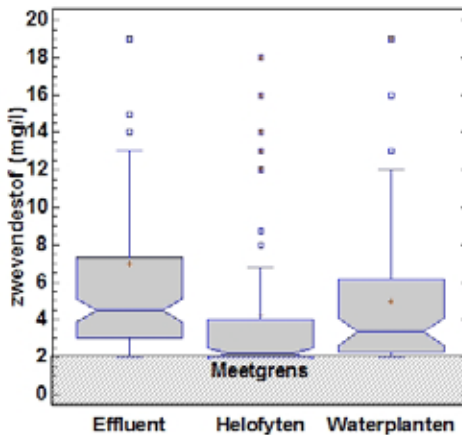
AFBEELDING 8 DE ZWEVEND STOF PARADOX GEMETEN; METINGEN VAN 11 SYSTEMEN IN NEDERLAND (MEDIAANWAARDEN) (BOOMEN, KAMPF ET AL, 2012B, DEELSTUDIE 4)



Ad ¹⁾ = meting in de paaivijver bij Aqualân te Grou. Deze komt sterk overeen met het oppervlaktewater van de Kromme Grou.

In afbeelding 9 is dit in meer detail geïllustreerd aan de hand van metingen aan het zwevend stof in de Waterharmonica bij Land van Cuijk over de periode 2005-2006 (Boomen, Kampf et al, 2012c). Er is een duidelijke afname van de hoeveelheid zwevend stof waar te nemen van de afloop van de nabezinktank tot na het helofytenfilter (gemiddelde waarde van 7,0 naar 4,2 mg/l). Na de waterplantenvijvers neemt het zwevend stof gehalte echter weer toe (gemiddelde waarde van 4,2 naar 5,0 mg/l). In de afgebeelde Box-whisker plot wordt de gemiddelde waarde aangegeven door het rode plusteken, de mediaan wordt aangegeven door de lijn door het midden van de inkepingen van de box.

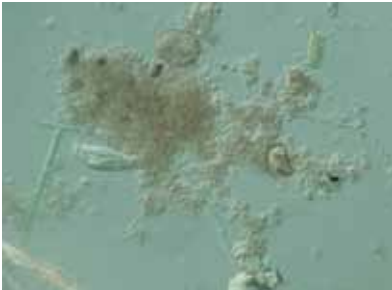
AFBEELDING 9 DE ZWEVEND STOF PARADOX GEMETEN; METINGEN VAN LAND VAN CUIJK 2005-2006 (BOOMEN, KAMPF ET AL, 2012B, DEELSTUDIE 4)



Ondanks dat de hoeveelheid zwevend stof in Waterharmonica's in absolute zin vaak niet afneemt, is de samenstelling wel sterk veranderd: het zwevend stof is veel natuurlijker geworden. Dit kan goed worden geïllustreerd door microscopische foto's van het water met zwevend stof. Op foto 6 is de verandering van zwevend stof afkomstig uit de nabezinktank van de RWZI Everstekeoog in Waterharmonica weergegeven. Deze verandering van deeltjessamenstelling werd bevestigd door onderzoek aan het systeem van Grou in 2010 (Boomen, Kampf et al, 2012a).

FOTO 6

**DE SAMENSTELLING VAN ZWEVEND STOF VERANDERT IN EEN WATERHARMONICA
(EVERSTEKOOG, FOTO'S ANNIE KRIEKE, WATERPROEF)**



**EFFLUENT RWZI MET ZWEVEND STOF
AFKOMSTIG VAN HET ACTIEF SLIB PROCES**

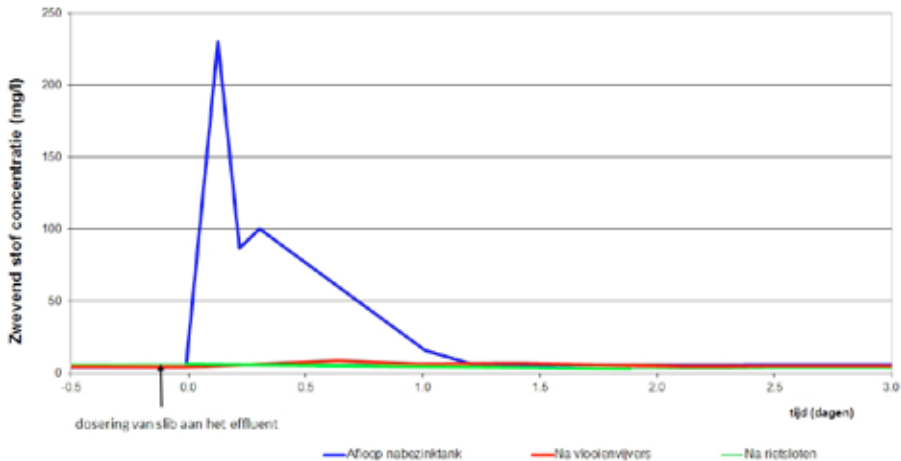


**MEER NATUURLIJK ZWEVEND STOF
AAN HET EINDE VAN DE WATERHARMONICA**

PIEKBELASTINGEN

Door de sterk wisselende aanvoer van water naar een RWZI is zowel het debiet als de kwaliteit van het effluent wisselend. Deze variaties worden in een Waterharmonica sterk gebufferd. Het grote voordeel is dat al met een eenvoudige Waterharmonica de kans op normoverschrijding sterk verkleind wordt. Het STOWA onderzoek "Waterharmonica, onderzoek naar zwevend stof en pathogenen" (Boomen, Kampf et al, 2012b, deelrapport 3), heeft aangetoond dat dit zowel geldt voor de piekbuffering van zwevend stof als de buffering van nutriënten en bacteriën. Zo wordt van het zwevend stof van een slibuitspoeling met waarden tot boven 200 mg/l, meer dan 90% gebufferd in de eerste vijvers. Ook de sterk verhoogde concentraties totaal fosfaat en totaal stikstof in de afloop van de nabezinktank tijdens de slibuitspoeling, werden met respectievelijk ruim 90% en 60-70% verminderd aan het eind van de rietsloten. In afbeelding 10 is het verloop van de concentraties zwevend stof tijdens en na een slibuitspoeling in de verschillende onderdelen van het Aqualân Grou gepresenteerd.

AFBEELDING 10 **VERLOOP CONCENTRATIE ZWEVEND STOF IN DE ACHTEREENVOLGENDE WATERHARMONICA COMPONENTEN VAN AQUALÂN GROU TIJDENS EEN KUNSTMATIG OPGEWEKTE SLIBUITSPOLING (NOVEMBER/DECEMBER 2009) (BOOMEN, KAMPF ET AL, 2012B, DEELRAPPORT 3)**



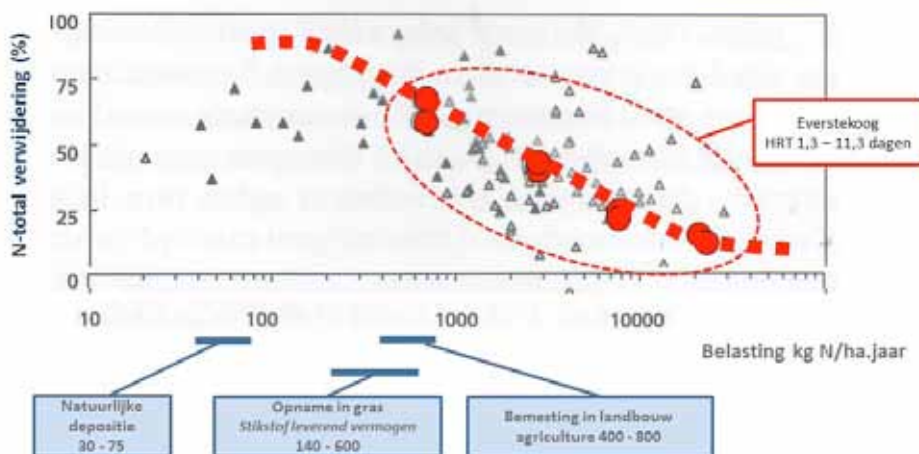
Deze afname van zwevend stof is gerelateerd aan de bezinking. Als het bufferen van een piekbelasting het doel is, dient daar bij de inrichting rekening mee te worden gehouden. Dat wil zeggen het plaatsen van een vijver vóór een rietsysteem waarbij de vijver op een eenvoudige manier kan worden geschoond. Het WIPE-onderzoek heeft aangetoond dat de afvlakking van pieken ook geldt voor micro-organismen en milieuvreemde stoffen, zonder dat het Waterharmonica systeem er noemenswaardig negatieve (ecotoxicologische) gevolgen van ondervindt (Foekema, Roex et al, 2012). Dit strookt ook met de waarnemingen in het Stowa-onderzoek naar biomassaweek (Blankendaal, Foekema et al, 2003).

In hoeverre de hoge slibverwijdering in een Waterharmonica kan leiden tot besparingen in de afmeting van bijvoorbeeld een nabezinktank, is nog onduidelijk. Mogelijke besparingen zijn wel aannemelijk want een groot gedeelte van het volume van de nabezinktank is bedoeld voor het afscheiden van grotere actief slib deeltjes onder RWA condities. De kleine deeltjes blijven onder DWA condities in de nabezinktank maar kunnen bij RWA condities uitspoelen. Bij een kleinere nabezinktank zal de Waterharmonica dus zowel grotere als kleinere deeltjes te verwerken krijgen. De meetresultaten tonen aan dat deze deeltjes prima in een Waterharmonica kunnen worden ingevangen (Boomen, Kampf et al, 2012b, deelrapport 3). De beheersbaarheid van het bezinkproces in de nabezinktank is wel van belang omdat het bezonken actief slib noodzakelijk is in het zuiveringsproces.

NUTRIËNTEN

De stikstof en fosfor kringloop in natuurlijke systemen is tamelijk gecompliceerd. In de RWZI wordt een aantal van deze processen geconditioneerd om nutriënten verwijdering te bereiken. Een Waterharmonica is eigenlijk meer natte natuur (of natte landbouw). Een vergelijking met een nat grasland is op zijn plaats. Daar geldt bijvoorbeeld een optimale bemesting van 400 kg N/ha.jaar waarbij 60-80% van de stikstofgift wordt omgezet in plantenmateriaal en de rest verdwijnt door denitrificatie en ammoniakontwijking (Hoeks en et al, 2008). In de bodem zelf zit niet meer dan 500 tot 1.200 kg N/ha. Het is dus goed om te beseffen dat landbouw niet zonder stikstofgift kan waarbij ammoniakontwijking en denitrificatie gezien wordt als verlies. In een Waterharmonica kan dus een deel worden vastgelegd in planten of verwijderd via ontwijking, maar de N-verwijdering is beperkt. Het kan dus geen kwaad om het lot van nutriënten in Waterharmonica's met een "landbouwbril" te bekijken en "landbouwkennis" over bemesting te gebruiken, zie voor meer achtergronden (Hoeks en et al, 2008). Verder vormt dus de vastlegging in planten (ca. 400 kg/ha/jaar) waarschijnlijk maar een deel van de verwijdering en zeker bij kortere verblijftijden (=hogere belasting) spelen denitrificatie en NH_3 -ontwijking een belangrijke rol. In onderstaande afbeelding 11 is dit aangegeven waarbij tevens enkele andere bronnen van stikstof zijn gepresenteerd. Met de rode stippen zijn de belasting van Eversteekoog zoals bovenstaand beschreven weergegeven.

AFBEELDING 11 N-TOTAAL VERWIJDERING BIJ VERBLIJFTIJDEN VAN 1,3 TOT 11,3 DAGEN IN EVERSTEKOOG INGE-
TEKEND IN GRAFIEK MET RESULTATEN VAN MOERASSYSTEMEN (KAMPF, 2005B, NAAR TOET, 2003)



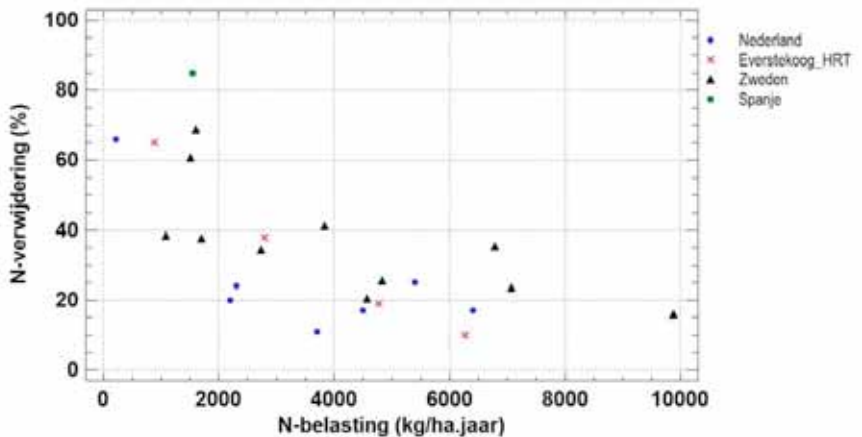
In tabel 3 zijn voor Nederlandse Waterharmonica's de verwijderde hoeveelheden en percentages, gerelateerd aan de belasting gepresenteerd.

TABEL 3 STIKSTOF EN TOTAAL-FOSFAAT VERWIJDERING IN ENKELE NEDERLANDSE WATERHARMONICA
SYSTEMEN

	belasting kg/ha.jaar	N-totaal verwijdering kg/ha.jaar	verwijdering %	belasting kg/ha.jaar	P-totaal verwijdering kg/ha.jaar	verwijdering %
Aqualân/Grou	2.200	430	20	340	130	38
Eversteekooig	5.400	1.375	25	790	59	8
Hapert	3.700	415	11	250	-21	-8
Klaterwater/Kaatsheuvel	220	145	66	57	56	99
Land van Cuijk	6.400	1.070	17	750	16	2
Ootmarsum	2.300	560	24	649	58	9
Sint Maartensdijk	4.500	790	17	710	-272	-38

In de afbeeldingen 12 en 13 zijn de “percentuele” N en P verwijderingen uitgezet tegen de N en P verwijderingen in kg/ha.jaar, van Nederlandse en Zweedse Waterharmonica's, plus Empuriabrava in Catalonië, Spanje.

AFBEELDING 12 STIKSTOFBELASTING (N_LOAD IN KG N-TOTAAL/HA.JAAR) VERSUS HET N-TOTAAL-VERWIJDERINGSPERCENTAGE (N-REMOVAL IN %), NEDERLANDSE, ZWEEDSE EN EEN SPAANSE WATERHARMONICA'S

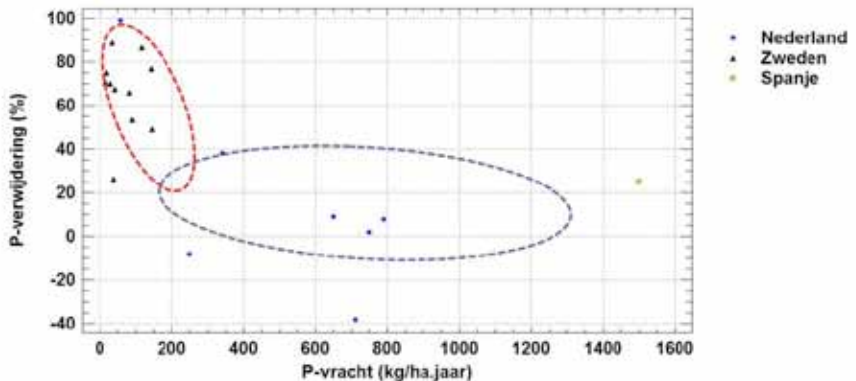


Er is een duidelijke afname van de verwijderingsrendementen te zien bij een toename van de belasting. De totaal stikstof verwijdering in de meeste Waterharmonica systemen in Nederland ligt in de range van 10-25%. (blauwe punten), duidelijk beneden de resultaten van de Zweedse systemen (zwarte driehoeken). De rode kruisjes geven de stikstofreductie aan in Eversteekoo tijdens het onderzoeksfase met water verblijftijden tussen 0,3 en ruim 11 dagen (belastingen van 1,4; 0,37, 0,12 en 0,04 m/dag).

In Zweden worden bij enkele Waterharmonica systemen stikstofverwijderingsrendementen gemeten van 25-50%, met lagere debieten en hogere concentraties (Andersson en Kallner, 2002 en Flyckt, 2010). Een kenmerkend punt in de afbeelding zijn de resultaten van Klaterwater in de Efteling (links boven in de grafiek). Het verticale zandfilter van

de RWZI Kaatsheuvel draagt bij aan een relatief hoge verwijdering van ca. 66%. De resultaten van het onderzoek in Eversteekooog toont een duidelijke invloed van de N-belasting op de procentuele verwijdering: bij de lange verblijftijden en daardoor lage N-belastingen liep de verwijdering op naar boven de 60 % waarbij N-totaal terug liep van 5 naar 1,7 mg/l. De Waterharmonica van Empuriabrava is met 80-90 % veel effectiever in terughouding van stikstof dan de Nederlandse systemen, bijvoorbeeld 82 % verwijdering bij een belasting van 1.550 kg N/ha.jaar (Sala en Kampf, 2011). Het is nog niet bekend waar deze verschillen door veroorzaakt worden. Zie voor verdere achtergronden en overeenkomsten tussen de Zweedse en Nederlandse situatie (Kampf, 2012).

AFBEELDING 13 DE FOSFORBELASTING (P_LOAD IN KG P-TOTAAL/HA.JAAR) VERSUS HET P-TOTAAL-VERWIJDERINGSPERCENTAGE (P_REM_PERC IN %) , NEDERLANDSE, ZWEEDESE EN EEN SPAANSE WATERHARMONICA'S

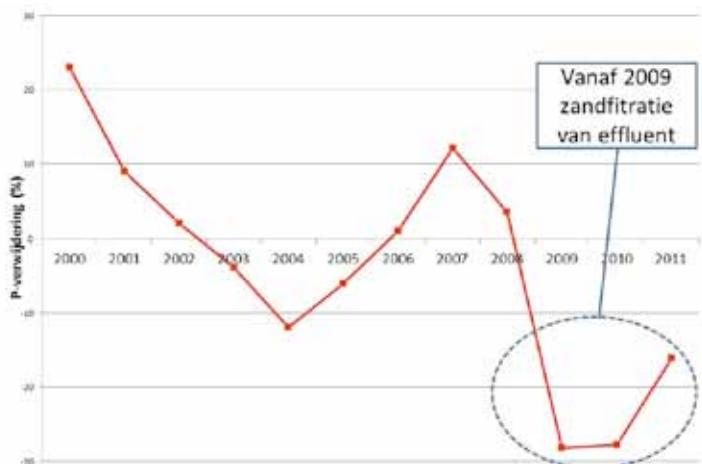


De resultaten voor fosfaatverwijdering zijn voor de Nederlandse (blauwe ellips) en Zweedse (rode ellips) Waterharmonica's ook sterk verschillend, zie afbeelding 13. In de Nederlandse systemen worden lage totaal-fosfaat verwijderingen gemeten in de range van -40 tot +40%. Totaal-fosfaat verwijdering vindt al grotendeels plaats in de eerste bezinkvijvers (Boomen en Kampf, 2012a, deelstudierapport 3). Daarnaast kennen de Nederlandse systemen een veel hogere P-belasting. In Klaterwater leidt de combinatie van een zandfilter (Astra filter met een vrij hoge dosering), een verticaal doorstroomd rietbed en daarna

vijvers, echter tot totaal fosfaat gehalten van 0,01 tot 0,02 mg/l en een rendement van 99%. In Zweden wordt een verwijdering bereikt tot waarden van 0,10 en zelfs 0,06 mg P/l bij lagere debieten en hogere concentraties (Flyckt, 2010). De fosforvastlegging in Empuriabrava is meer variabel. In 2010 was de verwijdering 25 % van de aanvoer van ruim 1.500 kg P/ha.jaar Sala en Kampf, 2011).

De variatie van P-verwijdering in de Nederlandse systemen komt ook doordat de met het effluent van de RWZI aangevoerde P-verbindingen nogal losjes gebonden blijken te zijn. In de onderzoeksperiode met verblijftijden tussen 1,6 en 11 dagen in Eversteekooog, nam het ortho-fosfaatgehalte in de winter af van 0,9 naar 0,3 mg/l, een reductie van 0,6 mg/l, terwijl in de zomer een toename van 1,3 naar 2 mg/l werd waargenomen. Dit werd bevestigd in Grou. Het duidt op P-release uit de bodem gedurende de zomermaanden (Boomen, Kampf et al, 2012a). Tijdens het Waterharmonica symposium op 29 maart 2012 (Uijterlinde, 2012) beschreef Wim van der Hulst van waterschap Aa en Maas de sterk wisselende ervaringen met P-verwijdering in Land van Cuijk, zie afbeelding 14. De P-verwijdering van 20 % kort na de aanleg hield niet aan, ging zelfs over in een P nalevering maar uiteindelijk weer een P verwijdering. Nadat vanaf 2009 het effluent van de rwzi via een zandfiltratie (met defosfatering) liep, nam de P verwijdering in de Waterharmonica weer sterk af naar een situatie van nalevering. Dit lijkt nu weer te verschuiven richting een extra P verwijdering in de Waterharmonica. Mogelijk wordt er overigens veel meer slib met het effluent van de RWZI afgevoerd dan blijkt uit de meetgegevens. Dit slib hoopt zich op in de Waterharmonica en geeft fosfaat af.

AFBEELDING 14 **VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN FOSFOR IN DE ZOMER IN LAND VAN CUIJK**
(WIM VAN DER HULST, IN (UIJTERLINDE, 2012))



Uit de langjarige meetgegevens van de nutriënten concentraties in de Waterharmonica systemen in Nederland, komt naar voren dat niet alleen pieken in zwevend stof door Waterharmonica's sterk worden afgevlakt, maar ook pieken van nutriënten (Boomen en Kampf, 2012a, deelstudierapport 4). Zo is over een meetperiode van enkele jaren in Grou in de afvoer van de nabezinktank een maximale waarde van 7,3 mg P/l gemeten, terwijl de maximum waarde in de Waterharmonica slechts 1,7 mg/l is. Maar ook de variatie in de verhouding van NH_4 en NO_3 in afvoer van de nabezinktank over het etmaal wordt in de Waterharmonica sterk afgevlakt. Deze buffering vindt grotendeels al plaats in de vlooienvijvers (cq. voorbezinkvijvers) (Schreijer, Kampf et al, 2000).

Al in de rapportage van het onderzoek op RWZI Eversteekoog (Schreijer, Kampf et al, 2000) werd beschreven dat in Waterharmonica's nutriënten niet als een vervuiling maar als een voedselbron in de beoogde voedselketen gezien kan worden. Een probleem is wel dat de verhouding tussen de concentraties van stikstof en fosfaat niet gelijk is aan het "bemestingsadvies voor natuurlijke gebieden". Wel was uit het onderzoek in Eversteekoog gebleken dat bij een voldoende lage belas-

ting (of lange verblijftijd) er vergaande uitputting van nutriënten plaatsvindt. Het is goed om te beseffen dat:

- N-verwijdering vrijwel uitsluitend een combinatie is van opslag in planten en processen in biofilms op ondergedoken plantendelen en bodems;
- P-verwijdering is een combinatie van “landbouw” met biologisch en chemische binding. Deze binding is in veel gevallen niet permanent. Onder niet aerobe omstandigheden kunnen gevormde fosfaatverbindingen verbreken en kan fosfaat vrijkomen. Dit is vooral bij het gebruik van ijzerzouten (voor defosfatering in de RWZI). Bij gebruik van aluminiumzouten ontstaat veel minder nalevering uit de waterbodem (Blom en Maat, 2005 en Flyckt, 2010). Lage gehalten aan fosfaten kunnen ook bereikt worden door vastlegging in de bodem door toevoeging van ijzerzouten en calciumcarbonaat aan de bodem (verticaal doorstroomde helofytenfilters): Stowa onderzoek verwijdering fosfaat met helofytenfilters (Flyckt, 2010).

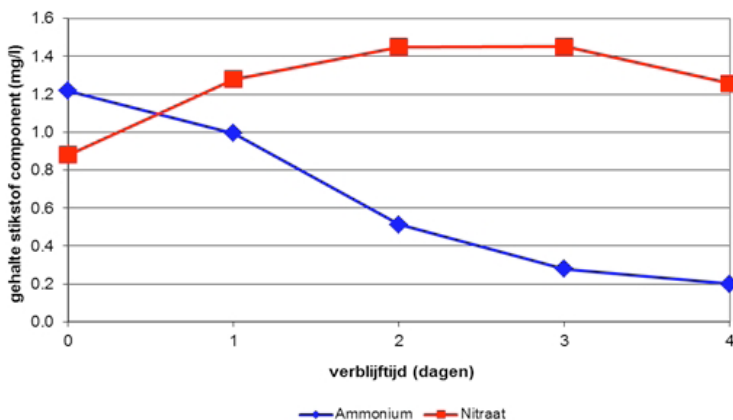
Kortweg samengevat, na enige optimalisatie kan in een Waterharmonica rond de 1.000 kg N/ha.jaar en ca. 750 kg P/ha.jaar verwijderd worden met een rendement dat afhankelijk is van de aangevoerde vracht en de concentratie. Bij laag en zeer laag belaste Waterharmonica's (dus een hydraulische belasting van minder dan 0,10 m/dag) zijn lage N- en P-gehalten mogelijk. Hiervoor is het wel nodig om in de rwzi lage gehalten aan N en P na streven. Dit hoeven geen extreem lage gehalten te zijn: met enige voorzichtigheid mag vastgesteld worden dat onder deze omstandigheden een N-gehalte van 2 – 3 mg/l mogelijk is. Het gehalte aan N-NO₃ zal hierbij vrijwel 0 zijn. Bij een belasting van 50 tot 400 kg P/ha.jaar kan 0,4 tot meer dan 1 mg P/l in een Waterharmonica vastgelegd worden, tot - zoals Klaterwater ook aantoon - lage gehalten van minder dan 0,1 mg P/l.

Zoals Klaterwater aantoon kunnen lage concentraties worden bereikt als de toevoer concentraties laag zijn. In het onderzoek naar natuurlijke zuiveringssystemen voor zuivering van drain- en slootwater dat in het kader van het Innovatieprogramma Kaderrichtlijn Water is uitgevoerd (Haan, Sival et al, 2011) zijn zuiveringsmoerassen voor verwijdering van nitraat uit drainwater en beekbegeleidende vloeivelden

voor nitraat en fosfaat op praktijkschaal onderzocht en uitgetest. Voor fosfaatverwijdering zijn ijzerfilters toegepast en om nitraatverwijdering te vergroten stro-filters. Deze nieuwe resultaten zijn weliswaar niet één op één op Waterharmonica's overdraagbaar, maar zijn wel bruikbaar als denkraam voor mogelijkheden voor verhoging van de nutriënten verwijdering.

Een verdere beschrijving van mogelijke optimalisatie stappen valt buiten deze rapportage, het onderzoek in de mesocosms van Grou, Horstermeer en Empuriabrava laat boeiende resultaten zien. Als voorbeeld, NH_4 -gehalten in Grou namen in de mesocosms met 90 % af, gemiddeld van 1,4 naar 0,2 mg N/l, terwijl de NO_3 concentratie toenam van 0,8 naar 1,3 mg/l. Hierdoor bedroeg de N-totaal verwijdering ca. 45%. Onder dezelfde omstandigheden verminderde PO_4 met bijna 50 %, van 1,1 naar 0,6 mg P/l. In de mesocosms elders werden overeenkomstige afnames gevonden. De precieze oorzaken zijn echter nog niet bekend en maken onderdeel uit van verder onderzoek van Ruud Kampf (afbeelding 15).

AFBEELDING 15 GEHALTEN AAN NH_4 EN NO_3 IN EEN SERIE VAN VIER MESOCOSMS IN GROU MET ELK ÉÉN DAG VERBLIJFTIJD

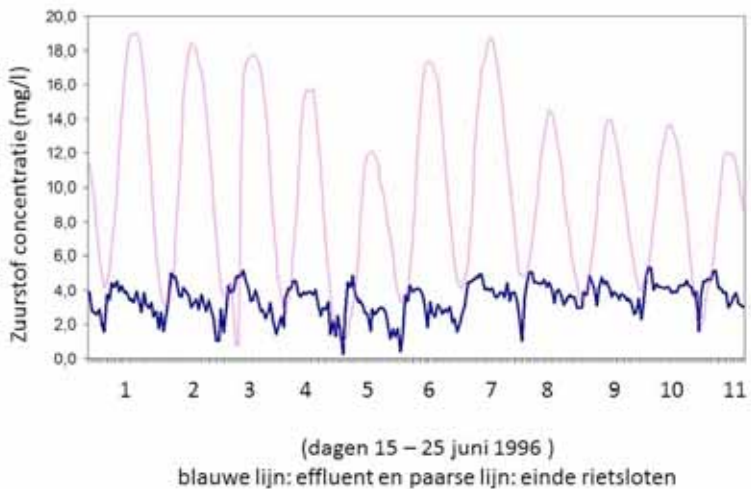


ORGANISCHE STOF EN ZUURSTOFHUISHOUDING

In Eversteekooog is uitgebreid onderzoek gedaan naar de zuurstofhuishouding in een semi-natuurlijk systeem als de Waterharmonica (Schreijer, Kampf et al, 2000). De voornaamste conclusies uit die studie waren:

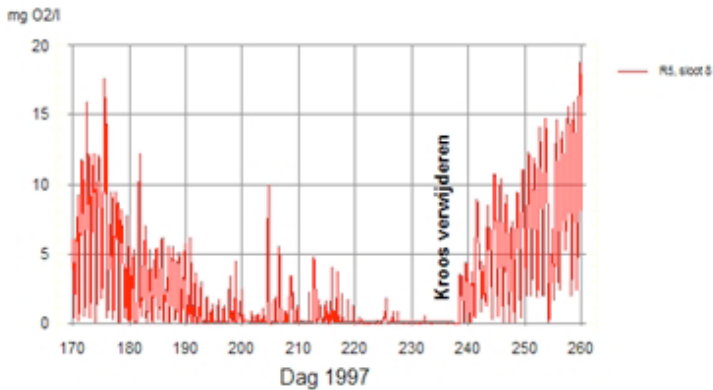
- het moerassysteem brengt in het zuurstofarme effluent een krachtig dag-nacht ritme van het zuurstofgehalte teweeg (zie afbeelding 16);
- vergroting van de verblijftijd heeft een reductie van de zuurstofvraag tot gevolg waardoor de minimale waarden eind van de nacht hoger bleven.

AFBEELDING 16 DE TOENAME VAN DE ZUURSTOFRITMIEK IN EVERSTEKOOOG, ZUURSTOFGEHALTES IN HET RWZI EFFLUENT (BLAUW) EN IN HET MOERASEFFLUENT (PAARS), PERIODE 15-25 JUNI 1996 (SCHREIJER, KAMPF ET AL 2000)



- de dagelijkse zuurstofritmiek is onafhankelijk van het seizoen maar de seizoenen hebben wel invloed hebben op de amplitude;
- de zuurstofproductie ijlt daarbij ca. 6 uur na op de lichtcyclus. Dit vindt ook bij bewolkte dagen plaats;
- bij overdekking met kroos komt de zuurstofritmiek tot stilstand maar bij verwijdering van het kroosdek komt de zuurstofproductie weer snel op gang (zie afbeelding 17).

AFBEELDING 17 **VERMINDERING VAN DE ZUURSTOFRITMIEK DOOR KROOSBEDEKKING EN HET SNELLE HERSTEL NA KROOSVERWIJDERING (3 ZOMERMAANDEN IN 2007) (SCHREIJER, KAMPF ET AL, 2000)**



Dit beeld is later bevestigd met metingen bij Land van Cuijk en Grou. Ook daar werden hoge reducties van zuurstofvragende stoffen (BZV) gemeten, werden de zeer lage zuurstofgehalten in het begin van de Waterharmonica verhoogd en ontstond een dag/nacht ritme (Boomen, Kampf et al, 2012c en Boomen, 2004).

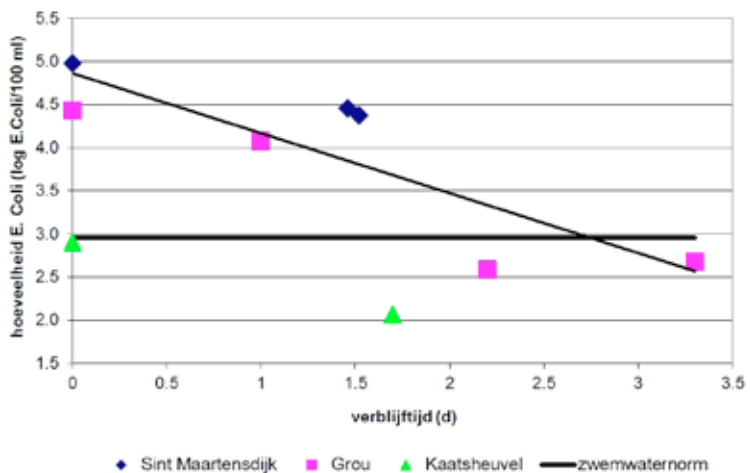
PATHOGENEN

In effluënten van RWZI's worden in Nederland E.Coli-aantallen, een indicator voor pathogenen, gemeten in van 50.000 tot 100.000 E.Coli/100 ml (Boomen, Kampf et al, 2012b). Er is in Nederland geen lozingsnormering voor pathogenen. Indien het wenselijk is de waarden voor E.Coli van het water van de aflat van de nabezinktank op de locatie van lozing naar de zwemwaternormering te brengen (=900 E.Coli/100 ml, formeel uitgedrukt in MPN = Most Probable Number overeenkomend met de eenheid KVE = kolonie vormende eenheden), dan is een afname met meer dan 98 procent noodzakelijk.

Een Waterharmonica resulteert in een sterke afname van de aanwezige pathogenen. Diverse onderzoeken hebben dit aangetoond. Zo werd in het onderzoek van 1995-1998 bij Eversteekooog reeds aangetoond dat een verwijdering met 99 tot 99,9% (2log tot 3log) van E.Coli goed mogelijk is. Na de eerste vijvers in Eversteekooog werd een E.Coli gemeten

van ca. 1.500 E.Coli/100 ml en na de rietsloten nog maar ca. 180 E.Coli/100 ml. Recent zijn de meetgegevens van E.Coli op de Waterharmonica's van Sint Maartensdijk, Grou en Kaatsheuvel naast elkaar gelegd (Boomen, Kampf et al, 2012c en Boomen, Kampf et al, 2012b, deelstudie 4). Ook uit de analyse van deze meerjarige meetreeksen komt naar voren dat de hoeveelheid pathogenen "logaritmisch" afneemt met de verblijftijd. In afbeelding 18 zijn de mediaanwaarden van deze metingen weergegeven waarbij de aantallen E.Coli/100 ml zijn uitgezet op een logaritmische as. Op deze wijze wordt geïllustreerd dat de afname op een logaritmische schaal lineair is.

AFBEELDING 18 DE INVLOED VAN DE HYDRAULISCHE VERBLIJFTIJD OP HET AANTAL E.COLI (MEDIAAN VAN AANTAL PER 100 ML) IN DRIE NEDERLANDSE WATERHARMONICA'S (BOOMEN, KAMPF ET AL, 2012C). DE ZWARTE HORIZONTALE LIJN GEEFT DE ZWEMWATER NORM AAN



De metingen van Kaatsheuvel laten een vergelijkbare afname zien als bij die van Grou en Sint Maartensdijk die echter lager start omdat de zandfilter van de RWZI Kaatsheuvel al de eerste reductie heeft bewerkstelligd. Uit deze metingen kan een lineaire relatie worden afgeleid van $\log E.Coli/100 \text{ ml} = -0,69 \cdot HRT + 4,9$ waarbij HRT de hydraulische verblijftijd is. In (Schreijer, Kampf et al, 2000) werd een verband afgeleid van $\log E.Coli = -0,65 \cdot HRT + C$. Een afbraaksnelheid van

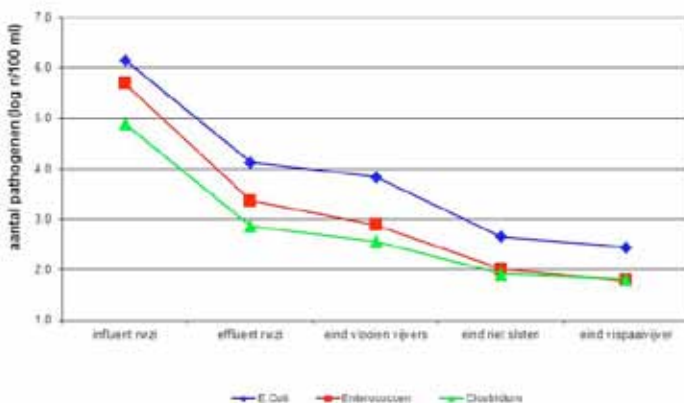
-0,65 tot -0,70 is niet uitzonderlijk voor afsterven van E.Coli in oppervlaktewater (Ruiter, 1978).

Indien het wenselijk is de waarden voor E.Coli van het water van de aflat van de nabezinktank op de locatie van lozing naar de zwem-waternormering te brengen, is een 1,75 log verwijdering noodzakelijk. Om deze reductie te bereiken is een minimale verblijftijd van 2,5 dag (bij DWA) in de Waterharmonica noodzakelijk. De zandfilter van Kaatsheuvel bereikt ook al deze waarden, al hoewel bij hoge doseringen aan chemicaliën voor P-verwijdering.

Verder is in onderzoek aangetoond dat voor de afname van de pathogenen zowel de bezink/vlooienvijvers als de rietsloten een belangrijke rol spelen. Afbeelding 19 laat de rol van zowel de vijvers als de rietsloten zien.

AFBEELDING 19

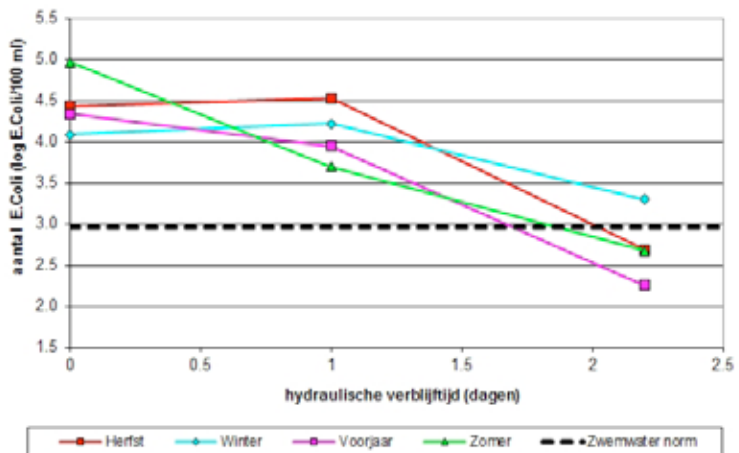
HET VERLOOP VAN DE PATHOGENEN VAN RESP. E.COLI, ENTEROCOCCEN EN *CLOSTRIDIUM PERFRINGENS* (AANTAL PER 100 ML) IN DE ACTIEF-SLIBINSTALLATIE EN DOOR HET AQUALÂN VAN DE RWZI GROU. DATA (12 METINGEN IN 2010, INFLUENT TWEE MAAL BEMONSTERD). DATA AFKOMSTIG UIT HET WIPE-ONDERZOEK, BEWERKT (FOEKEMA, ROEX ET AL, 2012)



De sturende processen daarin zijn waarschijnlijk de predatie door zoöplankton en (in mindere mate) de afsterving als gevolg van Uv-straling. De pathogenen lijken niet zozeer te bezinken: het zijn veel kleine losse cellen die niet zijn gebonden aan zwevend stof. Wel wordt een duidelijk verschil in zomer en winter signaleerd. Bij Eversteekooog werd

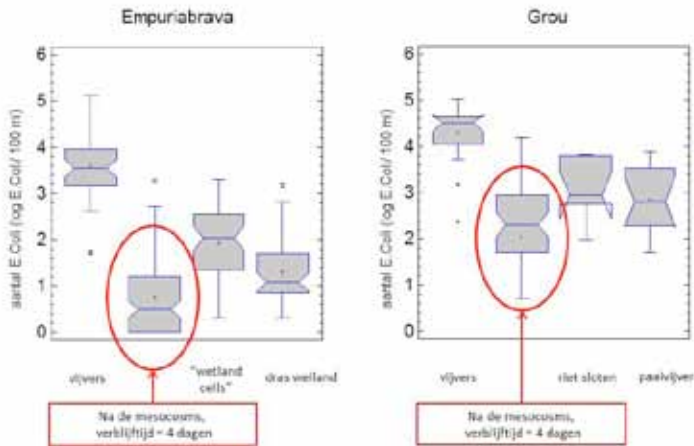
vastgesteld dat de afname in de winter aanzienlijk minder was dan in de andere seizoenen. Ook bij Grou is vastgesteld dat de afname in de zomer sterker is dan in de winter met een afbraaksnelheid van respectievelijk -1,04 en -0,36 (Boomen, Kampf et al, 2012c en Boomen, Kampf et al, 2012b, deelstudie 4). In afbeelding 20 is dit gepresenteerd. Uit de mesocosmos-studies blijkt dat bij voldoende aantallen watervlooiën de desinfectie in de winter bij temperaturen onder de 10 graden weinig lager is dan in de zomer (Kampf, 2005a). De afname van de E.Coli in de vlooienvijvers in het Aqualân Grou is met minder dan een halve log-waarde in 2010 gering. Dit komt door de te geringe verblijftijd in deze vijvers en de (daardoor mogelijke) lage aantallen watervlooiën in Grou. Zie ook afbeeldingen 20 en 21.

AFBEELDING 20 DE INVLOED VAN DE HYDRAULISCHE VERBLIJFTIJD OP HET VERLOOP VAN E.COLI-GEHALTE (AANTAL/100 ML) IN DE VERSCHILLENDE SEIZOENEN OP AQUALÂN GROU (BOOMEN, KAMPF ET AL, 2012C)



Ook hier toont het onderzoek in de mesocosms aan dat een verdere procesoptimalisatie mogelijk is, zie afbeelding 21.

AFBEELDING 21 DE AANTALLEN E.COLI (AANTAL/100 ML) IN DE MESOCOSMS (IN DE RODE CIRKELS) VAN EMPURIABRAVA EN GROU IN RELATIE TOT DE WATERHARMONICA COMPONENTEN (KAMPF EN SALA, 2009). ZIE VOOR NADERE INFORMATIE OVER DE BOX-WHISKER-PLOTS (BOOMEN, KAMPF ET AL, 2012B)



Waarom de resultaten voor pathogenen verwijdering in de mesocosms zoveel beter zijn is nog niet duidelijk. Mogelijke oorzaken zijn de hogere predatie door watervlooien en de meer ongestoorde flocculatie en bezinking van slibdeeltjes in de mesocosms, en minder kortsloot-sluitstromen. Ook is mogelijk de besmetting door vogels op de mesocosms minder dan in het veld. Nog lopend onderzoek aan de filtratie van gesuspendeerde zwevende stof door *Daphnia* (en andere Cladocera) toont inderdaad aan dat in de mesocosms van Empuriabrava *Daphnia* de waterkwaliteit verbetert door vooral de kleine, moeilijk te verwijderen deeltjes te consumeren. Het zijn veel belovende resultaten voor de inzet van *Daphnia* in watervlooien vijvers in Waterharmonica systemen (Pau, Serra et al, 2013).

In voorgaande is aangetoond dat de hydraulische verblijftijd een belangrijke invloed heeft (afbeelding 18) en dat kortslootstromen de gemiddelde verblijftijd verlagen. Deze is in het Aqualân immers effectief geen 5,6 dag zoals bedoeld in het ontwerp, maar slechts 3 dagen (Boomen, Kampf et al, 2012b, deelstudie 2). Ook in andere Waterharmonica's worden (mogelijke) preferente stromingen en dode

zones waargenomen die weinig bijdragen aan het zuiveringsresultaat, zoals in de drie “wetland cells” in Empuriabrava, links op foto 7. Het water stroomt hier tussen begroeide “eilanden met vegetatie” door. Ook in Ootmarsum lijkt de verblijftijd van het water hierdoor veel geringer te zijn dan in het ontwerp gepland was.

FOTO 7

DE WATERHARMONICA EMPURIABRAVA, SPANJE



De “biologische” desinfectie kan overigens zeker concurreren met “chemische” desinfectie. Als voorbeeld hiervan wordt een vergelijking tussen Eversteekooog en Wervershoof aangehaald (Kampf, Schreijer et al, 1997). Het betreft resultaten uit het zomerseizoen van 1996. E.Coli werd in Eversteekooog (HRT 2 dagen) in die zomer gemeten met gemiddeld 2.700/100 ml. Dit is duidelijk lager dan de 11.100/100 ml die in die zomer in Wervershoof is gemeten waarbij chemische desinfectie met chloorbleekloog werd gebruik. Ook de processtabiliteit na de Waterharmonica van Eversteekooog was beter (mediaanwaarden 220/100 ml respectievelijk 800/100 ml).

ECOTOXICOLOGIE EN MILIEUVREEMDE STOFFEN

Het afgevoerde water uit de nabezinktank van een RWZI kan verschillende bioaccumulerende of toxische stoffen bevatten. Deze kunnen het ecologisch functioneren van een Waterharmonica door ophoping

in de voedselketen beïnvloeden. Het is daarnaast van belang vast te stellen of er met deze stoffen iets gebeurt in een Waterharmonica zodat eventueel “schoner” water wordt afgevoerd.

In het systeem van Eversteekoog werd over de periode 1995-1998 al vastgesteld dat zware metalen in het Waterharmonica achter bleven door sedimentatie en mogelijk filtratie van het fijne zwevend stof door watervlooiën. In 2000 is verder vastgesteld dat de lozing van RWZI effluent op oppervlaktewater geen acute maar wel chronische toxische effecten kan hebben (Berbee, Naber et al, 2000 en Berbee, Maas et al, 2001). In het Stowa onderzoek van 2003 naar de ecotoxicologische effecten in relatie tot een biomassa kweek (Blankendaal, Foekema et al, 2003), is beschreven dat het effluent van de RWZI's een remmende werking op de algenontwikkeling kan hebben, maar niet op die van watervlooiën. Later is een negatieve relatie tussen het fosfaatgehalte van het effluent en de remming van de algengroei gevonden waardoor de negatieve relatie met de aanwezigheid van toxische stoffen minder sterk is geworden (Slijkerman, Dokkum et al, 2006). Wel werd enige bio-accumulatie gevonden. Deze accumulatie is bij overbelaste RWZI's hoog en minder overheersend bij lagere belastingen (Blankendaal, Foekema et al, 2003).

In het KRW innovatieproject WIPE (Foekema, Roex et al, 2012) is nog specifiek gekeken naar effecten en relaties met effluent kwaliteit in de Waterharmonica. Hierbij werd gebruik gemaakt van passieve samplers, (om stoffen in lage concentraties te kunnen analyseren), verschillende typen bio-assays, microbiologisch onderzoek en biologisch en biomarker (genexpressie) onderzoek aan chronisch op locaties blootgestelde vissen (stekelbaarzen). De onderzochte Waterharmonica's (Grou, Land van Cuijk en Hapert) bleken een gunstig effect te hebben op de toxicologische en bacteriologische kwaliteit van water uit de afloop van de nabezinktank. Er werden geen aanwijzingen gevonden voor risico voor acute toxiciteit.

Toch werd binnen een relatief korte periode in één van de Waterharmonica's hoge sterfte geconstateerd onder de blootgestelde stekelbaarzen. De oorzaak van deze sterfte kon niet worden achterhaald,

maar werd blijkbaar wel door de Waterharmonica weggenomen want aan het eind van de Waterharmonica was de overleving van de vissen normaal. In de rest van de blootstellingsperiode van ruim een jaar werd op geen van de posities verhoogde sterfte waargenomen, waarmee onderstreept wordt dat de hierboven beschreven sterfte een incident vormt. Er zijn ook geen misvormde stekelbaarsjes aangetroffen. Toch werden toxiciteitsniveaus overschreden waarbij, bij chronische blootstelling, wel effecten zouden kunnen ontstaan. In veel gevallen werd in deze perioden een verhoogd gehalte aan bestrijdingsmiddelen in het effluent aangetroffen. Bij passage door de Waterharmonica nam deze toxiciteit af, wat overeenkomt met een afname van het berekende milieurisico op basis van de concentraties van bestrijdingsmiddelen. Ook neemt de oestrogene (hormoonverstorende) activiteit van het effluent/sediment in de Waterharmonica af. Microbiologisch onderzoek toonde aan dat water/slib mengsels uit de harmonica's een sterke potentie hebben om oestrogene stoffen af te breken. Hoewel in de praktijk zuurstofgebrek waarschijnlijk de beperkende factor vormt om deze afbraak optimaal te laten verlopen, vertoonden de vissen minder indicaties voor hormoonverstoring naarmate zij meer richting het eind van de Waterharmonica waren blootgesteld. Waar indicaties voor hormoonverstoring werden aangetroffen, betrof dit individuele vissen. Het reproductiesucces van de blootgestelde groep werd hierdoor niet beïnvloed (Foekema, Roex et al, 2012).

Samenvattend kan worden gesteld dat het water uit de afloop van de nabezinktank van de RWZI doorgaans weinig toxische effecten zal veroorzaken, maar incidenteel een risico kan opleveren. In de loop van het Waterharmonica systeem treedt een vermindering van ecotoxicologisch risico op (Foekema, Roex et al, 2012). Dit komt ook door verlaging van het risico op hoge ammoniak gehalten in periodes van onvoldoende nitrificatie in de RWZI doordat deze pieken sterk worden gebufferd. Daarbij komt dat een Waterharmonica niet, in tegenstelling tot andere "vierde trapbehandelingen" waar toegevoegde chemicaliën en/of afbraakproducten zoals na ozondosering of UV-behandeling, wel het ecotoxicologisch risico verhoogt.

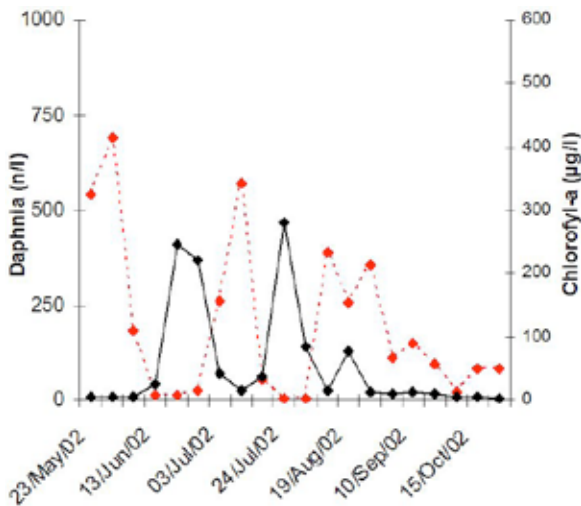
Deze bevindingen zijn in wezen niet verschillend van de resultaten van onderzoek in Empuriabrava (Matamores, Bayona et al, 2010).

ECOLOGIE

Over de ecologische waarde van een Waterharmonica is slechts gefragmenteerde informatie beschikbaar. Er is wel steeds aandacht voor geweest, vooral voor de lagere organismen zoals algen en watervlooien, maar in de monitoring en rapportage is dit niet structureel meegenomen. Zo is in de samenvatting van de rapportage van het onderzoek op Eversteekooog (Schreijer, Kampf et al, 2000) niet meer vermeld dan dat de Waterharmonica “een robuuste zuurstofritmiek voortbrengt met hoge oververzadiging overdag en een korte zuurstofarme periode ‘s nachts. De zuurstofritmiek sluit goed aan bij de situatie in het ontvangend oppervlaktewater”.

De hoeveelheid algen in een Waterharmonica, en dan vooral in de eerste vijver(s), is beperkt door de begrazing door watervlooien. Bij een proef op Eversteekooog kwam bij een vrij lange verblijftijd van 4,5 dag in een proefvijver twee maal een piek voor direct na het instorten van de watervlooiënpopulatie (afbeelding 22). In beide gevallen herstelde de populatie zich weer snel (Kampf, 2005c).

AFBEELDING 22 INVLOED VAN WATERVLOOIEN (RODE LIJN) OP VOORKOMEN VAN ALGEN IN PROEFVIJVERS IN EVERSTEKOOOG, UITGEDRUKT IN HET GEHALTE AAN CHLOROFYL-A (ZWARTE LIJN). DE VERBLIJFTIJD VAN 4,5 DAG IS VRIJ LANG VOOR ÉÉN VIJVER (KAMPF, 2005C)



In Eversteekoog (Schreijer, Kampf et al, 2000) waren de dominante waterplantsoorten in de sloten vooral Smalle Waterpest, Gedoornd Hoornblad, Eendenkroos, Schedefonteinkruid, Tenger Fonteynkruud, Bultkroos en Gekroesd Fonteynkruud. Op harde oppervlakken en op de bodem ontwikkelde zich een microbiële gemeenschap bestaande uit (meest eencellige) algen, bacteriën en schimmels, die samen met de daarin aanwezige organische stof en fauna wordt aangeduid als perifyton. In de helofytenvegetatie werd de perifyton op de bodem gedomineerd door diatomeeën en flagellaten ($<10\ \mu\text{m}$), met lage aantallen voor groenalgen en blauwalgen. Op de stengelbasis van de helofyten domineerden de diatomeeën, waarbij in het voorjaar groenalgen weer vanwege de hoge lichtinval belangrijker waren, en in het najaar de flagellaten gingen domineren. Een jaar na de aanleg van het filter waren grote aantallen watervlooien (tot ca. 300/l) in het zomerhalfjaar aanwezig in het voorbezinkbassin. Deze watervlooien behoorden voor 70% tot het geslacht *Daphnia* (*Daphnia magna* en *Daphnia pulex*). De hoge dichtheden bleven in stand door ontbreken van predatoren in het voorbezinkbassin. De macrofauna werd gedomineerd door muggenlarven, slakken en borstelwormen. Vis was tussen 1995 en 1998 niet of nauwelijks aanwezig maar later werden enkele stekelbaarzen in de sloten aangetroffen. In 1999 ontbrak vis nog steeds in het voorbezinkbassin. Proefbevissing door George Wintermans wees aantallen tot 15 per m^2 uit in de sloten met een verblijftijd van 3 dagen of meer. Bij de stuwen in Eversteekoog waren vaak handenvol met stekelbaarsjes aanwezig (foto 8).

Het duurt overigens zeker een jaar na aanleg voordat een Waterharmonica “biologisch stabiel” is. In Eversteekoog werden alle elektrodes in het systeem overdekt door eieren van waterwantsen (Schreijer, Kampf et al, 2000), in Grou was er het eerste jaar enorme flab en kroosgroei (Boomen, Kampf et al, 2012a), daarna veel minder.

FOTO 8

OP DE WATERHARMONICA EVERSTEKOOG WAREN VOORAL BIJ DE STUWEN TUSSEN DE VOORBEZINKVIJVER EN DE SLOTEN VAAK GROTE AANTALLEN TIENDOORNIGE STEKELBAARSJES AANWEZIG (FOTO: RUUD KAMPF)



In het Aqualân Grou zijn in 2008 – 2012 elk jaar visstand opnames uitgevoerd (Claassen en Koopmans, 2012). In de eerste jaren bleven de watervlooienvijvers vrij van vis, in de rietsloten werden alleen stekelbaarsjes aangetroffen. In de paai vijver van Grou is het aantal en de diversiteit aan vissen na aanleg sterk toegenomen waardoor deze paai-vijver een aantrekkelijke aanvulling van het Friese boezemsysteem is. In tabel 4 is het aantal en de soorten vis in de vispaai vijver van Grou geïllustreerd

TABEL 4 **OVERZICHT VAN DE GEVANGEN AANTALLEN EN DAARVAN HET PERCENTAGE BROED PER JAAR (JULI 2008, SEPTEMBER 2009, AUGUSTUS 2010, SEPTEMBER 2011, SEPTEMBER 2012) IN HET PAAIBIOTOOP (T5). (CLAASSEN EN KOOPMANS, 2012).**

DE (+)-WAARDEN IN DE N-KOLOM VAN 2011 BETREFFEN SOORTEN DIE WEL ZIJN AANGETROFFEN IN APRIL 2011, MAAR NIET IN SEPTEMBER 2011

	2008		2009		2010		2011		2012	
	n	% broed	n	% broed	n	% broed	n	% broed	n	% broed
Baars	9	22	102	81	112	76	126	81	32	56
Blankvoorn	54	67	75	56	41	54	116	57	73	5
Bittervoorn	-	-	14	14	7	29	18	100	1	100
Brasem	2	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Driedoornige stekelbaars	1	100	1	100	-	-	1	100	-	-
Giebel	2	100	-	-	-	-	1	100	-	-
Kleine modderkruiper	4	0	10	0	1	0	-	-	5	0
Kolblei	2	50	13	85	5	100	47	100	7	100
Paling	2	0	4	0	1	0	(+)	-	-	-
Pos	1	100	4	25	13	77	(+)	-	-	-
Riviergrondel	6	33	46	43	44	87	1	100	-	-
Ruisvoorn	6	0	3	100	24	88	6	17	3	33
Snoek	3	100	2	0	6	17	6	50	8	100
Tienddoornige stekelbaars	1	100	1	100	-	-	(+)	-	1	100
Vetje	-	-	1	100	-	-	-	-	2	100
Zeelt	5	40	4	100	2	50	3	67	4	50
Totaal	98	52	288	58	256	72	325	74	136	32
Aantal soorten/ Percentage soorten met broed	14		14		11		10		10	

Het visstand onderzoek in Grou toont aan dat een paaivijver aan het eind van een Waterharmonica, gekoppeld aan de boezem aanbeveling verdient. Het effect is tweeledig: lokale natuurontwikkeling in de vorm van een paaibiotop ("kraamkamer") en een bijdrage aan een meer evenwichtige visstand in het grote boezem systeem (Claassen en Koopmans, 2012).

Na enkele jaren kwamen echter ook in de watervlooienvijvers van Grou, die juist zo veel mogelijk visvrij werden gehouden, grote aantallen Tiendoornige stekelbaarsjes voor. Om hoge aantallen watervlooien (en ander zoöplankton) in de watervlooienvijvers te handhaven, is het noodzakelijk de vis te weren. Dit kan door een technische inrichting waarbij waterplanten geen kans krijgen (die voor de voortplanting van de Tiendoornige stekelbaarsjes belangrijk is), door biologische beheer van de visstand met afvissen en/of het uitzetten van jonge snoek (als predator op de stekelbaarsjes) óf door het incidenteel toelaten van hoge concentraties NH_4 op de vijvers (waardoor er een selectie ontstaat van de grote en sterke *Daphnia magna*).

In het Aqualân zitten opvallend veel kikkers (Boomen, Kampf et al, 2012a).

Alle Waterharmonica's zijn aantrekkelijk voor vogels. In Eversteekoog werden bijvoorbeeld de Kuifeend, Slobeend, Wilde eend, Krakeend, Knobbelzwaan, Stormmeeuw, Scholekster, Tureluur, Meerkoet, Waterhoen, Gele Kwikstaart en Kleine Karekiet als broedvogels aangetroffen (Schreijer, Kampf et al, 2000), Lepelaars en Ijsvogels werden door de stekelbaarsjes aangetrokken. Foto 9 is een collage van de Waterharmonica in Empuriabrava Spanje. De recente Waterharmonica's blijken een grote variatie aan vogels aan te trekken. De site www.waarneming.nl geeft een heel mooi overzicht. De waarnemingen voor de diverse Waterharmonica's kunnen geraadpleegd worden via Stichting Natuurinformatie, 2013: www.waterharmonica.nl/vogels. De tellingen tonen haarfijn de ornithologische aantrekkelijkheid aan van Waterharmonica's. De langste serie van waarnemingen is gedaan in Tilburg Noord. De grootste verscheidenheid is in Kristalbad, met in 2012 in totaal 141 soorten, waaronder Nonnetje, Witooogend, Grote Zilverreiger, Porceleinhoen, etc.

FOTO 9

FOTOCOLLAGE VOGELS IN EMPURIABRAVA, SPANJE (FOTO'S RUUD KAMPF)



Een veldonderzoek van de UvA in 2006 in het kader van studentenwerkweken (Kalshoven, Scheltes et al, 2006) aan de Waterharmonica van Eversteekooog heeft wel duidelijk aangetoond dat de biodiversiteit in de Waterharmonica sterk toeneemt. Dat komt goed tot uitdrukking in het aantal soorten, maar minder goed in biotische indices omdat die binnen deze waterkwaliteitsverbetering minder onderscheidend zijn. De verbetering van de biodiversiteit wordt gesignaleerd zowel in aantal soorten als in een verschuiving naar “soorten van schoner water”. Ook bij deze opnamen speelt de hydraulische verblijftijd een grote rol: pas na 3 dagen verblijftijd was het positief effect duidelijk. Onderzoek in 2008 in Grou (Brink en et al, 2008) heeft overeenkomstige bevindingen opgeleverd.

Ondanks dat er dus geen uitgebreide structurele monitoring van de ecologische waarde in Nederlandse Waterharmonica's heeft plaatsgevonden, komt uit de verschillende onderzoeken inclusief die in Spanje, een beeld naar voren van het ontstaan van natuur. Dit is dan vaak geen natuur om lyrisch van te worden (Boomen, 2004), maar het Waterharmonica draagt wel bij aan de biodiversiteit. Het Waterharmonica vervult daarmee een goede overgang van de Waterketen naar het Watersysteem.





7

WAT LEVERT EEN WATERHARMONICA NOG MEER OP BEHALVE NATUUR, RECREATIE EN WATERBUFFERING?

Een Waterharmonica heeft een zuiverende werking en kan het water uit de technische zuivering dus omzetten naar een meer natuurlijk water. Er is echter op meer vlakken winst te behalen door de aanleg van een Waterharmonica. Zo kan de cyclus van Waterketen en Watersysteem worden uitgelegd aan bestuurders, publiek en scholieren. Het waterschap kan haar rol daarin goed visualiseren. Deze educatie kan plaatsvinden met informatieborden (zoals bv. bij de RWZI Grou geplaatst, zie foto 10) of door het verzorgen van excursies aan groepen zoals veelvuldig op de RWZI Land van Cuijk plaatsvinden. In Grou zijn specifieke programma's ontwikkeld voor zowel een VMBO opleiding als dat stagiaires van het Van Hall instituut praktijk onderzoek verrichten.

Deze educatie kan goed worden gekoppeld aan recreatie. De gebieden lenen zich prima om door heen te wandelen. Bij Aqualân Grou zijn, net als in het Waterpark Groote Beerze in Hapert, Ootmarsum, Sint-Oedenrode, Soerendonk en Kristalbad wandelroutes in het Waterharmonica aangelegd. In alle gevallen is de Waterharmonica vrij toegankelijk, maar is RWZI voor het publiek ontoegankelijk. Direct contact met het water moet niet worden gestimuleerd omdat het

water hygiënisch mogelijk niet betrouwbaar is. Deze wat extensieve recreatie gaat overigens prima samen met natuurwaarden waardoor juist rustgebieden voor vogels gecreëerd kunnen worden. Zo wordt de natuurbeleving in Sint-Oedenrode en Kristalbad bevorderd door de bezoekers zicht te geven op het gebied vanuit uitkijktorens. De Waterharmonica resulteert naar verwachting niet in hoge natuurwaarde maar het helder watersysteem met een diversiteit aan planten trekt veel vogels en andere dieren. Ondanks bezorgdheid is er in de bestaande Waterharmonica's nooit muggenoverlastesignaleerd. Zie voor meer informatie over belevingsaspecten van de Waterharmonica's van Regge en Dinkel (Regge en Dinkel, 2011a) en De Dommel (De Dommel, 2012c, De Dommel, 2012b en Zanten, 2012).

FOTO 10

INFORMATIEBORD AQUALÂN TE GROU (FOTO RUUD KAMPF)



In het ontwerp van de Waterharmonica Biest-Houtakker (De Dommel, 2011b) geeft het waterschap De Dommel aan dat ze met deze RWZI juist gezien willen worden: *“Het ontwerp van de landschappelijke terreininrichting is zodanig dat de RWZI niet meer verstopt ligt zoals voorheen. Hij wil juist voor iedereen zichtbaar zijn. Trots op het fraaie gebouwencomplex en trots op de prestaties die hier worden geleverd”. “De Reusel is weer een prachtig beekje waarin het goed vissen is en waarlangs het heerlijk wandelen is”*.



8

WAT KOST EEN WATERHARMONICA?

Bij kosten moet onderscheid worden gemaakt in aanleg (investeringskosten) en beheer- en onderhoudskosten, (exploitatiekosten). Onderstaand wordt eerst op de investeringskosten ingegaan.

Een belangrijke randvoorwaarde bij de aanleg van een Waterharmonica is de beschikbaarheid van grond nabij de RWZI. Waar komt deze grond vandaan? Heeft het waterschap deze zelf in eigendom? Maar de grond kan ook door anderen, zoals natuurbeheerders en gemeenten worden ingebracht. De Waterharmonica hoeft namelijk niet op eigen grond te worden aangelegd en ook niet direct aansluitend aan de zuivering (zoals ook bij Klaterwater). Door combinaties van functies, bv. landschapsherinrichting of waterbuffering (Kristalbad), kunnen eveneens andere financiële bronnen worden aangewend en kunnen de extra kosten voor een Waterharmonica beperkt blijven.

Voornaamste kosten naast de eventuele grondkosten zijn de aanleg van de vijvers, rietsloten en kades met enkele verbindingswerken. Deze kunnen, op basis van de kosten van de aanleg van de eerder besproken Waterharmonica's, globaal worden geraamd voor meer complexe Waterharmonica's (zoals Everstekooog, Grou, Land van Cuijk en Soerendonk) op ca. € 175.000 per hectare (prijsspeil 2012). Bij eenvoudige systemen (zoals Sint Maartensdijk) kan het naar huidig prijspeil beperkt blijven tot ca. € 75.000 per hectare. Bijkomende specifieke kosten zoals het omleggen van persleidingen, de keuze voor een extra verticaal zandfilter of een verticaal helofytenfilter of de aanleg

van recreatieve voorzieningen, kunnen deze aanlegkosten verhogen tot 200.000-250.000 Euro per hectare. Dit is dan vaak gerelateerd aan de hoge eisen met betrekking tot nutriëntenverwijdering of pathogenenreductie. In tabel 5 zijn voor de voornaamste Waterharmonica's enkele karakteristieken weergegeven. Van Zweedse Waterharmonica's zijn gemiddelde aanlegkosten van ca. € 150.000 per hectare bekend.

TABEL 5 **INVESTERINGSKOSTEN VAN WATERHARMONICA SYSTEMEN IN NEDERLAND**

	prijspeil	Niet geïndexeerd		Geïndexeerd naar 2012		
		investering	index factor	per netto hectare	per bruto hectare	per i.e.
		€		€/ha	€/ha	€/i.e.
Elburg	1977	200.000	1,75	23.500	15.500	2,20
Eversteekoog	1994	245.000	1,33	251.500	121.000	11,65
Land van Cuijk	2000	600.000	1,17	179.500	91.000	10,30
Grou	2006	175.000	1,08	214.000	145.000	23,55
Hapert	2001	575.000	1,17	176.500	129.000	11,65
Klaterwater	1997	1.039.000	1,33	194.500	-	125,45
Kristalbad	2012	5.056.000	1.00	235.000	126.000	18,38
Maartensdijk	2000	53.000	1,17	62.000	13.000	3,20
Ootmarsum	2008	250.000	1,08	117.000	61.000	11,10
Raalte ¹	2009	2.400.000	-	-	-	-
Sint Oedenrode ²	2011	650.000	1.03	-	-	-
Soerendonk	2010	1.690.000	1.03	435.000	256.000	41,45
Tilburg-Moerenburg ³	2012	1.800.000	1	660.000	475.000	nvt
Tilburg-Noord	1996	400.000	1.33	22.000	25.000	1,42
Vollenhove	2012	100.000	1	100.000	83.000	6,30

- 1: Aanleg Raalte is opgeschort, geraamde kosten uit (Ott, Blom et al. 2009).
- 2: Sint Oedenrode is aangelegd als compensatie voor landschap aantasting, de kosten zijn inclusief aanleg van een uitzichttoren, een kunstwerk en een voetgangersbrug met stuwen.
- 3: Tilburg-Moerenburg is geen Waterharmonica voor nabehandeling van effluent, maar een "StormWaterharmonica" voor buffering en zuivering van RWA vóór de rwzi Tilburg-Noord. De weergegeven investering is alleen voor de uitbreiding van fase 2 (2,73 ha nat oppervlakte op 3,78 ha totaal).

De jaarlijkse exploitatie kosten bestaan vooral uit onderhoud, energie en monitoring. Aan de bovenstaand aangeduide Waterharmonica's wordt jaarlijks tussen de € 5.000 en € 25.000 elk besteed aan beheer en onderhoud en monitoring. Dit is afhankelijk van de monitorings-inspanning (van basis-monitoring tot onderzoeksgericht) en van de oppervlakte van de Waterharmonica. Per hectare Waterharmonica kost de basismonitoring gemiddeld ca. 7.500 €/ha.jaar met een bandbreedte tussen 3.000 €/ha.jaar (voor de systemen van meerdere hectares zoals Kristalbad) en 25.000 €/ha.jaar (voor kleinere systemen zoals Soerendonk en Grou). Voor Zweedse Waterharmonica systemen zijn bedragen voor beheer en onderhoud bekend tussen 1.000 en 7.000 €/ha.jaar.

Het onderhoud is vooral het jaarlijks of tweejaarlijks maaien van het riet en het verwijderen en afvoeren van waterplanten. Accumulatie van slib (en eventuele verontreinigingen) lijkt wel op te treden (Eversteekoo, Grou, Land van Cuijk) en het opvangen daarvan kan het beste plaatsvinden in goed bereikbare vijvers. De vegetatie ontwikkeling en de toekomstige belastingen op Kristalbad zijn nog onvoldoende uitgekristalliseerd om uitspraken te kunnen doen over de slibaanwas in het systeem. Een langjarig monitoringprogramma moet daarop in de toekomst een antwoord geven. Afgezien van eventuele pompkosten, zoals Grou en Klaterwater, verbruiken Waterharmonica's geen energie (Baltussen, 2011).

Ter vergelijking kan een indicatie worden gegeven van de kosten van een Waterharmonica met alternatieve zuiveringstechnieken zoals zandfilters, UV installaties etc. Onderstaand zijn indicatief gekapitaliseerde kosten weergegeven (van investering en beheer en onderhoud), gebaseerd op diverse Stowa rapportages (Jong, Kramer et al, 2008) uitgedrukt in euro per m³ behandeld afvalwater:

• RWZI, basis behandeling	ca. 1,00 €/m ³
• Ultrafiltratie	ca. 0,35 €/m ³
• UV-desinfectie (pathogenen)	ca. 0,20 €/m ³
• Coagulatie en (bio)filtratie (N en P)	ca. 0,20 €/m ³
• Langzaam Zandfilter (Leidsche Rijn)	ca. 0,10 €/m ³
• Waterharmonica	ca. 0,05 €/m ³

Al met al verhoogt een Waterharmonica de kosten van de zuivering van afvalwater (ca. € 1,- per m³ behandeld water) dus met € 0,05 per m³ behandeld water. Hierbij geldt een bandbreedte van 0,02 €/m³ tot 0,12 €/m³.

Tegenover deze kosten staan voor een Waterharmonica ook opbrengsten. Dit zijn maatschappelijke opbrengsten die technische oplossingen meestal niet hebben zoals het omzetten van dood water in levend water (vergroting biodiversiteit), het afvlakken van pieken in concentraties stoffen, een natuurlijke desinfectie zonder chemicaliën en energie behoefte en een recreatief gebied bruikbaar voor (natuur) educatie. Tevens zijn combinaties van functies mogelijk zoals waterberging, verdrogingsbestrijding, natuur, recreatie en biomassaproductie. Deze opbrengsten van Waterharmonica's blijken moeilijk te kwantificeren. Wat is de waarde van "levend water"? Wat is de waarde van de gevoelens van een recreant als hij een lepelaar ziet foerageren in óf een roerdomp ziet wegvliegen uit een Waterharmonica? Of van een visser die weet dat er veel verschillende vissoorten in een paaivijver aanwezig zijn? Het is iets waar al lang mee geworsteld wordt (Knight, Clarke et al, 2004 en Kampf, Eenkhoorn et al, 2003). Meestal is het alleen mogelijk om deze opbrengsten indirect te berekenen. Het belang van "man made nature" voor waterbeheerders blijkt uit de aandacht op de websites, bijvoorbeeld de Amsterdamse Waterleidingduinen van Waternet (Waternet, 2012). In Engeland besteedt bijvoorbeeld Anglian Water veel aandacht aan recreatief medegebruik van drinkwater reservoirs, het aantal bezoekers bedraagt ruim 2 miljoen per jaar (Anglian Water, 2012 en Anglian Water, 2011). Ook hier zijn de opbrengsten lastig in te schatten, maar een indruk geeft de herintroductie van Visarenden in Rutland Water in 2005: "it is estimated that £ 154,000 of visitor spending (in the local area is attributable to the presence of the ospreys." (Anglian Water, 2011). De mogelijke waarde van een grotere Waterharmonica wordt geïllustreerd door Parc du Marquenterre in de delta van de Somme aan de Franse kust. Dit gebied heeft een inrichting als een laag belaste Waterharmonica, mede gericht op natuur en recreatie, het aantal bezoekers per jaar overschrijdt de 150.000 ruimschoots, de toegangsprijs bedraagt € 10,50 per dag (NN, 2012b).

Recent is in een aantal publicaties getracht de opbrengst te benaderen vanuit “vermeden kosten”, kosten die niet gemaakt hoefden te worden, doordat activiteiten al in een project zijn opgenomen. Dit criterium kan geschat worden, redenerend vanuit de RWZI, maar ook vanuit het beheer van oppervlaktewater, maar ook natuurbeheer. Enkele impressies, zie ook (Kampf, 2012, Kampf en Boomen, 2012):

- gerekend vanuit de rwzi, per inwoner equivalent wordt per jaar circa 40 kg N en 2 kg P geloosd. Bij een zuiveringsheffing van € 80 per inwoner per jaar en een gelijke verdeling van kosten (over N en P) komt dat neer op € 1 en € 20 per kg verwijderde stikstof respectievelijk fosfor;
- als er door de aanleg van een Waterharmonica geen aanvullende technische pathogenen verwijdering (bijv. UV-desinfectie) nodig is, bedragen de vermeden kosten 0,20 €/m³;
- in het STOWA-onderzoek “Moerasbufferstroken langs watergangen; haalbaarheid en functionaliteit in Nederland” (Antheunisse, Hefting et al, 2008) wordt op grond van LNV-onderzoek (2006) aangegeven dat de “vermeden kosten” per kg verwijderde stikstof tussen de € 1,33 en € 2,20 bedraagt en voor fosfor € 8,50;
- in de “KRW-studie” Natuurlijke zuiveringssystemen (Haan et al, 2011) wordt geconcludeerd, dat de kosten per verwijderde kilo stikstof en fosfaat respectievelijk € 5 tot € 40 en € 115 bedragen;
- interessant om op te merken is dat in dezelfde rapportage voor retentie water een bedrag van vermeden kosten voor een waterberging genoemd wordt voor € 3,50/m³. Dit houdt in dat voor de retentie van 100.000 m³ in Waterharmonica een bedrag aan € 350.000 aan “vermeden kosten” kan worden aangenomen.

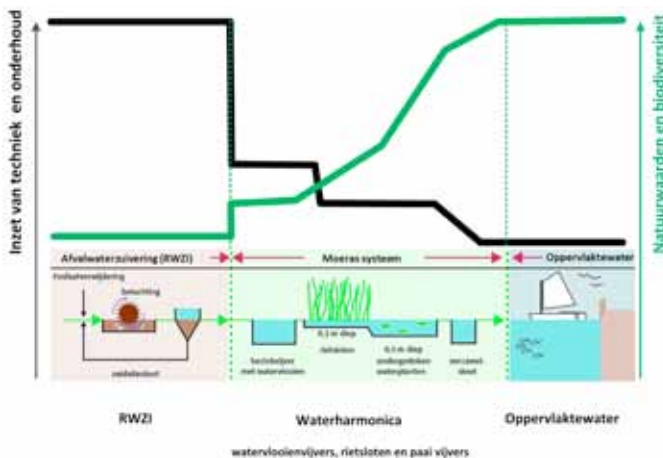


9

BEHEER EN ONDERHOUD

Een Waterharmonica vraagt net als de Waterketen en het Watersysteem beheer en onderhoud. Dit is echter aanzienlijk minder dan de inspanning op de RWZI zelf waar de kosten hoog zijn door procesbeheersing en energiekosten. Het is echter hoger dan de inspanning voor oppervlaktewaterbeheer in verband met de hogere voedingswaarde van het water. In het begin van een Waterharmonica liggen de kosten en de inspanning voor beheer en onderhoud het hoogste en dit neemt af in de loop van de Waterharmonica. Omgekeerd neemt de natuurwaarden toe in de loop van de Waterharmonica. In afbeelding 23, gebaseerd op de configuratie van de Waterharmonica's van Eversteekooog, Grou en Soerendonk, is dit gevisualiseerd (Kampf en Sala, 2009).

AFBEELDING 23 OMGEKEERDE RELATIE BEHEER EN ONDERHOUD VERSUS NATUURWAARDE



Afbeelding 23 illustreert dat de RWZI het duurste deel is en met geringe natuurwaarden. De vlooienvijvers met nog beperkte natuurwaarden zijn veel goedkoper, maar vragen nog relatief veel beheer (verwijderen opgehoopt slib, waterplanten, draadalg). De rietsloten zijn in natuurwaarden en beheer te vergelijken met natuurlijk ingerichte poldersloten, dus niet duur, maar met best aardige natuurwaarden. Tenslotte, als het effluent is veranderd in “bruikbaar oppervlaktewater” nemen de natuurwaarden aanzienlijk toe, zeker als dit laatste deel is aangelegd als een paaivijver (Grou, Soerendonk) of als een dras weiland (Empuriabrava).

FOTO 11

DROOGLEGGING VLOOIENVIJVER IN EMPURIABRAVA

De ingevangen slibdeeltjes afkomstig uit de RWZI verdienen nadere aandacht. Uit een oud TNO-onderzoek bleek dat riet ook onder water uitstekend geschikt is om niet alleen natuurlijk slib maar ook actief slib in te vangen en om te zetten (Kampf, 1983). Het bleek hierbij niet nodig om frequent slib te verwijderen. De ophoging van het rietbed zal langzaam plaats vinden, het slib wordt vergaand aeroob gestabiliseerd. Anders ligt dit bij de voorbezinkvijvers. Hierin bezinkt veel slib zoals is vastgesteld in de systemen van Empuriabrava, Eversteekoog,

Land van Cuijk en Grou. Dit slib kan regelmatig worden verwijderd (liefst uit ge-engineerde vijvers) of het kan worden verminderd door de “natuurlijke” vijvers zo nu en dan droog te zetten (zie foto 11). Dit droogzetten helpt bovendien om fosfaat release in de vijvers te voorkomen.

Wie het beheer en onderhoud van de Waterharmonica uitvoert staat tevens ter discussie, vanuit oppervlaktewater of vanuit zuiveringsbeheer? Vaak wordt de Waterharmonica toch gezien als een uitbreiding van de RWZI en meegenomen in het terreinbeheer en onderhoud. In de Nederlandse Waterharmonica's wordt het beheer meestal uitgevoerd door de Waterbeheerders. Het kan een goed idee zijn om een Waterharmonica te situeren op het terrein van een naburig agrariër of natuurbeheerder die vervolgens vergoed wordt naar agrarische maatstaven voor het onderhoud en beheer van de Waterharmonica: “waterboeren”, de boer als waterbeheerder (Clevering, Opendijk van Veen et al, 2006), zie ook (Eekeren, Verwer et al, 2012). Voor Kristalbad is ervoor gekozen het beheer en onderhoud van het terrein uit te besteden aan de terreinbeheerder (Landschap Overijssel) en de kunstwerken bij het waterschap te onderhouden.

Samengevat: De beheer- en onderhoudsinspanningen betreffen vooral het verwijderen van vegetatie en riet, baggeren, herprofilering en eventueel na een nog onbekende tijd herinrichting (bv. herplant van rietsloten). Hiermee is beheer van de Waterharmonica's in wezen niet anders dan het beheer van boezemlanden of andere natte gebieden.

10

ONTWERPRICHTLIJNEN

Het ontwerp (inrichting, afmetingen en belasting) van een Waterharmonica is afhankelijk van de beoogde functies. In de Waterharmonica gedachte is juist een combinatie van allerlei type inrichting gewenst.

De volgorde zoals in Eversteekoog, Land van Cuijk en Grou met eerst een (bezink)vijver, dan een rietsloot en tot slot een waterplantenvijver die tevens als paaibiotop voor vissen kan dienen, heeft bewezen functioneel te zijn. De werkelijke verblijftijd bleek in die systemen wel korter dan de ontwerpverblijftijd door de aanwezigheid van kortsluitstromen. Daarnaast waren diverse onderdelen kleiner aangelegd dan in het ontwerp was vastgelegd. Zowel in Eversteekoog als in Grou kwam dit door de erg modderige situatie tijdens aanleg en de slechte grondslag in Grou leidde ook tot afkalving van de oevers. In 2011 is daarom rondom de vlooienvijvers beschoeiing aangebracht. Dit sluit aan bij de gedachte achter afbeelding 23 met een meer technische aanleg van de vlooienvijvers, met beschoeiing of zelfs in beton uitgevoerd om beheer te vereenvoudigen. Enkele aspecten hierbij zijn opvang en afvoer van slib (incl. voorkomen van het vrijkomen van fosfor), beheer (afvoer van draadalgen) en optimalisatie van de watervlooienvolpopulatie (het is mogelijk om door oogsten van ca. 20 % van de populatie per dag de stand van watervlooienvol stabiel te maken (Kampf, Geest et al, 2007, Rosenkranz, 2001)). Het rietsysteem na de eerste vijver vormt dan de overgang naar een meer natuurlijk systeem. Het kan worden aangelegd in sloten voor eenvoudig onderhoud of juist in meer natuurlijke vormen voor meer biodiversiteit.

Een nog niet beproefde gedachte is om het zuurstofrijke water uit de laatste waterplantenvijver (deels) weer terug te brengen in het begin van de rietsloten om het nitrificatie- en denitrificatie proces te optimaliseren. Ook is het wenselijk de eerste vijvers en de rietsloten tijdelijk droog te kunnen zetten voor extra slibstabiliteit en fosfaat vastlegging.

Onderstaand wordt naar de voornaamste functies een differentiatie gemaakt, zie ook tabel 6.

- **Verwijdering zwevend stof en pathogenen:** Om dit te bereiken kan het best het eerste deel van de Waterharmonica worden ingericht als een vijversysteem met voldoende afmeting. Een verblijftijd vanaf 3 dagen is noodzakelijk, dit kan ook in diepere vijvers plaatsvinden (middel tot hoog belaste Waterharmonica: belasting 0,1 – 0,3 m/dag). Daarbij heeft het de voorkeur deze vijvers zo te ontwerpen dat het slib eenvoudig kan worden verwijderd. Het slib moet worden verwijderd omdat de met de slibdeeltjes bezonken pathogenen onder anaerobe omstandigheden maar langzaam afsterven en door opwoeling weer in de waterfase zouden kunnen komen. Verder dienen de vijvers als een propstroom te functioneren om algenbloei en kortsluitstromen te voorkomen.
- **Nutriëntenverwijdering.** Omdat nutriëntenverwijdering in een rwzi effectief mogelijk is, kan dit het beste zoveel mogelijk in de RWZI plaatsvinden (biologische N en P-verwijdering) of via nageschakelde flocculatie (met zandfiltratie). De Waterharmonica verlaagt dan het restant aan N en P effectief. Natuurlijke systemen zijn namelijk goed in het verwijderen van dit soort restconcentraties. Voor ammoniumverwijdering is een zuurstofrijke fase in de vijvers gewenst, waarna het ontstane nitraat beschikbaar komt voor groei of via denitrificatie (in rietsloten) verloren gaat. De verwijdering in een Waterharmonica is afhankelijk van de concentraties en neemt af met een toenemende belasting. Tevens is het van belang of het stikstof in de vorm van ammonium of nitraat is. Voor fosfaat geldt hetzelfde. Extra P-verwijdering kan beperkt plaatsvinden in (vlooienvijvers of rietbedden of een tussen geschakeld verticaal rietfilter (zoals bij Klaterwater). Als vlokingsmiddel voor

P-verwijdering kan beter gebruik worden gemaakt van Al-zouten in plaats van Fe-zouten omdat ijzerfosfaten net als biologisch vastgelegd fosfor onder anoxische en anaerobe condities minder stabiel zijn en de vastgelegde P-verbinding dan weer in oplossing geraakt. Voor een acceptabele nutriënten verwijdering is een laag tot zeer laag belaste Waterharmonica nodig ($< 0,1$ m/dag).

- **Natuur- en recreatieve waarden:** Eerst moet worden vastgesteld welke natuur gewenst is, een voedselrijke natuur met veel individuen en weinig soorten of een voedselarme natuur met een hogere biodiversiteit. Daarna kan worden gekozen of dit in waterplantenrijke omgeving plaatsvindt, in rietzones met rietvogels, een moerasbos en/of in vispaaigebieden. Zie hiervoor weer afbeelding 23. De biodiversiteit neemt toe door de Waterharmonica, al met een middel hoge belasting van $0,1 - 0,2$ m/dag is de biodiversiteit in de paaivijver van Grou opvallend. Het kan ook worden omgedraaid, waarbij de vraagstelling gericht kan worden op “hoe veel natuur kan ik voeden met water uit een Waterharmonica, dan komen belastingen $< 0,1$ m/dag in beeld, of zelfs duidelijk lager. Met een belasting van $5 - 10$ mm/dag ($0,005 - 0,01$ m/dag) kan een gebied ook in de zomer plas/dras worden gehouden (specifiek oppervlakte $12,5 - 25$ m²/i.e.)
- **Waterbuffering:** Een Waterharmonica kan bij elke belasting water bergen, het is verwonderlijk dat de meeste niet zijn geoptimaliseerd op waterberging omdat dan de verblijftijd ook bij RWA op peil kan blijven. De afmetingen van het bergingsgebied worden dan vooral bepaald door de noodzakelijke buffercapaciteit en de verwachte verontreinigingsgraad, maar ook door de inrichting en de natuurwaarden. Dit houdt in dat bij hoofdbestemming waterberging een laag van $1,5$ m of meer geborgen kan worden. Als hogere natuurwaarden nagestreefd worden lijkt een verhoging van de waterspiegel niet meer te moeten zijn dan $0,5$ m. Hierbij moet niet worden vergeten dat riet na maaien slecht tegen overstroming kan, de stengels mogen niet vol lopen.

Tot nu toe blijkt dat een belasting van ca. 0,25 m/dag (= 0,5 m² per i.e.) geschikt is om zeker in de zomer een goede desinfectiegraad te bereiken en slibblozingen bij RWA op te vangen (bijv. Eversteekoog en Grou). Hogere belastingen zoals toegepast in Hapert, in de opstartfase van de Waterharmonica Land van Cuijk en bij het ecologiseringsfilter in Ootmarsum, zijn eigenlijk te hoog. Ze zorgen overigens wel voor een eerste “ecologiseringsstap”. Voor het ontwerp van een “aantrekkelijke Waterharmonica gericht op natuur en waterbuffering” kan beter een lagere belasting worden gekozen en kan als vuistregel een hydraulische belasting van 0,05 m³/m².dag (= 0,05 m/d = ca. 2,5 m² per i.e.) worden aangehouden. Een en ander is samengevat in tabel 6.

TABEL 6 GLOBALE RICHTLIJNEN VOOR ONTWERP VAN WATERHARMONICA'S OPGESPLITST IN BELASTINGKLASSEN “ZEER LAAG” TOT “ZEER HOOG” MET BIJBEHORENDE BENODIGDE SPECIFIEKE NETTO OPPERVAKTE IN M²/I.E. (BIJ 125 – 150 L/I.E. DAG)

Belasting	Netto belasting (m/dag)	Specifiek oppervlakte (m ² /i.e.)	Waterharmonica's per belasting klasse als voorbeeld, zie ook tabel 1
Zeër laag	< 0,05	> 2,5	Klaterwater
Laag	0,05- 0,1	1,25 – 2,5	Elburg
Middel	0,1 – 0,20	0,75 – 1,25	Waterpark Groote Beerze Hapert, Aqualân Grou, Kristalbad Ootmarsum, Sint Oedenrode, Soerendonk, Vollenhove
Hoog	0,2 – 0,3	0,5 - 0,75	Eversteekoog, Sint Maartensdijk, Land van Cuijk
Zeër hoog	> 0,3	< 0,5	Tilburg-Noord

Om een idee te geven van het benodigde ruimtebeslag: voor een Waterharmonica om het volledige debiet van een RWZI van 100.000 i.e. te behandelen is, afhankelijk van de gekozen functies, een oppervlak van 5 tot 25 hectare nodig voor het netto water oppervlak. Er is gerekend met netto oppervlaktes, nodig voor het functioneren van de Waterharmonica's, afgeleid uit het de bevindingen in Nederlandse Waterharmonica's, voor extra inzicht met verschillende verblijftijden wordt verwezen naar het onderzoek in Eversteekoog (Schreijer, Kampf et al, 2000). Het bruto, de werkelijke oppervlakte zal in de praktijk

groter zijn. Zie hiervoor tabel 2. De bruto oppervlakte in de Nederlandse systemen is 1,5 tot 2 maal groter dan de netto oppervlakte, door oevers, toegangs- en onderhoudspaden en eventuele natuurlijke en recreatieve inrichting.

Als de nadruk alleen op desinfectie ligt, is de verblijftijd de belangrijkste ontwerpparameter met een logaritmische verwijdering van 0,65 maal de verblijftijd. Dit betekent een verblijftijd van drie dagen om 98-99% te verwijderen. Bij vijvers met een diepte van 1 m leidt dit tot een oppervlaktebelasting specifiek oppervlakte kleiner dan $0,5 \text{ m}^2/\text{i.e.}$

Voor nutriënten verwijdering lijkt de oppervlaktebelasting (in kg/ha.jaar) de sturende factor. Hoe hoger de belasting hoe meer nutriënten in absolute zin worden verwijderd, maar het verwijderingsrendement neemt af. De effectiviteit kan echter aanzienlijk worden vergoot door de nutriënten te zien als voedingstof in de voedselketen benadering in een kweekstelsel: nutriënten kunnen (tijdelijk) worden opgeslagen in algen (Uijterlinde en et al, 2011), phototrofe biofilms (Rijstenbil, 2006), waterplanten, kroos, etc.

De ontwikkeling van de Waterharmonica is nog in volle gang. De bouw van de recente, zoals Kristalbad, Soerendonk, Sint-Oedenrode en Vollenhove zal de komende jaren mits voldoende gemonitord, veel ervaring opleveren. Ter onderbouwing van het Integraal Zuiveringsplan (Fryslân, 2013) heeft het Wetterskip Fryslân een verkenning van de mogelijkheden voor Friesland (Kampf en Boomen, 2012) laten uitvoeren. Er is nagegaan bij welke van de 28 RWZI's in Friesland de aanleg van een Waterharmonica effectief zou kunnen bijdragen. De beschouwing is uitgevoerd voor korte en middellange termijn (2012 – 2027).

Hierbij is gekeken naar:

- Is er ruimte beschikbaar op en rond de RWZI?
- Voldoen aan de bestaande lozingseisen: kan een Waterharmonica eventuele overschrijding van N- en P-normen en/of zwevend stof voorkomen;
- Eisen vanuit de KRW-doelen, zowel waterkwaliteit als inrichting, onderdeel van ecologische verbindingszone;
- Zwemwater. Voor “officieel zwemwater” en water waar “gezwommen wordt”;
- Berging en buffering van water;
- Natuurdoelen;
- Recreatief gebruik;
- Hergebruik, beschouwd aan de hand van hergebruik als stedelijk water, natuur, landbouw of industrie;
- Rijksheffing lozing effluent;
- Wak bij een lozingspunt, Elfstedentocht.

De resultaten van de verkenning zijn weergegeven in tabel 7. De eerste kolom geeft aan dat op de meeste Friese RWZI terreinen geen ruimte is voor een Waterharmonica, maar meestal wel voor vijvers. De ruimte moet dus gezocht worden in de omgeving. In de meest gevallen is daar ruimte voor een Waterharmonica aanwezig. De andere kolommen zijn een beoordeling van de verschillende aspecten. Groen + and groen ++ is het resultaat van een positieve score op dat aspect van de betreffende mogelijke Waterharmonica, een nul in een wit vlak is een indicatie van geen reden om juist daarom een Waterharmonica aan te leggen.

Aan de hand van tabel 7 werd in (Kampf en Boomen, 2012) geconcludeerd dat er “vanuit de omgeving geredeneerd” een Waterharmonica bij veel van de RWZI's in Friesland tot zijn recht zou kunnen komen. In het Integraal Zuiveringsplan (Fryslân, 2013), gezien vanuit de Waterketen, werd dit als volgt vertaald:

“Uit dit onderzoek is naar voren gekomen dat het toepassen van een Waterharmonica bij de effluënten van RWZI 's in bepaalde gevallen een doelmatige oplossing kan zijn. De meerwaarde ligt vooral op die toepassingen, waarbij er sprake is van een aantal watersysteemopgaven op het gebied van bijvoorbeeld natuur- en recreatiewaarden, (ecologische) waterkwaliteitsdoelen, hergebruik

van water en verdrogingsbestrijding. De Waterharmonica kan hier een integrale bijdrage leveren. Ook vanuit (ecologische) waterkwaliteitsdoelen en duurzaamheid kan een Waterharmonica voordelen bieden als een 'low-tech, low-energy and cost-effective' benadering (Sala en Serra, 2004). De uiteindelijke haalbaarheid van een Waterharmonica vraagt hierom om een integrale afweging, waarbij lokale watersysteemopgaven en ook inpasbaarheid een belangrijke rol spelen. De afweging over de haalbaarheid kan daardoor het beste plaatsvinden binnen de integrale planvorming in een watergebiedsplan samen met andere stakeholders zoals Provincie Fryslân, de gemeenten, Staatsbosbeheer, Rijkswaterstaat en Vitens."

TABEL 7 PRIORITERING MOGELIJKE WATERHARMONICA'S IN FRIESLAND

nr rvtz	ruimte	verdoende ruimte rvtz	verdoende ruimte omgevings	afname langere tot aan toelatingstroom	bijdrage aan bereikbaarheid doel	vermindering risico's wateroverstroom	vermindering schade	afname schade / overstroom	wateroverstroom / inrichting	recreatieve waarde	landbouw	wateroverstroom / inrichting
nr rvtz	ruimte	kansen of belang van een Waterharmonica										
1	Akkrum	++	++	0	0	++	++	++	++	0	0	0
2	Ameland	0	++	0	0	0	++	++	++	++	++	0
3	St. Annaparochie	vijvers	++	++	++	0	++	++	++	0	0	0
4	Birdaard	vijvers	++	0	0	++	++	++	++	++	0	++
5	Bolsward	++	++	0	0	++	++	++	0	++	0	0
6	Burgum	++	++	++	0	++	++	++	++	++	++	++
7	Damwoude	++	++	++	0	0	++	++	++	++	0	0
8	Dokkum	++	++	0	++	++	++	++	++	++	0	0
9	Drachten	++	++	++	++	++	++	++	0	++	0	0
10	Franeker	vijvers	++	++	0	0	++	++	++	++	0	0
11	Gorredijk	vijvers	++ / ++	++	++	0	++	0	++	++	++	0
12	Grou	vijvers	++	0	0	++	++	++	++	++	0	0
13	Harlingen	++	++	0	0	0	++	0	0	++	0	0
15	Heerenveen	++	++	0	0	++	0 / ++	0 / ++	0 / ++	++	0	0
16	Joure	vijvers	++	0	0	++	++	++	++	++	0	0
17	Kootstertille	++	++	0	0	++	++	++	++	++	++	0
18	Leeuwarden	++	0 / ++	0	0	++	++	0	++	++	++	0
19	Lemmer	vijvers	++	++	0	++	++	++	++	++	++	0
20	Oosterwolde	++	++	++	++	++	++	0	++	++	0	0
21	Schiermonnikoog	vijvers	++	0	0	0	++	++	++	++	++	0
22	Sloten	++	++	0	0	++	++	++	++	++	0	++
23	Sneek	++	++	0	++	++	++	++	++	++	0	++
24	Terschelling	vijvers	++	0	0	0	++	++	++	++	++	0
25	Vlieland	++	++	0	0	0	++	++	++	++	++	0
26	Warns	++	++	++	0	++	++	++	++	++	0	++
27	Wolvega	++	++	0	0	++	++	++	++	++	0	0
28	Workum	vijvers	++	0	++	++	++	++	++	++	0	++
29	Wijnjewoude	++	++	++	++	++	++	++	++	++	0	0

11

WAT IS HET BELANG VAN DE WATERHARMONICA?

Waterharmonica is inmiddels een begrip, een manier van denken, zoals de termen Waterketen en Watersysteem. Het is iets wat bekend is: “de natuurlijke schakel tussen Waterketen en Watersysteem”. Bekend is ook wat het niet is, zoals een zandfilter, of een membraanfilter voor effluentfiltratie. Het is overigens wel mogelijk om techniek en natuur te combineren, voorbeelden zijn de effluentfiltraties voorafgaand aan de Waterharmonica's van Ootmarsum, Kaatsheuvel/Klaterwater, Land van Cuijk en Soerendonk. Het is nog onduidelijk wanneer deze voorafgaande filtratie nodig is, mogelijk alleen voor relatief hoog-belaste RWZI's. In Ootmarsum wordt onder DWA (=droog weer afvoer) omstandigheden al het effluent gefiltreerd (of in de MBR of in het zandfilter). Bij RWA (regen weer afvoer) condities wordt het teveel aan water echter na alleen aerobe behandeling direct naar de Waterharmonica geleid. In Empuriabrava is er juist voor gekozen om in periodes van slecht werking van de RWZI het effluent niet voor hergebruik via de Waterharmonica te bestemmen, maar te lozen op de rivier. Voor dit doel is een NH_4 -analyzer geïnstalleerd.

Onderliggend overzicht illustreert dat ondertussen veel bekend is over nut en noodzaak van Waterharmonica's. Vuistregels voor ontwerp zijn voorhanden, keuzes kunnen worden gemaakt in de gewenste prestaties, zoals buffering van water en desinfectie. Bekend is dat bij lagere belastingen de systemen sterk kunnen zijn in het vastleggen en omzetten van nutriënten, maar ook in vergroting van de biodiversiteit, waardoor natuurwaarden toenemen. Dit is goed te koppelen met recreatie

en beleving. Het zou ook kunnen zijn dat de grootste waarde ligt in het samenwerken van mensen van geheel verschillende achtergrond, interesses in een aantrekkelijk deel van de Watercyclus: een rwzi-beheerder ziet nu waarom hij zuivert en niet alleen om te voldoen aan de normen. Waterharmonica is gebleken een zeer interdisciplinair geschikt platform te zijn om allerlei vakgebieden bij elkaar te brengen in een interessant deel van het waterbeheer: de natuurlijke schakel tussen Waterketen en Waterbeheer. Het is boeiend om hier een conclusie uit de KRW-studie naar natuurlijke systemen voor zuivering drainwater van drain- en slootwater uit de landbouw (Haan, Sival et al, 2011) te citeren: 'Op grotere schaal ontstaan meer mogelijkheden voor combinaties met overige functies als waterberging, natuur, recreatie en biomassaproductie (bijvoorbeeld (Doorn, 1998 en Björk en Graneli, 1978)). Op plaatsen waar de Waterharmonica wordt gecombineerd met een ecologische verbindingssas kan de Waterharmonica als *stepping stone* of levensgebied fungeren (bv. Kristalbad). De Waterharmonica kan zeer goed een rol vervullen in stedelijk waterbeheer, zie bijvoorbeeld de uitgewerkte plannen voor Apeldoorn, Arnhem en Amstelveen (Veluwe, 2005, Arcadis, 2004 en Leloup, Voort et al, 2012).

Een gevolg van de Waterharmonica aanpak is het scheppen en restaureren van wetlands en het omzetten van kosten van waterzuivering in economische- en natuuropbrengsten voor burgers, maar ook voor de waterbeheerders. Dit geldt nog in hogere mate voor de "developing world" (Mels, Martijn et al, 2005). Een wijs gebruik van water en voedingsstoffen draagt bij tot armoedebestrijding en tegelijkertijd behoud en versterking van belangrijke ecosystemen. Het is niet alleen het oplossen van een afvalwaterprobleem, maar vooral een gebiedsgerichte en ecosysteem benadering.

Eigenlijk is de korte omschrijving in de begrippenlijst van het Waterbeheerplan '2010-2015 Krachtig water' van Waterschap De Dommel duidelijk: "Waterharmonica: Moerassysteem dat het effluent van een rioolwaterzuivering biologisch 'tot leven' brengt en zo de negatieve effecten op het ontvangende oppervlaktewater zo veel mogelijk beperkt (De Dommel, 2010a).

Het belang van de Waterharmonica werd nader geïllustreerd op de Stowa dag ter gelegenheid van meer dan vijftien jaar praktijk ervaring met Waterharmonica's: Nabehandeling van RWZI-effluent? Ja, natuurlijk! Praktijkervaringen met de Waterharmonica op 29 maart 2012. Deze dag werd druk bezocht en was zeer geanimeerd en is een uitstekende illustratie bij deze rapportage. Voor links naar de individuele presentaties wordt verwezen naar (Boomen, Foekema et al, 2012). Stowa heeft een film verzorgd met impressies van de dag (Stowa, 2012). Zie voor meer informatie www.waterharmonica.nl

REFERENTIES

- Agentschap NL, (2011). Innovatieprogramma Kaderrichtlijn Water.
<http://www.agentschapnl.nl/nl/node/118962>
- AGV, (2011). Jaarstukken AGV 2010. Amsterdam, Waterschap Amstel, Gooi en Vecht. http://www.agv.nl/asp/download.aspx?File=/contents/library/125/jaarverslag_agv_2010_compleet.pdf
- Andersson J. L. en Kallner S., (2002). De fyra stora en jämförelse av reningsresultat i svenska våtmarker för avloppsvattenrening. Uppsala, Svenskt Vatten AB, Linköpings Universitet. http://boffe.com/rapporter/Avlopp/V%E5tmark/VA-Forsk_2002-6.pdf
- Andersson J. L., Ridderstolpe P., Gunnarson S. en Tonderski K.S., (2010). Efficiency and management considerations in free water surface wetlands for tertiary wastewater treatment. Uppsala, Svenskt Vatten AB.
- Anglian Water, (2011). Leisure, Anglian Water Parks. Huntingdon, Anglian Water. http://www.anglianwater.co.uk/_assets/media/community-and-access-update-2011.pdf
- Anglian Water, (2012). Water Parks. Huntingdon, Anglian Water. <http://www.anglianwater.co.uk/leisure/what-to-see/water-parks/>
- Antheunisse A. M., Hefting M.M. en Bos E.J., (2008). Moerasbufferstroken langs watergangen; haalbaarheid en functionaliteit in Nederland, 2008-07. Utrecht, Stowa. http://www.stowa.nl/Upload/publicaties2/mID_4924_cID_3914_49404215_rapport%202008%2007.pdf
- Aqua for All, (2009). Werken aan onafhankelijkheid, Jaarverslag 2009. Den Haag, Aqua for All. http://www.aquaforall.nl/documents/aqua4all/downloads/aqua_for_all_jaarverslag_2009_def.pdf
- Arcadis, (2004). Pré-haalbaarheidsonderzoek hergebruik rwzi-effluent in watersysteem Arnhem-Zuid. Arnhem, Arcadis, gemeente Arnhem

- Bales A., (2008). Mesocosmos: La filtració biològica aplicada a la regeneració d'aigües residuals. Girona, Universitat de Girona / Consorci de la Costa Brava
- Baltussen J. J. M., (2011). Energiegebruik nageschakelde behandelingstechnieken op rwzi's, Stowa 2011- w09. Amersfoort, Stowa
- Baptist M. J. en Uijttewaai W.S.J., (2005). Transport and mixing, of cooling water, guidelines and modelling practice. Delft, RIZA
- Bentem A. G. N. v., Buunen A., Reitsma B., Nieuwenhuijzen A. et al, (2007). Het actief-slibproces, de mogelijkheden en grenzen. Stowa 2007-24. Utrecht, Stowa
- Berbee R. P. M., Maas H., Matla E. en Loo H. v.d., (2001). Toxiciteit effluent rwzi Aarle-Rixtel sterk afgenomen. H_2O , 34 (3), 25 – 26
- Berbee R. P. M., Naber A., Kerkum L., Espeldoorn A. et al, (2000). Ecotoxicologisch en chemisch onderzoek RWZI Aarle Rixtel (Helmond) en rivier de AA, RIZA-rapport 2000.022. Lelystad, RIZA
- Björk S. en Graneli W., (1978). Energy reeds and the environment. *Ambio*, 7 (4), 150 – 156
- Blankendaal V. G., Foekema E.M. en Goedhart P.C., (2003). Ecotoxicologische aspecten van rwzi-effluenten met behulp van biomassa kweek, Stowa 2003-12. Utrecht, Stowa
- Bleninger T. en Jirka G.H., (2009). Technical Background Document on Identification of Mixing Zones. Koblenz, Neptune project: Workshop: Water Framework Directive and Emerging Pollutants, 21 - 22 April 2009, Koblenz
- Bleninger T. en Jirka G.H., (2010). Technical Background Document on Identification of Mixing Zones. Brussels,
- Blom J. en Sollie S., (2009). Systeemkeuze en voorontwerp secundaire randvoorziening Vollenhove. Deventer / Zwolle, TAUW / Waterschap Reest en Wieden
- Blom J. J. en Maat H.T., (2005). Vergaande verwijdering van fosfaat met helofytenfilters, Stowa 2005-19. Utrecht, Stowa

- Boomen R. M. v. d., (2004). Praktijkonderzoek moerassysteem rwzi Land van Cuijk, 2004-45. Utrecht, Stowa
- Boomen R. M. v. d., (2007). Meet- en informatieplan Moerenburg, in opdracht van waterschap De Dommel. Witteveen+Bos, rapport nr. Tb19-133-1 d.d. 25 januari 2007
- Boomen R. M. v. d., (2008). Visie document Waterharmonica, STO 144-1-1. Deventer / Utrecht, Witteveen + Bos / Stowa
- Boomen R. M. v. d., Foekema E. en Uijterlinde C., (2012). Nabehandeling van RWZI-effluent? Ja, natuurlijk! Praktijkervaringen met de Waterharmonica. Efteling, Kaatsheuvel, Stowa.
http://www.stowa.nl/Nieuws__Agenda/Agenda/agenda_items/Nabehandeling_van_RWZI_effluent__Ja__natuurlijk__Praktijkervaringen_met_de_Waterharmonica.aspx?mId=10880&rId=253
- Boomen R. M. v. d., Kampf R. en Claassen T.H.L., (2012a). Waterharmonica Aqualân Grou. Vijf jaar monitoring. Leeuwarden, Wetterskip Fryslân
- Boomen R. M. v. d., Kampf R. en Mulling B.T.M., (2012b). Waterharmonica, onderzoek naar zwevend stof en pathogenen, deelstudierapporten, Stowa 2012_11. Amersfoort, Stowa
- Boomen R. M. v. d., Kampf R. en Mulling B.T.M., (2012c). Waterharmonica, onderzoek naar zwevend stof en pathogenen, hoofdrapport, Stowa 2012_10. Amersfoort, Stowa
- Brink H. t. en et al, (2008). Shifts in community composition and abiotic conditions in an effluent receiving artificial wetland, The waterharmonica-experiment. Amsterdam, Universiteit van Amsterdam
- Buskens R. F. M., Luning E.J. en Elemans H., (1998). De Beerze, waterconservering, waterzuivering en beekherstel. Den Bosch, Boxtel, IWACO, Waterschap De Dommel
- Butijn G. D., (1990). Evaluatie nareinigingsveld rioolwaterzuiveringsinstallatie Elburg, 1990 - 20 anw - 47 + Bijlagen. Lelystad, Rijkswaterstaat, directie Flevoland

- Butijn G. D., (1994). Nutrientenverwijdering in het helofytenfilter te Elburg bij lage belasting, 1994 - 15 Anw. Lelystad, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Flevoland
- Chanzi H., (2005a). The potential for the Waterharmonica concept in Tanzania. Edam / Deventer, HHNK / Saxion University
- Chanzi H., (11-7-2005b). The potential for the Waterharmonica concept in Tanzania. Edam / Deventer, Waterschap Hollands Noorderkwartier / Saxion University. <http://www.waterharmonica.nl/conferences/index.htm>
- Claassen T. H. L. en Koopmans M., (2012). Vis in het Aqualân Grou. *H₂O*, 45 (25/26), 46 – 49
- Claassen T. H. L., (1996). Het 3D-schakelsysteem: van tweesporenbeleid naar driesporenbeleid; ecotechnologisch van randverschijnsel naar centrumpositie (8), 141 - 153. Utrecht, Stowa
- Claassen T. H. L., Gerbens S. en Kampf R., (2006). Texelse kennis toegepast bij zuiveringsmoeras en paaibiotop bij rwzi Grou. *H₂O*, 39 (24), 41 – 43
- Clevering O. A., Opendijk van Veen J., Jukema N.J. en Boekhof M., (2006). De boer als waterbeheerder. Mogelijkheden Kaderrichtlijn Water op bedrijfsniveau, PPO publicatie 359. Lelystad, WUR Praktijkonderzoek & omgeving. <http://documents.plant.wur.nl/ppo/agv/359.pdf>
- Colon J., Sala L. en Kampf R., (2008). Projecte: Mesocosmos d'Empuriabrava: Regeneració d'aigües depurades mitjançant filtració biològica. Informe del primer any de funcionament (juliol 2007-juny 2008)
- De Dommel, (2010a). Krachtig water, Waterbeheerplan 2010-2015. Boxtel, Waterschap De Dommel. <http://www.dommel.nl/we-0/missie-beleid/waterbeheerplan>
- De Dommel, (2010b). Waterharmonica Soerendonk. Boxtel, Waterschap De Dommel. <http://www.dommel.nl/actueel/werk-uitvoering/waterharmonica>
- De Dommel, (2011a). Nicaragua. Boxtel, Waterschap De Dommel. <http://www.dommel.nl/we-0/werk-uitvoering-0/internationale/nicaragua>
- De Dommel, (2011b). Renovatie rioolwaterzuivering Biest-Houthakker. Boxtel, De Dommel. http://www.dommel.nl/algemene_onderdelen/zoeken/@195736/renovatie-0/

De Dommel, (2012a). Helofytenpark Moerenburg. Boxtel, Waterschap De Dommel. http://www.moerenburg.info/natuur_amp_omgeving/helofytenpark

De Dommel, (2012b). Informatiepanelen Soerendonk. Boxtel, Waterschap de Dommel. http://www.dommel.nl/actueel/werk-uitvoering/waterpark_soerendonk

De Dommel, (2012c). Waterpark Soerendonk. http://www.dommel.nl/algemene_onderdelen/zoeken/@202411/waterpark_soerendonk/

De Volkskrant, (17-8-2002). Vlooiënfabriek voor lepelaars. De Volkskrant

Durand-Huizing A., (30-3-2005). Haalbaarheidsstudie moerassysteem voor desinfectie effluent rwzi Wervershoof, PM30-1-1-. Deventer, Witteveen + Bos

Eekeren N., Verwer F., Verkerk M. en Broers E., (2012). Bufferboeren: agrariërs en waterbeheerders gezamenlijk aan de slag. H₂O (4), 8 – 9

Eijer-de Jong J., Willers H., Palsma B. en Claessen V., (2002). Monitoring moerassysteem rwzi Land van Cuijk. H₂O, 35 (16), 26 – 29

Flyckt L., (2010). Reningsresultat, drifterfarenheter och kostnadseffektivitet i svenska våtmarker för spillvattenrening , LITH-IFM-A-EX--10/2377—SE . Linköping, Tekniska Högskolan, Linköpings Universitet

Foekema E. M. en Kampf R., (2002). Gebruik van effluent van de rwzi De Cocksdorp voor natuurdoeleinden: onderzoek naar de kweek van watervlooiën in het kwekelbaarsjes systeem, DH02/007. Den Helder, MEP-TNO. http://194.151.97.59/wf/proj/wh/pdf/rap/Kwekelbaarsjes_rapp_experimenteel_2001.pdf

Foekema E. M. en Kampf R., (2005). Overzicht van werkzaamheden in het kader van het Kwekelbaarsjesproject in de periode 1998 - 2004, B&O-DH - R 2005/257. Den Helder, TNO

Foekema E. M., Oost R. v.d., Roex E. en Murk T., (1-12-2011). WIPE, Waterharmonica, Improving Purification Effectiveness. <http://nbv.kncv.nl/Uploads/2011/12/NBV-Edwin-Foekema.pdf>

Foekema E. M., Roex E., Sneekes A., Koelemij E. et al, (2012).

De invloed van moerassystemen op de milieukwaliteit van rwzi effluent en aanbevelingen tot optimalisering, rapport C005/12, Waterharmonica Improving Purification Effectiveness, WIPE. IJmuiden / Wageningen, IMARES / Deltares

Fryslân, (2013). Integraal Zuiverings Plan. Leeuwarden, Wetterskip Fryslân

Fryslân leeft met water, (2009). Achtergronddocument: Beschrijving watersysteem en wettelijk kader. Leeuwarden, Fryslân leeft met water: Provinciale Staten van Fryslân en Algemeen Bestuur van Wetterskip Fryslân

Ghauharali R. I. en Bos R., (2007). Visualisatie van effluentpluimen. Marknesse, Edam, VB Ecoflight, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier

Graaf P. de et al, (2010). Inrichtingsvisie Linge-oever en voorontwerp Waterharmonica RWZI Geldermalsen. Rotterdam / Tiel / Geldermalsen, Paul de Graaf Ontwerp & Onderzoek / Waterschap Rivierenland / Gemeente Geldermalsen

Graansma J. en Schobben H.P.M., (26-11-2002). Haalbaarheidsnotitie moerassysteem/helofytenfilter Wervershoof. Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen

Haan E. d. en Horst J., (2001). Waterpark Groote Beerze. Bostel, Waterschap De Dommel

Haan J. d., Sival F.P., Schoot J.R.v.d. en Buck A.J.d., (2011). Natuurlijke zuiveringssystemen voor zuivering van drain- en slootwater uit de landbouw, Inhoudelijk eindrapportage voor Innovatieprogramma Kaderrichtlijn Water, PPO-nr. 429. Lelystad, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Wageningen UR

Haijkens Y., (2004). Toepassing van ecotechnologische schakelsystemen in Noord-Nederland, mogelijkheden voor nazuivering van RWZI-effluent, 34 82 04), 1 - 50 + bijlagen. Leeuwarden / Groningen, Royal Haskoning / Van Hall Instituut

- HHSK, (2011). Waterharmonica afvalwaterzuiveringsinstallatie Berkenwoude. Rotterdam, Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard. http://www.schielandendekrimpenerwaard.nl/aspx/download.aspx?File=/contents/pages/38650/waterharmonica_afvalwaterzuiveringsinstallatie_berkenwoude.pdf
- HHSK, (2012). Waterbeheerplan HHSK 2010-2015, 'Goed voor elkaar'. Rotterdam. http://www.schielandendekrimpenerwaard.nl/projecten/projecten/kaderrichtlijn_water
- Hoeks P. en et al, (2008). Bemestingsadvies, Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen. Lelystad, Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen. <http://www.bemestingsadvies.nl/bemestingsadvies.html>
- Hoorn M. v. en Elst D. v.d., (2011). Pilotexperiment effluentpolishing met watervlooiën, Nazuiveren met natuur. Groningen, Waterschap Noorderzijlvest
- Hoorn M. v., Elst D. v.d. en Kampf R., (2011). Tussenrapportage effluentpolishing met watervlooiën . Groningen, Waterschap Noorderzijlvest
- Hoorn M. v., Elst D. v.d., Poiesz W.G. en Kampf R., (2012). Ecologisch nazuiveren. Groningen, Waterschap Noorderzijlvest
- Hut R. M. G. v. d. en Veen S.M., (3-6-2004). Rietveld bij Elburg, Ontwikkelingsscenario's en inrichtingsplan voor het voormalige nazuiveringsveld van de RWZI te Elburg. Lelystad, Culemborg, Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied, Bureau Waardenburg. http://www.buwa.nl/backsite/attachments/03_136_eindrapport.pdf
- IWACO, (1993). Evaluatie hergebruik rioolwater op Vlieland. Groningen, IWACO
- Jacobi J., (2004). Waterschappen klaar voor de Waterharmonica? H₂O, 37, (25-26)
- Jak R. G., Foekema E.M., Kampf R. en Dokkum H.P., (2000). Gebruik van effluent van de rwzi De Cocksdoorp om de voedselsituatie van Lepelaars te verbeteren. Den Helder, Edam, TNO en Uitwaterende Sluizen
- Jannsen M., Zandt E. v.d. en Berends D., (2010). Ontwerp zuivering Soerendonk, duurzaam en klaar voor KRW. Neerslag, 2010 (III), 33 – 39

- Jong P. d., Kramer J.F., Slotema W.F. en Third K.A., (2008). Verkenningen zuiveringstechnieken en KRW. Stowa 2005-28. Utrecht, Stowa
- Jouwermans S., (1994). Effluentvijvers als tertiaire zuivering, Deel 1: Literatuurstudie kwaliteitsverbetering van het effluent in bergings- en effluentvijvers. Deel 2: Ontwerpstudie effluentvijvers AWRI-Noord, Tilburg, Afstudeerproject. Delft, TU-Delft, Civiele Techniek
- Jung-Hoon C., (2011). Application of constructed wetlands in Goheung & Haenam reclaimed area. Water quality & ecological improvement), 321 - 365. Seoul, Zuid-Korea
- Kalshoven S., Scheltes M. en Tinbergen L., (2006). Moerasfilter na de Waterzuivering. Verbetering in waterkwaliteit en biodiversiteit. Amsterdam, Universiteit van Amsterdam
- Kampf, R., (1983). Verwerking van slib in een rietveld. H2O, 16 (20)
- Kampf R., (2001). Lepelaars profiteren van effluent rwzi Texel, bron voor voedselkringloop op een Waddeneiland. H₂O, 34 (6), 6
- Kampf R., (2002). Effluent van de rwzi De Cocksdorp voor natuurdoeleinden, D en H voorstel Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen. Edam
- Kampf R., (2005a). Natuurlijke nazuivering van effluent. Delft, Stichting Postacademiaal Onderwijs
- Kampf R., (22-4-2005b). Stikstofverwijdering in natuurlijke systemen en het Waterharmonica concept. Delft, Stichting Postacademisch Onderwijs
- Kampf R., (19-5-2005c). Van effluent naar oppervlaktewater. Delft, Stichting Postacademisch Onderwijs PAO
- Kampf R., (2008a). Biologische waterzuivering – de oxydatiesloot, geschiedenis met een grote toekomst. Afvalwaterwetenschap, 7 (2), 124 – 134
- Kampf R., (11-1-2008b). Biologische waterzuivering – de oxydatiesloot, geschiedenis met een grote toekomst. Delft, TU-Delft
- Kampf R., (23-1-2008c). Wetland treatment, use of constructed wetlands to enhance effluent quality. Varna, Bulgarije, EU-project Neptune, FP6 programma. http://www.waterharmonica.nl/publikaties/2008_10_varna_kampf_wetlands.pdf

Kampf R., (24-9-2009). Linking well treated waste water with nature. 3rd Wetland Pollutant Dynamics and Control WETPOL 2009. Barcelona / Empuriabrava. http://ccbgi.org/docs/jornades_wetpol_09/2009_09_23_wetpol_technical_excursion_kampf_final.pdf

Kampf R., (2012). Kosteneffectiviteit Kristalbad, achtergronden kosten van stikstof en fosfor reductie in de Waterharmonica Kristalbad), 1 - 13. Schermerhorn / Almelo, rekel/water / Waterschap Regge en Dinkel

Kampf R. en Boomen R.M. v.d., (2013). De toekomst van de Waterharmonica in Friesland, Verkenning mogelijkheden 2012-2027, LW289-47. Leeuwarden, Deventer, Wetterskip Fryslân, Witteveen+Bos

Kampf R. en Claassen T.H.L., (2004). The use of treated wastewater for nature: The Waterharmonica, a sustainable solution as an alternative for separate drainage and treatment, IWA-Leading-Edge Technology, LET2004, WW5, 3 June 2004, Prague, Czech Republic. Prague, IWA

Kampf R., Eenkhoorn B.J., Foekema E.M. en Dokkum H.P., (2003). Can Spoonbills play a role in "integral water management" on Texel?, Eurosite-workshop on Management of Coastal Wetlands for Spoonbills and associated waders Texel, The Netherlands, 19-22 April 2002.), 25 - 27. Tilburg, Eurosite Programme and Development Office

Kampf R., Geest H.v.d., Sala L., Romani A. et al, (2007). Biological filtration of treated waste water by Daphnia: an alternative for technical filtration, or an addition? Antwerpen

Kampf R., Jak R. en Groot M., (1999). Growing Daphnia on effluent to improve the food situation of spoonbills on the island of Texel, do Daphnia really eat sludge?, 4th International Conference on Ecological Engineering for Wastewater Treatment, 7-11 June 1999 ed., As, Norway. http://194.151.97.59/wf/proj/wh/pdf/publikaties/paper_kampf_eco_eng99_daphnia.pdf

Kampf R. en Sala L., (19-10-2009). Natural processes to convert treated waste water into a usable surface water. A Dutch-Catalan cooperation. Jornada "Aigua a la carta.Processos i tecnologies: L'adequació de la qualitat de les aigües als diferents usos". Barcelona, Asinca. http://ccbgi.org/activitats.php?id_28

Kampf R., Schreijer M., Toet S. en Verhoeven J.T.A., (1996). Nabehandeling van effluent tot bruikbaar oppervlaktewater in een moerassysteem met helofyten en waterplanten, opzet van een vierjarig demonstratieproject op praktijkschaal op rwzi Eversteekoo. *H₂O*, 29 (14), 400 – 402

Kampf R., Schreijer M., Toet S. en Verhoeven J.T.A., (1997). Van effluent tot bruikbaar oppervlaktewater. In: Biologisch gezuiverd effluent, grondstof of eindproduct?, 16 oktober 1997, NVA, Rijswijk. http://www.waterharmonica.nl/publikaties/1997_nva_kampf/nva.htm

Klapwijk S. P., (1996). 25 jaar toegepast onderzoek waterbeheer, jubileumsymposium STOWA, september 1996. Utrecht, Stowa

Kleiman M., (2006). Monitoring hergebruik effluent van rwzi Eversteekoo op Texel, Het effect van gezuiverd afvalwater op het watersysteem en de benutting van effluent voor de bestrijding van droogte: Van afvalstof naar product!. Edam, HHNK. <http://edepot.wur.nl/4543>

Knight R. L., Clarke R. en Petry C., (2004). Working with nature, the Great Swamp Effluent Management System. *Water21* (February), 54 - 57. <http://greennature.com/travel/visit1408.html>

Kroes F., (1997). Mogelijkheden van hergebruik van effluent op Ameland, Hoofdrapport en Waterbalans. Leeuwarden, Waterschap Friesland

Lange R. d. en Veenstra J., (2007). Basisdocument 4e ronde KRW-gebiedsgroepen (Waddeneilanden: eindversie 18 oktober 2007). Leeuwarden, Wetterskip Fryslân

Leloup M. J., Voort J.W., Zandvoort M. en Ouboter M., (2012). Waterkringloop Amstelveen. Amsterdam, Waternet. <http://www.innovatie.waternet.nl/projecten/waterkringloop-amstelveen>

Marsman E., (6-9-2006). Garanderen natuurkwaliteit in toekomstig natuurgebied Over de Maas. Tiel, Waterschap Rivierenland

Matamores V., Bayona M.B. en Salvadó V., (2010). A comparative study of removal of emerging pollutants in a conventional tertiary treatment and a pond-constructed wetland system. Venice, IWA

- Mels A., Martijn E.-J., Kampf R. en Claassen T.H.L., (2005). 'Waterharmonica' in the developing world, Stowa 2005-21. Utrecht, Stowa. <http://www.stowa.nl/Producten/Publicaties/index.aspx?rId=5136>
- Min D., (2002). Verantwoord gebruik van effluent van de RWZI Ameland, Een Maatschappelijke Kosten-Baten Analyse. Leeuwarden, Waterschap Friesland
- NN, (12-2-2004). Quick-scan Waterpark Schoonbroek, AP-360-1. Deventer, Apeldoorn, Witteveen + Bos, Waterschap Veluwe, Gemeente Apeldoorn
- NN, (17-9-2009a). Besluit houdende vaststelling van het subsidieprogramma Innovatieprogramma Kaderrichtlijn Water. Staatscourant, 17-09-2009
- NN, (2009b). Transnational Purification. Almelo, Waterschap Regge en Dinkel
- NN, (2009c). Urban Water Cycle project. <http://www.urbanwatercycle.org/>
- NN, (3-8-2012a). Nieuwe zuivering Eversteekoo in gebruik genomen. Texelse Courant
- NN, (2012b). Parc du Marquenterre, La rencontre de l'homme et de la nature. Abbeville, Destination Bai de la Somme. <http://www.parcumarquenterre.com/>
- Noord-Hollands Dagblad, (2002). Proef Texel met watervlooiën en vis in afvalwater. Noordhollands Dagblad, Den Helder
- Oosterhuis M. en Schyns P., (9-5-2013). Toepassing Nereda op RWZI Dinxperlo en Vroomshoop, Symposium KRW-innovatieprojecten, in het kader van de Neredaweek. Amersfoort, Stowa. http://www.stowa.nl/nieuws_agenda/agenda/symposium_krw_innovatieprojecten_in_het_kader_van_de_neredaweek
- Oranjewoud, (2010). Achtergrondrapport 4e zuiveringstrap rwzi Marum., projectnr. 195739. Heerenveen / Groningen, Oranjewoud / Waterschap Noorderzijlvest
- Otte A., Blom J., Blecourt W.d. en Veldhuizen H.v., (2009). Ecologie leidende factor voor verbetering waterkwaliteit in Raalte. H₂O, 42 (24), 23 – 25

Pallarès E., (24-9-2009). The Empuriabrava wastewater treatment plant and constructed wetland system. 3rd Wetland Pollutant Dynamics and Control WETPOL 2009. Barcelona. http://ccbgi.org/docs/jornades_wetpol_09/aiguamolls_23_setembre_2009-ccb.pdf

Pasveer A., (1957). Eenvoudige afvalwaterzuivering. De Ingenieur, 69 (17) 26 april 1957. Gezondheidstechniek 1

Pau C., Serra T., Colomer J., Casamitjana X. et al, (2013). Filtering capacity of *Daphnia magna* on sludge particles in treated wastewater. Water Research, (47), 181 – 186

Prakken J. A., (2003). Natural changes by natural purification, the effects of the effluent of the sewage treatment plant on a constructed wetland in Apeldoorn. Apeldoorn, Deventer, Waterschap Veluwe, Saxion Hogeschool

Projectgroep Wetterlannen, (2011a). KRW innovatieproject voor zuiverend gemaal en nazuivering afvalwater. Leeuwarden, Projectgroep Wetterlannen

Projectgroep Wetterlannen, (2011b). Wetterlannen; KRW innovatieproject voor zuiverend gemaal en nazuivering afvalwater. Tytsjerksteradiel, Leeuwarden, Deventer, Gemeente Tytsjerksteradiel, Wetterskip Fryslân, Van Hall Larenstein & Tauw

Provinsje Fryslân, (2007). Aankondiging feestelijke opening UWC project Aqualân Grou. Leeuwarden, Provinsje Fryslân

Regge en Dinkel, (2005). a) Bestuursprogramma 2005 - 2008: "Water als maat", b) Ketenstrategie waterschap Regge en Dinkel, c) Twents Water Kompas. Almelo, Waterschap Regge en Dinkel

Regge en Dinkel, (2011a). Kristalbad, schakel tussen land, droog en nat. Almelo, Waterschap Regge en Dinkel. www.wrd.nl/kristalbad

Regge en Dinkel, (17-6-2011b). Retentiegebied met eigen huisstijl. H₂O, 44 (12), 15

Rijn en IJssel, (2009). Perspectievennota 2009-2012 'Opmaat naar begroting 2009'. Doetinchem, Waterschap Rijn en IJssel. <http://www.wrij.nl/contents/pages/50399/vstperspectievennota2009-2012bijlage170708.pdf>

Rijstenbil J., (2006). Phototrophic biofilms and their applications: towards a unifying concept, a note from the PHOBIA project. EcoEng Newsletter, June 2006. http://www.iees.ch/EcoEng061/EcoEng061_Rijstenbil.html#phobia

Roeleveld P., Roorda J. en Schaafsma M., (2010). Op weg naar de rwzi 2030: NEWater. Stowa 2010-11. Amersfoort, Stowa

Rosenkranz K., (2001). Some eco engineering aspects of growing Daphnia on treated wastewater, modelling of the kwekelbaars project), 1 - 57. Den Helder, Hamburg, TNO , Technische Universität Hamburg

Ruiter M. A. d., (1978). Het risico van zwemmen en baden in faecaal verontreinigd oppervlaktewater. Delft, TNO

Sala L. en Kampf R., (2011). The Costa Brava approach to the Dutch concept of Waterharmonica. Girona, Consorci de la Costa Brava. http://ccbgi.org/docs/smallwat_2011/l_sala_smallwatt_2011.pdf

Sala L. en Romero de Tejada S., (2007). Use of reclaimed water in the recreation and restoration of aquatic ecosystems: practical experience in the Costa Brava region (Girona, Spain) (6th Conference on Water reclamation and reuse for sustainability. Antwerpen, IWA

Sala L., Serra M., Huguet A., Colom J. et al, (2004). Multiple benefits of water reuse. Projects for environmental purposes at the Aiguamolls de l'Emporda nature reserve. Avignon, IWA

Schomaker A. H. H. M., (2010). Monitoring Klaterwater 2009, 3V3900. 's Hertogenbosch, Haskoning, De Efteling BV

Schomaker A. H. H. M., Otte A., Blom J.J., Claassen T.H.L. et al, (2005). Waterharmonica, de natuurlijke schakel tussen Waterketen en Watersysteem, 2005-18. Utrecht, Stowa. http://194.151.97.59/wf/proj/wh/pdf/rap/stowa_rapport_2005_18_waterharmonica_eindrapport.pdf

Schomaker T., (2011). Klaterwater, hergebruik RWZI-effluent Kaatsheuvel op de Efteling. www.royalhaskoning.com/nl-NL/Werkvelden/WaterEnMilieu/ROEnWaterbeheer/Pages/KlaterwaterKlEfteling.aspx

Schreijer M. en Kampf R., (1995). Nabehandeling van effluent tot bruikbaar oppervlaktewater in een moerassysteem; Vooronderzoek. *H₂O*, 28 (11), 340 - 342 en 347

Schreijer M., Kampf R., Verhoeven J.T.A. en Toet S., (2000). Nabehandeling van effluent tot bruikbaar oppervlaktewater in een moerassysteem met helofyten en waterplanten, Resultaten van een 4-jarig demonstratieproject op rwzi Eversteekoog, Texel. Edam en Utrecht, Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen en Universiteit Utrecht.

Slijkerman, D. M. E., Dokkum, H.P., Kampf, R. and Brils, J.M., (2006). Waterbodemonverontreiniging en haalbaarheid ecologische doelstellingen voor oppervlaktewater. *H₂O*, 39 (1), 35 - 37

Sloot J. S., Lorenz C.M. en Verhoeven J.T.A., (2001). Handboek zuiveringsmoerassen voor licht verontreinigd oppervlaktewater, 2001 - 09. Utrecht / Deventer, Stowa / Witteveen + Bos

Slootjes N., (2004). Van kreet naar concreet. Aanzet voor een Maatregelenboek Droogte, 9P8435/R00001/RS/Rott. Lelystad, RIZA

Sluis H. v., Westerink P., Matte G. en van Zanten O., (2009). Primeur op rwzi Soerendonk. *H₂O*, 42 (16/17), 14 - 15

Smits A., (2011). Uitbreiding rioolwaterzuivering Sint-Oedenrode. Boxtel, Waterschap De Dommel. <http://www.dommel.nl/we-0/werk-uitvoering-0/gerealiseerde/archief/uitbreiding>

Smits A., Scheepens M. en Berk P. v.d., (2011). Kunstwerken rioolwaterzuivering Sint-Oedenrode. Boxtel, Waterschap De Dommel. http://www.dommel.nl/we-0/werk-uitvoering-0/projecten_uitvoering/kunstwerken#Ecologischeverbindingszonegrootsucces

Smits M., (2006). Zuiver water op de Efteling. Groen & Golf, 2006 (december. <http://edepot.wur.nl/8462>

Stichting Natuurinformatie, (2013). Waarneming.nl. <http://www.waterharmonica.nl/vogels>

Stowa, (29-3-2012). Praktijkervaringen met de Waterharmonica, bijeenkomst Kaatsheuvel op 29 maart 2012, een filmverslag. Amersfoort, Stowa. <http://www.youtube.com/watch?v=yAM12wWD9FU>

Texelse Courant, (27-2-2001). Hoe lepelaars baat hebben bij Texelse waterzuivering, experimentele kwekerij watervlooien bij Eversteekoog. Texelse Courant

Toet S., (2003). A treatment wetland used for polishing tertiary effluent from a sewage treatment plant: performances and processes), Universiteit Utrecht, faculteit Biologie

Ton M., (2000). Aanleg helofytenfilter. Neerslag, 2000/2

Tubantia, (2-11-2011). De streepjescode van het Kristalbad. Tubantia

Uijterlinde C., (29-3-2012). Nabehandeling van RWZI-effluent? Ja, natuurlijk! Praktijkervaringen met de Waterharmonica. Kaatsheuvel, 29 maart 2012. Amersfoort, Stowa

Uijterlinde C. en et al, (2011). Effluentpolishing met algen. Hoofdrapport, 2011-04. Amersfoort, Stowa

VBK-groep, (2011). Uitbreiding en aanpassing RWZI Eversteekoog VBK-groep. <http://www.vbkgroep.nl/?s=eversteekoog>

Veluwe, (2005). Werken aan water, Apeldoorns waterplan 2005 - 2015. Apeldoorn, Waterschap Veluwe

Vente D. d. en Swart E., (2008). Van hoogwaardig zuiveringswater naar hoogwaardig natuurwater: de biozone Ootmarsum. H₂O (20), 29 – 31

Vidal G., (2008). Utilització de matèria orgànica i dinàmica de utrients en el Sistema d'Aiguamolls Construits d'Empuriabrava. Girona, Universitat de Girona / Consorci de la Costa Brava

Vlaski S., Hoeijmakers R., Woldring J. en Rus J.S., (2006). Onderzoek winning zout water en hergebruik RWZI-effluent drinkwatervoorziening Vlieland, 9R7801. Groningen / Leeuwarden, Royal Haskoning / Vitens

Waterforum, (2008). EU-lidstaten mogen mengzones rond lozingspunten zelf vaststellen . http://www.waterforum-archief.net/index.asp?url=/template_a1.asp&que=paginanr=5911

Waterforum, (2012). Rijn en IJssel bouwt nieuwe rioolwaterzuivering in Dinxperlo. WaterForum. http://www.waterforum.net/index.php?option=com_content&view=article&id=1035&Itemid=32

Waternet, (2012). Amsterdamse Waterleidingduinen. Amsterdam, Waternet.
<http://awd.waternet.nl>

Wel A. v. d., (21-1-2005). Klaterwater als waterharmonica, Brabantse Delta levert hoogwaardig water aan de Efteling. Het Waterschap (21 januari 2005), 6 – 8

Wijngaard K. A. v. d., (2003). Zuiveringsmoerassen in Nederland, nr. 010/2003, 1 - 55. Wageningen, Deventer, Edam, LU-Wageningen, Witteveen+Bos, Hollands Noorderkwartier

Zanten O. v., (9-5-2012). Ecologisering van voedselarm rwzi-effluent door middel van een innovatieve en compacte 3-traps Waterharmonica. Epe http://www.stowa.nl/Nieuws__Agenda/Agenda/agenda_items/index.aspx?rId=278

