

stowa

1996-2011:
VAN EFFLUENT TOT BRUIKBAAR OPPERVLAKTEWATER

WATERHARMONICA'S IN NEDERLAND



RAPPORT

2012
12

WATERHARMONICA'S IN NEDERLAND

1996-2011: VAN EFFLUENT TOT BRUIKBAAR OPPERVLAKTEWATER

RAPPORT

2012

12

ISBN 978.90.5773.559.2



Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

UITGAVE	STOWA, Amersfoort, 2012
AUTEURS	Rob van den Boomen (Witteveen+Bos) Ruud Kampf (Vrije Universiteit)
	met medewerking van Theo Claassen (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) Cora Uijterlinde (STOWA)
DRUK	Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA	STOWA 2012-12
ISBN	978.90.5773.559.2

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 kennisinstututen 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	14
6	HOE VERANDERT HET EFFLUENT?	29
7	WAT LEVERT EEN WATERHARMONICA NOG MEER OP BEHALVE NATUUR, RECREATIE EN WATERBUFFERING?	57
8	WAT KOST EEN WATERHARMONICA?	59
9	BEHEER EN ONDERHOUD	63
10	ONTWERPRICHTLIJNEN	66
11	WAT IS HET BELANG VAN DE WATERHARMONICA?	70
	REFERENTIES	72

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 beloofd 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 onderzoek plaatsgevonden naar de werking en effectiviteit van deze systemen en ook nu nog is onderzoek gaande. 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 Oppervlaktewater 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.

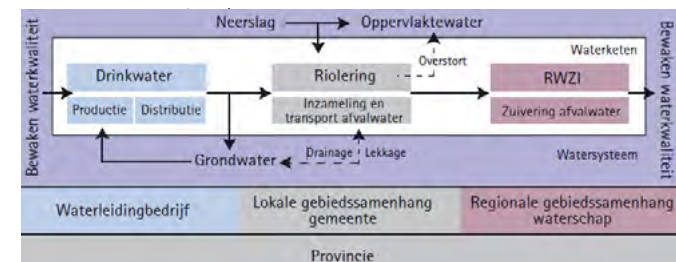
Door deze wet- en regelgeving is de kwaliteit van het oppervlaktewater net als in de ons omringende landen sterk verbeterd. Bij de toetsing van de huidige oppervlaktewaterkwaliteit aan de doelstellingen uit de Kader Richtlijn Water (KRW), lijken de meeste waterlichamen redelijk op orde met betrekking 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 voedingstoffen (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 gehalten. Dus wel redelijk schoon maar geen ecologisch gezond water (Kampf, Schreijer et al, 1997).

3 DE WATERHARMONICA, VAN STOWA PRIJS TOT TOEPASSING

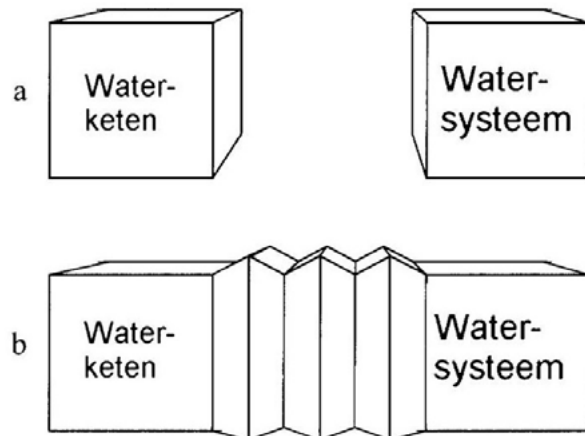
In beleidsplannen van de meeste waterbeheerders werd en wordt nog steeds de Waterketen centraal gesteld. Afbeelding 1 is ontleend aan het "Achtergronddocument: Beschrijving watersysteem en wettelijk kader" in Friesland (Fryslân leeft met water, 2009). Het schema is opgesteld vanuit de Waterketen, waarbij het Watersysteem zowel de bron is van het water als de ontvanger. Vanuit een probleem aanpak gisch 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 onttrekking 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 KLASSIEKE BENADERING VAN DE PLAATS VAN DE WATERKETEN, ONTLEEND AAN (FRYSLÂN LEEFT MET WATER, 2009)



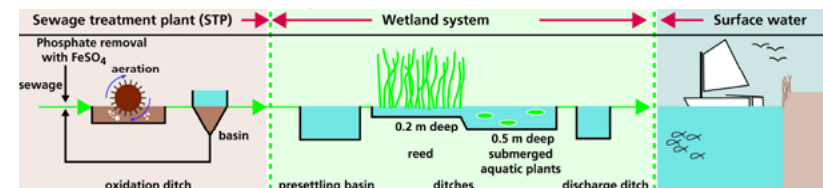
Theo Claassen herkende de kloof (afbeelding 2a) tussen Waterketen en Watersysteem lang geleden. Hij won in 1996 de 2e prijs bij het jubileumsymposium van de STOWA met de inzending van het concept van "het 3 D-schakelsysteem: met behulp van technologie en ecologie worden restlozingen gereduceerd of geëlimineerd 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 (EMISSIESPOOR) AAN WATERSYSTEEM (WATERKwalITEITSSPOOR): DE WATERHARMONICA (CLAASSEN, 1996)



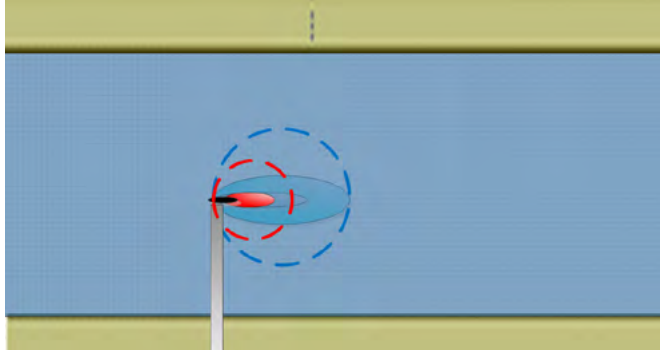
Dit theoretische model is verder praktisch uitgewerkt door Ruud Kampf en Theo Claassen in de Waterharmonica: de natuurlijke schakel tussen Waterketen en Watersysteem (afbeelding 3). Voor het veranderen van de kwaliteit van het effluent van RWZI's naar "bruikbaar oppervlaktewater" zijn zuiveringsmoerassen 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 (KAMPF, CLAASSEN ET AL, 2005)



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 milieukwaliteitseisen voor oppervlaktewater (Waterforum, 2008). In de Kader Richtlijn Water wordt dan ook ruimte gegeven aan een zogenaamde "mixing zone" (Baptist en Ujttewaal, 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 EEN KLEURSTOF (GHAUHARALI EN BOS, 2007)



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 zoals gepland in Amstelveen. In wezen is dat het concept geworden van de Waterharmonica (Kampf, 2008a). 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_3 , NH_4 en BZV vanuit oogpunt van visticiteit, 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 hoofdstukken 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 Eversteekooog 1995-1999 (Schreijer en Kampf, 1995), (Kampf, Schreijer et al, 1996), (Schreijer, Kampf et al, 2000), (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 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 Eversteekoog, Texel, later in Horstermeer, Grou, Girona en ook Garmerwolde (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). Dit onderzoek heeft geleid tot een promotieonderzoek bij de Vrije Universiteit van Amsterdam en TU-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 en Kampf, 2012a en 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), 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. In het begin waren dit helofytenfilters voor de behandeling van ruw afvalwater. De eerste 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. 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 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) worden in de loop van 2012 in gebruik genomen (zie ook www.waterharmonica.nl). 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 en 1994), (Hut en Veen, 2004). Tilburg-Noord is 21,5 ha groot 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), (Sala en Kampf, 2011).

FOTO 3 IMPRESSIE WATERHARMONICA'S



Op foto 4 zijn de locaties van Waterharmonica's in Nederland weer gegeven.

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 onder andere Amstelveen, Garmerwolde, Marum, Haarlo en Dinxperlo, Ameland, Wetterlannen, Bergumermeer, Berkenwoude, Kerkwerpe en de Diezemonding. De status van de geplande Waterharmonica's varieert van "ideeën" 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 "groenblauwe" wig uitgewerkt. Een mogelijke Waterharmonica in Raalte (Otte, Blom et al, 2009) is (nog) niet uitgevoerd vanwege de huidige finan-

ciële 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).

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
ELBURG IS UIT GEBRUIK GENOMEN, WEGENS HOGE NATUURWAARDEN NIET MEER IN WERKING GESTELD. NRS. 1 T/M 12 GEREALISEERD (IN VOLGORDE VAN INGEBRUIKSTELLING), A T/M T 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 1994), (Hut en Veen, 2004)
1	Eversteekooig, Texel	1994: bron zoet water voor landbouw op eiland (Kleiman, 2006), desinfectie wegens passeren woonwijk (Kampf, Schreijer et al, 1996), wordt uitgebreid en vernieuwd (VBK-groep, 2011)
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 en 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 (Jouwensma, 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, 2007), (Boomen, Kampf et al, 2012)
9	Ootmarsum	2010: "ecologisering" effluent voor lozing op een kleine beek (Vente en Swart, 2008)
10	Sint-Oedenrode	2011: Ecologische verbinding, "natuurlijk water", opgenomen in wandelroute, vogelreservaat met uitkijktoren (Smits, 2011), (Smits, Scheepens et al, 2011)
11	Kristalbad (Enschede/Hengelo)	2012: regionale buffering water, recreatie groen bufferzone, ecologisering, waterkwaliteitsverbetering (Regge en Dinkel, 2011a en 2011b) en KRW-subsidie (Agentschap NL, 2011), (NN, 2009)
12	Soerendonk	2012: waterbuffer, ontwikkeling natuur, paaivijver/vismigratie (De Dommel, 2010b)
a	Ameland	aanvulling grondwater in verdroogde duinen, lokstroom voor vispassage, natuurbouw, in voorbereiding (Kroes, 1997), (Min, 2002), (Lange en Veenstra, 2007)
b	Amstelveen	leveren water aan stedelijk gebied, in voorbereiding (AGV, 2011)
c	Apeldoorn	haalbaarheidsstudie, kostenbatenanalyse, "Groen blauwe wig", planning en uitwerking, niet uitgevoerd (NN, 2004), (Prakken, 2003)
d	Arnhem	gebruik als stadswater, niet gerealiseerd (Arcadis, 2004)
e	Bergumermeer-Wetterlannen	natuurlijk water, waterbuffer, KRW-subsidie (NN, 2009), (Projectgroep Wetterlannen, 2011a en 2011b)
f	Berkenwoude	nutriëntenverwijdering, maken "levend" water, buffering, in voorbereiding (HHSK, 2011 en 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), (Vries, Römken et al, 2001), (Jak, Foekema et al, 2000)
i	Dinxperlo	Watertuin en groenzone (Waterforum, 2012)
j	Dreumel	levering water aan toekomstig natuurgebied Over de Maas (Marsman, 2006)
k	Garmerwolde	vermindering zwevend stoflozing, voorbereidend onderzoek (Hoorn, Elst et al, 2011)

nr	naam	voornaamste reden(en) aanleg
l	Geldermalsen	waterberging, visstand en migratie, recreatie, procedure na voorontwerp tijdelijk stilgelegd (Marsman, 2009), (Graaf, 2010)
m	Gieten	Natuurlijk water, nutriënten verwijdering (Haijkens, 2004)
n	Kerkwerpe	"Perpetuum Mobile", voorontwerp (Hoekstra, 2011)
o	Marum	levering water aan natuurgebied, in voorbereiding (Haijkens, 2004), (Oranjewoud, 2010), (Agentschap NL, 2011)
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	Vollenhove	"zuiverende oever", in voorbereiding (Blom en Sollie, 2009)
s	Wervershoof	vijvers voor desinfectie, bestuurlijke goedkeuring, niet uitgevoerd (Graansma en Schobben, 2002), (Durand-Huizing, 2005)
t	Tilburg Moerenburg	buffering "influent", inclusief natuurwaarde, recreatie, voorkomen van overstort (Boomen, 2007)

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 afvoercapaciteit van de Beek de Zandleij bij RWA te klein is om het hele effluent af te voeren. Door het waterniveau met 1,6 m op te voeren kan ruim 200.000 m³ water gebufferd worden. Twee tot drie keer per jaar komt deze Waterharmonica geheel vol te staan: "tot aan de rand" (mondelijke mededeling Waterschap De Dommel).

Er is geen standaard welke van de componenten en in welke volgorde het beste achter elkaar geschakeld kunnen worden. Wel is duidelijk dat actief-slibvlokken vooral door bezinking verwijderd worden en dat losse bacteriën een aantrekkelijke voedselbron vormen voor water-vlooien (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 fosfaatgehaltenes, 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 en Kampf, 2012a, deelstudie 4).

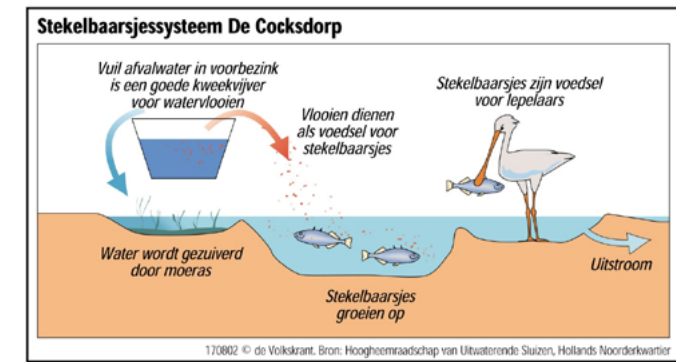
De rietsloten zijn in de meeste systemen lijnvormige elementen die parallel aan elkaar zijn geschakeld om dode zones te voorkomen en propstroom te creëren. Deze zijn relatief ondiep (20-50 cm). De breedte van de sloten wordt bepaald door de reikwijdte van de machines voor onderhoud. Voor Kristalbad was 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 maaien plaats kan vinden met maaiboten.

Voor de RWZI de Cocksdoorp 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 aan-

dacht voor dit concept (Texelse Courant, 2001), (De Volkskrant, 2002), (Noord-Hollands Dagblad, 2002), (Foekema en Kampf, 2002), (Kampf, Eenhoorn et al, 2003), was de tijd er toen nog niet rijp voor, wellicht nu wel.

AFBEELDING 6

DE WATERHARMONICA ALS "VOEDSELKETEN" BENADERING, VAN DEELTJES IN AFVALWATER, VIA WATERVLOOIEEN 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), (Lange en Veenstra, 2007).

In tabel 2 zijn karakteristieken van Nederlandse Waterharmonica systemen die in 2011 in bedrijf waren (Elburg geweest) weergegeven (Boomen en Kampf, 2012a, deelstudie 4).

TABEL 2 ENKELE KARAKTERISTIEKEN VAN NEDERLANDSE WATERHARMONICA SYSTEMEN

Systeem	Oppervlak (m ²)	Debiet (m ³ /dag)	Hydraulische belasting (m/dag)	Verblijftijd (dag)	Deel van effluent (%)
Aqualân te Grou	8.000	1.200	0,15	3,3	ca. 25
Elburg	150.000	10.000	0,07	15	100
Eversteekoog te Texel	13.100	3.500	0,27	2 ^a	100
Klaterwater te Kaatsheuvel	71.200	1.380	0,02	105	ca. 10 ^b
Land van Cuijk te Haps	35.700	8.650	0,24	4	ca. 25
Ootmarsum	23.000	3.030	0,13	3,7	100
Tilburg-Noord ^c	215.000	67.000	0,3 – 0,5 ^c	1-2 ^c	100
Waterpark Grote Beerze te Hapert	38.000	7.200	0,19	2,8	100
Sint Maartensdijk	10.200	2.400	0,24	1,5	100

Ad ^a: Eversteekoog: Tijdens onderzoek 1995-1999 verblijftijden tussen 1,3 en 11 dagen.

Ad ^b: Klaterwater: ca. 10 % van effluent wordt afhankelijk van de waterbehoefte op RWZI behandeld in zandfiltratie met vergaande P-verwijdering.

Ad ^c: Tilburg-Noord is niet opgenomen in de rapportage Waterharmonica, onderzoek naar zwevend stof en pathogenen (Boomen en Kampf, 2012a en 2012b). De vermelde oppervlakte is de bruto oppervlakte dat voor waterberging beschikbaar is. De hydraulische belasting tijdens DWA en de hydraulische verblijftijd zijn geschat.

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 fosfaat en stikstof bereikt. Deze mesocosms zijn geplaatst bij Eversteekoog, Horstermeer, Grou, Empuriabrava in Spanje (Kampf, 2009) en Garmerwolde (Hoorn, Elst et al, 2011), 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, 2011), (Flykt, 2010). Die systemen zijn vergelijkbaar in grootte 1,6 - 28 ha en zijn al langere tijd in bedrijf (tussen 7 en 17 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 recent symposium in 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 bleek dat de Waterharmonica in oostelijk Europa een goedkoop alternatief kan zijn voor het verbeteren van de effluent kwaliteit van een minder goed werkende RWZI. Voorbeelden zijn verder 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) (Kampf, 2008c). 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), (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, 2005) over het potentieel voor toepassing in Tanzania als alternatief voor Ecosanitie: "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) - (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 diepgaand (promotie) onderzoek. De voornaamste afgeronde onderzoeken zijn al eerder genoemd. Er lopen twee promotietrajecten (Ruud Kampf op de VU/TUD en Bram Mulling op de UvA) waaruit nog nieuw inzicht ontstaat in het lot van deeltjes in een Waterharmonica. En aan de bestaande en nieuwe Waterharmonica's zijn 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:

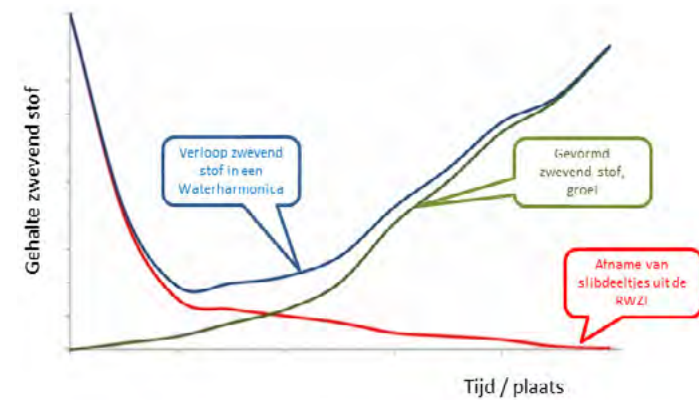
- de bredere aandacht voor verwijdering van zwevend stof van effluent-filtratie technieken op RWZI's: kunnen Waterharmonica systemen dit beter, goedkoper, of leidt het tot een aanvullende verwijdering?
- wat is het effect van slibuitspoeling van een RWZI onder RWA condities. Wordt de uitspoeling gebufferd?
- 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 en Kampf, 2012b) als het promotie-onderzoek van Bram Mulling op de 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.

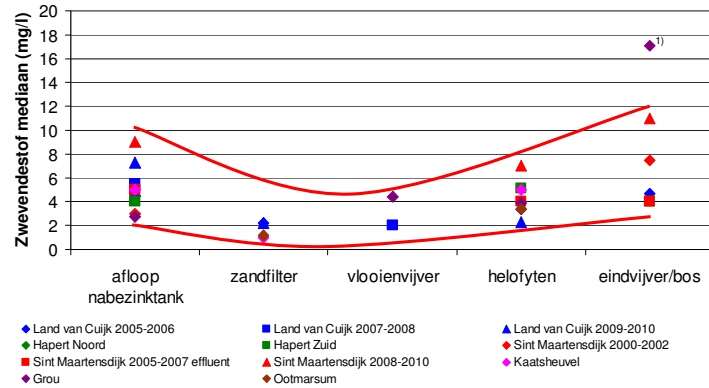
De totale hoeveelheid zwevend stof neemt als gevolg van deze processen mogelijk midden in een Waterharmonica af, maar aan het einde is de hoeveelheid mogelijk weer toegenomen. Dit is de zogenaamde zwevend stof paradox (Schreijer, Kampf et al, 2000), (Kampf, 2009). Afbeelding 7 geeft dit weer.

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 en Kampf, 2012b). 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 paaijvers) neemt de absolute hoeveelheid zwevend stof weer toe, maar is nog altijd laag.

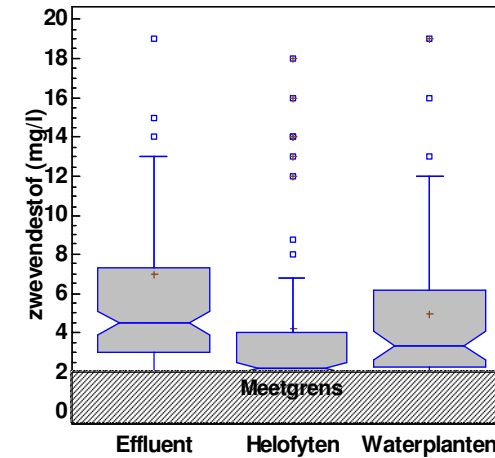
AFBEELDING 8 DE ZWEVEND STOF PARADOX GEMETEN; METINGEN VAN 11 SYSTEMEN IN NEDERLAND (MEDIANAANWAARDEN) (BOOMEN EN KAMPF, 2012A, DEELSTUDIE 4)



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 en Kampf, 2012b). 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 boxes 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.

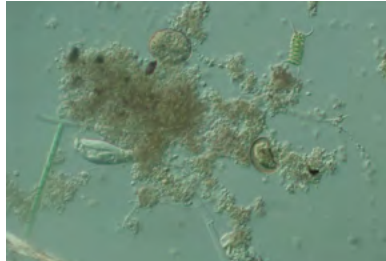
AFBEELDING 9 DE ZWEVEND STOF PARADOX GEMETEN; METINGEN VAN LAND VAN CUIJK 2005-2006 (BOOMEN EN KAMPF, 2012A, DEELSTUDIE 4)



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 Eversteoog in Waterharmonica weergegeven. Deze verandering van deeltjessamenstelling werd bevestigd door onderzoek aan het systeem van Grou in 2010 (Boomen en Kampf, 2012b).

FOTO 6

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



EFFLUENT RWZI MET ZWEVEND STOF AFKOMSTIG VAN
HET ACTIEF SLIB PROCES



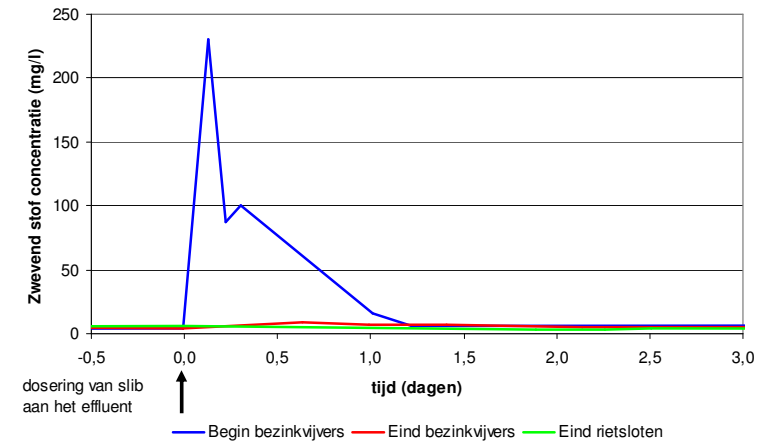
MEER NATUURLIJK ZWEVEND STOF AAN HET EIND VAN
DE WATERHARMONICA

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 en Kampf, 2012a, 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 SLIBUITSPOELING
(NOVEMBER/DECEMBER 2009) (BOOMEN EN KAMPF, 2012A, 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, Oost et al, 2012). Dit strookt ook met de waarnemingen in het Stowa-onderzoek naar biomassakweek (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 nabe-

zinktank 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 en Kampf, 2012a, deelrapport 3). De beheersbaarheid van het bezinkproces in de nabezinktank is wel van belang omdat het bezonken actief slib noodzakelijk is in het zuiveringsproces.

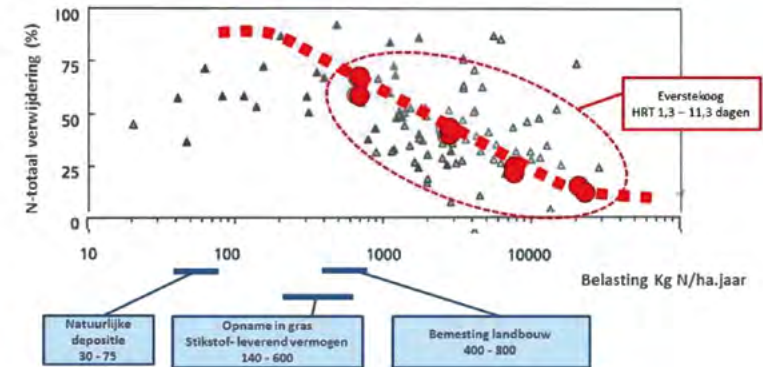
NUTRIËNTEN

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 dan ook meer 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, 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. Het kan geen kwaad om het lot van nutriënten in Waterharmonica's met een "landbouwbril" te bekijken en "landbouwkennis" over bemesting te gebruiken (Hoeks, 2008).

Bij een verblijftijd van 2 dagen was de belasting van Eversteekooog met totaal-N circa 4.900 kg N/ha.jaar. Hierbij is een verwijdering van stikstof gemeten van 1.300 kg N/ha.jaar. Onderzoek met een verblijftijd van 0,3 dag leverde een belasting op van circa 20.000 kg N/ha.jaar en een verwijdering van 1.800 kg N/ha.jaar. Bij een verblijftijd van 10 dagen was de belasting ca. 600-700 kg N/ha.jaar en de verwijdering 400 kg N/ha.jaar. Ondanks dat dus absoluut wel meer stikstof wordt verwijderd bij een hoge belasting neemt de effectiviteit van stikstofverwijdering af bij hogere belasting (= kortere verblijftijd).

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 -ontwikking 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 Eversteekooog zoals bovengestand beschreven weergegeven.

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



De totaal stikstof verwijdering in de verschillende Waterharmonica systemen in Nederland wordt gemeten in de range van 10-25%. Het verticale zandfilter van de RWZI Kaatsheuvel draagt bij aan een relatief hoge verwijdering van circa 66%. In tabel 3 zijn de verwijderde hoeveelheden en percentages, gerelateerd aan de belasting gepresenteerd.

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

	N-totaal			P-totaal		
	belasting	verwijdering	verwijdering	belasting	verwijdering	verwijdering
	kg/ha.jaar	kg/ha.jaar	%	kg/ha.jaar	kg/ha.jaar	%
Aqualân/Grou	2.200	430	20	340	130	38
Eversteekoog	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 Zweden worden bij enkele Waterharmonica systemen stikstofverwijderingsrendementen gemeten van 25-50%, met lagere debieten en hogere concentraties (Andersson en Kallner, 2002), (Flykt, 2010). 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. Nog niet bekend waar deze verschillen door veroorzaakt worden.

Voor fosfaat geldt ook dat Waterharmonica systemen met een hogere belasting een lager verwijderingsrendement hebben. Totaal-fosfaat verwijdering worden gemeten in de range van 2-40%. Totaal-fosfaat verwijdering vindt al grotendeels plaats in de eerste bezinkvijvers (Boomen en Kampf, 2012a, deelstudierapport 3).

In Klaterwater leidt de combinatie van een zandfilter (Astra filter met een vrij hoge dosering), een verticaal doorstroomd rietbed en daarna vijvers, 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 (Flykt, 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).

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 andere pieken (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 NH₄ en NO₃ 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).

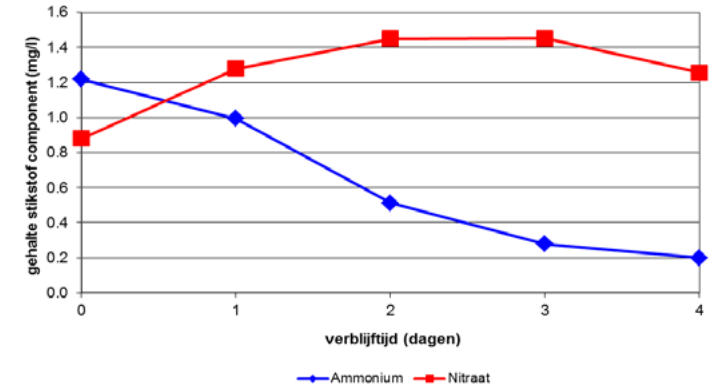
Al in de rapportage van het onderzoek op RWZI Eversteekoog (Schreijer, Kampf et al, 2000) werd beschreven dat in Waterharmonica's nutriënten niet als een vervuiling maar als een voedselbron in de beoogde voedselketen gezien kan worden. Een probleem is wel dat de verhouding tussen de concentraties van 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 belasting (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 (Flykt, 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 (Blom en Maat, 2005).

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. Zoals Klaterwater aantoonde 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 praktisch schaal onderzocht en uitgetest. Voor fosfaatverwijdering zijn ijzerfilters toegepast. 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 12).

AFBEELDING 12 GEHALTEN AAN NH_4 EN NO_3 IN EEN SERIE VAN VIER MESOCOSMS IN GROU MET ELK ÉÉN DAG VERBLIJFTIJD (PROEFSCHRIFT RUUD KAMPF, IN VOORBEREIDING)

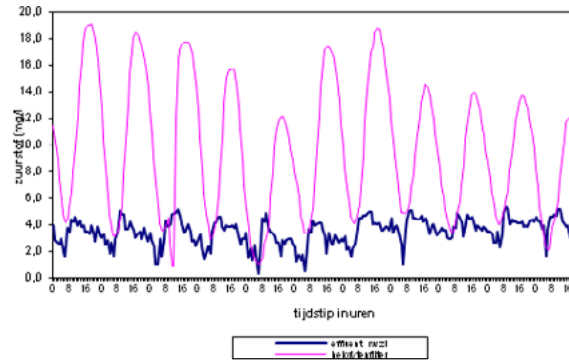


ORGANISCHE STOF EN ZUURSTOFHUISHOUDING

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:

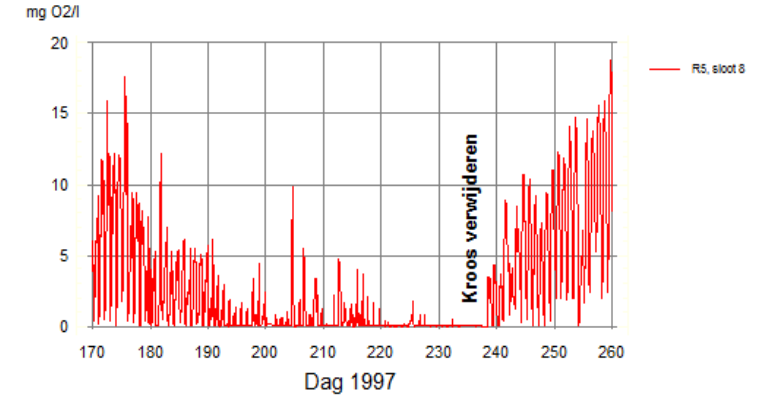
- het moerassysteem brengt in het zuurstofarme effluent een krachtig dag-nacht ritme van het zuurstofgehalte teweeg (zie afbeelding 13);
- vergroting van de verblijftijd heeft een reductie van de zuurstofvraag tot gevolg waardoor de minimale waarden eind van de nacht hoger bleven;

AFBEELDING 13 DE TOENAME VAN DE ZUURSTOFRITMIEK IN EVERSTEKOOG (ZUURSTOFGEHALTES IN HET RWZI EFFLUENT (BLAUW), EN IN HET MOERASEFFLUENT (PAARS), PERIODE 15-25 JUNI 1996 (SCHREIJER, KAMPF ET AL, 2000)



- de ritmiek 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 14).

AFBEELDING 14 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 en Kampf, 2012b) en (Boomen, 2004).

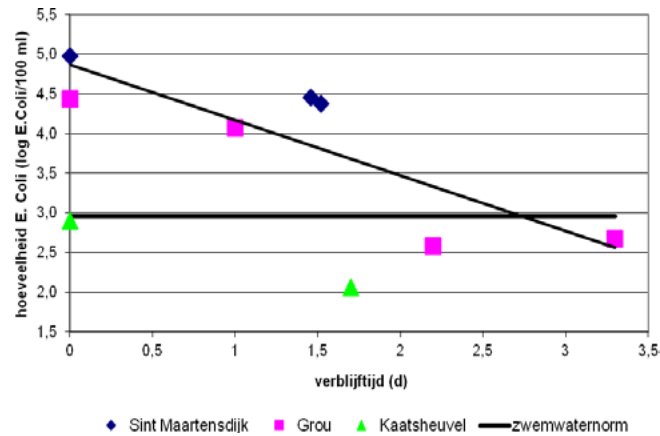
PATHOGENEN

In de afloop van de nabezinktank wordt E.Coli, een indicator voor pathogenen, gemeten in waarden van 50.000 tot 100.000 E.Coli/100 ml. Er is geen lozingsnormering voor pathogenen. Indien het wenselijk is de waarden voor E.Coli van het water van de afloop van de nabezinktank op de locatie van lozing naar de zwembadnormering 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 Eversteekoog reeds aangetoond dat

een verwijdering met 99 tot 99,9% (2log tot 3log) van E.Coli goed mogelijk is. Na de eerste vijvers in Eversteekoog 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 en Kampf, 2012b) en (Boomen en Kampf, 2012a, deelstudie 4). Ook uit de analyse van deze meerjarige meetreeksen komt naar voren dat de hoeveelheid pathogenen "logaritmisch" afneemt met de verblijftijd. In afbeelding 15 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 (doorgetrokken lijn).

AFBEELDING 15 DE INVLOED VAN DE HYDRAULISCHE VERBLIJFTIJD OP HET AANTAL E.COLI (MIDIAAN VAN AANTAL PER 100 ML) IN DRIE NEDERLANDSE WATERHARMONICA'S (BOOMEN EN KAMPF, 2012B). DE ZWARTE HORIZONTALE LIJN GEEFT DE ZWEMWATER NORM AAN



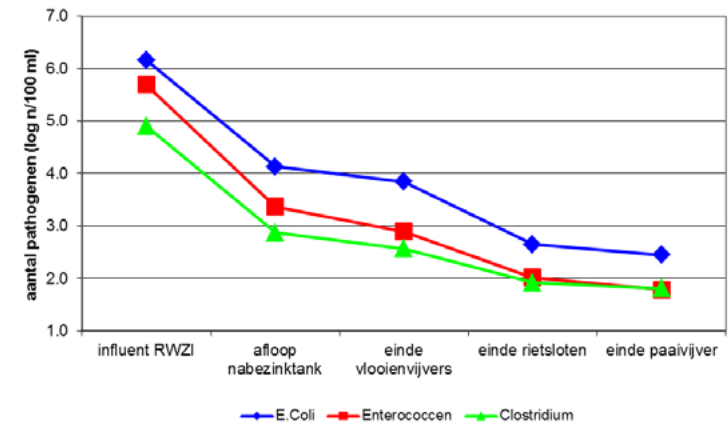
De metingen van Kaatsheuvel laten een vergelijkbare afname zien als bij die van Grou en Sint Maartensdijk die echter lager start omdat de zandfilter van de RWZI Kaatsheuvel al de eerste reductie heeft bewerkstelligd. Uit deze metingen kan een lineaire relatie worden afgeleid van $\log E.Coli/100 \text{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

leid van $\log E.Coli = -0,65 * HRT + C$. 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 zwemwaternormering 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.

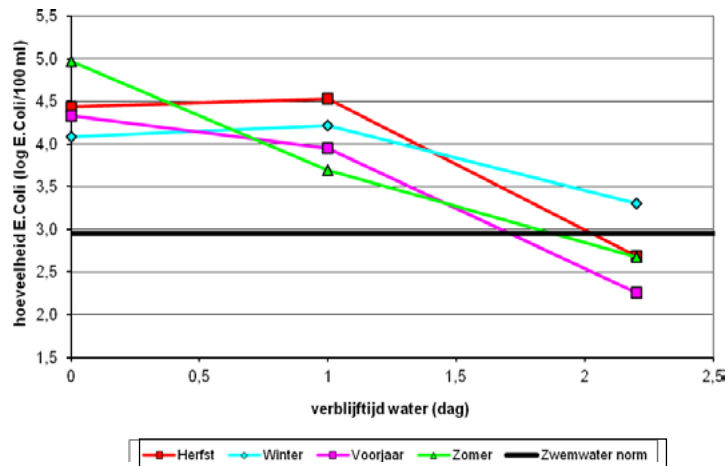
Verder is in onderzoek aangetoond dat voor de afname van de pathogenen zowel de bezink/vlooienvijvers als de rietsloten een belangrijke rol spelen. Afbeelding 16 laat de rol van zowel de vijvers als de rietsloten zien.

AFBEELDING 16 HET VERLOOP VAN DE PATHOGENEN VAN RESP. E.COLI, ENTEROCOCCEN EN CLOSTRIDIUM PERFRINGENS (AANTAL PER 100 ML) IN DE ACTIEF-SLIBINSTALLATIE EN DOOR HET AQUALAN VAN DE RWZI GROU. DATA (12 METINGEN IN 2010, INFLUENT TWEE MAAL BEMONSTERD). DATA AFKOMSTIG UIT HET WIPE-ONDERZOEK, BEWERKT (FOEKEMA, OOST ET AL, 2012)



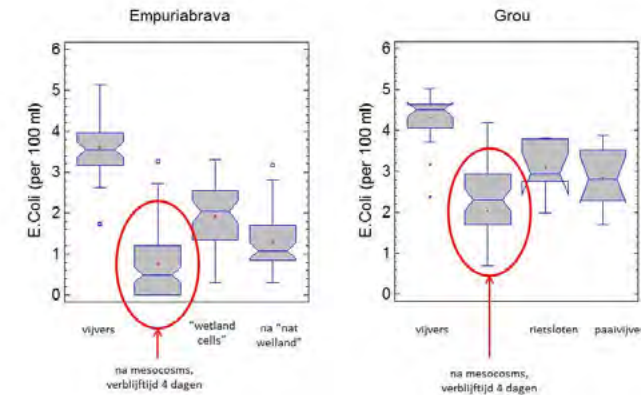
De sturende processen daarin zijn waarschijnlijk de predatie door zoöplankton en (in mindere mate) de afsterving als gevolg van UV-straling. De pathogenen lijken niet zozeer te bezinken: het zijn veel kleine losse cellen die niet zijn gebonden aan zwevend stof. Wel wordt een duidelijk verschil in zomer en winter gesignaleerd. Bij Eversteekoog 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 en Kampf, 2012b) en (Boomen en Kampf, 2012a, deelstudie 4). In afbeelding 17 is dit gepresenteerd. Uit de mesocosm-studies blijkt dat bij voldoende aantallen watervlooien de desinfectie in de winter bij temperaturen onder de 10 graden weinig lager is dan in de zomer (Kampf, 2005a). De afname 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 watervlooien in Grou. Zie ook afbeeldingen 17 en 18.

AFBEELDING 17 DE INVLOED VAN DE HYDRAULISCHE VERBLIJFTIJD OP HET VERLOOP VAN E.COLI-GEHALTE (AANTAL/100 ML) IN DE VERSCHILLENDE SEIZOENEN OP AQUALÂN GROU (BOOMEN EN KAMPF, 2012B)



Ook hier toont het onderzoek in de mesocosms aan dat een verdere procesoptimalisatie mogelijk is, zie afbeelding 18.

AFBEELDING 18 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-PLOTS (BOOMEN EN KAMPF, 2012A)



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. Ook is mogelijk de besmetting door vogels op de mesocosm minder. In het proefschrift van Ruud Kampf (in bewerking) zal dit vraagstuk nader worden uitgewerkt.

In voorgaande is aangetoond dat de hydraulische verblijftijd een belangrijke invloed heeft (afbeelding 15) en dat kortsluitstromen 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 en Kampf, 2012a, 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 Eversteekoog en Wervershoof aangehaald (Kampf, Schrijer et al, 1997). Het betreft resultaten uit het zomerseizoen van 1996. E.Coli werd in Eversteekoog (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 gebruikt. Ook de processtabiliteit na de Waterharmonica van Eversteekoog 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 reeds 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), (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, Oost 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 (stelkbaarzen). 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 de Waterharmonica's van Land van Cuijk hoge sterfte geconstateerd onder de blootgestelde stelkbaarzen. De oorzaak van deze sterfte kon niet worden achter-

haald, maar werd blijkaar 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. De vissen vertoonden 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, Oost 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, Oost et al, 2011 en 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 ozon dosering of UV-behandeling, wel de ecotoxiciteit verhoogt.

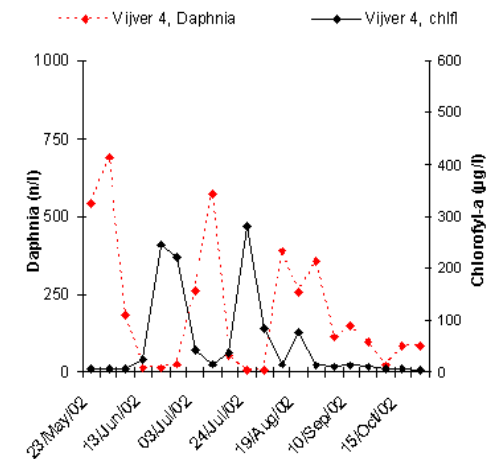
ECOLOGIE

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 Eversteekoog (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 Eversteekoog kwam bij een vrij lange verblijftijd van 4,5 dag in een proefvijver twee maal een piek voor direct na het instorten van de watervlooienpopulatie (afbeelding 19). In beide gevallen herstelde de populatie zich weer snel (Kampf, 2005c).

AFBEELDING 19

INVLOED VAN WATERVLOOIEN (RODE LIJN) OP VOORKOMEN VAN ALGEN IN PROEFVIJVERS IN EVERSTEKOOG, 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 waren de dominante waterplantsoorten in de sloten vooral Smalle Waterpest, Gedoornnd Hoornblad, Eendenkroos, Schedefonteinkruid, Tenger Fonteinkruid, Bultkroos en Gekroesd Fonteinkruid. 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 µm), 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, slak-

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)



ken 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 m² 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 wantsen (Schreijer, Kampf et al, 2000), in Grou was er het eerste jaar enorme flab en kroosgroei (Boomen, Kampf et al, 2012), daarna veel minder.

In het Aqualân Grou zijn in 2008, 2009, 2010 en 2011 visstand opnames uitgevoerd (Hut, 2008), (Koopmans, 2010 en 2011). In de eerste jaren bleven de watervlooienvijvers vrij van vis, in de rietsloten werden alleen stekelbaarsjes aangetroffen. In de paaienvijver van Grou is het aantal en de diversiteit aan vissen na aanleg sterk toegenomen waardoor deze paaienvijver een aantrekkelijke aanvulling van het Friese boezemsysteem is (Koopmans, 2011). In tabel 4 is het aantal en de soorten vis in de vispaaienvijver van Grou geïllustreerd. In het Aqualân zitten opvallend veel kikkers (Boomen, Kampf et al, 2012).

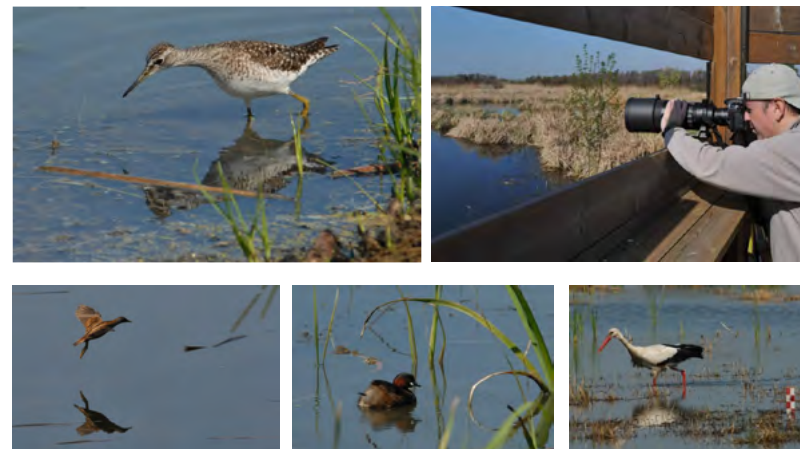
Na enkele jaren kwamen echter ook in de watervlooienvijvers van Grou, die juist zo veel mogelijk visvrij werden gehouden, grote aantallen Tiendoornige stekelbaarsjes voor. Om hoge aantallen watervlooien (en ander zoöplankton) in de watervlooienvijvers te handhaven, is het noodzakelijk de vis te weren. 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 NH₄ op de vijvers (waardoor er een selectie ontstaat van de grote en sterke *Daphnia magna*).

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

	2008			2009			2010			2011		
	n	n broed	% broed	n	n broed	% broed	n	n broed	% broed	n	n broed	% broed
Baars	9	2	22	102	83	81	112	85	76	126	102	81
Blankvoorn	54	36	67	75	42	56	41	22	54	116	66	57
Bittervoorn	-	-	-	14	2	14	7	2	29	18	18	100
Brasem	2	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Driedoornige stekelbaars	1	1	100	1	1	100	-	-	-	1	1	100
Giebel	2	2	100	-	-	-	-	-	-	1	1	100
Kleine modderkruiper	4	-	0	10	-	0	1	-	0	-	-	-
Kolblei	2	1	50	13	11	85	5	5	100	47	47	100
Paling	2	-	0	4	-	0	1	-	0	0	-	-
Pos	1	1	100	4	1	25	13	10	77	0	-	-
Riviergrondel	6	2	33	46	20	43	44	39	87	1	1	100
Ruisvoorn	6	-	0	3	3	100	24	21	88	6	1	17
Snoek	3	3	100	2	-	0	6	1	17	6	3	50
Tienddoornige stekelbaars	1	1	100	1	1	100	-	-	-	0	-	-
Vetje	-	-	-	1	1	100	-	-	-	-	-	-
Zeelt	5	2	40	4	4	100	2	1	50	3	2	67
Totaal	98	51	52	288	166	58	256	184	72	325	242	74
Aantal soorten/	14	10		14	11		11	9		10	10	
Aantal soorten broed												

Zowel op Eversteekoo, als bij Land van Cuijk en Grou, zijn na de aanleg van het Waterharmonica (periodiek) grote aantallen vogels gesignaleerd. Als broedvogels bijvoorbeeld Kuifeend, Slobeend, Wilde eend, Krakeend, Knobbelzwaan, Stormmeeuw, Scholekster, Tureluur, Meerkoet, Waterhoen, Gele Kwikstaart en Kleine Karekiet. Zowel Lepelaars en Ijvogels worden door de stekelbaarsjes aangetrokken. Ook is in het Aqualân van Grou een Roerdomp gesignaleerd. Foto 9 is een collage van de Waterharmonica in Empuriabrava Spanje. Deze toename aan biodiversiteit wordt daar als zeer aantrekkelijk gekwalificeerd.

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 Eversteekoo 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, 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

FOTO10

INFORMATIEBORD AQUALÂN TE GROU (FOTO RUUD KAMPF)



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 en in Soerendonk wandelroutes in het Waterharmonica aangelegd en zijn de hekken direct om de RWZI geplaatst waardoor de Waterharmonica vrij toegankelijk is. 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 Kristalbad bevorderd door de bezoekers zicht te geven op het gebied vanuit twee 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 muggenoverlast gesignaleerd.

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 Eversteekoo, Grou, Land van Cuijk en Soerendonk) op ca. 175.000 Euro per hectare (prijsspeil 2011). Bij eenvoudige systemen (zoals Sint Maartensdijk) kan het naar huidige prijspeil beperkt blijven tot ca. 75.000 Euro 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 nutriëntenverwijde-

ring of pathogenenverwijdering. In tabel 5 zijn voor de voornaamste Waterharmonica's enkele karakteristieke weergegeven. Van Zweedse Waterharmonica's zijn gemiddelde aanlegkosten van ca. 150.000 Euro per hectare bekend.

TABEL 5 **INVESTERINGSKOSTEN VAN WATERHARMONICA SYSTEMEN IN NEDERLAND**
(BOOMEN EN KAMPF, 2012B)

	Niet geïndexeerd				Geïndexeerd naar 2011		
	prijspeil	investering	per hectare	per i.e.	index factor	per hectare	per i.e.
		Euro	Euro/ha	Euro/i.e.		Euro/ha	Euro/i.e.
Elburg	1977	200.000	13.500	1,25	1,75	23.500	2,20
Eversteekooog	1994	245.000	188.500	8,75	1,33	251.500	11,65
Land van Cuijk	2000	600.000	154.000	8,80	1,17	179.500	10,30
Grou	2006	175.000	199.000	21,90	1,08	214.000	23,55
Hapert	2001	575.000	151.000	9,95	1,17	176.500	11,65
Klaterwater	1997	1.039.000	146.000	94,10	1,33	194.500	125,45
Maartensdijk	2000	53.000	53.000	2,75	1,17	62.000	3,20
Ootmarsum	2008	250.000	108.500	10,30	1,08	117.000	11,10
Raalte ¹	2009	2.400.000	267.000				
Soerendonk ²	2010	1.690.000	256.000				

Ad ¹: Aanleg Raalte is opgeschort, geraamde kosten uit (Ott, Blom et al, 2009).

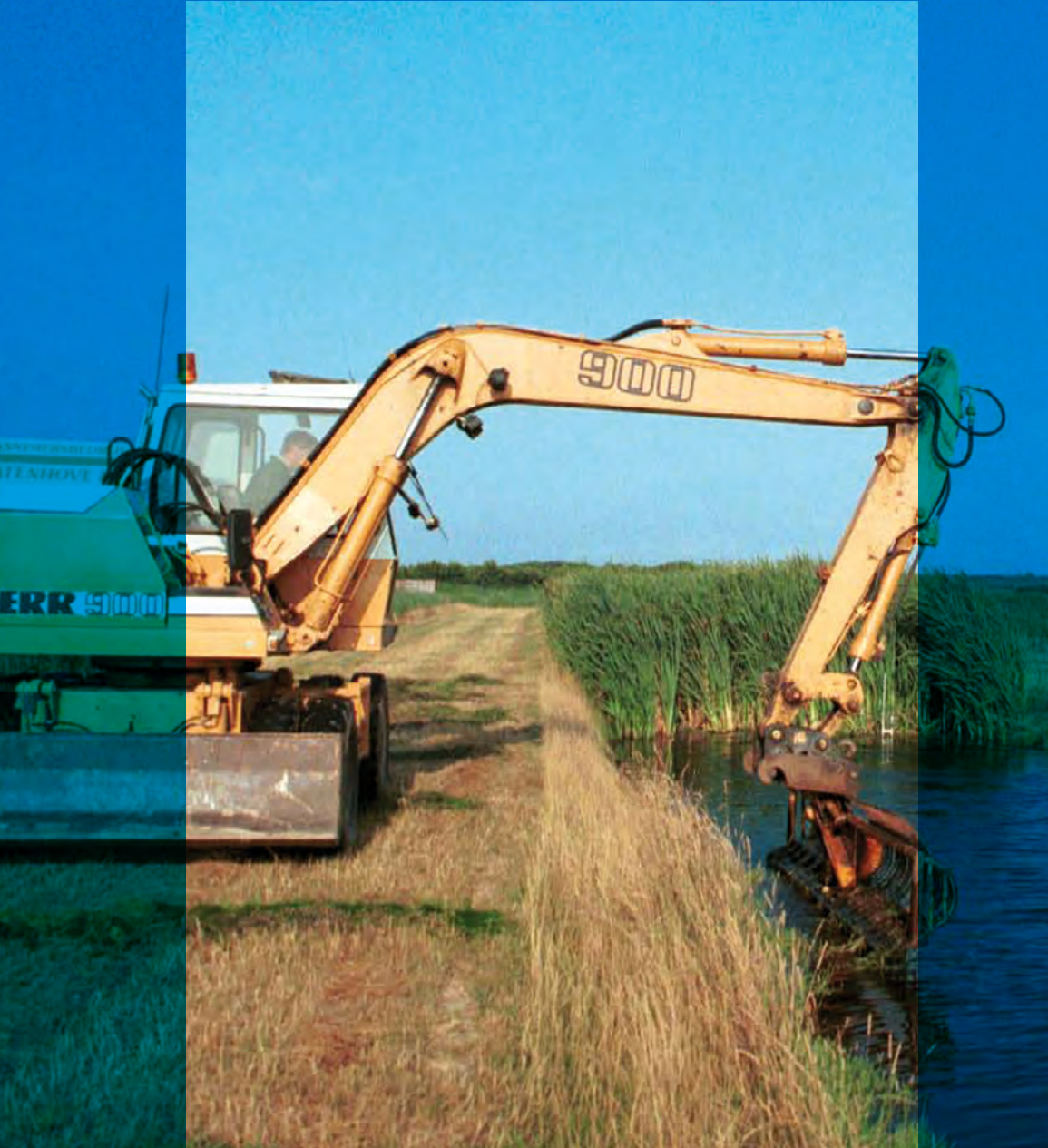
Ad ²: Soerendonk wordt in 2012 in gebruik genomen.

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 Euro elk besteed aan beheer en onderhoud en monitoring. Dit is afhankelijk van de monitorings-inspanning (van basis-monitoring tot onderzoeksgericht) en van het oppervlak van de Waterharmonica. Per hectare Waterharmonica is dit gemiddeld circa 7.500 Euro/ha.jaar met een bandbreedte tussen 5.000 Euro/ha.jaar (voor de systemen van meerdere hectares) en 25.000 Euro/ha.jaar (voor systemen tot 1 hectare. Voor Zweedse Waterharmonica systemen zijn bedragen voor beheer en onderhoud bekend tussen 1.000 en 7.000 Euro/ha.jaar). Bij monitoring betreft dat overigens een

basismonitoring zonder uitgebreide onderzoeksdoelen. Het onderhoud is vooral het jaarlijks of tweejaarlijks maaien van het riet en het verwijderen en afvoeren van waterplanten. Accumulatie van slib (en evt. verontreinigingen) lijkt beperkt en kan beter plaatsvinden in goed bereikbare vijvers dan tussen het riet. Afgezien van eventuele pompkosten, zoals Grou en Klaterwater, verbruiken Waterharmonica's geen energie (Baltussen, 2011).

In de Nederlandse Waterharmonica's wordt het beheer 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 et al, 2006), zie ook (Eekeren, Verwer et al, 2012).

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

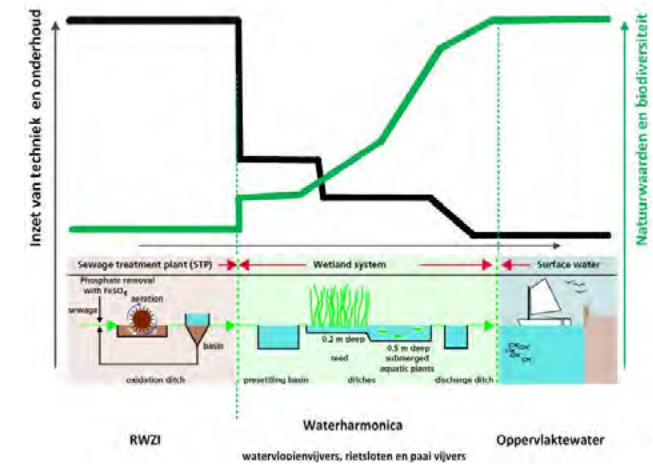


9

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 20, gebaseerd op de configuratie van de Waterharmonica's van Eversteekooij, Grou en Soerendonk, is dit gevisualiseerd (Kampf en Sala, 2009).

AFBEELDING 20 OMGEKEERDE RELATIE BEHEER EN ONDERHOUD VERSUS NATUURWAARDE



Afbeelding 20 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, draadalgen). 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).

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 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.

FOTO 11

DROOGLEGGING VLOOIENVIJVER IN EMPURIABRAVA (FOTO RUUD KAMPF)



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. Voor Kristalbad is 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 Everstekeog, 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 is 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 Everstekeog 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 20 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 watervlooienspopulatie (het is mogelijk om door oogsten van ca. 20 % van de populatie per dag de stand van watervlooiens stabiel te maken (proefschrift Ruud Kampf, in voorbereiding). 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 diversiteit.

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 van 3 tot 4 dagen is noodzakelijk, doch 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.** Dit kan 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 vlokkingmiddel 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 20. 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 waterbergen, 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 sliblozingen bij RWA op te vangen (bijv. Everstekeog 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 OPPERVLAKE IN M²/I.E. (BIJ 125 – 150 L/I.E. DAG)

Belasting	Belasting (m/dag)	Specifiek oppervlakte (m ² /i.e.)	Waterharmonica's per belasting klasse als voorbeeld, zie ook tabel 1
Zeer laag	$< 0,05$	$> 2,5$	Klaterwater
Laag	$0,5 - 0,1$	$1,25 - 2,5$	Elburg
Middel	$0,1 - 0,20$	$0,75 - 1,25$	Waterpark Groote Beerze Hapert, Aqualân Grou Ootmarsum
Hoog	$0,2 - 0,3$	$0,5 - 0,75$	Everstekeog, Sint Maartensdijk, Land van Cuijk
Zeer 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.

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 $< 0,5$ m²/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 vergoed door de nutriënten te zien als voedingstof in de voedselketen benadering in een kweekstelsel: nutriënten kunnen (tijdelijk) worden opgeslagen in algen (Uijterlinde, 2011), phototrofe biofilms (Rijstenbil, 2006), waterplanten, kroos, etc.

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 bijvoorbeeld 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 slechte 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 inmiddels 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 combinatie met overige functies als waterberging, natuur, recreatie en biomassaproductie bijvoorbeeld (Doorn, 1998). Een waterreservoir in de vorm van een aangelegde vijver kan deze functies verder versterken’.

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).

REFERENTIES

- Agentschap NL (2011). Innovatieprogramma Kaderrichtlijn Water.
www.agentschapnl.nl/nl/node/118962.
- AGV (2011). Jaarstukken AGV 2010. www.agv.nl/aspx/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.
- Andersson, J. L., Ridderstolpe, P., Gunnarson, S., en Tonderski, K. S. (2011). Efficiency and management considerations in free water surface wetlands for tertiary wastewater treatment. Uppsala: Svenskt Vatten AB, Linköpings Universitet.
- Aqua for All (2009). Werken aan onafhankelijkheid, Jaarverslag 2009. www.aquaforall.nl/documents/aqua4all/downloads/aqua_for_all_jaarverslag_2009_def.pdf
- Arcadis. (2004). Pré-haikbaarheidsonderzoek hergebruik rwzi-effluent in watersysteem Arnhem-Zuid. Arnhem, Arcadis, gemeente Arnhem.
- Baltussen, J. J. M. (2011). Energiegebruik nageschakelde behandelingstechnieken op rwzi's (2011-w09). Amersfoort: Stowa.
- Baptist, M. J. en Uijttewaal, 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., en Jong, P. d. (2007). Het actief-slibproces, de mogelijkheden en grenzen. Utrecht: Stowa.
- Berbee, R. P. M., Maas, H., Matla, E., en Loo, H. v. d. (2001). Toxiciteit effluent rwzi Aarle-Rixtel sterk afgenomen. H2O, 34, 25-26.
- Berbee, R. P. M., Naber, A., Kerkum, L., Espeldoorn, A., Maas, H., Tonkes, M. et al. (2000). Ecotoxicologisch en chemisch onderzoek RWZI Aarle Rixtel (Helmond) en rivier de AA. (RIZA-rapport 2000.022). Lelystad: RIZA.
- Blankendaal, V. G., Foekema, E. M., en Goedhart, P. C. (2003). Ecotoxicologische aspecten van rwzi-effluent 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. EU-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. (2005-19). Utrecht: Stowa.
- Boomen, R. M. v. d. (2004). Praktijkonderzoek moerassysteem RWZI Land van Cuijk; Samenvattende rapportage monitoring, 2001-2003. (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. (rapport nr. Tb19-133-1 d.d. 25 januari 2007). Deventer: Witteveen + Bos.
- Boomen, R. M. v. d. (2008). Visie document Waterharmonica, (STO 144-1-1). Deventer / Utrecht: Witteveen + Bos / Stowa.
- Boomen, R. M. v. d. en Kampf, R. (2012a). Waterharmonica, onderzoek naar zwevend stof en pathogenen, deelstudierapporten. (Stowa 2012_11). Amersfoort: Stowa.
- Boomen, R. M. v. d. en Kampf, R. (2012b). Waterharmonica, onderzoek naar zwevend stof en pathogenen, hoofdrapport (Stowa 2012_10). Amersfoort: Stowa.
- Boomen, R. M. v. d., Kampf, R., en Claassen, T. H. L. (2012). Aqualân Grou, vijf jaar Waterharmonica. Deventer / Leeuwarden: Witteveen + Bos / Wetterskip Fryslân.

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). Lelystad: Rijkswaterstaat, directie Flevoland.

Butijn, G. D. (1994). Nutrientenverwijdering in het helofytenfilter te Elburg bij lage belasting. (1994 - 15 Anw).

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Flevoland.

Chanzi, H. (11-7-2005). The potential for the Waterharmonica concept in Tanzania. www.waterharmonica.nl/conferences/index.htm

Claassen, T. H. L. (1996). Het 3D-schakelsysteem: van tweesporenbeleid naar driesporenbeleid; ecotechnologisch van randverschijnsel naar centrumpositie. In 25 jaar toegepast onderzoek waterbeheer, jubileumsymposium STOWA, 13 september 1996 (pp. 141-153). Utrecht: Stowa.

Claassen, T. H. L., Gerbens, S., en Kampf, R. (2007). Texelse kennis toegepast bij zuiveringsmoeras en paaibiotop bij rwzi Grou. H2O, 39, 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 en omgeving.

De Dommel (2010a). Krachtig water, Waterbeheerplan 2010-2015 Boxtel: Waterschap De Dommel. www.dommel.nl/we-0/missie-beleid/waterbeheerplan

De Dommel (2010b). Waterharmonica Soerendonk. www.dommel.nl/actueel/werk-uitvoering/waterharmonica

De Dommel (2011a). Nicaragua. www.dommel.nl/we-0/werk-uitvoering-0/internationale/nicaragua

De Dommel (2011b). Renovatie rioolwaterzuivering Biest-Houthakker. www.dommel.nl/algemene_onderdelen/zoeken/@195736/renovatie-0/

De Volkskrant (2002, 17 augustus). Vlooi-fabriek voor lepelaars. De Volkskrant.

Doorn, J. v. (1998). Brandstofanalyse en conversiemogelijkheden van maaisel en riet. Petten: ECN-Brandstoffen, Conversie en Milieu.

Durand-Huizing, A. (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, 8-9.

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

Flykt, 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 Cocksdoorp voor natuurdoeleinden: onderzoek naar de kweek van watervlooien in het kwekelbaarsjes systeem (DH02/007). Den Helder: TNO.

Foekema, E. M. en Kampf, R. (2005). Overzicht van werkzaamheden in het kader van het Kwekelbaarsjesproject in de periode 1998 – 2004. (Ben0-DH - R 2005/257). Den Helder: TNO.

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

Foekema, E. M., Oost, R. v. d., Roex, E., en Murk, T. (2012). De invloed van moerassystemen op de milieukwaliteit van rwzi effluent en aanbevelingen tot optimalisering (WIPE, Waterharmonica Purification Effectiveness rapport C005/12).

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

- Graansma, J. en Schobben, H. P. M. (2002). Haalbaarheidsnotitie moerassysteem/helofytenfilter Wervershoof. AWKB Uitwaterende Sluizen.
- Haan, E. d. en Horst, J. (2001). Waterpark Groote Beerze. Boxtel: 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 en Omgeving, Wageningen UR.
- Haijkens, Y. (2004). Toepassing van ecotechnologische schakelsystemen in Noord-Nederland, mogelijkheden voor nazuivering van RWZI-effluent (34 82 04). Leeuwarden / Groningen: Royal Haskoning / Van Hall Instituut.
- HHSK (2011). Waterharmonica afvalwaterzuiveringsinstallatie Berkenwoude. www.schielandendekrimpenerwaard.nl/asp/download.aspx?File=/contents/pages/38650/waterharmonica_afvalwaterzuiveringsinstallatie_berkenwoude.pdf
- HHSK (2012). Waterbeheerplan HHSK 2010-2015, 'Goed voor elkaar'. 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. www.bemestingsadvies.nl/bemestingsadvies.html
- Hoekstra, J. R. (2011). Perpetuum Mobile, a benefit landscape machine for Schouwen-Duiveland Wageningen: Wageningen University.
- Hoorn, M. v., Elst, D. v. d., en Kampf, R. (2011). Tussenrapportage effluentpolishing met watervlooiën. Groningen: Waterschap Noorderzijlvest.
- Hut, R. M. G. v. d. (2008). Visstandbemonstering Aqualan Grou. (AenW-notitie1135vis.07 v1). Veenwoude: Altenburg en Wymenga.
- Hut, R. M. G. v. d. en Veen, S. M. (2004). Rietveld bij Elburg, Ontwikkelingsscenario's en inrichtingsplan voor het voormalige nazuiveringsveld van de RWZI te Elburg. Lelystad, Culemborg: Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied, Bureau Waardenburg.
- IWACO (1993). Evaluatie hergebruik rioolwater op Vlieland. Groningen: IWACO.
- Jacobi, J. (2004). Waterschappen klaar voor de Waterharmonica? H2O, 37.

- 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.
- Jouwersma, 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 en Haenam reclaimed area. Water quality en ecological improvement. In International Symposium on Ecological Site Development of Saemangum (pp. 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 waddeneiland. H2O, 34, 6.
- Kampf, R. (2002). Effluent van de rwzi De Cocksdoorp voor natuurdoeleinden, D en H voorstel HHNK, Edam.
- Kampf, R. (2005a). Natuurlijke nazuivering van effluent. In PAO-cursus Op weg naar KRW-effluent. Delft: Stichting Postacademisch Onderwijs. www.waterharmonica/conferences.
- Kampf, R. (2005b). Stikstofverwijdering in natuurlijke systemen en het Waterharmonica concept. In PAO-cursus Stikstofverwijdering uit afvalwater. Delft: Stichting Postacademisch Onderwijs. www.waterharmonica/conferences.
- Kampf, R. (2005c). Van effluent naar oppervlaktewater. In PAO-cursus Op weg naar een nieuw effluent (Delft: Stichting Postacademisch Onderwijs PAO. www.waterharmonica/conferences.
- Kampf, R. (2008a). Biologische waterzuivering – de oxydatiesloot, geschiedenis met een grote toekomst. Afvalwaterwetenschap, 7, 124-134.
- Kampf, R. (2008b). Biologische waterzuivering – de oxydatiesloot, geschiedenis met een grote toekomst. 60e Vakantiecursus in Drinkwatervoorziening, 27e

Vakantiecursus in Riolering & Afvalwaterbehandeling: Water and sanitation for all. Delft: TU-Delft.

Kampf, R. (2008c). Wetland treatment, use of constructed wetlands to enhance effluent quality. In Varna, Bulgarije: EU-project Neptune, FP6 programma.

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

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, Prague, Tsjechië.

Kampf, R., Claassen, T. H. L., Dokkum, v. H. P., Foekema, E. M., en Graansma, J. (2005). Increasing the natural values of treated wastewater. In H.D.Bohemen (Ed.), Ecological Engineering: Bridging between ecology and civil engineering (pp. 90-97). Delft: Aeneas, Technical Publishers.

Kampf, R., Eenkhoorn, B. J., Foekema, E. M., en Dokkum, H. P. (2003). Can Spoonbills play a role in "integral water management" on Texel? In J.Veen en O. Stepanova (Eds.), Wetland management for Spoonbills and associated waterbirds, Report of the 68th EUROSITE Workshop, 19-21 April 2002, Texel, The Netherlands (Eurosites-workshop on Management of Coastal Wetlands for Spoonbills and associated waders, Texel, The Netherlands, 19-22 april 2002. ed., pp. 25-27). Tilburg: Eurosites Programme and Development Office.

Kampf, R., Geest, H. v. d., Sala, L., Romani, A., Comas, J., Claassen, T. H. L. et al. (2007). Biological filtration of treated waste water by Daphnia: an alternative for technical filtration, or an addition? IWA 6th Conference on Wastewater Reclamation and Reuse for Sustainability, 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, Noorwegen

Kampf, R. en Sala, L. (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.

ccbgi.org/docs/jornades_wetpol_09/2009_09_23_wetpol_technical_excursion_kampf_final.pdf

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, 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? Lezing op NVA-symposium Biologisch gereinigd effluent: grondstof of eindproduct?, 16 oktober 1997. In (pp. Rijswijk). www.waterharmonica/conferences.

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! (06.25278). Edam: HHNK.

Koopmans, M. (2010). Vismonitoring Aqualan Grou, gegevens 2010. Veenwoude / Leeuwarden: Altenburg en Wymenga ecologisch onderzoek / Wetterskip Fryslân.

Koopmans, M. (2011). Vismonitoring Aqualan Grou 2011. (AenW-rapport 1715). Veenwoude / Leeuwarden: Altenburg en Wymenga ecologisch onderzoek bv / Wetterskip Fryslân.

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.

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

- Marsman, E. (2009). Projectplan Inrichtingsvisie Lingeoever en Waterharmonica RWZI Geldermalsen. Tiel: Waterschap Rivierenland.
- Mels, A., Martijn, E.-J., Kampf, R., en Claassen, T. H. L. (2005). 'Waterharmonica' in the developing world. (Stowa 2005-21). Utrecht: Stowa.
- Min, D. (2002). Verantwoord gebruik van effluent van de RWZI Ameland, Een Maatschappelijke Kosten-BatenAnalyse. Leeuwarden: Waterschap Friesland.
- NN (2004). Quick-scan Waterpark Schoonbroek. (AP-360-1). Deventer, Apeldoorn: Witteveen + Bos, Waterschap Veluwe, Gemeente Apeldoorn.
- NN (2009). Besluit houdende vaststelling van het subsidieprogramma Innovatieprogramma Kaderrichtlijn Water. Staatscourant. 17 september 2009.
- Noord-Hollands Dagblad (2002). Proef Texel met watervlooiën en vis in afvalwater. Noordhollands Dagblad.
- 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, 23-25.
- Pallarès, E. (24-9-2009). The Empuriabrava wastewater treatment plant and constructed wetland system. 3rd Wetland Pollutant Dynamics and Control, Barcelona, Spanje, WETPOL 2009. http://ccbgi.org/docs/jornades_wetpol_09/aiguamolls_23_setembre_2009-ccb.pdf
- Pasveer, A. (1957). Eenvoudige afvalwaterzuivering. De Ingenieur, 69.
- 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, 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 en Tauw.

- 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 (2011b). Retentiegebied met eigen huisstijl. H2O, 44, 15.
- Rijn en IJssel (2009). Perspectievennota 2009-2012 'Opmaat naar begroting 2009'. Doetinchem: Waterschap Rijn en IJssel. 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. www.iees.ch/EcoEng061/EcoEng061_Rijstenbil.html#phobia
- Roeleveld, P., Roorda, J., en Schaafsma, M. (2010). Op weg naar de rwzi 2030: NEWater Amersfoort. (Stowa 2005-21): Stowa.
- Ruiter, M. A. d. (1978). Het risico van zwemmen en baden in faecaal verontreinigd oppervlaktewater. Delft: TNO.
- Sala, L. and Kampf, R. (2011). The Costa Brava approach to the Dutch concept of Waterharmonica. 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). In Antwerpen: IWA. http://ccbgi.org/docs/antwerp_2007/article_antwerp_2007_constructed_wetlands_014.pdf
- Sala, L., Serra, M., Huguet, A., Colom, J., Carré, M., en Romero de Tejada, S. (2004). Multiple benefits of water reuse. Projects for environmental purposes at the Aiguamolls de l'Emporda nature reserve.
- 9th IWA International Conference on Constructed Wetlands Avignon, 27-30 September 2004

- Schomaker, A. H. H. M. (2010). Monitoring Klaterwater 2009 (3V3900). 'sHertogenbosch: Haskoning, De Efteling BV.
- Schomaker, A. H. H. M., Otte, A., Blom, J. J., Claassen, T. H. L., en Kampf, R. (2005). Waterharmonica, de natuurlijke schakel tussen Waterketen en Watersysteem (2005-18). Utrecht: Stowa.
- Schomaker, T. (2011). Klaterwater, hergerbuik RWZI-effluent Kaatsheuvelop de Efteling.
www.royalhaskoning.com/nl-NL/Werkvelden/WaterEnMilieu/ROEnWaterbeheer/Pages/KlaterwaterkEfteling.aspx
- Schreijer, M. en Kampf, R. (1995). Nabehandeling van effluent tot bruikbaar oppervlaktewater in een moerassysteem; Vooronderzoek. H2O, 28, 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., en Brils, J. M. (2006). Waterbodemonverontreiniging en haalbaarheid ecologische doelstellingen voor oppervlaktewater. H2O, 39, 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. van, Westerink, P., Matte, G., en van Zanten, O. (2009). Primeur op rwzi Soerendonk. H2O. 42, 14-15.
- Smits, A. (2011). Uitbreiding rioolwaterzuivering Sint-Oedenrode.
www.dommel.nl/we-0/werk-uitvoering-0/gerealiseerde/archief/uitbreiding
- Smits, A., Scheepens, M., and Berk, P. van der (2011). Kunstwerken rioolwaterzuivering Sint-Oedenrode. www.dommel.nl/we-0/werk-uitvoering-0/projecten_uitvoering/kunstwerken#Ecologischeverbindingzonegrootsucces

- Smits, M. (2006). Zuiver water op de Efteling. Groen & Golf. December, 2006
<http://edepot.wur.nl/8462>
- Texelse Courant (2001). Hoe lepelaars baat hebben bij Texelse waterzuivering, experimentele kwekerij watervlooiën bij Eversteekoog. Texelse Courant, 27 februari 2001.
- Toet, S. (2003). A treatment wetland used for polishing tertiary effluent from a sewage treatment plant: performances and processes. Proefschrift, Universiteit Utrecht, faculteit Biologie.
- Ton, M. (2000). Aanleg helofytenfilter. Neerslag, 2000/2.
- Tubantia (2011, November 2). De streepjescode van het Kristalbad. Tubantia, 2 november 2011.
- Uijterlinde, C. (2011). Effluentpolishing met algen. Hoofdrapport (2011-04). Amersfoort: Stowa.
- VBK-groep (2011). Uitbreiding en aanpassing RWZI Eversteekoog.
www.vbkgroep.nl/?s=eversteekoog
- Vente, D. d. en Swart, E. (2008). Van hoogwaardig zuiveringswater naar hoogwaardig natuurwater: de biozone Ootmarsum. H2O, 29-31.
- Vlaski, S., Hoeymakers, R., Woldring, J., en Rus, J. S. (2006). Onderzoek winning zout water en hergebruik RWZI-effluent drinkwatervoorziening Vlieland. (9R7801). Groningen / Leeuwarden: Royal Haskoning / Vitens.
- Vries, W. d., Römkens, P. F. A. M., Kros, J., Boels, D., Brus, D. J., en Japenga, J. (2001). Risico's van bodemverontreiniging in het landelijk gebied, Bodemkwaliteitskaarten, risico's voor de voedselveiligheid, actief bodembeheer en beslissingsondersteunende systemen. Wageningen: Alterra.
- Waterforum. (2008). EU-lidstaten mogen mengzones rond lozingspunten zelf vaststellen .
www.waterforum-archief.net/index.asp?url=/template
a1.asp&que=paginarn=5911
- Waterforum (2012). Rijn en IJssel bouwt nieuwe rioolwaterzuivering in Dinxperlo. WaterForum.
www.waterforum.net/component/content/article/3-algemeen/7-interviews1

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

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