



Natuur geïntegreerde zuivering voor run-off water

Natuur geïntegreerde zuivering voor run-off water

WLN
Rijksstraatweg 85
9756 AD Glimmen

T: 050-402 2121
E: info@wln.nl
W: www.wln.nl

Projectnaam:	Natuur geïntegreerde zuivering voor run-off water
Datum:	20 mei 2016
Status:	Definitief
Auteur:	A. Mous
Documentnaam:	Natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken
Vrijgave	Naam
Goedgekeurd door:	P. van der Maas
Opdrachtgever:	TSNW
Contract nr.:	-



Het kwaliteitsmanagementsysteem van WLN is gecertificeerd volgens ISO 9001:2008 en is van toepassing op het op projectmatige basis adviseren op het gebied van watertechnologie.

Ondanks alle zorg die aan de samenstelling van deze uitgave is besteed, kan noch de auteur, noch WLN B.V. aansprakelijkheid aanvaarden voor schade die het gevolg is van enige fout in deze uitgave.

© WLN

Niets uit dit bestek/drukwerk mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van WLN B.V., noch mag het zonder een dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd.

SAMENVATTING

Afspoelend regenwater (run-off water) wordt gekarakteriseerd door wisselende concentraties aan verontreinigingen, afhankelijk van de intensiteit van de regenbui. Ook piekafvoeren van water en het type gebruik van het land waar het regenwater afstroomt hebben een grote invloed op de aanwezigheid van verontreinigingen. Natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken, zoals helofytenfilters, vloeivelden, et cetera, zijn technieken die min of meer ingepast zijn in de natuurlijke omgeving. De technieken hebben een 'lage engineeringgraad' en zijn gebaseerd op zowel biologische als fysische processen om verontreinigingen te verwijderen uit water. Natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken zijn mogelijk een interessante optie om run-off water te zuiveren voordat het wordt geloosd op oppervlaktewater of geïnfiltreerd in de bodem.

In dit TSNW project is, door middel van literatuuronderzoek, de potentie van natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken in kaart gebracht voor de behandeling van run-off water in het algemeen, en voor de casus Assen Zuid in het bijzonder.

In het kader van het ontwikkelingsplan 'Assen Zuid' worden plannen gemaakt om een industriegebied te realiseren met, zoals het zich nu laat aanzien, onder andere een truckstop en een mestvergister. Het gebied grenst aan het stroomgebied van de Drentsche Aa, de bron voor de oppervlaktewaterwinning van Waterbedrijf Groningen. Waterbedrijf Groningen spant zich, samen met andere overheden en organisaties, sinds jaar en dag in om deze bron zo schoon mogelijk te houden. De gemeente Assen heeft plannen om het regenwater van Assen Zuid af te koppelen van het riool en middels natuur geïntegreerde zuivering te zuiveren voordat het de Drentsche Aa bereikt.

Uit de studie blijkt dat een verticaal helofytenfilter, mits goed bedreven, alle verontreinigingen > 75% verwijdert, behalve fosfaat (30%). Hetzelfde geldt voor vloeivelden, met uitzondering van CZV, atrazine en stikstof. Voor (agro)wadi's en infiltratievelden is er niet gekeken naar het verwijderen van atrazine, BTEX en BZV, en worden de andere stoffen gemiddeld verwijderd. Goede dimensionering, verblijftijd/hydraulische belasting en onderhoud van het systeem zijn cruciaal voor het behalen van hoge en constante verwijderingsrendementen. De kosten voor de technieken zijn hieronder weergegeven.

Tabel 1 – Indicatieve kosten voor de natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken

		V. helofytenfilter	Vloeiveld	Agrowadi	Infiltratieveld
Hydraulische belasting	m/d	0,1-0,2	0,02-0,05	0,022	0,08-2,16
Investeringskosten (1 m ³ /u)	€	253.000	12.000-4.800	65.000	100.000
Investeringskosten (67 m ³ /u)	€	800.000-400.000	20.000	4.385.000	-
Onderhoudskosten	€	225.000	28.120	540.000	43.000

Op basis van bufferend vermogen, kosten en verwijderingsrendementen is het vloeiveld gebruikt in de waterkwaliteitsberekeningen. Zowel jaargemiddeld als in de zomermaanden treedt er een (plaatselijke) waterkwaliteitsverslechtering op na behandeling van het afspoelende run-off water, specifiek voor Assen Zuid. Voornamelijk zware metalen, BZV, CZV en fosfaat zijn in hogere concentraties aanwezig dan de achtergrondconcentraties van de Drentsche Aa. Het is belangrijk te definiëren welke vuilemissie naar de Drentsche Aa acceptabel is en welke alternatieve zuiveringsopties er zijn.

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	2
2	RUN-OFF WATER – VERONTREINIGINGEN EN VERWIJDERINGSMECHANISMEN	3
2.1	BTEX (BENZEEN, TOLUEEN, ETHYLBENZEEN EN XYLEEN).....	4
2.2	PAK (POLYCYCLISCHE AROMATISCHE KOOLWATERSTOFFEN).....	4
2.3	ZWARE METALEN	4
2.4	BESTRIJDINGSMIDDELEN.....	5
3	NATUUR GEÏNTEGREERDE ZUIVERINGSTECHNIEKEN	7
3.1	VERTICAAL HELOFYTENFILTER	7
3.2	HORIZONTAAL HELOFYTENFILTER	9
3.3	VLOEIVELD.....	9
3.4	(AGRO)WADI.....	10
3.5	INFILTRATIEVELD, -GREPPEL	12
3.6	LAMELLENSEPARATOR ALS REFERENTIE.....	13
3.7	ALTERNATIEVE COMBINATIES	14
4	SAMENVATTING ZUIVERINGSPRESTATIES EN KOSTEN	16
5	CASUS: ASSEN ZUID	18
5.1	ACHTERGROND.....	18
5.2	UITGANGSPUNTEN	18
5.3	BESCHOUWING.....	19
6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	23
6.1	CONCLUSIE	23
6.2	AANBEVELINGEN.....	24
	VERWIJZINGEN	25

1 INLEIDING

In veel gemeenten wordt regenwater afgekoppeld van de riolering, zodat het riool hydraulisch minder zwaar wordt belast en overbelasting van de rioolwaterzuiveringsinstallatie wordt tegengegaan. De keerzijde van afkoppeling is echter dat regenwater afkomstig van verhard oppervlak direct op oppervlaktewater wordt geloosd. Het regenwater kan vervuild zijn met (micro)verontreinigingen, zoals bestrijdingsmiddelen en zware metalen.

Gezien de aard van het water (lage concentraties verontreinigingen) en het sterk fluctuerende debiet (afhankelijk van regenval), zou het gebruik van natuur geïntegreerde zuiveringssystemen een goede optie kunnen zijn om de vuillast naar oppervlaktewater te beperken.

Het doel van het project is om de potentie van verschillende soorten natuur geïntegreerde zuiveringssystemen te evalueren voor de behandeling van run-off water. De zuiveringssystemen zijn:

- Helofytenfilters (zandfilters begroeid met helofyten);
- Vloevelden (open wateren begroeid met helofyten);
- (Agro)wadi's (gedraineerde zandfilters die natuurlijk begroeid raken met gras);
- Infiltratievelden/greppels (zandfilters, gemaakt van de natuurlijke bodem).

Er zal niet, of in minder mate, gekeken worden naar systemen welke het vermogen hebben om regenwater te bergen, omdat het probleem van de verontreinigingen hiermee niet wordt verholpen.

De hoofdvraag van dit project is:

Wat is de potentie van natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken voor de behandeling van run-off water in het algemeen, en voor de casus Assen Zuid in het bijzonder?

De extra motivatie voor deze evaluatie en potentieschatting komt voort uit plannen voor de realisatie van een industriegebied in het kader van het ontwikkelingsplan 'Assen Zuid'. Hierdoor zal, als gevolg van afstroming van vervuild regenwater, de Drentsche Aa zwaarder worden belast met in regenwater aanwezige verontreinigingen. De vraag is in hoeverre bepaalde vormen van natuur geïntegreerde zuiveringen effectief kunnen zijn tegen deze verontreinigingen.

Het onderzoek bestaat voornamelijk uit een literatuurstudie. De literatuurgegevens zijn getoetst met behulp van interviews en een workshop met deskundigen en betrokkenen. De bevindingen zijn vastgelegd in dit rapport. In hoofdstuk 2 worden eerst de verschillende types run-off water beschreven, waarna in hoofdstuk 3 wordt ingegaan op een aantal natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken. Vervolgens wordt voor de casus Assen Zuid het behandelen van een specifiek soort run-off beschreven.

2 RUN-OFF WATER – VERONTREINIGINGEN EN VERWIJDERINGSMECHANISMEN

De toepasbaarheid van een natuur geïntegreerde zuivering is sterk afhankelijk van de samenstelling van het water. Deze samenstelling wordt bepaald door het landgebruik van het afstromende gebied. Hieronder worden verschillende soorten run-off besproken. De types run-off water zijn in tabel 2 opgesomd.

Er is onderscheid gemaakt tussen de types: truckstop, industrieel, woonwijken, erfafspoelwater en akkerland. Deze keuze is gebaseerd op het contrasterende landgebruik en verschillende verontreinigingen met wisselende concentraties. Een truckstop en industrieel landgebruik hebben naar verwachting hoge concentraties BTEX, PAK en zware metalen. Van akkerland wordt verwacht dat hoofdzakelijk bestrijdingsmiddelen en nutriënten in verhoogde concentraties aanwezig zullen zijn. Van woonwijken liggen de concentraties naar verwachting in het midden van voorgenoemde types.

Een kanttekening bij de tabel is dat er niet veel gegevens beschikbaar zijn over verontreinigingen in afspoelend regenwater, zoals BTEX, olie, PAK en bestrijdingsmiddelen, en dat de concentraties in afspoelend regenwater locatie specifiek zijn. Bestrijdingsmiddelen zijn een grote groep stoffen met verschillende karakteristieken en verwijderingsrendementen, om de systemen te kunnen vergelijken is er gekozen voor één bestrijdingsmiddel, namelijk atrazine.

Tabel 2 - Aanwezigheid van stoffen in run-off van bepaalde types gebieden (Boogaard, 2015; Kadlec & Wallace, 2009; Borden, et al., 2002; Southwick, et al., 2003; Denton, et al., 2006). Lichtblauw, gebaseerd op meerdere bronnen, lichtgeel, gebaseerd op één bron en wit is geen data

		Truckstop	Industrieel	Woonwijken	Erfafspoelwater	Akkerland
Totaal BTEX	µg/l	0,77	0,61	1,4		
PAK						
Olie	mg/l	7,3 (3,0-9,5)	9,5 (1-50,4)	3,9 (0,8-13,5)		
Cu	µg/l	88	34	11-19		
Zn	µg/l	290	224	102-129		
Pb	µg/l	80-180	85	18-50		
Atrazine	µg/l					2
Zwevende stof	mg/l	31	176	17-54,5	90	110 (5-611)
BZV	mg/l	20 (7-56)	9,6	6	700	3,8
CZV	mg/l	75 (20-275)		32	1100	
Kjeldahl N	mg/l	1,4 (0,57-4,2)		1,9		
Totaal stikstof	mg/l	2,0 (0,7-20)	1,79		60	7,9 (1,60-26,20)
Totaal fosfor	mg/l	0,36 (0,02-4,3)	0,31	0,14-0,55	11	0,29 (0,07-1,15)

De verwijdering van BTEX, PAK, zware metalen en bestrijdingsmiddelen wordt hieronder beschreven. Er wordt verwacht dat deze stoffen via complexe en/of gecombineerde verwijderingsprincipes worden afgebroken. De beschrijving is bedoeld om meer inzicht te krijgen in het verwijderen van deze stoffen in natuur geïntegreerde systemen.

2.1 BTEX (benzeen, toluen, ethylbenzeen en xyleen)

Als benzine in contact komt met water, zullen de aromaten (BTEX) oplossen door hun hoge oplosbaarheid. Hierdoor kunnen ze ook minder goed geadsorbeerd worden aan zwevende stof of ander organisch materiaal. In wetlands komt biodegradatie van BTEX hoofdzakelijk voor in de biofilm rond plantendelen en (zand/grind)korrels. Onderzoek van Chang *et al* (2001) liet zien dat met behulp van toluen verrijkte microbiologische biomassa BTEX relatief snel degradeerde (halfwaardetijd van 1-2 dagen), Lin *et al* (2002) bevestigde de afbraak van BTEX onder anaerobe condities (Chang, et al., 2001; Lin, et al., 2002; Kadlec & Wallace, 2008).

BTEX zijn vluchtige bestanddelen en kunnen zo uit water verdwijnen. Dit gebeurt hoofdzakelijk bij ondiep water, met een groot contactoppervlak tussen water en lucht. De opname via planten en sorptie aan zwevende stof is naar verwachting laag en stof afhankelijk. Bijvoorbeeld klei blijkt een lagere sorptie coëfficiënt te hebben voor benzeen dan turf (Kadlec & Wallace, 2008).

2.2 PAK (polycyclische aromatische koolwaterstoffen)

PAK worden gevormd uit onvolledige afbraak van organisch materiaal. Het zijn hydrofobe bestanddelen die niet vluchtig zijn. PAK kunnen afhankelijk van het aantal ringen in het molecuul afgebroken worden door middel van biodegradatie. Dit wordt moeilijker naarmate het aantal ringen toenemen en de grens ligt ongeveer bij 3 ringen. Alleen naftaleen en antraceen kunnen afgebroken worden onder anaerobe omstandigheden, de rest gebeurt aerob. De diffusie van zuurstof, naar het sediment waar PAK omzetting plaatsvindt, is de limiterende factor voor biologische omzetting. PAK worden goed geadsorbeerd aan koolstof houdende gronden en desorptie treedt niet snel op. Dit houdt in dat de PAK opgeslagen worden in het zuiveringsstelsel als ze niet biologisch gedegradeerd kunnen worden. Opname door planten vindt niet of nauwelijks plaats (Kadlec & Wallace, 2008).

2.3 Zware metalen

Metalen binden aan organisch materiaal met polaire functionele groepen. De metalen bezinken vervolgens met het zwevende stof waaraan het gebonden is of het bindt zich aan de biofilm op zand of rond wortels. Door het verlagen van de pH verschuift het evenwicht tussen de metalen en het organisch materiaal waardoor minder metalen opgenomen worden (Kadlec & Wallace, 2009). Onder optimale omstandigheden kan de correlatie (R^2) tussen metaal en organische materiaal > 0.93 zijn (Kadlec & Wallace, 2009). Dit betekent dat de verwijdering van metalen uit water sterk gecorreleerd is met de aanwezigheid van organisch materiaal. Ook Boogaard (2015) zag een sterke correlatie tussen metalen en zwevend stof en vond dat metalen gemiddeld voor 65% gebonden zijn aan zwevend stof. Dit was voor lood zelfs 90% (Boogaard, 2015). Ondanks dat zware metalen binden aan zwevend stof, is dit vaak de kleinste fractie van het zwevende stof. Deze fractie, naast dat het de grootste concentratie verontreinigingen bevat, is lastig weg te vangen (Boogaard, 2015).

Koper. Koper komt hoofdzakelijk opgelost voor. Koper wordt verwijderd door accumulatie in de bodem, planten en algen. De opslag zal op een gegeven moment verzadigd raken. Door nieuw sediment toe te voegen kan koper weer opgenomen worden. Deze toevoeging moet dan periodiek plaatsvinden. Onder anaerobe condities kan koper met sulfide reageren, welke gevormd wordt door sulfaat reducerende bacteriën. Daarnaast lijkt de binding tussen koper en organisch materiaal

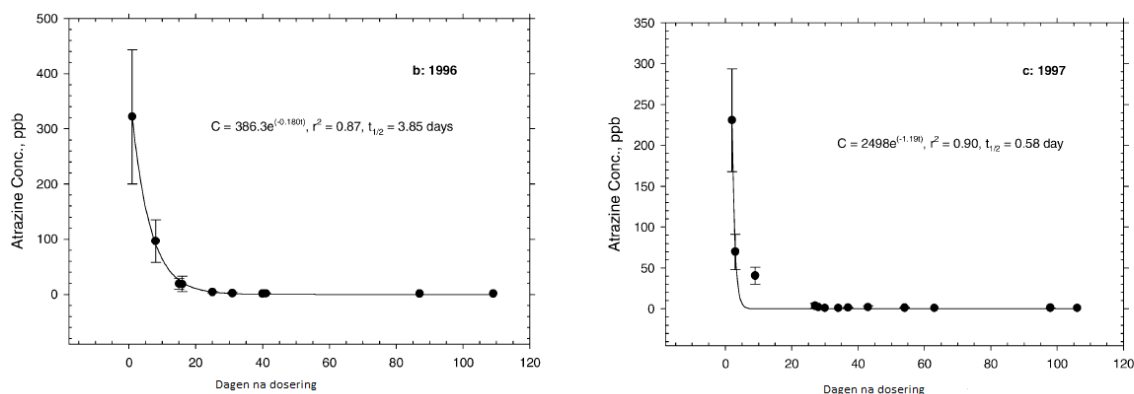
(bijvoorbeeld turf) van belang voor het verwijderen van koper uit water (Kadlec & Wallace, 2009; Boogaard, 2015).

Lood. Lood in water komt voornamelijk voor als Pb(II). Deze staat vormt onoplosbare neerslag met sulfiden, carbonaten, sulfaten en chlorides. Ook kan het verbindingen vormen met organische stof welke opgelost blijven in de waterstroom of colloïdaal worden. Lood wordt in vloeivelden hoofdzakelijk verwijderd door accumulatie van het lood in de bodem. Concentraties van lood kunnen hoog oplopen, zo werd in een vloeiveld een beginconcentratie van 31 mg/kg gemeten en na 4,5 jaar werd een stijging naar 3300-3900 mg/kg droge stofgehalte gezien (Kadlec & Wallace, 2009).

Zink. Zink kan in een wetland verwijderd worden door middel van bezinking en filtratie, chemische precipitatie, binding aan organisch materiaal en, een klein beetje, plant opname. Net zoals lood kan zink onoplosbare neerslag vormen met onder andere carbonaten en sulfiden.

2.4 Bestrijdingsmiddelen

De meest gebruikte types bestrijdingsmiddelen zijn insecticiden, herbiciden, rodenticiden en fungiciden. Omdat bestrijdingsmiddelen (pesticiden) uit een grote groep verschillende componenten bestaan is het lastig om een eenduidige run-off concentratie te benoemen. Buiten het feit om dat het landgebruik specifiek is, is het ook afhankelijk van de voorkeuren van de landgebruiker, moment van aanbrengen op het land, mobiliteit van de stof en continent specifiek. Dit maakt het moeilijk te generaliseren. Southwick *et al* (2003) deden onderzoek naar pesticide concentraties in run-off van akkervelden en zagen een duidelijk verband met het moment van aanbrengen van de pesticiden (Southwick, et al., 2003). In figuur 1 zijn de resultaten met betrekking tot Atrazine weergegeven.



Figuur 1 – Atrazine concentratie in run-off afgezet tegen het aantal dagen na dosering van de pesticide ($\mu\text{g/l}$) voor 2 opeenvolgende jaren in Zuid Louisiana (Southwick, et al., 2003).

De 'oude' pesticiden (van < 1950) werden moeilijk afgebroken en konden eigenlijk alleen afgevangen worden door middel van infiltratie/bezinking en binding aan zwevend (organisch) materiaal. De 'nieuwe' pesticiden worden beter afgebroken en blijken in concentratie verlaagd te zijn na bijvoorbeeld een vloeiveld (Kadlec & Wallace, 2009). Voor volledige afbraak van pesticiden zijn wisselende redox-omstandigheden het meest gunstig. Sommige pesticiden worden in een zuurstofrijk milieu goed afgebroken en anderen juist in een zuurstofloos milieu (Rombout, et al., 2007).

Biologische afbraak van pesticiden kan voorkomen in filters. Dit fenomeen wordt gezien in langzame zandfilters (ref. PS De Punt, pilot onderzoek 1995). Na een halfjaar continue dosering van een pesticide werd deze biologisch afgebroken. Hoogstwaarschijnlijk is de tijd nodig om een stabiele cultuur op te bouwen per pesticide verschillend. Voor run-off water zullen de concentraties aan pesticiden mogelijk te veel fluctueren voor het opbouwen van een stabiele biologische cultuur.

3 NATUUR GEÏNTEGREERDE ZUIVERINGSTECHNIEKEN

Natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken kunnen een groot scala aan technieken zijn. De zuiveringstechnieken die hieronder beschreven worden, worden beschreven aan de hand van het principe van zuiveren dat zij hanteren. Het is mogelijk om de begroeiing, diepte, drainage, et cetera aan te passen, maar het principe van zuiveren blijft hetzelfde.

Er zijn een paar algemene opmerkingen die gelden voor alle systemen. Als de verwijdering deels gebaseerd is op planten kunnen de verwijderingsrendementen met 40-50% teruglopen in de wintermaanden. Het systeem moet na de winter weer opstarten (van der Marel, 2013). Daarnaast hebben planten een bepaalde behoefte aan nutriënten. Dosering van nutriënten kan overwogen worden als er zich te weinig in het water bevinden.

Een beheersmaatregel voor planten is dat zij gemaaid moeten worden. Het riet moet op een dusdanige lengte gemaaid worden dat het niet onder de waterspiegel komt te staan. Als dit wel het geval is kan verlies van planten optreden en kan het verwijderingsrendement van het systeem verlagen (Rombout, et al., 2007; van den Boomen & Kampf, 2012).

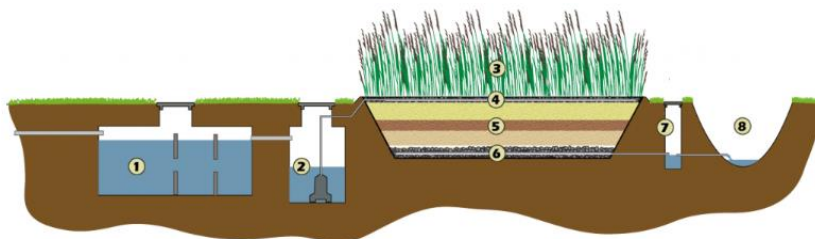
De planten die over het algemeen gebruikt worden voor wetlands zijn:

- Mattenbies;
- Grote lisdodde;
- Rietgras;
- Pitrus.

Meestal wordt rietgras (*Phragmites australis*) gekozen, omdat dit een sterk ontwikkeld wortelstelsel heeft, droogte en vorst resistent is en een grote tolerantie heeft voor waterpeil schommelingen (Rombout, et al., 2007).

3.1 Verticaal helofytenfilter

Een verticaal helofytenfilter (VHF) is een constructed wetland. Het water wordt bovenop het filtermedium gebracht waarna het door het filtermedium naar beneden wordt getransporteerd door zwaartekracht. Onderin het filtermedium zit een drainagebuis waar het gezuiverde water verzameld wordt. Op het filtermedium zijn helofyten geplant, zoals gezien kan worden in figuur 2.



Figuur 2 – Weergave van een verticaal helofytenfilter (Global Wetlands, 2015)

Een VHF maakt gebruik van anaerobe en aerobe zones om verontreinigingen te verwijderen. Hierdoor is het mogelijk om hoge stikstof concentraties, fosfor concentraties en metaal concentraties te verwijderen (Kadlec & Wallace, 2009). Het VHF kan op twee manieren bedreven worden: periodiek

(stimuleert verwijdering van organisch materiaal omdat er meer zuurstof in het filter komt) en met een continue bovenwaterstand (stimuleert stikstofverwijdering omdat er meer anaerobe zones ontstaan en metaal immobilisatie) (Rombout, et al., 2007).

De helofyten nemen zuurstof op uit de lucht en transporteren dit naar de wortels. Hierdoor ontstaan aerobe zones rond de wortels en anaerobe zones daaromheen. Daarnaast vormt er zich een biofilm rond de wortels van de planten en op het zand waar biologisch afbreekbare stoffen worden omgezet.

Het VHF wordt vaak toegepast bij zwaar vervuild afvalwater, huishoudelijk afvalwater, bedrijfsafvalwater of proceswater. Ook oliederivaten blijken goed verwijderd te worden (Kadlec & Wallace, 2009). In sommige gevallen wordt kalk, ijzer of aluminium toegevoegd om extra fosfor te verwijderen. Ook de toevoeging van calcium kan de binding met fosfaat efficiënter maken (Luederitz, et al., 2001).

Voorbeeld. In Kopenhagen is een VHF geïnstalleerd om riool overstorten te zuiveren maar omdat deze sporadisch voorkomen wordt in de droge perioden oppervlaktewater gezuiverd. Uitdroging van het VHF is niet bevorderlijk voor de bacteriologie in het filter. Het oppervlak van het filter is 5000 m² met een diepte van 2m en een oppervlakte belasting van 0.1-0.2 m/dag. Dit staat gelijk aan een maximale belasting van 1000 m³/dag (Gervin & Brix, 2001).

Het filter is beplant met riet (*Phragmites australis*) en opgebouwd uit ijzerhoudend zand, grind en vermorzeld marmer met een opslagcapaciteit van 6500 m³. In de onderstaande tabel zijn de verwijderingsrendementen opgesomd voor stikstof en fosfor. CZV en zwevende stof werden in het filter gereduceerd tot < 25 mg/l en < 5 mg/l, respectievelijk.

Tabel 3 – Verwijderingsrendementen stikstof en fosfor in verticaal helofytenfilter Denemarken.
Inf = influent, Eff = effluent, Ntot = stikstof totaal, Ptot = fosfor totaal, concentraties in mg/l (Gervin & Brix, 2001). De fosfor waarden zijn genomen voor de winterperiode.

	Inf Ntot	Eff Ntot	(%)	Inf Ptot	Eff Ptot	(%)
Oppervlakte water	1.64	1.19	25	0.15	0.048	65
Riool overstort	7.26	1.08	81	1.27	0.029	98

De richtlijn van 0.1-0.2 m/d voor de dimensionering van een VHF wordt algemeen aangehouden als optimale hydraulische belasting. De waterverdeling over het filter is belangrijk; dit kan met behulp van een verdeelsysteem met leidingen of door een pompcontrole die uitgaat op het moment dat het filter volledig gevuld is. Het tweede principe is robuuster. Voor de plantdichtheid van de helofyten wordt vaak uitgegaan van 6 planten/m² (Rombout, et al., 2007).

De verwijdering in een VHF is gepresenteerd in tabel 5. De verwijderingsrendementen fluctueren sterk. Dit is voornamelijk gerelateerd aan de verblijftijd van het water in het VHF en dus indirect aan de hydraulische belasting. Des te langer de verblijftijd, des te hoger de verwijderingsrendementen.

Kostenindicatie: In de 'Leidraad Riolerings' staan de kosten voor een helofytenfilter voor 5/6 i.e., waarbij de aanschaf en aanleg kan variëren tussen de € 7.600 en € 8.900. De kosten voor onderhoud/inspectie en energie liggen rond de € 325/jaar (Leidraad Riolerings, 2015). Deze kosten zijn

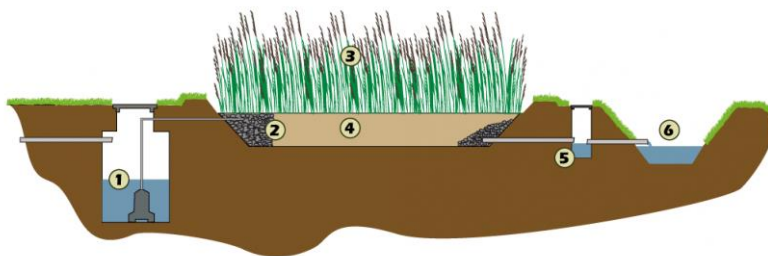
gebaseerd op behandeling van huishoudelijk, dat wil zeggen relatief geconcentreerd afvalwater. Voor regenwatersystemen wordt een ander kengetal voor aanlegkosten gehanteerd, namelijk € 50/m² filter (Rombout, et al., 2007).

Samenvattend: Een VHF wordt vaak toegepast voor water met relatief hoge nutriënten concentraties. Het filter heeft deze nutriënten ook nodig om optimaal te werken. Daarnaast heeft een VHF een buffertank nodig om de piekafvoeren van hemelwater op te vangen, aangezien het filter geen groot waterbergend vermogen heeft.

3.2 Horizontaal helofytenfilter

Het horizontaal helofytenfilter (HHF) werkt onder hetzelfde principe als het VHF alleen wordt het water ingebracht via de zijkant en niet blootgesteld aan lucht. Voordeel hiervan is dat het bovenwater niet voor stankoverlast kan zorgen en een nadeel is dat er minder zuurstof in het filter gebracht wordt. Het filtermateriaal is grover, zodat het water met weinig weerstand door het filter kan lopen (Global Wetlands, 2015; Kadlec & Wallace, 2009). Een HHF wordt voornamelijk toegepast voor de zuivering van minder zwaar vervuild water, zoals zwemwater, run-off van wegen of vervuild oppervlaktewater.

HHF hebben een klein doorstroomd oppervlak, net zoals VHF. Hemelwater wordt gekenmerkt door hoge piekafvoeren, die niet zo snel afgevoerd kunnen worden door het filter. Hiervoor zou een bufferende voorziening voor de HHF geplaatst moeten worden. Om dit nadeel, en geen betere prestaties dan het VHF, wordt een HHF niet vaak gebruikt voor de behandeling van hemelwater (Rombout, et al., 2007). Dit maakt het vinden van dimensioneringsgrondslagen en verwijderingsrendementen van een HHF lastig. Er wordt aangenomen dat de verwijdering onder lage nutriëntenbelasting (stikstof, fosfor, BZV en CZV) in dezelfde orde zal liggen als van een VHF.



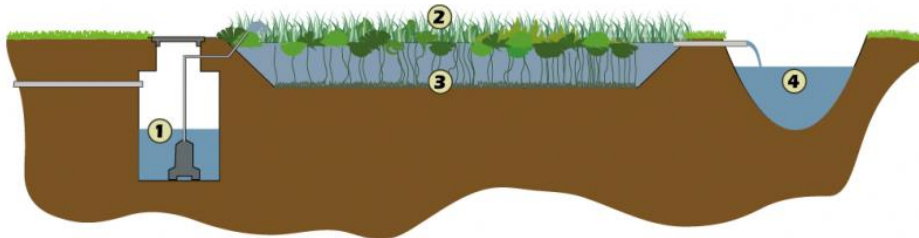
Figuur 3 – Weergave van een horizontaal helofytenfilter (Global Wetlands, 2015)

3.3 Vloeveld

Een vloeveld is een ondiepe brede waterpassage, met een diepte van 10-20 cm en is begroeid met helofyten, zie figuur 4. De zuivering vindt vooral plaats door diffusie en sedimentatie. Dit maakt het vloeveld vooral geschikt om grote hoeveelheden licht vervuild water te behandelen, zoals effluent van rioolwaterzuiveringsinstallaties (Global Wetlands, 2015).

Een vloeveld heeft een groot waterbergend vermogen. Gedurende een langere tijd kan het waterniveau 20-40cm worden verhoogd en gedurende een korte tijd (weken) kan het met 40-80cm worden verhoogd (Rombout, et al., 2007; Kadlec & Wallace, 2009). Als het vloeveld alleen voor waterberging gebruikt wordt kan het niveau tot 1,5 meter stijgen maar daarbij neemt het verwijderend vermogen af (van den Boomen & Kampf, 2012). Voor de verblijftijd van oppervlaktewater/RWZI

effluent wordt vaak een verblijftijd van 10 dagen gehanteerd. Algemeen gebruikte richtlijn voor de dimensionering van een vloeiveld is een optimale hydraulische belasting van 0,02-0,05 m/d. Bij deze belasting worden de hoogste verwijderingsrendementen bereikt. Dit staat los van het waterbergend vermogen, die kan zoals net beschreven hoger zijn.



Figuur 4 – Weergave van een vloeiveld (Global Wetlands, 2015)

Bij de installatie van een vloeiveld moet rekening gehouden worden met bladval. Sommige bladeren kunnen voor een verhoging van de pH zorgen, waardoor metalen weer mobiel worden. De metaalverwijdering kan consequent hoog zijn als de ratio vloeiveld en afwateringsgebied > 1% is. Dit betekent dat de grootte van het vloeiveld niet meer dan 99% kleiner mag zijn dan het gebied dat afwatert naar het vloeiveld (Kadlec & Wallace, 2009). In tabel 5 zijn de verwijderingsrendementen weergegeven. Deze zijn niet constant, hoofdzakelijk door wisselende verblijftijden en dimensionering van de vloeivelden.

Kostenindicatie: STOWA houdt investeringskosten van € 5-20/m² vloeiveld aan (Rombout, et al., 2007), de onderhoudskosten zullen vergelijkbaar zijn of iets lager liggen dan bij een verticaal helofytenfilter.

Samenvattend: Een vloeiveld heeft een groot waterbergend vermogen en een lage nutriënten behoefte, omdat de plantendichtheid laag ligt. De verwijderingsrendementen zijn gemiddeld tot goed, mits het vloeiveld goed bedreven wordt.

3.4 (Agro)wadi

Een agrowadi bestaat uit folie, waarin een filtratiebed wordt aangebracht, met bovenin een verdeelsysteem voor het water en onderin een drainagesysteem naar het oppervlaktewater, zoals gezien kan worden in figuur 5 (Broos, 2011).



Figuur 5 – Agrowadi (Broos, 2011)

Het filtratiebed bestaat over het algemeen uit twee verschillende filterpakketten, met wisselende korrelgrootten, zodat het grovere zwevende stof bovenin het filter wordt afgevangen en onderin het fijnere zwevende stof. De agrowadi heeft altijd een bezink- of buffersloot voor het systeem. In deze sloot vindt slibafvang en hydraulische buffering plaats. De agrowadi heeft zelf geen groot bufferende vermogen.

Voorbeeld. Kimenai heeft onderzoek gedaan naar het behandelen van erfafspoelwater. De opstelling was een bezinksloot gevolgd door een agrowadi (Kimenai, 2007). Voor erfafspoelwater liggen de concentraties zwevende stof, CZV, BZV, totaal stikstof en totaal fosfor vrij hoog, in de orde van 90, 1100, 700, 60 en 11 mg/l respectievelijk. De verwijderingsrendementen zijn weergegeven in tabel 4.

Ondanks de hoge concentraties in het water bereikt de agrowadi een redelijke verwijdering van de componenten. De verblijftijd van het systeem is hier een belangrijke factor in. Aan de hand van berekeningen kwam men uit op een verblijftijd in het systeem van 15 dagen.

Tabel 4 – Concentraties van de verschillende parameters voor en na de zuiveringsstappen en de verwijderingsrendementen, gebaseerd op data van Kimenai (Kimenai, 2007)

	ZS (mg/l)	CZV (mg/l)	BZV (mg/l)	Tot N (mg/l)	Tot P (mg/l)
Bezinksloot	80.67	1046.33	536.67	54.45	10.40
Agrowadi	44.33	851.67	426.67	44.45	9.20
Effluent Agrowadi	3.17	60.07	6.77	29.70	1.23
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Verwijdering stap 1	45.04	18.60	20.50	18.35	11.54
Verwijdering stap 2	92.86	92.95	98.41	33.19	86.59
Totale verwijdering	96.07	94.26	98.74	45.45	88.14

De agrowadi is gedimensioneerd op een verwerking van 3,6 m³/dag en gebruikt hiervoor een oppervlakte van 181,5 m³ (33 m lan , 5 m breed en 1,1 m diep). De buffer heeft een nuttig volume van 11,8 m³ en stort over op het oppervlaktewater bij 22,2 m³ (10,4 m³ is het minimale volume van de buffer (Kimenai, 2007)).

Ook het STOWA onderzoek 'Erfafspoeling' heeft aandacht besteed aan deze zuiveringstechniek voor erfafspoelwater. De resultaten van dit onderzoek zijn weergegeven in tabel 5 (Broos, 2011). De tabel laat duidelijk zien dat de rendementen van de agrowadi's nogal van elkaar verschillen. De hoogste rendementen komen nagenoeg overeen met de rendementen gevonden in het onderzoek uitgevoerd door Kimenai.

De verblijftijd in een agrowadi is erg belangrijk, omdat de contacttijd tussen de bacteriën en de te verwijderen stoffen hier vanaf hangt. Het grote verschil in zuiveringsrendement is waarschijnlijk een resultaat van (verschillende) verblijftijden. In het onderzoek van Kimenai kunnen we met zekerheid zeggen dat de verblijftijden erg hoog liggen en dat de kans dat op overbelasting klein was. De hoge negatieve verwijderingsrendementen zijn te wijten aan het afsterven van de biologie in de systemen. De zuurstofbehoefte voor de omzetting van de stoffen ligt erg hoog. Als de hoeveelheid zuurstof niet

toereikend is ontstaan er anaerobe zones waardoor een deel van de biologie afsterft en hoogstwaarschijnlijk mee uitspoelt.

Tabel 5 – Rendement (gemiddeld, hoog en laag) van agrowadi's. Ntot = totaal stikstof, Ptot = totaal fosfor, OB = onopgeloste bestanddelen, CZV = chemisch zuurstof verbruik, BZV = biologisch zuurstof verbruik (Broos, 2011)

	Ntot	Ptot	OB	CZV	BZV
Gem. R (%)	-9	5	-8	-14	-45
Hoogste R (%)	55	83	94	98	99
Laagste R (%)	-182	-161	-125	-462	-872

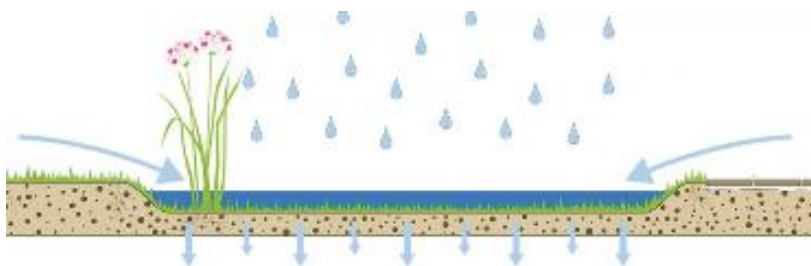
Naast de agrowadi zijn er ook gewone wadi's. Deze wadi's werken onder hetzelfde principe maar worden niet gebruikt voor erfafspoelwater. Vaak wordt de bovenste laag van de wadi gevuld met een humusachtige grond, waardoor gras zich beter kan ontwikkelen en er over de wadi gelopen kan worden. Als er specifieke verontreinigingen verwijderd moeten worden zoals zware metalen of PAK kan ervoor gekozen worden om bijvoorbeeld ijzeroxide en/of actief kool toe te voegen aan de bodem (Rombout, et al., 2007).

Kostenindicatie: Installatiekosten € 6/m² aangesloten verhard oppervlak en de onderzoeks- en onderhoudskosten liggen op € 9,30 per m² wadi per jaar (Rombout, et al., 2007; Leidraad Riolering, 2015).

Samenvattend: Agrowadi's kunnen hoge nutriënten concentraties matig verwerken en CZV, BZV goed verwijderen mits de verblijftijd in het systeem lang genoeg is. Het waterbergend vermogen van de agrowadi is laag.

3.5 Infiltratieveld, -greppel

Een infiltratievoorziening (ook wel bodempassage genoemd) is een versimpelde versie van de bovengenoemde technieken, zie figuur 6. In dit systeem worden componenten hoofdzakelijk verwijderd met behulp van bezinking, filtratie en adsorptie/omzetting. Het is een open kanaal/sloot of een verlaagd stuk grond waar water instroomt bij hoge piekafvoeren. Het systeem is niet gedraineerd en maakt volledig gebruik van de zuiverende werking van de bestaande bodem.



Figuur 6 – Schematische weergave van een infiltratieveld (d'Ersu, 2015)

Het is mogelijk om de bestaande bodem aan te passen en hier een zandfilter te installeren, waardoor verwijderingsrendementen verzekerd kunnen worden. Dit type lijkt op een wadi zonder drainage. De (natuurlijke) aanwezigheid van gras of planten maakt nutriënt opname mogelijk.

Het wordt aangeraden de infiltratievelden, -greppels en -bermen aan een verhard oppervlakte van niet meer dan 2 ha aan te sluiten en daarbij een helling van 1 of 2 % aan te houden, met een maximum van 4 %. Dit wordt gedaan om de behandeling van water efficiënt te houden. Bij een droge of met gras

begroeide infiltratievoorziening wordt aangeraden een hoogte van 60 cm van het grondwaterpeil aan te houden, om grondwater verontreiniging te voorkomen (EPA, n.d.).

Infiltratievoorzieningen kunnen verschillend gedimensioneerd worden, waardoor de oppervlakte belasting wisselend kan zijn. In Arnhem-Zuid heeft de bodempassage een oppervlakte belasting van 1,5 m/dag. De infiltratiecapaciteit kan variëren tussen 0,08 en 2,16 m/d, afhankelijk van het ontwerp en de type ondergrond (Boogaard, 2015).

Kostenindicatie: Voor een infiltratieveld liggen de investeringskosten op € 4-6,50 /m² aangesloten verhard oppervlak en de onderhoudskosten op € 2,15 /m² per jaar. Kosten voor een infiltratiegreppel bedragen ongeveer € 22 per meter (2 m breed) en het onderhoud is minimaal, eens per jaar moet de greppel ontdaan worden van houtachtige gewassen (Rombout, et al., 2007; Leidraad Riolerig, 2015).

Samenvattend: Een infiltratievoorziening heeft een goed waterbergend vermogen en kan langere tijd zonder water. De verwijdering van componenten is minder goed te controleren en is afhankelijk van de soort bodem, maar goed in te passen in de omgeving.

3.6 Lamellenseparator als referentie

Als referentiekader wordt in dit hoofdstuk een vergelijking gemaakt met een zuiveringstechniek die ook wordt toegepast voor de behandeling van run-off water, maar niet 'natuur geïntegreerd' is, de lamellenseparator.

Lamellenseparatoren halen deeltjes uit het water die zwaarder of lichter zijn dan water. De verontreinigingen glijden langs de lamellen naar boven of beneden, afhankelijk van het ontwerp. De lamellenseparator creëert in een kleine ruimte een zeer groot bezinkingsoppervlak. Als de afstand tussen de lamellen klein genoeg is, kunnen verontreinigingen samenklonteren zodat ze makkelijker opdrijven of bezinken (Rombout, et al., 2007).

Een veelgebruikt maximaal debiet voor run-off ligt op 14 l/s/ha, dit staat gelijk aan 50 m³/h per hectare (Rombout, 2006). Aangeraden wordt de oppervlaktebelasting van een lamellenseparator < 1 m/h te houden (Rombout, et al., 2007).

Een vergelijking van verwijderingsrendementen van lamellenseparatoren levert een erg uiteenlopend beeld op. Dit heeft te maken met het verschillende ontwerp van de lamellenseparatoren. Naast het ontwerpdebiet zijn ook de andere ontwerp richtlijnen voor de lamellenseparatoren niet eenduidig. In onderstaande tabel zijn de verwijderingsrendementen opgesomd.

Tabel 6 – Verwijderingsrendement lamellenseparatoren (Rombout, et al., 2007; Boogaard, 2015; Rombout, 2006)

Verwijderingsrendement %	
Zwevende stof	21-54
CZV	21
BZV	28-67
Kjeldahl N	9
Koolwaterstoffen	26-80 ¹
Koper	0-40
Zink	13-27
Lood	17-44

¹ Bij lagere concentraties neemt het zuiveringsrendement af.

Een lamellenseparator maakt gebruik van bezinking als verwijderingsmechanisme. Veel verontreinigingen binden aan zwevende stof in water, waardoor verwijdering van deze stoffen voor de hand zou liggen. De kleinste deeltjes hebben de hoogste concentratie verontreinigingen, zoals metalen, olie en PAK. Nutriënten worden minder goed gebonden aan zwevende stof en binden daarbij aan grotere deeltjes. Deze deeltjes worden beter verwijderd met behulp van bezinking dan de fijne zwevende stofdeeltjes (Boogaard, 2015). Zoals bij alle systemen beschreven in dit rapport hangt het verwijderingsrendement sterk af van de hoeveelheid en snelheid van het passerende ‘verontreinigde’ water. Met toenemende oppervlaktebelasting neemt het verwijderingsrendement af.

De lamellenseparatoren zijn gevoelig voor verstopping. Dit kan verkleind worden door een vuilrooster voor het filter te plaatsen. Daarnaast kan het bezonken slib opwervelen wanneer het debiet hoger is dan het ontwerpdebiet. De lamellenseparator heeft een klein oppervlak nodig en wordt verzonken in de grond, hierdoor veroorzaken ze weinig overlast.

Kostenindicatie: De kosten voor aanleg plus voorzieningen zijn ongeveer € 3,10-5,70/m² aangesloten oppervlak en de beheerskosten € 0,02/m² aangesloten oppervlak per jaar. Maar dit is variërend. In Arnhem-Zuid was de aanleg (inclusief lamellenseparator) voor een oppervlakte van 3,8 ha € 45.000. Dit komt neer op € 1,18/m² verhard oppervlak.

Samenvattend: een lamellenseparator heeft geen groot waterbergend vermogen, omdat een te hoog debiet het bezonken slib weer op kan wervelen. Hiervoor moet er een buffertank voor de lamellenseparator of een bypass geïnstalleerd worden. De verwijdering vindt plaats door middel van bezinking en is robuust mits het debiet laag genoeg gehouden wordt.

3.7 Alternatieve combinaties

Het is mogelijk dat combinaties van genoemde technieken of principes ervan specifiek voor een doeleinde erg geschikt blijken te zijn. Hieronder worden daar een paar voorbeelden van genoemd.

1. Boerensloot

De ‘Boerensloot’ wordt geïntroduceerd om waswater van melkmachines te reinigen, voordat dit water op het oppervlaktewater wordt geloosd. De ‘Boerensloot’ is een testobject van Groene Cirkels, het samenwerkingsverband van Heineken, Alterra en de provincie Zuid-Holland. Op dit moment wordt de zuiveringssloot getest in Zoeterwoude op Die Barle Farms.

De ‘Boerensloot’ bestaat uit een helofytenfilter, gevolgd door een met kalkkorrels gevulde big bag om fosfaten te binden. Tot slot wordt het water in de oever geïnfiltreerd waarna het naar het oppervlaktewater loopt. Er wordt verwacht dat het waswater na deze behandeling aan de wettelijke normen voldoet (Provincie Zuid-Holland, 2015). De komende jaren wordt het project gevolgd om te kijken of het de verwachte resultaten oplevert.

Waswater van melkmachines bestaat hoofdzakelijk uit nitraten en organische stof. Het kan afhankelijk van de reiniging ook fosfor bevatten, als fosforzuur gebruikt is.

2. Biofilter/fytobak

Een fytopak of biofilter bestaat uit een mengsel van stro, compost, gedroogde koemest, potgrond en biomix uit een andere fytobak, als entmateriaal. Het filter wordt hoofdzakelijk gebruikt voor het verwijderen van pesticiden uit bijvoorbeeld spoelwater van spuittoestellen van landbouwers, tuinbouwers, loonwerkers, et cetera.

Het biofilter wordt in een plastictunnel geplaatst waar een bak van 6 m² volstaat voor de behandeling van 5000 l/jaar en van 12 m² voor 10.000 l/jaar. Door de plastictunnel is de temperatuur hoger in het filter waardoor verdamping plaatsvindt en er gunstige temperaturen voor de bacteriën zijn om de pesticiden af te breken. Het biofilter produceert geen effluent. In principe verdampt al het water. Het is mogelijk om het eventuele effluent te gebruiken, maar dit kan dan alleen voor dezelfde toepassingen als waar het water vandaan komt, dus voor schoonmaak van spuittoestellen of iets dergelijks.

Een verwijdering van 95/99 % voor pesticiden kan bereikt worden (D'hoop & Mestdagh, 2015). Dit heeft hoofdzakelijk te maken met het gebruik/verdamping van het water uit het biofilter.

4 SAMENVATTING ZUIVERINGSPRESTATIES EN KOSTEN

Voor de agrowadi's is het zuiveringsrendement erg wisselend, met hoge negatieve waardes. Dit heeft hoogstwaarschijnlijk te maken met overbelasting met perssappen en percolaat. Hierdoor ontstaat een zuur milieu waardoor bacteriën afsterven. Door het afbreken van nutriënten wordt zuurstof aan het milieu onttrokken. Uiteindelijk resulteert dit erin dat de zuiverende werking van de agrowadi totaal verloren gaat (Broos, 2011).

Overbelasting moet vermeden worden voor alle natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken; als de belasting aan BZV en CZV te hoog is en de zuurstofvraag niet geleverd kan worden door het systeem ontstaan zuurstofloze zones in het filter waardoor aerobe bacteriën afsterven en de zuiverende werking van het filter teniet wordt gedaan.

De verwijderingsrendementen van de natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken zijn erg wisselend en stof specifiek. Een verticaal helofytenfilter verwijdert alle stoffen met > 75 %, behalve fosfaat dat voor 35 % wordt verwijderd. Een vloeiveld laat hetzelfde beeld zien met verwijdering van > 80 % voor alle stoffen, behalve zwevende stof (65 %), CZV (25 %), stikstof (30 %) en fosfor (30 %). De (agro)wadi heeft onder optimale condities goede verwijdering van lood, BZV, CZV en zwevende stof. Totaal stikstof, fosfor en koper worden gemiddeld verwijderd. Bij het infiltratieveld worden over het algemeen CZV, N Kjeldahl, fosfor en de metalen gemiddeld verwijderd.

Bij de (agro)wadi en het infiltratieveld is niet gekeken naar BTEX, PAK en bestrijdingsmiddelen. In tabel 7 zijn de verwijderingsrendementen opgesomd, met zowel de maximale als minimale rendementen. De kleuren in de tabel geven het aantal referenties aan, bij de gele kleur is er één referentie en bij de blauwe kleur zijn dit meerdere.

Om de natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken optimaal te laten werken is het van belang te kijken naar de hydraulische belasting/verblijftijd en de dimensionering. Deze twee kenmerken kunnen zorgen voor een efficiënt systeem. De dimensioneringsgrondslagen van de natuur geïntegreerde systemen zijn erg uiteenlopend, omdat hier geen eenduidige regels voor zijn. Daarnaast is onderhoud aan het systeem een cruciale factor.

Tabel 7 – Verwijderingsrendementen (in %) van de beoogde stoffen in de verschillende zuiveringstechnieken (Broos, 2011; Kadlec & Wallace, 2009; Rombout, et al., 2007; Kimenai, 2007)

	Verticaal helofytenfilter	Vloeiveld	Agrowadi	Infiltratieveld
Totaal BTEX	96	80-86		
PAK	50-99	90		
Olie				
Cu	46-75	59-81	36	68
Zn	18-81	71-91	91	79
Pb	15-80	17-80		40
Bestrijdingsmiddelen	62-97	-19-100		
Zwevende stof	80-90	11-65	-125-94	
BZV	62-98	12-80	-872-99	
CZV	18-93	-5-25	-462-98	42
Kjeldahl-N				55
Totaal stikstof	80	-14-58	-182-55	
Totaal fosfor	35	-1-80	-161-83	57

De verwijderingsrendementen van de stoffen die biologisch minder goed af te breken zijn, worden hieronder uitgebreid besproken.

1. BTEX

In een vloeiveld met een verblijftijd van 3,9 dagen kan 80 % toluen verwijderd worden. Ook benzeen werd gereduceerd van 15 naar 2 µg/l in een grindbed (infiltratieveld/greppel) met een belasting van 20-80 cm/d. Op locaties in Alberta, Canada, en het VK wordt in een horizontaal helofytenfilter met verblijftijden van respectievelijk 14 dagen en 1 dag BTEX verwijderd met een rendement van 40-60 %. In een verticaal helofytenfilter werd de inkomende concentratie benzeen van 1000 mg/l verwijderd tot 37-87 mg/l. In alle systemen bleek zuurstof toediening de verwijdering van BTEX te bevorderen (Kadlec & Wallace, 2008).

2. PAK

De verwijdering van PAK blijkt minder eenduidig dan die van BTEX. Het type grond gebruikt in de filters is belangrijk voor de verwijdering van PAK. Zo blijkt een filter van beboste veengrond geen goede verwijdering van PAK te bewerkstelligen, na 15 jaar wordt nog geen PAK afgevangen. Aan de andere kant wordt in een verticaal helofytenfilter met een verblijftijd van 6,5 dag 99 % verwijdering van fenantreen gevonden. Ook een vloeiveld in Frankrijk, beplant met lisdodde, bleek effectief voor 90 % verwijdering van de PAK (Kadlec & Wallace, 2008).

3. Zware metalen

In Amerika en Nieuw-Zeeland wordt de verwijdering van koper in een wetland gedaan met behulp van een vloeiveld. De rendementen die hier bereikt worden liggen tussen de 59-81 %. In Tsjechië maken ze gebruik van een horizontaal helofytenfilter voor het behandelen van gemeentelijk afvalwater met koper. Ze bereiken hiermee rendementen van -27-84 %. In Nederland en België wordt hetzelfde water gereinigd met een verticaal helofytenfilter. De koperconcentraties worden verlaagd met 46-75 % (Kadlec & Wallace, 2009).

Lood in afvalwater wordt goed verwijderd door middel van vloeivelden. De rendementen liggen in dit geval tussen de 17-81 %, waarbij het vloeiveld met 81 % rendement gevoed werd met lage concentraties aan lood. Horizontale helofytenfilters hebben een verwijderingsrendement tussen -220-98 % voor lood in afvalwater. Het verticale helofytenfilter heeft een verwijderingsrendement tussen de 15-80 %, met over het algemeen hogere ingaande loodconcentraties.

Zink wordt matig tot goed verwijderd in vloeivelden, verwijderingsrendementen van 18-61 % worden bereikt. In een horizontaal helofytenfilter ligt de verwijdering tussen 53-97 % en voor een verticaal helofytenfilter tussen 71-91 %. In het geval van alle drie de zware metalen (koper, lood en zink) zijn de verblijftijden van het water in de filters niet vermeld. Van de verblijftijden wordt verwacht dat deze een wezenlijk effect op de resultaten hebben (Kadlec & Wallace, 2009).

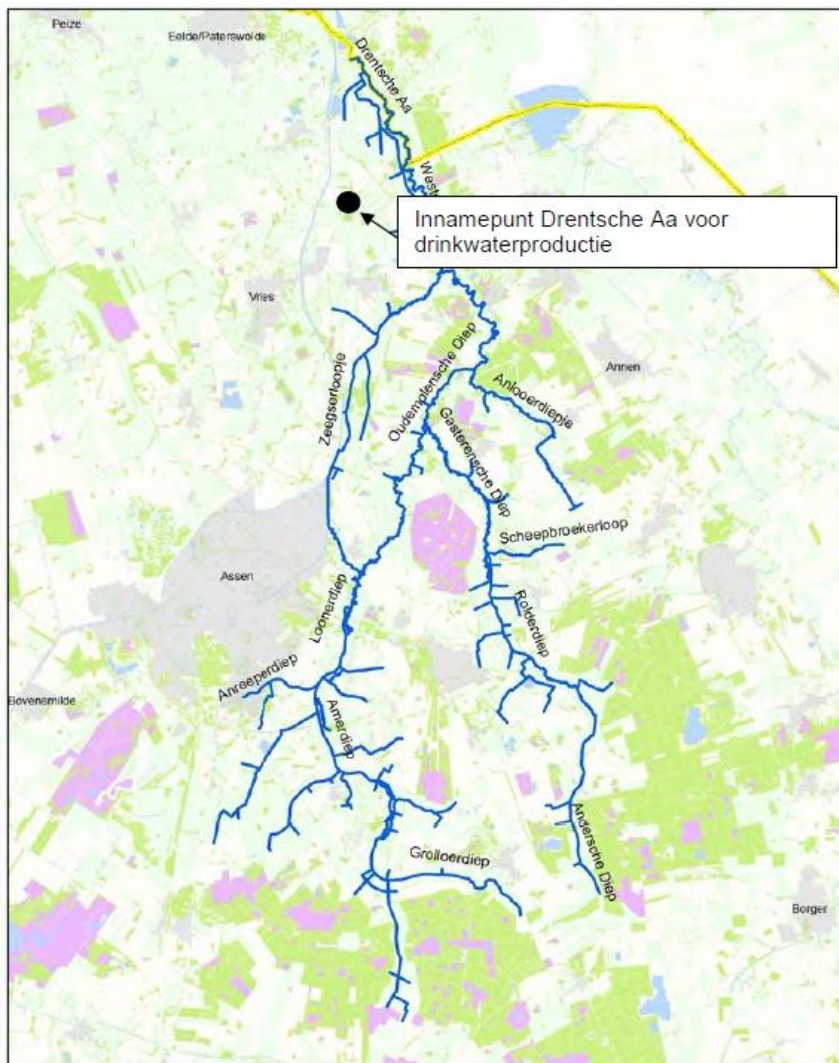
4. Pesticiden

In wetlands is de verwijdering van pesticiden erg wisselend. In een continue belast vloeiveld met een verblijftijd van 2,1 dag worden verwijderingsrendementen van 86 % voor Aldrin, 100 % voor DDT, -19 % voor Lindaan en 4 % voor Permethrin bereikt (Lopez-Flores, et al., 2003). Metolachlor wordt in zowel een vloeiveld als een helofytenfilter verwijderd, respectievelijk 50 % en 62-97 %. Hierbij heeft het vloeiveld een langere verblijftijd (12-20 ten opzichte van 2-19 dagen) en de pesticide wordt gedoseerd aan de wetlands (George, et al., 2003).

5 CASUS: ASSEN ZUID

5.1 Achtergrond

De hiervoor beschreven zuiveringstechnieken zijn onderzocht op toepasbaarheid voor de casus Assen Zuid. Voor Assen Zuid liggen plannen om een industrieterrein in te richten grenzend aan de Drentsche Aa (zie figuur 7). De precieze inrichting is nog niet bekend, maar de bouw van een truckstop en een mestvergister staan in ieder geval op de planning. Het idee is om het regenwater van dit gebied af te koppelen van het rioolwater en middels (natuur geïntegreerde) zuivering te lozen op de Drentsche Aa. De Drentsche Aa wordt gebruikt als bron voor drinkwaterproductie door Waterbedrijf Groningen. Het is daarom van belang het water in de Drentsche Aa zo schoon mogelijk te houden.



Figuur 7 – Beschermingsgebied voor oppervlaktewater Drentsche Aa (van Dongen, et al., 2013).

5.2 Uitgangspunten

In dit hoofdstuk wordt er gerekend aan de vervuiling die via het industrieterrein in de Drentsche Aa terecht zou kunnen komen en aan het effect van 'natuur geïntegreerde' zuiveringstechnieken op deze vervuiling. Door het gebrek aan informatie over het industrieterrein zal er gerekend worden met een

afstromend oppervlak van 2 ha, daarnaast zal er van uitgegaan worden dat het merendeel van de vervuiling afkomstig is van een truckstop (80 %) en een kleiner deel van de mestvergister (20 %), wat als industrieel landgebruik wordt gelabeld. Hiervoor is gekozen omdat de mest voor de vergister aangevoerd zal worden door vrachtwagens en het gebied verder afgedekt is. De concentraties in het afstromende regenwater zijn berekend met de (op literatuur gebaseerde) concentraties zoals weergegeven in tabel 2 (80 % truckstop + 20 % industrieel).

Over bestrijdingsmiddelen in afstromend regenwater is, zoals eerder genoemd, weinig bekend. Dit heeft te maken met het locatie en landgebruik specifiek zijn van de gebruikte bestrijdingsmiddelen. In de tabel is Atrazine genomen als voorbeeld bestrijdingsmiddel. Op landbouwgrond stroomt hiervan tussen de 300 en 1 µg/l af (zie tabel 1). Uit het artikel van Southwick, *et al* (2003) blijkt dat er na 30 dagen na toediening een stabiele afgifte van Atrazine is van 1-2 µg/l. Er wordt daarom een concentratie van 2 µg/l aangehouden in het afstromende regenwater.

De verwijdering door middel van de natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken is gebaseerd op de verwijderingsrendementen uit tabel 7. Daarbij is de uitgaande concentratie berekend bij zowel minimale als maximale verwijdering. De 'toegestane' concentratie in de Drentsche Aa is getoetst aan normen, gebaseerd op zomerhalfjaargemiddelden, uit de 'Jaarrapportage Waterkwaliteit' van waterschap Hunze en Aa's en op analyses bij het innamepunt voor de drinkwaterproductie. Dit laatste geldt alleen voor BZV en CZV.

5.3 Beschouwing

In tabel 8 is te zien dat de natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken de verontreinigingen niet tot onder het jaargemiddelde van de Drentsche Aa verwijderen. De nutriënten en BTEX worden matig tot goed afgevangen, maar zware metalen en bestrijdingsmiddelen, die meer voorkomen bij industrieel landgebruik, blijken lastiger te verwijderen. Atrazine levert geen probleem op voor het jaargemiddelde van de Drentsche Aa, omdat het afstromende regenwater een concentratie heeft van 2 µg/l en dit gelijk staat aan het jaargemiddelde van de Drentsche Aa.

Tabel 8 – Concentratie afstromend regenwater gecombineerd met verwijderingsrendementen van de natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken en getoetst aan de concentraties in de Drentsche Aa (groen=goed, rood=slecht, geel=matige benadering Drentsche Aa water, blauw=geen data).

	Afstromend regenwater		Verticaal helofytenfilter		Vloeienveld		Agrowadi		Infiltratieveld	Jaargemiddelde concentratie Drentsche Aa
			min	max	min	max	min	max		
Totaal BTEX	0,7	µg/l		0,0	0,2	0,1	0,7	0,7	0,7	10
Olie	7,7	µg/l								
Cu	77,2	µg/l	41,7	19,3	31,7	14,7	49,4	49,4	24,7	2,4
Zn	276,8	µg/l	227,0	52,6	80,3	24,9	24,9	24,9	58,1	10,6
Pb	121,0	µg/l	102,9	24,2	100,3	24,2	121,0	121,0	72,6	7,2
Atrazine	2,0	µg/l	0,8	0,1	2,4	0,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Zwevende stof	60,0	mg/l	12,0	6,0	53,4	21,0	135,0	3,6	60,0	
BZV	17,9	mg/l	6,8	0,4	15,8	3,6	174,2	0,2	17,9	1,5
CZV	60,2	mg/l	49,4	4,2	63,2	45,2	338,3	1,2	34,9	30,0
Totaal stikstof	2,0	mg/l		0,4	2,2	0,8	5,5	0,9	0,9	2,2
Totaal fosfor	0,4	mg/l		0,2	0,4	0,1	0,9	0,1	0,2	0,1

BZV, CZV, stikstof en fosfor worden, onder optimale omstandigheden, door alle systemen goed verwijderd. Voor het infiltratieveld en het verticaal helofytenfilter blijkt fosfor nog wel lastig en

hetzelfde geldt voor BZV in het infiltratieveld. Het verwijderingsrendement voor fosfor kan verhoogd worden door het toevoegen van ijzerkorrels in het helofytenfilter. De zware metalen blijken voor alle systemen lastig om te verwijderen onder het jaargemiddelde van de Drentsche Aa. In het geval van BTEX en Atrazine zijn de concentraties in het afstromende regenwater al onder het jaargemiddelde.

Als de natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken niet naar behoren werken zal de volledige vervuiling in de Drentsche Aa terechtkomen. De bijdrage aan de jaargemiddelde concentratie van het afspoelen van het regenwater van Assen Zuid naar de Drentsche Aa is weergegeven in tabel 9. Hierbij is uitgegaan van een volledig afstromend oppervlak van 2 ha waar op jaarbasis 800 mm regenwater valt. Het debiet in de Drentsche Aa is berekend aan de hand van een debietmeter bij Schipborg, die gelijkstaat aan 80% van het debiet bij het innamepunt. De concentraties in de Drentsche Aa zijn genomen als gemeten bij het innamepunt door Waterbedrijf Groningen, waarbij de concentratie van Atrazine genomen is als de laagste waarde die gemeten kan worden (0,02 µg/l) omdat deze stof niet in de Drentsche Aa wordt gevonden.

In tabel 9 en 10 is de vergelijking gemaakt tussen de lozing van ongezuiverd regenwater en de lozing na een optimaal werkend vloeiveld en lamellenseparator. De keuze voor een vloeiveld komt voort uit tabel 8 waar het vloeiveld onder optimale omstandigheden goede verwijdering laat zien en ook zware metalen als een van de betere verwijderd. Deze techniek is als meest robuust genomen, gebaseerd op deze verwijderingsrendementen en het bufferend vermogen.

In tabel 9 is te zien dat de bijdrage van Assen Zuid aan de concentraties verontreinigingen voor bijna alle stoffen minder is dan 1%. Alleen lood en Atrazine levert de lozing een bijdrage van > 2% aan de vracht in de Drentsche Aa. Na zuivering met behulp van een vloeiveld worden ook deze vrachten afgevangen tot ≤ 1%. Lood wordt ook afgevangen in de lamellenseparator, maar dit geldt niet voor de bestrijdingsmiddelen. Het kan zijn dat Atrazine ook gedeeltelijk in een lamellenseparator wordt verwijderd, maar hier zijn weinig tot geen data van bekend. Beide zuiveringstechnieken leveren een verbetering van de waterkwaliteit op.

Tabel 9 – Vrachten aan verontreinigingen afstromend van Assen Zuid en percentage hiervan op de Drentsche Aa jaargemiddeld

	Afstromend regenwater		Percentage (%) van vracht Drentsche Aa	Percentage (%) van vracht Drentsche Aa na optimaal werkend vloeiveld	Percentage (%) van vracht Drentsche Aa na optimaal werkend lamellenseparator
Totaal BTEX	0,7	µg/l	0,8	0,1	0,2
Olie	7,7	mg/l			
Koper	77,2	µg/l	1,1	0,2	0,7
Zink	276,8	µg/l	0,9	0,1	0,6
Lood	121,0	µg/l	5,3	1,1	2,9
Atrazine	2,0	µg/l	2,2	0	2,2
Zwevende stof	60,0	mg/l			
BZV	17,9	mg/l	0,3	0,1	0,1
CZV	60,2	mg/l	0,0	0,0	0,0
Totaal stikstof	2,0	mg/l	0,0	0,0	0,0
Totaal fosfor	0,4	mg/l	0,1	0,0	0,1

In tabel 10 zijn de vrachten aan verontreinigingen in het afstromende regenwater van Assen Zuid berekend voor de zomermaanden. In juni en juli staat het waterniveau in de Drentsche Aa het laagst. Aan de hand van het gemiddelde regenvolume in deze maanden is bekeken wat het effect is van een regenbui bij laag water. Ook hier is de vergelijking gemaakt met de verwijdering in een optimaal

werkend vloeiveld en lamellenseparator. De bijdrage aan de vracht in de Drentsche Aa bij lozing zonder zuivering ligt tijdens laag waterstanden significant hoger dan berekend in tabel 9. In dit geval is de bijdrage aan de vrachten voor BTEX, alle zware metalen en atrazine > 4%. De verwijdering met behulp van het vloeiveld resulteert in gelijkwaardige vrachten van onbehandeld afstromend regenwater uit tabel 9. In het geval van de lamellenseparator zijn de zware metalen en atrazine aanwezig > 3%. De bijdrage aan de vrachten van de Drentsche Aa is voor de lamellenseparator aanzienlijk hoger dan het vloeiveld.

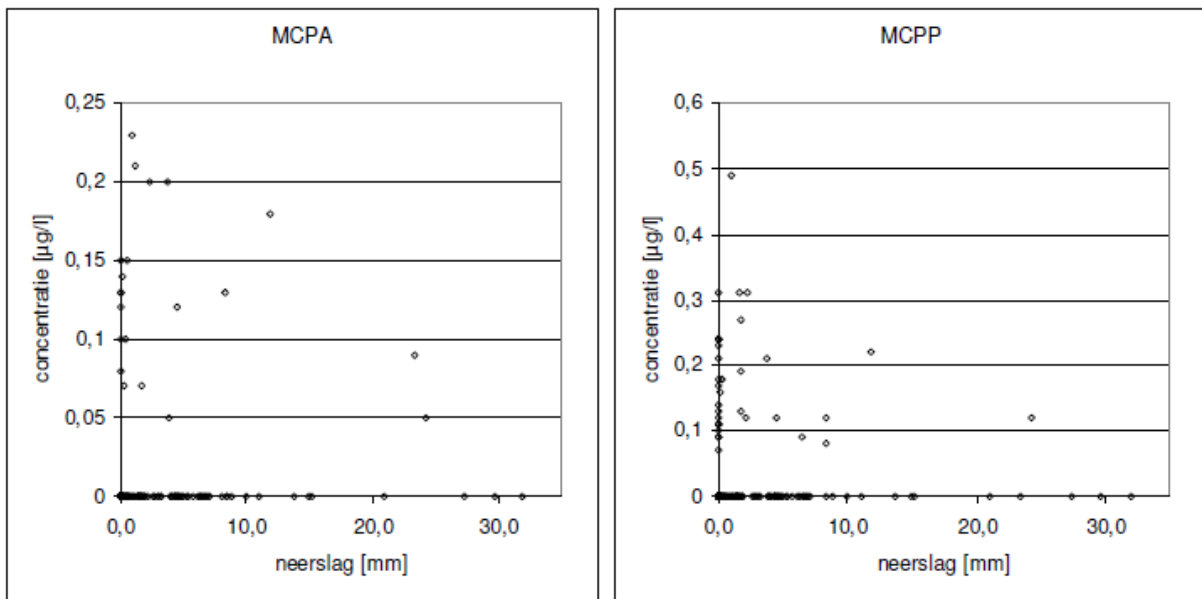
Tabel 10 – Vrachten aan verontreinigingen afstromend van Assen Zuid en percentage hiervan op de Drentsche Aa in de zomermaanden

	Afstromend regenwater		Percentage (%) van vracht Drentsche Aa	Percentage (%) van vracht Drentsche Aa na optimaal werkend vloeiveld	Percentage (%) van vracht Drentsche Aa na optimaal werkend lamellenseparator
Totaal BTEX	0,7	µg/l	4,4	0,6	0,9
Olie	7,7	µg/l			
Koper	77,2	µg/l	6,2	1,8	3,7
Zink	276,8	µg/l	4,7	0,4	3,5
Lood	121,0	µg/l	28,9	5,8	16,2
Atrazine	2,0	µg/l	12,0	0	12,0
Zwevende stof	60,0	mg/l			
BZV	17,9	mg/l	1,4	0,3	0,5
CZV	60,2	mg/l	0,2	0,2	0,2
Totaal stikstof	2,0	mg/l	0,1	0,1	0,1
Totaal fosfor	0,4	mg/l	0,4	0,1	0,4

In de Drentsche Aa worden de afgelopen jaren hoofdzakelijk de bestrijdingsmiddelen 2,4-D, AMPA, Glyfosaat, MCPA en MCPP boven de drinkwaternorm aangetroffen. In figuur 8 kan duidelijk gezien worden dat deze concentraties moeilijk tot niet gerelateerd kunnen worden aan de neerslag. Dit zou tot de conclusie kunnen leiden dat de aanwezigheid van bestrijdingsmiddelen in het water niet direct voortkomt uit regenwaterafspoeling. De hoogste concentraties aan MCPA en MCPP worden hoofdzakelijk gezien bij weinig neerslag. Toch moet bij deze conclusie een mate van voorzichtigheid aangehouden worden, als bestrijdingsmiddelen minder mobiel zijn zullen ze er langer over doen om de Drentsche Aa te bereiken en kunnen ze een vertraging hebben op de neerslag.

Naast de verwijderingsrendementen is er ook gekeken naar de grootte en kosten van de natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken. Voor het berekenen van de grootte van de zuiveringstechniek is er gekeken naar de grootste hoeveelheid regen die in 1 dag 1 keer per jaar wordt geleverd op 1 meetstation, dit is 80 mm/dag (KNMI, 2015). Als worst case scenario is er vanuit gegaan dat de volledige 2 hectare afstroomt, wat neerkomt op 1600 m³/dag en dus 67 m³/uur. Daarnaast is er een berekening gemaakt van de grootte aan de hand van een belasting van 1 m³/uur (1,2 mm/dag). De berekeningen zijn gebaseerd op de optimale hydraulische belasting en de resultaten zijn te zien in tabel 11.

Bij de kosten is niet uitgegaan van een eventuele buffertank die geïnstalleerd moet/kan worden. Het volledige debiet zal door het filter worden opgevangen. In realiteit is dit niet het geval, maar om een goede vergelijking te kunnen maken is het als genoemd meegenomen. De kosten van een helofytenfilter en vloeiveld zijn gebaseerd op de optimale hydraulische belasting. De agrowadi is via hetzelfde principe berekend. Hierbij zijn aan de hand van de hydraulische belasting de grootte en de kosten voor het filter berekend. Voor het infiltratieveld zijn de bedragen gegeven per m² afstromend oppervlak, in dit geval 2 hectare.



Figuur 8 – Plots van MCPA en MCPP tegenover neerslag. Concentraties < detectielimiet worden aangegeven als 0 (de Jong, et al., 2006).

Uit tabel 11 blijkt dat bij een debiet van 1 m³/u het vloeiveld het grootste oppervlak nodig heeft om het water te verwerken, terwijl na het verhogen van het debiet naar 67 m³/u het vloeiveld niet veel groter wordt om het water te bergen. Dit heeft te maken met het water bergend vermogen. Alle andere natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken worden aanzienlijk groter bij de dimensionering voor een grote bui. Om de kosten voor die technieken te verlagen is het aan te raden een buffertank te installeren. Deze buffertank zal de grootte van de technieken, zoals de agrowadi, aanzienlijk verkleinen.

Tabel 11 – Grootte en indicatieve kosten van de zuiveringstechnieken gebaseerd op 2 verschillende hydraulische belastingen

		V. helofytenfilter	Vloeiveld	Agrowadi	Infiltratieveld
Hydraulische belasting	m/d	0,1-0,2	0,02-0,05	0,022	0,08-2,16
Bufferend vermogen			40-80cm verhoging		Afhankelijk van locatie
Grootte (1 m ³ /u)	m ²	240-120	1.200-480	1.100	300-11
Grootte (67 m ³ /u)	m ²	16.000-8.000	2.000	73.500	20.000-740
Investeringskosten (1 m ³ /u)	€	253.000	12.000-4.800	65.000	100.000
Investeringskosten (67 m ³ /u)	€	800.000-400.000	20.000	4.385.000	-
Onderhoudskosten	€	225.000	28.120	540.000	43.000

Het is belangrijk om de genoemde investerings- en onderhoudskosten als indicatie te gebruiken.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 Conclusie

De volgende algemene conclusies komen voort uit dit rapport:

- Alle stoffen worden bij een optimaal bedreven verticaal helofytenfilter > 75% verwijderd, behalve fosfaat (30%). Hetzelfde geldt voor een vloeiveld, behalve CZV en stikstof. De verwijdering hiervan fluctueert of vindt minder plaats;
- De agrowadi heeft hoge verwijderingsrendementen als overbelasting door nutriënten niet plaatsvindt. Er is weinig tot niet gekeken naar de verwijdering van atrazine of stoffen uit de transportsector. Hetzelfde geldt voor infiltratievelden. Hierdoor worden zware metalen, CZV, stikstof en fosfor gemiddeld verwijderd;
- Hoge verwijderingsrendementen worden bereikt bij goede dimensionering, verblijftijd/hydraulische belasting en onderhoud van de technieken. Dit zijn cruciale factoren voor de verwijdering;
- De zuiveringstechnieken kunnen niet volledig gecontroleerd worden;
- Het vloeiveld is het meest robuust, kijkend naar het bufferend vermogen in combinatie met de verwijderingsrendementen en de kosten van de techniek;
- Run-off concentraties zijn sterk locatie specifiek en worden maar beperkt in de literatuur beschreven.

De indicatieve kosten voor de natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken zijn:

Tabel 12 – Indicatieve kosten voor de installatie van de natuur geïntegreerde zuiveringstechnieken

		V. helofytenfilter	Vloeiveld	Agrowadi	Infiltratieveld
Hydraulische belasting	m/d	0,1-0,2	0,02-0,05	0,022	0,08-2,16
Investeringskosten (1 m ³ /u)	€	253.000	12.000-4.800	65.000	100.000
Investeringskosten (67 m ³ /u)	€	800.000-400.000	20.000	4.385.000	-
Onderhoudskosten	€	225.000	28.120	540.000	43.000

Specifiek voor Assen Zuid zijn aanvullende conclusies voortgekomen uit het rapport:

- Geen natuur geïntegreerde zuiveringstechniek verwijdert alle stoffen onder de achtergrond concentraties van de Drentsche Aa, voornamelijk zware metalen, BZV, CZV en fosfaat blijven verhoogd aanwezig in het water;
- Afspoeling van de verontreinigingen jaargemiddeld levert maximaal een bijdrage aan de vracht op van 5%. In de zomermaanden neemt dit percentage toe tot 28% op de vracht van de Drentsche Aa;
- Met zuivering verlaagt deze bijdrage naar maximaal 1% en 5% respectievelijk;
- Een lamellenseparator lijkt geen betere barrière dan een vloeiveld;
- De waterkwaliteit van de Drentsche Aa zal, ondanks zuivering, (plaatselijk) verslechteren.

6.2 Aanbevelingen

De aanbevelingen aan de hand van dit rapport zijn met betrekking tot Assen-Zuid:

- Definitief maken van de plannen rond de inrichting van Assen Zuid;
- Preciezer schatten van de verwachte samenstelling van de run-off van Assen-Zuid en de emissie naar de Drentsche Aa;
- Kijken naar alternatieve opties voor natuur geïntegreerde zuivering en lozing op de Drentsche Aa, zoals vervoer naar RWZI of plaatselijke zuivering (niet perse natuur geïntegreerd);
- Definiëren welke emissie naar de Drentsche Aa via run-off water acceptabel is.

VERWIJZINGEN

Boogaard, F., 2015. Stormwater Quality. In: *Stormwater characteristics and new testing methods for certain sustainable urban drainage systems in The Netherlands*. Delft: TU Delft.

Boogaard, F., 2015. Stormwater quality characteristics in Dutch urban areas and performance of sedimentation devices. In: *Stormwater characteristics and new testing methods for certain sustainable urban drainage systems in The Netherlands*. Delft: TU Delft, pp. 43-55.

Borden, R. C., Black, D. C. & McBlief, K. V., 2002. MTBE and aromatic hydrocarbons in North Carolina stormwater runoff. *Environmental Pollution*, Volume 118, pp. 141-152.

Broos, J., 2011. *Een inventarisatie van de problematiek en mogelijke oplossingen voor erfafspoeling*, Bunnik: STOWA.

Broos, J., 2011. *Erfafspoeling*, Amersfoort: STOWA.

Chang, S., La, H. & Lee, S., 2001. Microbial degradation of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene isomers (BTEX) contaminated groundwater in Korea. *Water Sci Technol*, 44(7), pp. 165-171.

de Jong, B., Ramaker, T. & Zwolsman, G., 2006. *Klimaatverandering en de Drentsche Aa - Verkenning effect op afvoer en bestrijdingsmiddelen*, Nieuwegein: KIWA N.V..

Denton, J. E. et al., 2006. *Characterization of used oil in stormwater runoff in California*, sl: California Environmental Protection Agency.

d'Ersu, M., 2015. *Amsterdam Rainproof*. [Online]

Available at: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/infiltratiestroken-met-bovengrondse-opslag>

[Geopend 10 november 2015].

Deutsch, J., 2003. *Report 5.1. Review of the Use of stormwater BMPs in Europe*, sl: DayWater.

D'hoop, M. & Mestdagh, I., 2015. *Praktische gids biozuiveringssystemen - biofilter en fytobak*, sl: Provinciaal Onderzoeks en Voorlichtingscentrum voor Land en Tuinbouw.

EPA, sd *Grassed Swales*. [Online]

Available at: <http://water.epa.gov/polwaste/npdes/swbmp/Grassed-Swales.cfm>

[Geopend 21 September 2015].

George, D., Stearman, G., Carlson, K. & Lansford, S., 2003. Simazine and metolachlor removal by subsurface flow constructed wetlands. *Water Environmental Research*, 75(2), pp. 101-112.

Gervin, L. & Brix, H., 2001. Removal of nutrients from combined sewer overflows and lake water in a vertical-flow constructed wetland system. *Water Science and Technology*, 44(11-12), pp. 171-176.

Global Wetlands, 2015. *Helofytenfilter*. [Online]

Available at: <http://www.globalwetlands.com/nl/helofytenfilter/#vloeiveld>

[Geopend 11 September 2015].

Kadlec, R. H. & Wallace, S. D., 2008. Organic Chemicals. In: T. & F. Group, red. *Treatment Wetlands*. Boca Raton: CRC Press, pp. 517-620.

Kadlec, R. H. & Wallace, S. D., 2009. *Treatment wetlands*. 2de red. Boca Raton: CRC Press.

Kimenai, M., 2007. *Emissiereductie met behulp van een agrowadi*, 's Hertogenbosch: Waterschap Aa en Maas.

KNMI, 2015. *Hoe vaak komt extreme neerslag zoals op 28 juli tegenwoordig voor, en is dat anders dan vroeger?*. [Online]

Available at: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/hoe-vaak-komt-extreme-neerslag-zoals-op-28-juli-tegenwoordig-voor-en-is-dat-anders-dan-vroeger>

[Geopend 17 December 2015].

Kouakou, U., Ello, A. S., Yapo, J. A. & Trokourey, A., 2013. Adsorption of iron and zinc on commercial activated carbon. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5(6), pp. 168-171.

Leidraad Rioleringszorg, 2015. *D1100 Kostenkengetallen rioleringszorg*, sl: Leidraad Rioleringszorg.

Lin, B., Van Verseveld, H. & Roling, W., 2002. Microbial aspects of anaerobic BTEX degradation. *Biomed Environ Sci*, 15(2), pp. 130-144.

Lopez-Flores, R. et al., 2003. Comparison of nutrient and contaminant fluxes in two areas with different hydrological regimes (Emporda Wetlands, NE Spain). *Water Research*, 37(12), pp. 3034-3046.

Luederitz, V. et al., 2001. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical and horizontal flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 18(2), pp. 157-171.

Mazille, F. & Spuhler, D., 2011. *Adsorption (Activated Carbon)*. [Online]

Available at: <http://www.sswm.info/content/adsorption-activated-carbon>

[Geopend 14 Oktober 2015].

Okiel, K., El-Sayed, M. & El-Kady, M. Y., 2011. Treatment of oil-water emulsions by adsorption onto activated carbon, bentonite and deposited carbon. *Egyptian Journal of Petroleum*, Volume 20, pp. 9-15.

Overheid.nl, 2016. *Activiteitenbesluit milieubeheer*. [Online]

Available at: <http://wetten.overheid.nl/BWBR0022762/2016-01-01>

[Geopend 7 Maart 2016].

Provincie Zuid-Holland, 2015. *Boerensloot zuivert spoelwater melkmachines*. [Online]

Available at: <http://www.zuid-holland.nl/actueel/nieuws/@11641/boerensloot-zuivert/>

[Geopend 10 november 2015].

Rombout, J., 2006. *Lamellenseparatoren*, Amsterdam: Tauw bv, STOWA.

Rombout, J., Boogaard, F., Kluck, J. & Wentink, R., 2007. *Verkenning van de kennis van ontwerp, aanleg en beheer van zuiverende regenwatersystemen*, Utrecht: STOWA.

Southwick, L., Grigg, B., Fouss, J. & Kornecki, T., 2003. Atrazine and Metolachlor in Surface Runoff under Typical Rainfall Conditions in Southern Louisiana. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Volume 51, pp. 5355-5361.

UniRemInc, 2005. *PRP Powder for hydrocarbon spill clean up on oil, fuel and other liquid petroleum*s. [Online]

Available at: <http://uniremenc.com/prp-powder/>

[Geopend 7 Oktober 2015].

Unuabonah, E. I. et al., 2013. Hybrid Clay: A new highly efficient adsorbent for water treatment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, Volume 1, pp. 966-973.

van den Boomen, R. & Kampf, R., 2012. *Waterharmonica's in Nederland. 1996-2011: van effluent tot bruikbaar oppervlaktewater*, Amersfoort: STOWA.

van der Marel, P., 2013. *Waterkwaliteit en waterzuivering Wildlife Parkresort - eindrapportage*, Glimmen: WLN.

van Dongen, M., Vlaar, T. & Brilleman-Brondijk, G., 2013. *Gebiedsdossier oppervlaktewaterwinning Drentsche Aa*, sl: Waterschap Hunze en Aa's, Waterbedrijf Groningen en Provincie Drenthe.