

Nieuwe kansen voor duurzame biomassa: afvalwater zuiveren met wilgen

Dit rapport is in opdracht van InnovatieNetwerk opgesteld door:

Adrie Otte, Bioniers

Martijn Boosten, Probos

Projectleider InnovatieNetwerk:

Mw. Ir. M.H.A. (Marleen) van den Ham

Dit rapport valt binnen het concept 'Biomassa als drager van het landschap'



Postbus 19197

3501 DD Utrecht

tel.: 070 378 5653

internet: www.innovatienetwerk.org

Het ministerie van EZ nam het initiatief tot en financiert InnovatieNetwerk.

ISBN: 978 – 90- 5059 – 514 – 8

Overname van tekstdelen is toegestaan, mits met bronvermelding.

Rapportnr. 14.2.324, Utrecht, maart 2014.

Inhoud

	Blz.
Samenvatting	1
1. Achtergrond	3
2. Systemen in het buitenland	5
2.1 Type systemen	5
2.2 Type afvalwater	6
2.3 Vormgeving, technische uitvoering en eigenschappen	8
2.4 Ontwerpgrondslagen	13
2.5 Praktische uitvoering	18
2.6 Ophoping	19
2.7 Overige aspecten	19
2.8 Kosten en baten	20
2.9 Duurzame energie en houtige biomassa	23
3. Wilgenzuivering vs. helofytenfilters en krooszuivering	25
3.1 Principes en werking	25
3.2 Benodigde oppervlakten	26
3.3 Beheer, onderhoud en biomassaproductie	27
3.4 Kosten en baten	28
3.5 Overige factoren (recreatie, educatie, natuur, waterberging)	29
3.6 Samenvatting	29
4. Kansen in Nederland	31
4.1 Rioolwaterzuiveringsinstallaties	31
4.2 Bedrijfszuiveringsinstallaties	32
4.3 Perspectieven voor wilgenzuivering	33
5. Conclusies en vervolg	35
Literatuur	37
Bijlage 1: Kosten/batenberekeningen	43

Samenvatting

Nederland heeft vooral ervaring met helofytenfilters als het gaat om natuurlijke waterzuiveringssystemen. In onder andere Zweden, Denemarken en de VS is echter ook ervaring opgedaan met waterzuiverende wilgenplantages. Deze plantages leveren nuttige biomassa en leveren als bijproduct waterzuivering of schoon water op. Deze rapportage ontsluit de in buitenlandse literatuur opgetekende kennis en ervaring met wilgenzuivering voor Nederland.

De meest gebruikte systemen in het buitenland zijn systemen zonder lozing. Hierbij wordt een wilgenplantage bevoeid met afvalwater (huishoudelijk en industrieel), effluent van een waterzuiveringsinstallatie (rioolwaterzuiveringsinstallatie of bedrijfsafvalwaterzuiveringsinstallatie) of percolatiewater uit vuilstorten. De hoeveelheid water is gelijk aan de verdamping door de bomen (minus de neerslag). Deze systemen worden alleen tijdens het groeiseizoen bevoeid. Het voordeel van deze systemen is dat het afvalwater volledig verdwijnt. Het nadeel is dat het systeem alleen in het zomerhalfjaar gebruikt kan worden en dat het afvalwater van de winter opgeslagen moet worden of alsnog moet worden geloosd.

Een ander systeem, dat vooral kleinschalig wordt toegepast, is een verticaal doorstroomd systeem, waarbij het water op het maaiveld wordt gelaten, door de bodem zakt en via drainagebuizen het systeem verlaat. Dit systeem lijkt sterk op verticaal doorstroomde helofytenfilters die we ook in Nederland kennen. Deze systemen werken ook in de wintermaanden, kunnen kleiner worden gedimensioneerd, maar zijn duurder in aanleg, beheer en onderhoud.

De wilgensoorten en -klonen dienen te worden uitgezocht op eigenschappen die gunstig zijn voor een optimale waterzuiveringscapaciteit. Soorten en klonen met een hoge biomassaproductie en een lang groeiseizoen zijn hiervan een voorbeeld. De wijze van inrichting van de bomen is identiek aan die van wilgenplantages zonder waterzuiveringsfunctie.

Wilgenplantages met irrigatie met afvalwater hebben over het algemeen een hogere productie dan plantages zonder irrigatie. Ook spaart irrigeren met nutriëntenrijk afvalwater kosten voor (kunst)mest uit. In de praktijk ligt de opbrengst aan biomassa in het buitenland tussen ongeveer 5 en 20 ton ds/ha/j. Behalve opbrengst aan biomassa hebben wilgenplantages een hoge natuurwaarde, recreatieve waarde en educatieve waarde. Als het hout als brandstof wordt gebruikt en afvalwater de bomen voedt, leveren plantages voor elke energie-eenheid die aan fossiele brandstof nodig is voor beheer en onderhoud, 73 tot 80 energie-eenheden aan biobrandstof.

De hoeveelheid te doseren water hangt sterk samen met de hoeveelheid verdamping door de bomen. Hoeveel dit in Nederland is, is niet bekend, maar een schatting laat zien dat dit tussen 2 en 11 mm/d zal zijn. De verwijdering van nutriënten ligt rond 200 kg N/ha/j en 5 kg P/ha/j. Dit is inclusief verwijdering door bacteriële processen en vastlegging in de bodem.

Behandeling van effluent van een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi) kan kostenneutraal met een wilgenplantage. Bij de verwachte prijsstijging voor houtige biomassa in de nabije toekomst levert dit geld op.

Vergelijking van een wilgenplantage voor waterzuivering met helofytenfilters en krooszuivering laat zien dat wilgenzuivering meer ruimte vraagt dan de andere systemen. Krooszuivering en wilgenplantages leveren beide nuttige biomassa op. Krooszuivering is een veel arbeidsintensiever systeem, omdat eens of twee keer per week kroos moet worden geoogst en verwerkt. De kosten-batenanalyse laat zien dat de kosten voor de behandeling van afvalwater met wilgenzuivering lager zijn dan die van behandeling met helofytenfilters en kroos.

Wilgenzuivering is het meest geschikt voor de behandeling van effluent van kleinere rwzi's in landelijk gebied en voor behandeling van bedrijfslozingen. In potentie kan het effluent van de kleinste rwzi's (tot 10.000 i.e.¹ en de helft van de rwzi's tussen 10.000 en 25.000 i.e.) behandeld worden, en dan is in totaal in Nederland 1.944 ha wilgenplantage nodig. Dit levert dan ongeveer 29.000 ton ds/j aan biomassa op, aannemende dat de productie 15 ton ds/ha/j is. Bij inzet van deze biomassa voor energieopwekking wordt hiermee de uitstoot van 29.360 ton fossiele CO₂ vermeden.

De hoeveelheid bedrijfsafvalwater is in Nederland veel kleiner dan de hoeveelheid rwzi-effluent. Met 28,2 ha wilgenzuivering zou alle bedrijfsafvalwater in Nederland behandeld kunnen worden (gemiddeld 1.300 m² per bedrijf).

¹ Inwonersequivalenten.

1. Achtergrond

In Nederland zijn tot nu toe vooral helofytenfilters gebruikt om op natuurlijke wijze (afval)water te zuiveren. Rietvelden genieten de meeste populariteit. Hoewel effectief om water te zuiveren, leveren rietvelden geen nuttige biomassa en dus geen financieel rendement op.

Stichting Probos heeft recent onderzoek gedaan naar de financiële aspecten van wilgenplantages. Hieruit blijkt dat onder voorwaarden, wilgenplantages financieel rendabel kunnen zijn ([13],[41]). Gecombineerd met de functie van waterzuivering zou het financiële rendement hoger kunnen worden. Ervaringen in Zweden, Denemarken en de VS laten zien dat waterzuivering met wilgen goed mogelijk is (o.a. [2], [5], [24] en [32]). In Nederland is deze vorm van waterzuivering echter relatief onbekend.

Wilgenplantages bieden in potentie mogelijkheden, omdat de schaarse grond viervoudig wordt gebruikt en omdat meerdere beleidsdoelen worden gediend:

- Voor waterzuivering (Europese Kaderrichtlijn Water (KRW), verdrogingsbestrijding);
- Voor de teelt van biomassa (reductie CO₂-uitstoot, hernieuwbare energie);
- Voor verhoging van de biodiversiteit (biodiversiteitsdoelstellingen);
- Voor landschapsverbetering en recreatie.

De conclusie uit een vierjarige EU-studie is dat wilgenplantages voor biomassaproductie in combinatie met waterzuivering aantrekkelijk zijn en verder ontwikkeld dienen te worden op een grotere schaal ([32]).

Om de kennis over wilgenplantages voor waterzuivering voor Nederland te ontsluiten, heeft InnovatieNetwerk opdracht gegeven tot het verzamelen van ervaringen in het buitenland. Deze state-of-the-art-rapportage is daarvan het resultaat.

In deze rapportage komen de volgende onderwerpen aan bod:

- Welke systemen bestaan in het buitenland?
- Wat voor type (afval)water wordt gezuiverd?
- Hoe zijn systemen vormgegeven en hoe zitten zij technisch in elkaar?
- Hoe wordt een optimale waterzuivering gecombineerd met een optimale inrichting en exploitatie van de wilgenplantage voor biomassaproductie?
- Wat zijn ontwerpgrondslagen?
- Wat zijn de kosten en baten?
- Hoe verhouden wilgenzuiveringen zich tot conventionele helofytenfilters (zuiveringsrendementen, kansen en knelpunten, kosten en baten)?
- Waar kunnen wilgenzuiveringssystemen worden toegepast? Bij welk type sectoren of bedrijven liggen kansen?

- Waar zijn potentiële win-winsituaties waarbij wilgenzuivering kan worden gecombineerd met natuurontwikkeling, lokale opwekking van duurzame energie (afzet van de biomassa), et cetera?
- Wat is de potentie voor wilgenzuivering in Nederland (aantal en oppervlakte)?

2. Systemen in het buitenland

2.1 Type systemen

2.1.1 Geen lozing

Afvalwater wordt meestal geloosd op het oppervlaktewater of via het riool afgevoerd. Lozen op oppervlaktewater betekent meestal een verstoring van het ecosysteem in het water. De mate van verstoring varieert met de mate van vervuiling en het debiet van de lozing ten opzichte van die van het ontvangende oppervlaktewater. Bij irrigatie van wilgenplantages met afvalwater kan deze dusdanig worden ingericht dat lozingen niet plaats hoeven te vinden, omdat al het in de plantage ingelaten water wordt verdampt door de bomen.

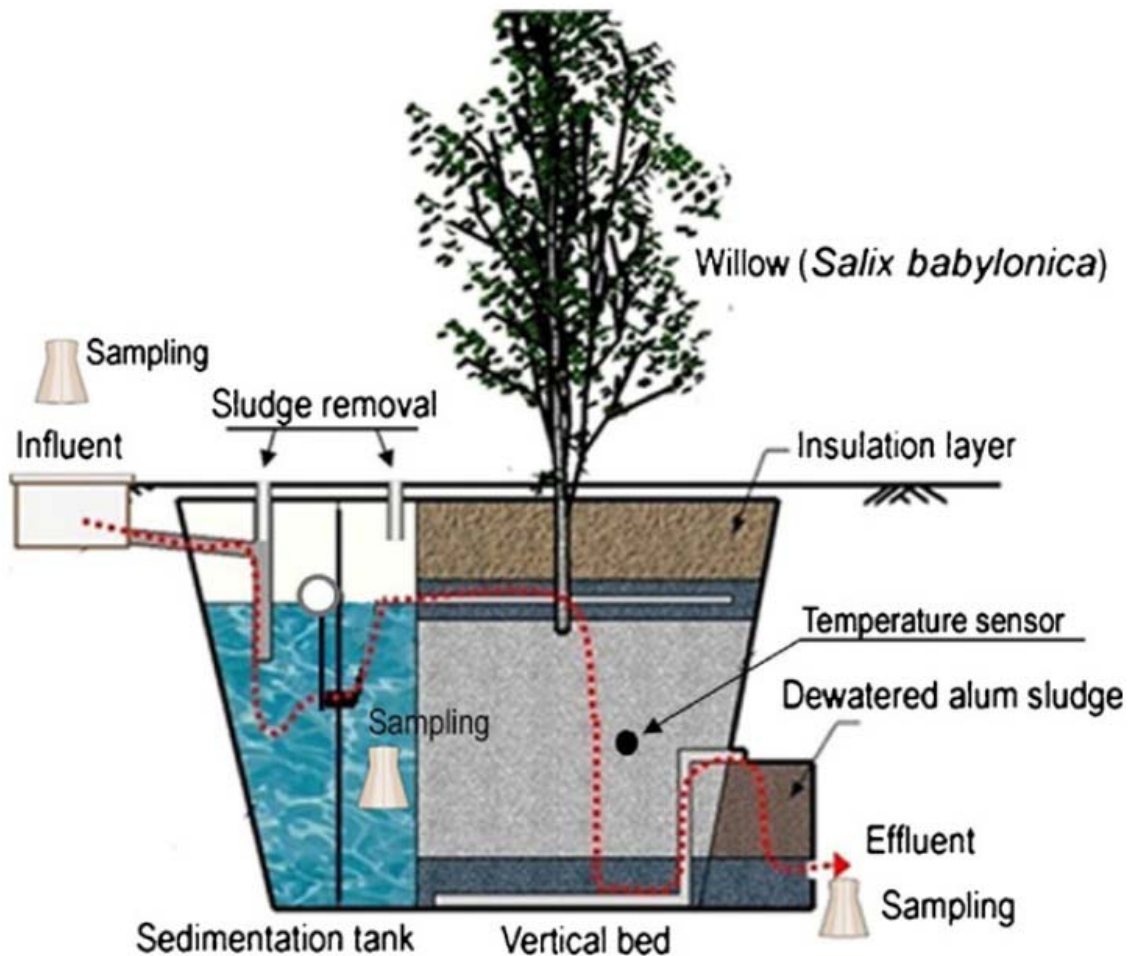
Grootschalige wilgenzuiveringsystemen bestaan uit een wilgenplantage die in het groeiseizoen wordt geïrrigeerd met het te zuiveren water (o.a. [5], [24], [32]). De irrigatie gebeurt via druppelirrigatie of sprinklerirrigatie. De hoeveelheid te behandelen water in het systeem wordt afgestemd op de verdamping, de infiltratiesnelheid en de hoeveelheid neerslag, zodanig dat er geen lozing op oppervlaktewater plaats hoeft te vinden. Irrigatie gebeurt alleen in de zomermaanden.

Het voordeel van geen-lozing-systemen is uiteraard dat er geen water wordt geloosd. Dit betekent dat er geen lozingsvergunning nodig is, geen afwenteling van problemen plaatsvindt naar het oppervlaktewater en benedenstrooms gelegen gebieden, en dat het systeem niet in de nabijheid van oppervlaktewater aangelegd hoeft te worden. Een nadeel is dat hoewel wilgen veel water verdampen, er een groter oppervlakte nodig is in vergelijking met systemen die wel water lozen. Een ander nadeel is dat er alleen in het groeiseizoen irrigatie, en daarmee waterzuivering, mogelijk is. Moet jaarrond water gezuiverd worden, dan is een opslagbekken nodig.

2.1.2 Verticaal doorstroemd

Kleinschalige systemen, bijvoorbeeld voor de zuivering van het afvalwater van één of enkele huishoudens, bestaan vaak ook uit een geïrrigeerd systeem zonder lozing, maar soms uit een verticaal doorstroemd systeem waarbij wel lozing op het oppervlaktewater plaatsvindt ([83]). Een voorbeeld is te zien in Figuur 1. Een groot deel van de zuivering vindt plaats door de bodempassage en door bacteriën die in de bodem aanwezig zijn. Hierdoor kan het systeem ook in de winter worden gebruikt. Omdat lozing van water mogelijk is, kan de grootte van het systeem, en daarmee het zuiveringsrendement, worden afgestemd op de lozingseisen. Een nadeel is dat de aanlegkosten hoger zijn dan de aanleg van een geen-lozingen-systeem, omdat er drainagebuizen moeten worden

aangelegd in de bodem. Ook het bodemtype moet geschikt zijn om een vlotte verticale doorstroming te garanderen.



Figuur 1: Voorbeeld van een verticaal doorstroomd wilgenfilter.

2.2 Type afvalwater

Voor het bevoeien en bemesten van wilgenplantages worden verschillende typen afval(water) gebruikt. Hieronder een overzicht van de beschreven systemen in de literatuur.

- Huishoudelijk afvalwater en rejectiewater uit slibontwatering ([5], [24], [25], [57], [75]).
- Effluent (gezuiverd water) van rioolwaterzuivering (rwzi) ([32], [74], [77], [78]).
- Slib van rwzi's ([25], [37], [56], [67]).
- Industrieel afvalwater van een cichoreiverwerkingsfabriek ([32]).
- Industrieel afvalwater van een aardappelverwerkingsfabriek ([44]).
- Industrieel afvalwater van een papierfabriek ([55]).
- Industrieel afvalwater ([25]).
- Verdunde urine (1-3% urine) ([32]).
- Percolatiewater uit vuilstorten ([7], [25], [85]).

Op al deze typen afval(water) groeiden wilgen goed. Irrigatie met nutriëntenrijk afvalwater verhoogt de productie van wilgen met 30 tot 100% ten opzichte van irrigatie met water of ten opzichte van geen irrigatie ([15], [32]). Ook het feit dat door de irrigatie de vochtvoorziening in de wilgenplantage vrijwel altijd optimaal is, zorgt ervoor dat met (afval)water geïrrigeerde wilgenplantages doorgaans een hogere productie hebben dan reguliere plantages ([15]).

2.2.1 Water uit rwzi's ([25])

Sinds de jaren negentig van de vorige eeuw zijn in Zweden veel wilgenplantages aangelegd om de stikstofbelasting van oppervlaktewater door huishoudelijk afvalwater te verminderen. Deze plantages worden bevoeid door druppel- of sprinklerirrigatiesystemen. In Enköping is een veld van 76 ha aangelegd dat rejectiewater van slibontwatering ontvangt. Hierin zit 800 mg N/l, dat is 25% van de totale hoeveelheid N die uit de rwzi komt. Het water wordt in de winter opgevangen in speciale opvangbekkens. Vervolgens wordt dit water in de zomer gebruikt voor bevoeiing. Bevoeiing gebeurt 120 dagen per jaar. De totale hoeveelheid nutriënten is 30 ton N en 1 ton P per jaar in 200.000 m³ afvalwater, waarvan 30.000 m³ afkomstig is uit de ontwatering.

2.2.2 Percolatiewater van vuilstort ([25])

Percolatiewater wordt eerst belucht, daarna gaat het naar een wilgenveld. Door de hoge verdamping van de wilgen, wordt al het water verdampt en is er geen lozing meer. Er wordt 3 tot 4 mm percolatiewater per dag gedoseerd als de chlorideconcentratie niet boven de 1.200 mg/l uit komt. Er zijn (in 2003) dertig van dit soort systemen in Zweden. Ook hier gebeurt irrigatie alleen in het groeiseizoen. Voor deze toepassing moeten wilgenvariëteiten worden gebruikt met een hoge tolerantie voor ammonium en chloride. Op percolatiewater uit vuilstorten groeien wilgen goed (met een belasting van tot 2.144 kg N/ha.10 weken, 144 kg P/ha.10 weken, 709 kg K/ha.10 weken, 1.010 kg Cl/ha.10 weken en 1.678 kg Na/ha.10 weken)([85]).

2.2.3 Industrieel afvalwater ([25])

In de bestudeerde literatuur wordt vooral sproeiwater uit houtzagerijen behandeld. De samenstelling varieert per houtsoort. Stoffen zijn: fenolzuren, chemisch zuurstofverbruik (CZV), zware metalen, fosfaat. Een gemiddelde houtzagerij produceert al snel 100.000 m³ afvalwater per jaar. De hydraulische belasting kan hoog zijn, omdat de concentraties aan stoffen niet snel te hoog zijn voor toxische effecten. Bij de Zweedse Heby-zagerij wordt 60.000 m³ per jaar geïrrigeerd op 1 ha wilgen en 0,5 ha gras. De irrigatiehoeveelheid is 33-38 mm/dag gedurende 120 dagen.

Ook water uit een composteringsinstallatie is uitgetoetst, maar hierop groeiden de wilgen niet goed. De reden hiervoor is niet onderzocht ([85]).

2.3 Vormgeving, technische uitvoering en eigenschappen

2.3.1 Wilgenplantages

Inleiding

Wilgenplantages zijn moderne wilgengrienden waarin biomassa wordt geteeld. De plantages bestaan uit circa 15.000 wilgenstoven per hectare, waarin periodiek (elke twee, drie of vier jaar) de scheuten worden geoogst. Na elke oogst groeien uit de wilgenstoven nieuwe scheuten. Deze cyclus van oogst en hergroei kan zich elke twintig jaar herhalen. De teelt van biomassa in wilgenplantages is volledig gemechaniseerd van grondvoorbereiding en planten van de stekken tot onderhoud en oogsten. In 2011 was in Zweden ongeveer 13.000 ha aan wilgenplantages in gebruik ([26]). In Nederland is op dit moment (november 2013) 33 ha aan wilgenplantages aangelegd ([64]). Het areaal neemt toe. In 2011 was de oppervlakte nog 29 ha ([14]).

Soorten en klonen

Salix viminalis, *S. dasyclados* en *S. schwerinii* zijn de soorten die in Europa het snelst groeien (in termen van biomassa-productie) ([52]). In Zweden wordt er al meer dan 25 jaar gewerkt aan de selectie van klonen voor wilgenplantages. Deze klonen zijn onder andere geselecteerd op hun hoge biomassa-productie, resistentie tegen ziekten en plagen en vorstongevoeligheid. De klonen worden wereldwijd toegepast, waaronder in Nederland. De Zweedse klonen zijn veelal selecties van of kruisingen tussen diverse wilgensoorten, zoals *Salix viminalis*, *S. dasyclados* en *S. schwerinii*. Op de klonen rust kwekersrecht en ze mogen dus niet zonder licentie geproduceerd en verhandeld worden. De firma SalixEnergij levert bijvoorbeeld de volgende klonen: Inger, Tordis, Tora, Torhild, Klara, Sven en Olof. Voor een uitgebreide beschrijving van deze klonen wordt verwezen naar Jansen & Boosten ([41]). Met een aantal van deze klonen zijn al goede ervaringen opgedaan bij toepassing in waterzuiveringssystemen. Er zijn echter nog te weinig onderzoeksresultaten voorhanden om te bepalen welke kloon het meest geschikt is voor waterzuivering ([23], [42], [55]).

Voor de combinatie met waterzuivering spelen naast een snelle groei en hoge productie ook andere eigenschappen een rol. Bij systemen die al het water verdampen, kan een langer groeiseizoen een belangrijk criterium zijn om voor een andere soort te kiezen. Sommige zuidelijke soorten kunnen goed groeien in noordelijkere streken en blijven daar langer groen dan inheemse soorten. Een voorbeeld hiervan is *S. babylonica* en de hybride daarvan, *S. × sepulcralis* ([52]). Tabel 1 geeft een overzicht van eigenschappen waaraan een toegepaste soort moet voldoen voor de verschillende mogelijke toepassingen.

Tabel 1: Eisen die aan wilgensoorten worden gesteld bij verschillende toepassingen (uit [52]).

Willow characteristics	Applications						
	Land reclamation	Phytoremediation			Bioengineering		Agroforestry including biomass plantations
		Rhizofiltration	Phytoextraction, phytodegradation	Phytostabilization	Erosion control	Protective structures	
Agronomical							
High growth rate	+	+	+	+	+	+	+
High biomass production		+	+		+		+
Good coppicing ability		+	+	+		+	+
Tolerance of high planting density		+	+	+	+	+	+
Height						+	
High shoot/branch density						+	
Good rooting ability	+	+	+	+	+	+	+
Clonal propagation	+	+	+	+	+		
High root density	+	+	+	+			
Root high tensile strength					+		
Deep root system		+		+			
Long growing season		+	+	+			+
Palatability	+	+	+	+	+	+	+
Low disease and pest susceptibility	+	+	+	+	+	+	+
High wildlife value	+	+		+	+	+	
Low wildlife value			+				
High ornamental value	+					+	
Value-added products		+		+		+	
Physiological							
High rates of transpiration		+	+	+	+		
High nutrient uptake, high N use		+		+			+
Low nutrients requirements	+	+	+	+			+
Resistance to chemical contaminants (inorganic metals, organics)	+		+	+			+
Resistance to carbon dioxide and methane in the root zone				+			
Tolerance of high bulk density	+				+	+	+
Resistance to air pollutants	+	+	+	+	+	+	
High metal uptake and accumulation rates		+	+	+			
Oxygen transport to the root zone		+	+	+			
Ecological							
Tolerance to drought	+				+		
Tolerance to heat	+				+		
Tolerance to frost	+	+	+	+		+	+
Tolerance to inundation		+			+		
Tolerance to deposition					+		
Tolerance to root exposure	+	+			+		
Tolerance to hypoxic soils		+		+	+	+	
Tolerance to salinity, high pH	+			+	+	+	
Tolerance to low pH	+						

2.3.2 Aanleg, beheer, oogst en verwijdering

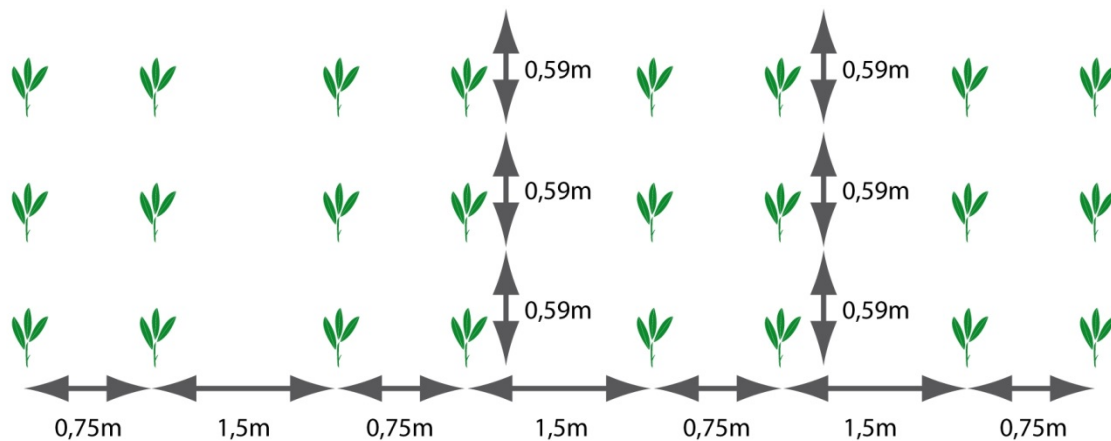
Voorafgaand aan het planten is het nodig om het terrein te ploegen en/of te frezen en vervolgens te eggen. Daarmee wordt een goed plantbed gecreëerd waarmee het plantwerk wordt vergemakkelijkt en het aanslaan van de wilgen wordt bevorderd ([13],[41]).

Aan het begin en het einde van de plantage moeten voldoende grote kopakkers worden aangelegd, zodat machines bij aanplant, onkruidbestrijding en oogst gemakkelijk kunnen keren en manoeuvreren. Een kopakker moet minimaal 10 meter breed zijn ([41]).

Bovendien is het aan te bevelen om lange rechte rijen (van minimaal 100 meter of meer) aan te leggen, zodat de machines weinig tijd verliezen met keren.

Een algemeen toegepaste 'standaard' voor de aanleg van wilgenplantages is het Zweedse systeem met dubbele plantrijen. Dit systeem heeft als voordeel dat een plant-, oogst-, of wiedzmachine in één werkgang twee rijen kan oogsten. Bij het Zweedse systeem is de afstand tussen twee rijen 75 centimeter en de afstand tussen de dubbele rijen 150 centimeter (zie Figuur 2).

De plantafstand tussen de stekken in de rij kan variëren van 50 tot 70 centimeter. Afhankelijk van de grondsoort en verwachte onkruiddruk kunnen in de rij nog nauwere of ruimere plantverbanden worden toegepast. Diverse onderzoeken ([12],[48]) laten zien dat nauwe plantverbanden niet automatisch een hogere biomassa-productie tot gevolg hebben. Kuiper ([48]) geeft wel aan dat bij 6.700 tot 10.000 stekken per hectare een ondergrens zit om nog een redelijke biomassa-productie te krijgen. Nauwere plantverbanden geven vaak wel een snelle kroonsluiting en daarmee een betere onderdrukking van het onkruid ([40]). Een algemeen toegepaste standaard is 15.000 stekken per hectare; de plantafstand in de rij is hierbij 60 centimeter.



Figuur 2: Schematische weergave van het Zweedse systeem van aanplant.

De aanplant vindt doorgaans plaats in de late winter of het vroege voorjaar (maart-april). Er zijn diverse gespecialiseerde plantmachines voor wilgenenergieplantages voorhanden, zoals de Deense Egedal Energy Planter, de Zweedse Stepplanter en de Engelse Turton Direct coppice planter. Al deze machines planten twee of vier rijen in één werkgang, waarbij de plantsnelheid varieert van 4 tot 16 ha per dag. Aangezien deze machines alleen op grotere afstand van Nederland beschikbaar zijn, waardoor de transportkosten relatief hoog zijn, heeft het alleen zin om deze machines in Nederland in te zetten voor de aanleg van grotere oppervlaktes (20 ha of meer). Voor de aanleg van kleinere oppervlaktes is het vooralsnog aantrekkelijker om te planten met reguliere land- of bosbouwmachines, zoals een koolplanter, een preiplanter of een bosploegplantmachine. De ervaring in Nederland en Vlaanderen leert dat hiermee ongeveer 1 tot 2 ha per dag kan worden aangeplant. Tot slot zijn er in Nederland griendhoutbedrijven actief die de aanplant kunnen verzorgen met plantmachines uit de griendcultuur. De kosten voor aanplant met deze machines zijn doorgaans iets hoger dan aanplant met een kool- of preiplantmachine ([41]).

Wilgen zijn kort na de aanplant in de jonge groeifase zeer gevoelig voor boven- en ondergrondse licht- en waterconcurrentie van onkruiden. In het eerste jaar na aanplant is

het daarom noodzakelijk onkruidbestrijding uit te voeren, zodat de jonge aanplant een goede start krijgt. Onkruidbestrijding kan zowel chemisch als mechanisch worden uitgevoerd. Chemische onkruidbestrijding met bijvoorbeeld Roundup kan alleen voorafgaand of direct na de aanplant vlaktegwijs worden uitgevoerd wanneer de wilgenschuiten nog niet zijn uitgelopen. Mechanische onkruidbestrijding kan worden uitgevoerd met een schoffelmachine, rijenfrees of vingerwieders. Afhankelijk van de onkruiddruk zal in het groeiseizoen na aanplant twee tot zelfs vier maal onkruidbestrijding nodig zijn ([13], [29], [46], [47]).

De wilgen worden elke twee tot drie jaar geoogst tijdens het winterseizoen (november tot april). Er zijn in Europa diverse typen gespecialiseerde oogstmachines voorhanden. Sommige machines oogsten hele scheuten, zoals de Deense Stemster of de machines uit de griendcultuur. Oogst met deze machines is minder efficiënt, aangezien er na de oogst nog een aparte handeling moet plaatsvinden om de scheuten te verchippen, zodat de biomassa geschikt is om te verstoken in houtgestookte installaties. De meeste oogstmachines die worden ingezet in wilgenplantages oogsten en chippen de wilgenschuiten daarom in één werkgang. Een voorbeeld van dit type oogstmachine is de Deense Energy Harvester. Daarnaast zijn er ook speciale oogstkoppen voor maïshakselaars beschikbaar die geschikt zijn voor het oogsten van wilg, zoals de Claas HS2 en de New Holland Coppice Header 130 FB. De meeste oogstmachines zijn relatief zwaar. Het totaalgewicht van een maïshakselaar met de New Holland Coppice Header 130 FB ligt rond de 13-14 ton. De Deense Energy Harvester weegt inclusief trekker circa 10 ton. Dit betekent dat de ondergrond voor de oogst relatief droog moet zijn om insporing te voorkomen ([41]).

Met de oogst van wilg worden uiteraard ook nutriënten afgevoerd. Mede op basis van ervaringen in het buitenland lijkt bemesting gedurende de eerste paar oogstcycli echter niet nodig ([18], [79]). Ook de wilgenplantages in een project in Flevoland hebben de eerste twee tot drie oogstcycli nog geen teruggang in de biomassa-productie laten zien ([12]).

Over het algemeen wordt ervan uitgegaan dat wilgenplantages gemiddeld na twintig jaar aan vervanging toe zijn, omdat de productiviteit dan sterk afneemt en de wilgenstoven hun vitaliteit verliezen en dus niet (goed) meer uitlopen. Het ruimen van een wilgenplantage kan geschieden door na de laatste oogst de stobben en wortels te klepelen en te frezen ([13]).

2.3.3 Productie

De gemiddelde productie van commerciële wilgenplantages in Zweden is ongeveer 5 tot 6 ton droge stof (ds) per hectare per jaar, maar hangt sterk af van de eigenschappen van de plantage. In goed onderhouden plantages worden opbrengsten tot wel 20 ton ds/ha/j gemeld. De economische levensduur van de plantages is 20 tot 25 jaar ([26]). Irrigatie met

afvalwater verhoogt de productie met 4 tot 8 ton dw/ha/j of 30-100% ([15], [32]) ten opzichte van niet-geïrrigeerde systemen. In Tabel 2 is een overzicht te zien van de productie in verschillende systemen in verschillende landen.

Tabel 2: Productie in verschillende systemen in verschillende landen.

Studie	Land	Productie ton ds/ha/j
Adegbidi et al (2001; [3])	VS	Tot 19
Amofah et al (2012; [5])	Zweden	11
Abrahamson et al (2012; [2])	VS	13-14
Aasamaa et al (2010; [1])	Estland	Tot 10
Boosten & Jansen (2010; [12]) ¹	Nederland	10
	Verenigd	
Aylott <i>et al.</i> (2008; [8])	Koninkrijk	Tot 13
Börjesson & Berndes (2006; [15])	Zweden	16-18
EU (2003; [32]) Orchies	Frankrijk	12
EU (2003; [32]) Larissa	Griekenland	18
EU (2003; [32]) Roma	Zweden	9
EU (2003; [32]) Culmore	Noord-Ierland	12

¹ Niet met afvalwater bevoeide plantage.

De productie is mede afhankelijk van de hoeveelheid toegevoerde nutriënten, waarbij dit effect hoger is bij nutriëntenarme grond dan bij nutriëntenrijke grond ([58]).

2.3.4 Natuurwaarde

Een veelvoorkomend misverstand over wilgenplantages is dat dit monocultures zijn en ze in het landschap een “ecologische woestijn” vormen. Onderzoeken in onder meer Zweden, Nederland, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk tonen echter aan dat wilgenplantages een hoge biodiversiteit hebben ([2],[7],[12],[17],[22],[70]). Wilgen bieden bijvoorbeeld foerageer- en nestgelegenheid voor verschillende vogelsoorten. In een onderzoek in de VS werden 79 soorten vogels gezien in wilgenplantages, waarvan 39 regelmatig. De vogeldiversiteit is hoger dan in agrarisch gebied en vergelijkbaar met natuurlijke habitats zoals struikgewas, braakliggend terrein en opkomend bos.

In de periode 2006-2008 hebben soortexperts de biodiversiteit van de wilgenplantages in Flevoland onderzocht ([12]). De wilgenplantages bleken een verrassend hoge biodiversiteit te herbergen. De percelen vertoonden vooral een rijke diversiteit aan broedvogelsoorten (tussen de 18 en 22 soorten). Ook het aantal paddenstoelsoorten (tussen de 62 en 96) was aanzienlijk. Tot slot vond men relatief veel bladmossoorten (12). Alhoewel er meer dan 100 soorten vaatplanten werden aangetroffen, was dit aantal niet bijzonder hoog in vergelijking met het landelijk gemiddelde. Ook de 11 gevonden dagvlindersoorten werden als relatief gering ervaren. De aangetroffen soorten zijn vooral

soorten die normaal in struwelen, jong bos, ruigtes en andere (meer dynamische) milieus voorkomen.

Uit het bovenstaand blijkt dat wilgenplantages de (lokale) biodiversiteit kunnen verhogen.

2.3.5 Milieuaspecten

Vroege levenscyclusanalyses lieten zien dat wilgenplantages een lage broeikasgasemissie hebben van 3,7 ton CO₂-equivalenten over de hele levenscyclus. Deze eerste studies waren gebaseerd op beperkte gegevens, zonder de biomassa onder de grond mee te nemen. Een recente studie laat zien dat de ondergrondse biomassa de eerste paar jaren sterk toeneemt. Per saldo betekent dit dat wilgenplantages meer CO₂ vastleggen dan dat zij in CO₂-equivalenten uitstoten ([2]).

De netto energieratio voor een wilgenplantage is 1:55 over zeven driejarige rotaties (eens per drie jaar oogsten). Dat betekent dat voor elke energie-eenheid fossiele energie die gebruikt wordt voor de productie, 55 eenheden energie in biomassa geproduceerd worden. Als er geen kunstmest wordt gebruikt, maar organische bemesting of afvalwater, stijgt deze ratio naar 1:73 tot 1:80.

Wanneer de biomassa 100 km wordt getransporteerd en omgezet wordt in elektriciteit met een efficiëntie van 30%, wordt de energieratio 1:11 tot 1:13 ([2]). In essentie zijn wilgenplantages grote zonnecollectoren die zonne-energie opvangen en vastleggen in houtige biomassa.

2.4 Ontwerpgrondslagen

2.4.1 Hydraulische belasting

Verreweg de meeste systemen in Zweden, Denemarken en de VS zijn systemen zonder lozing. De hoeveelheid irrigatiewater is gelijk aan de hoeveelheid verdamping en wegzijging minus de hoeveelheid neerslag. Deze hoeveelheden variëren uiteraard sterk van plaats tot plaats. In Zweden is de hydraulische belasting meestal tussen 2 en 3 mm/dag (600 mm/j) ([24]), in een systeem in Wallonië 700 mm in de periode van 15 maart tot 28 september (3,6 mm/dag gedurende de groeiperiode) ([42]) en in Ierland van 6-11 mm/dag ([22]). Dit zijn allemaal systemen zonder lozing. De hydraulische belasting is hiermee vergelijkbaar met zeer laag belaste helofytenfilters ([11]).

In de meeste gevallen is de watertoevoer gelijk aan de netto verdamping. Een watertoevoer drie keer zo hoog als de verdamping verhoogt de opbrengst iets, maar vermindert de recycling van nutriënten. Het is economischer om de watertoevoer niet veel hoger te laten zijn dan de verdamping ([32]). In Zweden is een gemiddelde van 4 tot

7 mm/d berekend en in Denemarken wordt een verdamping van 8,2 mm/d gemeld ([57]). In Italië is een verdamping door wilgen gemeten van 9,8 mm/d ([36]).

Sommige studies hebben laten zien dat berekeningen volgens de Penman-systematiek voor gewasverdamping een onderschatting laat zien voor wilgen. De gemeten verdamping was 0,7-1,0 van de Penman-berekening in het begin van het groeiseizoen, 1,2-1,6 in het midden en 2,0 aan het eind van het groeiseizoen. Dit is gecorreleerd met de hoeveelheid blad. In Ierland is een verdamping in het groeiseizoen gemeten van 2,5 tot 4 keer de berekende verdamping volgens Penman ([22]).

Uitgaande van deze gegevens is het mogelijk om een schatting te maken van de verdamping van wilgen in Nederland. De gemiddelde verdamping in De Bilt in de jaren 2003-2012, berekend volgens de Makkink-formule in het groeiseizoen (april t/m september), is 483 mm. Ervan uitgaande dat de Makkink-formule een 20% lagere verdamping berekent dan Penman ([38]), is de Penman-verdamping 603 mm in het groeiseizoen. Uitgaande van de verdamping door wilgen zoals in de vorige paragraaf beschreven, betekent dit dat wilgen in Nederland gemiddeld in het groeiseizoen 780 tot 2.400 mm water verdampen (gemiddeld 4,3 tot 13,2 mm/d). De Deense meting ligt in het midden van dit interval.

De gemiddelde neerslag in het groeiseizoen over 2003-2012 is 447 mm (2,4 mm/d). Dit betekent dat er in het groeiseizoen een netto verdamping door de wilgen is van gemiddeld 1,8 tot 10,7 mm/d. Dit is een ruim interval en deze schatting zou dan ook moeten worden geverifieerd met meetgegevens in Nederland.

1,8 mm/d betekent een debiet van 3.320 m³/ha/j en 10,7 mm/d een debiet van 19.500 m³/ha/j. Een rwzi van 10.000 inwonerequivalenten² (i.e.) zou dan een wilgenplantage nodig hebben van 44 tot 260 ha. Volgens de berekeningen in [27], uitgaande van 24,3 miljoen i.e. die gezuiverd worden bij alle rwzi's in Nederland ([21]), zou bij een rwzi van 10.000 i.e. 20,6 ha wilgenplantage nodig zijn (20,6 m²/i.e.). In de meeste gevallen, waarbij de rwzi in een stedelijke omgeving ligt, zal deze ruimte niet voorhanden zijn, maar in landelijk gebied wellicht wel. Systemen zonder lozing zouden daarmee verder praktisch geschikt zijn voor kleine lozing met een relatief hoge nutriëntenconcentratie. Daarmee zou behandeling van grote afvalwaterstromen alleen kunnen gebeuren in systemen met een lozing.

² Een inwonerequivalent (i.e.) is een maat voor de vracht aan vervuiling. Het is de gemiddelde hoeveelheid vervuiling in het afvalwater die een persoon in huis veroorzaakt, en is gebaseerd op de gemiddelde vervuiling door zuurstofbindende stoffen die een persoon per etmaal produceert. De definitie van een i.e. is wettelijk vastgesteld in artikel 1.1 van de Wet Milieubeheer, en is gelijk aan een biochemisch zuurstofverbruik van 54 gram per etmaal.

2.4.2 Nutriëntenbehoefte en -verwijdering

Nutriëntenbehoefte

De nutriëntenbehoefte hangt nauw samen met de maximale groeisnelheid, en de daadwerkelijke groeisnelheid is afhankelijk van de nutriëntentoevoer ([48], [59]). Een hoge nutriëntentoevoer is daarom goed voor het bewerkstelligen van een zo hoog mogelijke productie. De keerzijde is dat niet alle nutriënten benut worden bij een hoge toevoer, waardoor het zuiveringsrendement afneemt (zie tekst onder *Nutriëntenopname en -verwijdering*). Bij systemen zonder lozingen betekent een permanent hogere belasting dan de bomen kunnen opnemen dat het systeem zich oplaadt met nutriënten (vooral fosfaat; stikstof kan verdwijnen door denitrificatie). Bij systemen met een lozing betekent dit een wellicht hogere concentraties in het effluent dan gewenst. De nutriëntentoevoer moet daarom goed worden afgestemd op de opname door de bomen. Het ligt voor de hand te kiezen voor een soort en variëteit (kloon) met een zo hoog mogelijke productie bij de heersende omstandigheden ter plekke. De water- en nutriëntentoevoer wordt vervolgens afgestemd op deze productie.

Nutriëntenopname en -verwijdering

In de literatuur worden grote verschillen gevonden in opname en verwijdering van nutriënten. Voor een groot deel is dit afhankelijk van de locatie en klimatologische omstandigheden. In regio's met een hoge verdamping en hogere temperaturen worden meer nutriënten opgenomen dan in regio's met weinig verdamping en lagere temperaturen. In warmere klimaatregio's is er ook meer denitrificatie door bacteriën in de bodem.

De volgende getallen worden genoemd van verwijdering in wilgenplantages en opname van nutriënten door wilgen:

- Verwijdering: 200 kg N/ha/j en 5 kg P/ha/j. ([24], [25], [33]).
- Verwijdering: 75-86 kg N/ha/j, 10-11 kg P/ha/j, 27-32 kg K/ha/j, 52-79 kg Ca/ha/j en 4-5 kg Mg/ha/j in een systeem in Nystate ([3]).
- Opname door wilgen: 100 kg N/ha/j en 13 kg P/ha/j
Verwijdering: 630 kg N/ha/j en 50 kg P/ha/j met bodempassage ([5]).
- Opname door wilgen: 50 kg N/ha/j ([25]).
- Opname door wilgen: 18-73 kg N/ha/j, 3-9 kg P/ha/j en 6-27 kg K/ha/j ([32]).
- Optimale belasting: 70-120 kg N/ha/j ([28]).

De opname van stikstof door wilgen ligt tussen 18 en 100 kg N/ha/j en van fosfaat tussen 3 en 13 kg P/ha/j. De totale verwijdering is afhankelijk van de bodemsamenstelling (vastlegging fosfaten door metaalionen) en de activiteit van bacteriën (nitrificatie-denitrificatie). De verwijdering van nutriënten ligt daarom hoger dan de opname door wilgen, en ligt tussen 75 en 630 kg /ha/j en 5 en 50 kg P/ha/j.

Nutriënten die de wilgen opnemen, komen gedeeltelijk in nieuwe wortelbiomassa, gedeeltelijk in nieuwe takbiomassa en gedeeltelijk in bladbiomassa terecht. Nutriënten in de bladeren komen gedeeltelijk weer in het systeem terecht wanneer de bladeren in het najaar van de bomen vallen. Bij een gesloten systeem zonder lozing blijven de nutriënten in het systeem. In een systeem met een lozing komen er bij de mineralisatie van de gevallen bladeren weer nutriënten in het water terecht. Overigens verlagen de bomen de nutriëntengehalten in de bladeren sterk voordat zij de bladeren laten vallen. De plant onttrekt 40 tot 67% van de nutriënten in de bladeren voordat de bladeren vallen ([16]).

In Tabel 3 is een overzicht te zien van nutriëntentoevoer en verwijderingsrendementen van verschillende systemen. In systemen zonder lozing is de verwijdering berekend als de afvoer met geogoste biomassa. Verwijdering door vastlegging in de bodem en door bacteriële activiteiten is hierbij dus niet inbegrepen. Bij de systemen met een lozing is de verwijdering het verschil tussen de inkomende en de uitgaande vracht aan nutriënten.

Tabel 3: Overzicht van toevoer van nutriënten en verwijderingsrendementen.

Bron en land	Type	Belasting							Verwijdering							
		Hydr. bel. mm/d	Totaal-N kg/ha.d	NH4-N kg/ha.d	Totaal-P kg/ha.d	K kg/ha.d	BZV kg/ha.d	CZV kg/ha.d	ZS kg/ha.d	Totaal-N %	NH4-N %	Totaal-P %	K %	BZV %	CZV %	ZS %
Amofah et al (2012), Zw	VD	23	8,0	6	1,20		23	47		43	32	23		87	80	94
Sugiura et al (2008), GB	GL	7,8	1,5		0,15	1,10				46		30	28			
EU (2003), Orchies Fr.	GL	1,4	0,7		0,20	1,72	30									
EU (2003), Larissa Gr.	GL	4,6	2,3		0,40	0,82	6,7									
EU (2003), Roma Zw.	GL	1,6	0,1		0,02	0,15	0,2									
EU (2003), Culmore GB.	GL	0,4	0,1		0,06	0,05	0,5			62		94		71		
Wu et al (2011), N. China	VD	120		3,7	0,60		36		15	90		87,6*		96		97
Dimitriou (2011), Zw.		2,2	1,2		0,02											
Kuusemets (2001), Est.	VD	28	19,0		2,50		28			32		14		75		

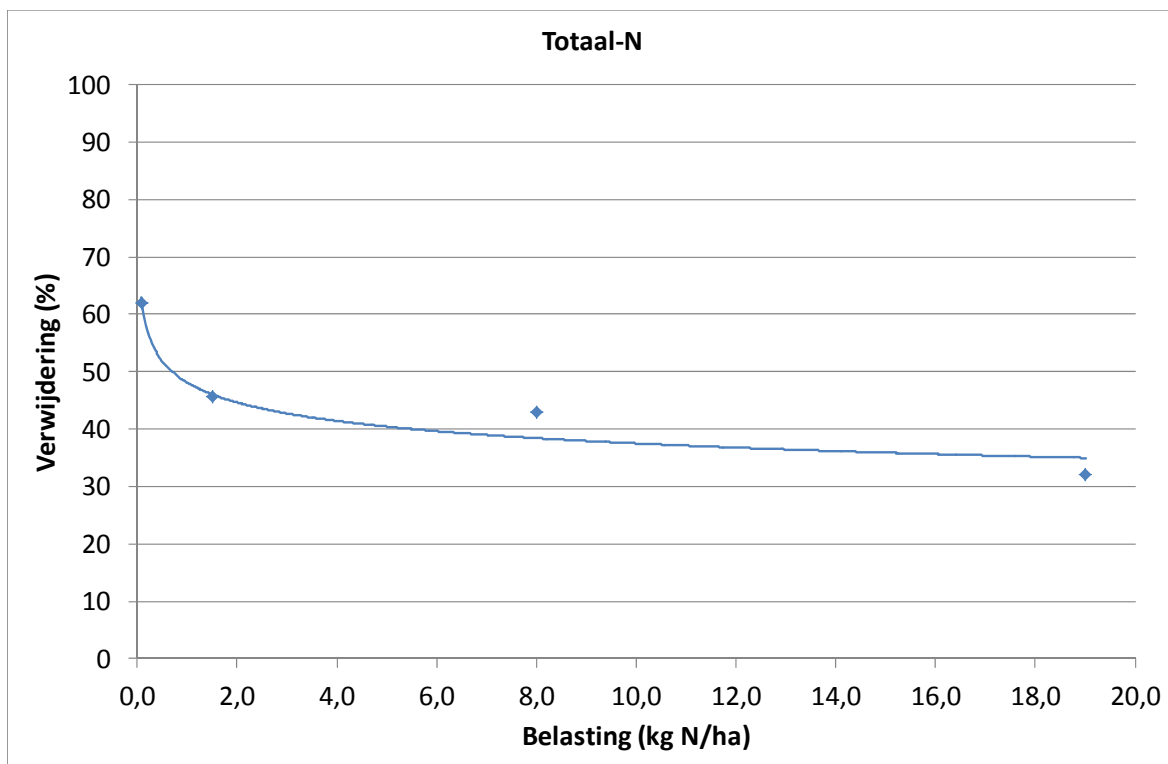
Type
 VD: vertikaal doorstroomd
 GL: geen lozing

Zw: Zweden
 GB: Groot-Brittannië
 Fr: Frankrijk

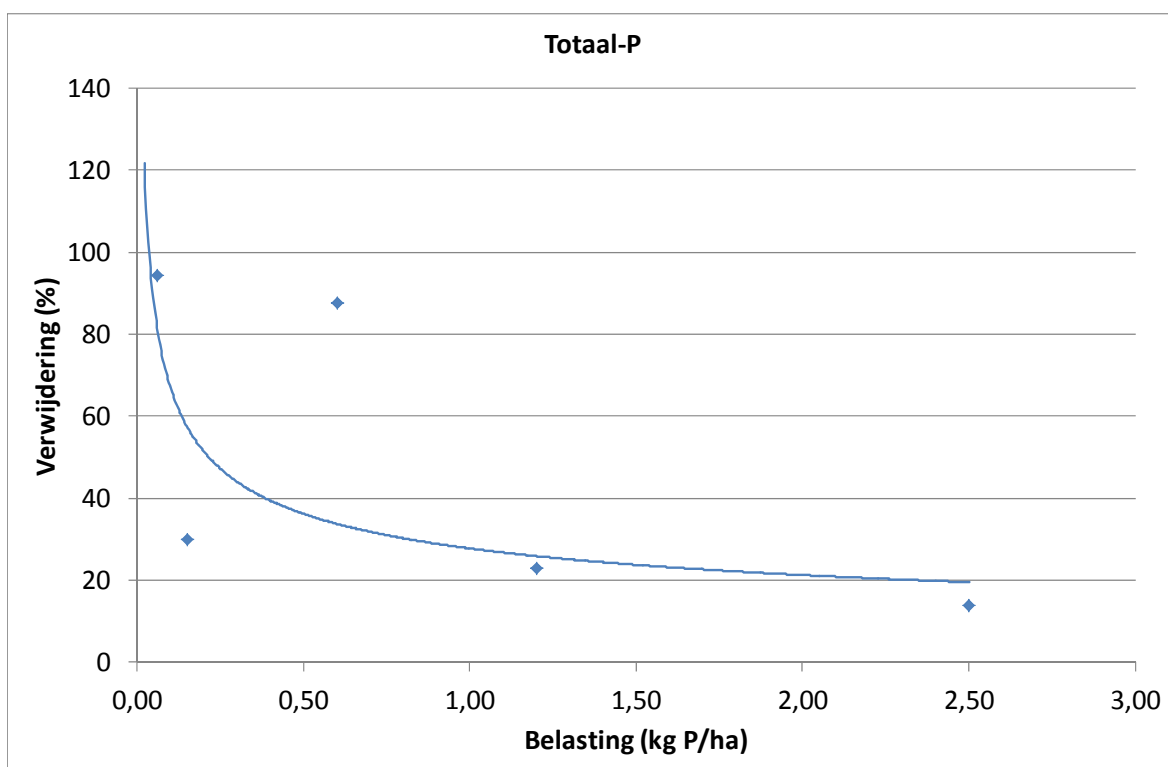
Gr: Griekenland
 Est: Estland

* na P vastlegging met aluminium

De belasting van de systemen met nutriënten is gerelateerd aan het verwijderingsrendement (zie Figuur 3 en Figuur 4, data afkomstig uit Tabel 3). De grafieken laten zien dat het verwijderingsrendement hoger is bij een lagere belasting. Dit verschijnsel is ook waargenomen bij zuiveringsmoerassen ([11], [70]) en in uitgebreide studies aan wilgenzuiveringsystemen ([48], [59]).



Figuur 3: Relatie tussen belasting en verwijderingsrendement van totaal-N.



Figuur 4: Relatie tussen belasting en verwijderingsrendement van totaal-P.

2.5 Praktische uitvoering

In de literatuur is niet veel informatie te vinden over de praktische uitvoering van wilgenplantages voor waterzuivering. Wilgenzuiveringen zonder lozing vinden op grote schaal plaats in Zweden, verticaal doorstroomde wilgenzuiveringen worden alleen kleinschalig (op woningniveau) toegepast. Grootschalige verticaal doorstroomde wilgenzuiveringssystemen zijn in de literatuur niet bekend.

2.5.1 Systemen zonder lozing

Grootschalige wilgenzuiveringssystemen zonder lozing bestaan uit een wilgenplantage die in het groeiseizoen wordt geïrrigeerd met het te zuiveren water (o.a. [5], [24], [32]). De irrigatie gebeurt door druppelirrigatie of sprinklerirrigatie. Hierbij is het zaak om de afstand tussen de irrigatiebuizen/punten niet te groot te maken. Bij een onderzoek werd een duidelijk verschil in groeisnelheid gemeten tussen bomen die binnen 5 meter van een irrigatiebuis stonden en bomen die verder weg groeiden. Het water moet voldoende bij alle bomen kunnen komen om een optimale groei van alle bomen te garanderen ([6]). Bij het Zweedse systeem met dubbele rijen is een doseerpijp tussen de twee dicht bij elkaar gelegen rijen het meest praktisch. Zij worden dan niet beschadigd door oogstmachines, omdat deze tussen de dubbele rijen rijden. De hoeveelheid te behandelen water wordt afgestemd op de verdamping, de infiltratiesnelheid en de hoeveelheid neerslag, zodanig dat er geen lozing op oppervlaktewater plaats hoeft te vinden. Irrigatie gebeurt alleen in de zomermaanden. Er staat in deze systemen in het groeiseizoen geen waterlaag op de aarde. Hoe diep het grondwater onder het maaiveld staat, wordt niet vermeld, maar aangenomen mag worden dat deze zo diep staat dat de wilgen er geen schadelijke effecten van ondervinden.

Systemen zonder lozing kunnen in de winter onder water gezet worden. Over hoe lang zij onder water kunnen blijven staan zonder schadelijke effecten en over wat de maximale waterdiepte kan zijn, is in de literatuur niets te vinden. In de uiterwaarden staan wilgen soms langdurig onder water, dus onder water zetten zal de bomen niet doen afsterven. Wellicht zijn er negatieve effecten op de groei, maar dat is niet bekend. Voor de oogst in de winter zullen de systemen tijdelijk droog moeten worden gelegd, zodat de bodem voldoende begaanbaar is voor de oogstmachines.

2.5.2 Systemen met lozing

Systemen met een lozing zijn altijd kleinschalige, verticaal doorstroomde systemen. In principe zijn deze systemen op te schalen, maar dan moeten nog wel wat praktische problemen opgelost worden. Denk hierbij aan aspecten als:

- Bladafval. Voorkomen moet worden dat afvallende en vervolgens mineraliserende bladeren een piekbelasting van stikstof en fosfaat geven in het water. Wellicht is het mogelijk om het systeem direct na de bladval door te spoelen met water, waarbij de meestromende bladeren worden afgevangen. Het is ook mogelijk dat de belasting

met stikstof en fosfaat uit de bladeren meevalt, omdat de stikstof via nitrificatie-denitrificatie wordt verwijderd en fosfaat wordt vastgelegd in de bodem. Bij verticaal doorstroomde systemen wordt vaak een ijzerlaag in de bodem aangebracht om fosfaat af te vangen.

Een andere optie is om de scheuten te oogsten vlak voor bladval. Onbekend is wat daarvan de effecten zijn op de groei, vitaliteit en levensduur van de bomen. Wanneer de scheuten worden geoogst met het blad eraan, levert dit overigens een lagere kwaliteit biomassa op. Veel eigenaren van houtverbrandingsinstallaties accepteren geen biomassa (houtchips) waar veel blad in zit.

- Beschadiging drainagebuizen. Wanneer zware oogstmachines over de plantage rijden, zouden zij in de bodem liggende drainagebuizen kunnen beschadigen of zelfs breken. Dit is te ondervangen door de drainagebuizen onder de dubbele rijen met wilgen te leggen.

2.6 Ophoping

Niet-afbreekbare stoffen zouden zich in een systeem zonder lozingen kunnen ophopen. In rwzi-effluent gaat het dan om metalen. Wilgen zijn echter goed in staat om metalen op te nemen en vertonen geen verminderde groei bij hoge concentraties ([20], [51], [68]). De metalen worden teruggevonden in de wortelbiomassa, in het hout, de scheuten en de bladeren, waarbij de concentratie van metalen in de biomassa toeneemt met de concentratie van de metalen in het water ([51], [68]). De verdeling van de metalen over de verschillende onderdelen van de planten varieert zowel per wilgensoort als per metaal. De concentratie van metalen is vrijwel altijd het hoogst in de wortels, maar omdat de totale biomassa van hout veel groter is dan die van de wortels, is bij sommige soorten en metalen de totale hoeveelheid metalen het hoogst in het hout ([51], [84]). Bij het oogsten van het hout wordt daarom een groot deel van de metalen afgevoerd.

Omdat de opname van metalen toeneemt met de concentratie en omdat een aanzienlijk deel van de metalen wordt afgevoerd met het geoogste hout, ligt het voor de hand te veronderstellen dat na verloop van tijd een evenwichtsconcentratie van metalen wordt bereikt en dat geen verdere ophoping plaatsvindt. Er is echter geen onderzoek bekend waarbij langdurig de metalenconcentraties in de bodem zijn onderzocht bij voortdurende belasting.

2.7 Overige aspecten

De bacteriepopulatie in de bodem verandert wanneer wilgenplantages worden aangelegd. De biomassa, stikstofmineralisatie en respiratie nemen toe. Wanneer geïrrigeerd wordt met effluent is dat effect groter, vooral in de bovenste 10 cm van de

bodem ([77]). De groei blijkt twee keer zo hoog te zijn in geïrrigeerde velden dan in niet-geïrrigeerde velden.

Wilgen brengen overdag zuurstof in de bodem, en waarschijnlijk veel meer dan dat zij gedurende de nacht weer verbruiken. Het zuurstoftransport is gemiddeld 195,7 g O₂/m³.h.kg nat wortelgewicht. De hoeveelheid zuurstoftransport is sterk gecorreleerd met zowel het bladoppervlak als het nat wortelgewicht ([59]). Zuurstoftoevoer in de bodem zorgt voor een betere vastlegging van fosfaat in de bodem en voor meer nitrificatie.

Opname van nutriënten, en daarmee de groei van wilgen, kan vergroot worden door actief mycorrhiza-schimmels (*Glomus intraradices* is getest) te enten, die een symbiose vormen met de bomen ([34]). De effectiviteit is variëteitafhankelijk. Door de symbiose werd een verhoging gemeten van 33% van de biomassa-toename van de stammen.

2.7.1 Aandachtspunten bij waterzuivering door wilgen

Factoren die de opbrengst van wilgen verminderen, zijn vorstschade, watertekort, nutriëntentekort en overmatige groei van onkruid ([32]). Omdat watertekort niet en nutriëntentekort nauwelijks aan de orde zijn bij irrigatie met afvalwater, is de opbrengst soms fors hoger dan bij niet met afvalwater geïrrigeerde systemen. Nutriëntentekorten kunnen optreden als de verhoudingen tussen nutriënten in het afvalwater niet overeenkomen met de verhoudingen die de plant nodig heeft.

Over het algemeen zijn er geen negatieve effecten (plagen, ziekten) door irrigatie met afvalwater. Alleen een plantage met bevloeiing met verdunde urine had meer last van insecten en roest, waarschijnlijk vanwege de hogere voedingswaarde van de bladeren ([32]). Als roest voorkomt, heeft – ongeacht de weerscondities en wilgensoort, – irrigatie met afvalwater een toename van de ernst van roest tot gevolg ([76]). Onderzocht was niet of dit kwam door een hogere luchtvochtigheid door het bevloeien. Het kan ook zijn dat de hogere groei (en dus een hogere bladdichtheid, en daarmee een hogere luchtvochtigheid) de oorzaak is. Eerdere studies tonen echter aan dat een hoger stikstofgehalte van de bladeren, een hogere roestdichtheid tot gevolg heeft. Het is dus onzeker of de hogere roestdichtheid een gevolg is van toevoeren van water of van nutriënten, of een combinatie van beide.

2.8 Kosten en baten

In de literatuur wordt gemeld dat wilgenplantages de potentie hebben om de plattelandseconomie te versterken door het diverser maken van de teeltgewassen, het creëren van alternatieve inkomstenbronnen en het in roulatie houden van geld in de lokale economie. Economische studies in de VS hebben laten zien dat er 75 directe en indirecte banen worden gecreëerd en \$520.000 per jaar in inkomsten en belastinginkomsten voor elke 4.000 ha wilgenplantages voor bio-energie ([2]).

De opbrengst van diverse rassen is in de praktijk gemeten, maar er is nog veel ruimte voor opbrengstverhoging door teeltprogramma's [2]. Het is dus te verwachten dat de opbrengst in de toekomst toe zal nemen.

In de volgende paragrafen wordt een berekening gegeven van de kosten en baten van een wilgenzuivering. De gemiddelde biomassaopbrengst van niet met afvalwater geïrrigeerde wilgenplantages ligt in Nederland gemiddeld op circa 10 dw/ha/j ([12]). Hierbij kunnen uitschieters naar beneden (5 tot 6 ton) en naar boven (13 tot zelfs 18 ton) optreden. Het is bekend dat irrigatie met afvalwater de productie kan verhogen met 4 tot 8 ton dw/ha/j of 30-100% ten opzichte van niet-geïrrigeerde systemen ([15], [32]). In de onderstaande berekeningen is daarom uitgegaan van verhoogde productie van gemiddeld 15 ton.

De kosten en opbrengsten van wilgenplantages zijn in kaart gebracht door Boosten & Oldenburger ([12][13]) en recent geactualiseerd door Jansen & Boosten ([41]) en Remijnse ([66]). Alle in deze rapportage vermelde kosten zijn exclusief BTW. De aanleg van 1 ha wilgenplantage kost circa €4.000,-. Dit zijn de kosten voor terreinvoorbereiding (ploegen, frezen, eggen), planten (aankoop stekken, plantwerk) en de kosten voor onderhoud (inboet en onkruidbestrijding) gedurende de eerste twee jaar na aanleg. De kosten voor de aanleg van een plantage worden lager naarmate een groter oppervlak wordt aangeplant, omdat het stekmateriaal goedkoper wordt bij grotere bestellingen en de inzet van machines en menskracht efficiënter kan plaatsvinden. Bij een oppervlakte van 20 ha liggen de aanlegkosten op circa €2.800,- per ha ([41]). Voor wilgenplantages wordt een tweejarige oogstcyclus aangehouden. De oogstkosten variëren sterk per type oogstmachine. Op basis van de literatuur ([13], [41],[66],[81]) zullen de oogstkosten gemiddeld €750,- per cyclus bedragen. De oogstkosten zullen lager worden naarmate de te oogsten oppervlakte groter wordt. Vanaf een oppervlakte van 20 ha zullen de oogstkosten naar schatting €500,- per ha per cyclus bedragen.

Ruiming van de plantage aan het eind van de levenscyclus kost € 1.000,-/ha ([13]).

Zoals hierboven vermeld, zal de jaarlijkse opbrengst van een wilgenplantage in combinatie met waterzuivering naar verwachting rond de 15 ton droge stof per hectare liggen. Dit komt overeen met 30 ton verse biomassa (vochtgehalte 50%) en 21 ton luchtdroge biomassa (vochtgehalte 35%) per hectare per jaar. De biomassaprijzen verschillen afhankelijk van de afnemer en het vochtgehalte. Er kan worden geleverd aan de handel. De handel betaalt voor verse chips (met 50% vochtgehalte) €10,- tot €25,- per ton, vers afgehaald bij de plantage. Er kan ook rechtstreeks worden geleverd aan een biomassacentrale (houtgestookte verwarmingsinstallatie). Hiervoor moet circa €10,- per ton transportkosten worden gerekend om de chips af te leveren bij de centrale. Aan de poort van de centrale worden prijzen betaald van €20,- tot €35,- per ton voor verse chips en €30,- tot €60,- voor luchtdroge chips (met 35% vochtgehalte) ([14],[41]). Om luchtdroge

chips te krijgen, moeten de chips eerst enkele maanden tot een jaar worden opgeslagen om ze aan de lucht te laten drogen. Dit kan bij de plantage in een overdekte opslagplaats of door de hoop met chips af te dekken met een ademend doek.

Bij een rente van 5% en een levensduur van 20 jaar zijn de kapitaallasten €538,-/ha/j. Deze kapitaallasten zijn gebaseerd op de aanname dat de kosten voor aanleg van de plantage geleend worden. De jaarlijkse kosten van onderhoud en beheer zijn €70,-/ha.

Bij gebruik van de wilgenplantage voor waterzuivering komen er extra kosten bij voor pompen en doseerbuizen en eventueel drainagebuizen. Deze kosten worden geschat op €15.000,-/ha.

Bij kapitaallasten van €538,-/ha/j, beheer- en onderhoudskosten van €70,-/ha/j en een opbrengst voor luchtdroge chips van €630,- tot €1.260,-/ha/j komt het totaal uit tussen -€450,- en €180,-. In Tabel 4 zijn de kosten en baten samengevat. Voor de gedetailleerde berekeningen, zie Bijlage 1.

Tabel 4: Kosten en baten van 20 ha wilgenplantage.

Wat	20 ha
Aanleg plantage en onderhoud eerste twee jaar	€ 356.000,-
Ruiming plantage aan eind levenscyclus	€ 20.000,-
Onderhoud, beheer, oogstkosten en vervoer	€ 10.600,-/j
Kapitaallasten	€ 11.000,-/j
Opbrengsten	€ 12.600,- - 25.200,-/j
TOTAAL BATEN PER JAAR	€ -9.000,- 3.600/j

Om de behandelingskosten met een wilgenzuivering te berekenen, gaan we uit van de volgende gegevens:

- Rwzi-grootte van 10.000 i.e. (620.000 m³/j;[73]);
- Systeem zonder lozing met een netto verdamping in het groeiseizoen van 8 mm/d;
- Bufferen van het effluent in het systeem in het winterseizoen;
- Benodigd oppervlak is dan 43 ha.

Uitgaande van deze gegevens en de in Tabel 4 gegeven kosten betekent dit dat zuivering met een wilgenplantage tussen €1,86 kost en €0,81/i.e. oplevert (-€ 0,030 - €0,013/m³) (zie Bijlage 1 voor de berekening). Grofweg kan worden gesteld dat behandeling van effluent van een rwzi met een wilgenplantage kostenneutraal kan gebeuren. Het kostenplaatje kan nog gunstiger worden wanneer in de toekomst de houtprijzen stijgen (zie paragraaf 2.9 Duurzame energie en houtige biomassa).

Wanneer een systeem zonder lozingen wordt gebruikt en het effluent van een rwzi voorheen werd geloosd op rijkswater, bespaart het waterschap de lozingsheffing uit, waardoor de balans nog positiever uitvalt.

De kosten zoals weergegeven in bovenstaande paragrafen zijn exclusief voorzieningen voor recreatie en educatie, zoals paden en bruggen voor recreatiedoeleinden, informatieborden, hekken en eventuele dijken rondom de plantage, zodat deze tevens dienst kan doen als waterbergingsgebied.

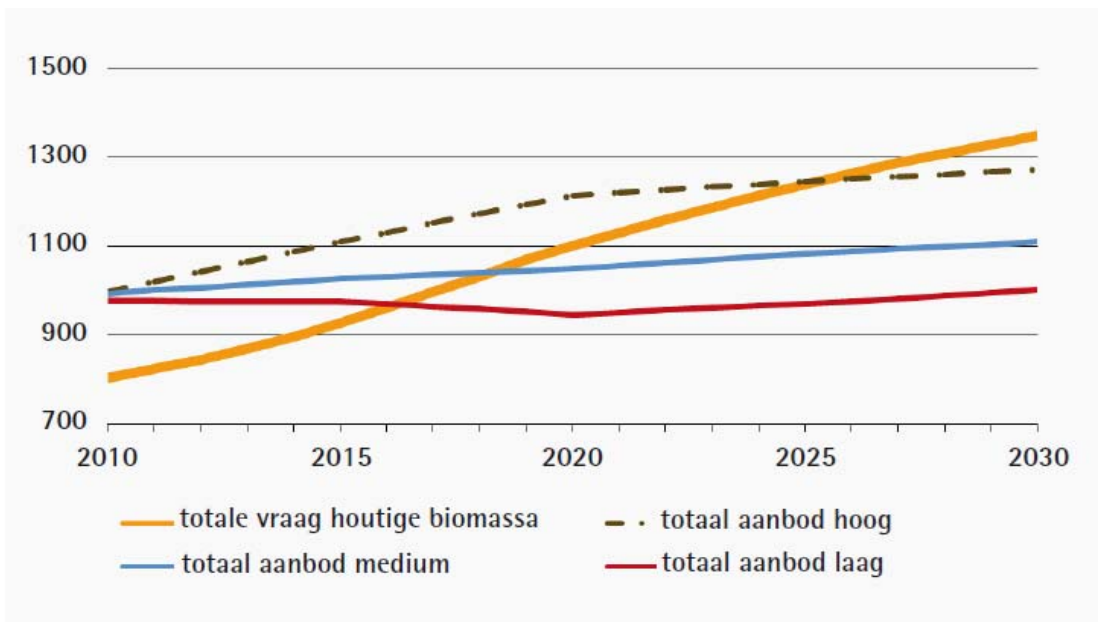
2.9 Duurzame energie en houtige biomassa

In 2012 was ongeveer 4,4% van het Nederlandse energieverbruik afkomstig uit hernieuwbare bronnen. 73% van de hernieuwbare energie wordt opgewekt met biomassa, waarvan een derde bestaat uit houtige biomassa ([19]). De Nederlandse overheid is recent met diverse maatschappelijke partijen overeengekomen om het aandeel hernieuwbare energie in 2020 te verhogen tot 14% en in 2023 tot 16% ([72]). Dit laatste percentage komt overeen met ca. 340 PJ aan energie. Van de duurzame energiedoelstellingen moet, conform het in 2008 tussen de NBLH-sector en het Rijk overeengekomen 'convenant Agrosectoren', 32 PJ worden gerealiseerd met de inzet van (houtige) biomassa uit bos, natuur, landschap en de houtketen ([4]). Dit betekent dat niet alleen nu, maar ook in de toekomst houtige biomassa een belangrijke rol blijft spelen in onze duurzame energievoorziening.

Als beleidsdoelstellingen voor de bijdrage die houtige biomassa moet leveren aan de toekomstige energievoorziening worden omgerekend naar houtvolume, dan blijkt er een enorme hoeveelheid houtige biomassa nodig te zijn, zowel internationaal als binnen Nederland. Internationale scenariostudies laten zien dat de vraag naar houtige biomassa de beschikbaarheid zal overtreffen tussen 2015 en 2020 ([54], [60]) (zie Figuur 5). Tot dusverre was het voor Nederlandse houtgestookte installaties (voor de opwekking van elektriciteit en/of warmte) relatief eenvoudig om voldoende houtige biomassa te contracteren. De hoeveelheid eenvoudig contracteerbare biomassa in Nederland is echter beperkt, enerzijds omdat niet alle biomassa even gemakkelijk (tegen een redelijke prijs) kan worden geogst en anderzijds omdat ook vanuit het buitenland wordt getrokken aan de Nederlandse biomassa. Een belangrijk deel van de houtige biomassa wordt nu al geëxporteerd en is daarmee niet meer beschikbaar voor de Nederlandse markt ([14]). De gestegen vraag naar biomassa heeft al prijsstijgingen tot gevolg gehad. De verwachting is dat bij een stijgende vraag naar houtige biomassa in binnen- en buitenland, de prijzen nog verder omhoog zullen gaan.

Om te zorgen dat er binnen Nederland ook op termijn voldoende (betaalbare) biomassa beschikbaar is, is het belangrijk om te kijken naar de mogelijkheden van biomassateelt in

bijvoorbeeld wilgenplantages. Zeker als de wilgenplantages ook andere doelen kunnen dienen, zoals waterzuivering.



Figuur 5: Ontwikkeling van de maximale vraag naar biomassa ten opzichte van het potentiële aanbod bij drie verschillende mobilisatiescenario's (in mil. m³ rondhout equivalenten) (Bron: [60]).

In het Energieakkoord van 6 september 2013 is afgesproken dat waterschappen in 2020 minstens 40% (4 PJ) van hun eigen energieverbruik duurzaam produceren. Dit is nu circa 25%. Ter ondersteuning van deze doelstelling zullen verkenningen en pilots worden uitgevoerd naar energieproductie op eigen terreinen ([72]). In dit kader lijken er ook kansen te liggen voor de aanleg van wilgenplantages waarin zowel water wordt gezuiverd als houtige biomassa wordt geproduceerd voor de opwekking van duurzame energie.

3. Wilgenzuivering vs. helofytenfilters en krooszuivering

3.1 Principes en werking

Onder helofytenfilters worden natuurlijke waterzuiveringssystemen verstaan waarbij planten een belangrijke rol spelen. Deze systemen kunnen natuurlijke moerassen, aangelegde moerassen of meer kunstmatige verticaal doorstroomde systemen zijn. Er worden drie typen helofytenfilters onderscheiden ([43]):

- Horizontaal doorstroomde systemen. Het water stroomt oppervlakkig door een systeem met soms meerdere poelen, bestaande uit ondiepe en diepere delen.
- Wortelzonesystemen. Het water stroomt horizontaal door de bodem. Deze bodem bestaat meestal uit een goed doorlatende laag waarop planten groeien.
- Verticaal doorstroomde systemen. Het water wordt aan het oppervlak in het systeem gelaten, infiltreert in de bodem en verlaat het systeem via drainagebuizen.

Bij wortelzonesystemen en verticaal doorstroomde systemen passeert het water de bodem. Hierdoor vindt filtering plaats en worden vaste deeltjes afgevangen. Bacteriën in de bodem zorgen voor nitrificatie en denitrificatie. IJzer-, aluminium- en calciumionen zorgen voor vastlegging van opgelost fosfaat in de bodem. Systemen met een bodempassage hebben een hoger zuiveringsrendement dan horizontaal doorstroomde systemen.

In alle drie systemen zorgen planten (ondergedoken, drijvend en boven het water uitstekend) voor opname van nutriënten, zuurstofvoorziening in de bodem en stimulering van het bodemleven.

Opname van nutriënten is in horizontaal doorstroomde helofytenfilters over het algemeen beperkt ([11], [43], [70]), maar systemen met een bodempassage kunnen, mits goed ontworpen, zowel een goede stikstofverwijdering (via nitrificatie-denitrificatie) als een goede fosforverwijdering (via vastlegging aan ijzer, calcium of aluminium) hebben ([10], [43], [70]).

Bij een aantal rwzi's in Nederland is een helofytenfilter aangelegd voor de nabehandeling van rwzi-effluent. Deze systemen zijn bedoeld om de nutriëntengehalten beperkt terug te brengen. Maar deze reductie is, zoals hierboven geschetst, vaak beperkt. Helofytenfilters worden dan ook meestal ingezet om van effluent oppervlaktewater te maken. In jargon heet dat *ecologiseren*. Het dode effluent wordt ontdaan van onnatuurlijke organismen uit de zuivering, en er wordt een natuurlijk zuurstofritme geïntroduceerd alsmede hogere organismen zoals watervlooien en macrofauna ([11], [70]).

Zuivering met kroos wordt nog niet grootschalig toegepast, maar wel kleinschalig in proefprojecten ([39], [63]). Het drijvende waterplantje kroos (*Lemna*- of *Azolla*-soorten) drijft op het water en neemt water en nutriënten direct via wortels in het water op. Opgeloste stikstof en fosfaat worden goed opgenomen door de planten, waardoor een effectieve zuivering optreedt. Het kroos wordt een tot twee keer per week geoogst, waarbij een deel achterblijft. Zo blijft de dichtheid van het kroos op de sloten optimaal voor een zo hoog mogelijke productie. Kroos is zeer eiwitrijk en deze eiwitten kunnen uit het kroos worden gewonnen. Deze eiwitten kunnen verwerkt worden tot veevoer of gebruikt als grondstof in de *biobased economy* voor bijvoorbeeld lijmen en coatings.

Een krooszuiveringssysteem bestaat uit een serie sloten waardoor het water stroomt. De verblijftijd van het water kan variëren, maar is meestal twee dagen. Om de productie in voor- en najaar te vergroten en het groeiseizoen te verlengen, vindt krooskweek plaats in (eenvoudige folie)kassen.

Wilgenzuiveringen kunnen worden vormgegeven als wortelzonesystemen, als verticaal doorstroomde systemen, maar ook als systemen zonder lozing. Horizontaal doorstroomde systemen vallen af, omdat wilgen in het groeiseizoen niet permanent onder water kunnen staan. Wilgenzuiveringen met een lozing hebben daardoor een beperkt effect op het ecologiseren van het water, tenzij er een horizontaal doorstroomd helofytenfilter of een of meer vijvers achter geschakeld worden.

Alle systemen werken het best in het zomerhalfjaar. Verticaal doorstroomde systemen en wortelzonesystemen zuiveren ook, maar in mindere mate, in de wintermaanden door de bodempassage. Kroosystemen kunnen geschikt gemaakt worden voor doorkweken in de zomer, mits de kweek in kassen plaatsvindt en er zowel bijbelicht als bijverwarmd wordt. Dit vraagt echter veel extra energie. Of de bijkomende kosten opwegen tegen de baten is nog niet onderzocht.

3.2 Benodigde oppervlakten

Het benodigde oppervlak van zowel helofytenfilters als kroos- en wilgenzuiveringen is sterk afhankelijk van de hoeveelheid te behandelen water, van de concentraties nutriënten in dat water, van de gewenste reducties in nutriëntenconcentraties en van de vormgeving van het systeem. Over het algemeen vragen verticaal doorstroomde systemen en wortelzonesystemen minder ruimte dan horizontaal doorstroomde systemen. Bij wilgenzuiveringen vragen systemen zonder lozing meer ruimte dan systemen met een lozing. Enkele typische getallen voor de hydraulische belasting staan in Tabel 5.

Krooszuiveringen hebben een hoge biomassa-productie en daarmee een relatief hoge verwijdering van nutriënten. De benodigde oppervlakten zijn over het algemeen kleiner dan die van helofytenfilters. Daar staat tegenover dat krooszuivering meer menskracht kost omdat één tot twee keer per week kroos moet worden geoogst en afgevoerd. Voor alle systemen geldt dat het totale oppervlak groter is dan het oppervlak van het zuiveringssysteem zelf, omdat er ruimte nodig is voor onderhoudspaden, recreatiepaden en dergelijke.

Tabel 5: Typische hydraulische belasting en oppervlak van helofytenfilters, kroos- en wilgenzuivering.

Systeem	Typische belasting (mm/d)	Specifieke oppervlak (m ² /i.e.)
Wilgenzuivering zonder lozing	2 - 10	25-100
Wilgenzuivering met lozing		
Laagbelaste helofytenfilters ([11])	< 50 - 100	1,25 - > 2,5
Matig belaste helofytenfilters ([11])	100 - 200	0,75 - 1,25
Hoogbelaste helofytenfilters ([11])	200 - >300	1,25 - <0,5
Krooszuivering ([62])	70	2,9

3.3 Beheer, onderhoud en biomassa-productie

Bij zowel helofytenfilters als wilgenplantages vragen pompen, leidingen, doseersystemen en paden onderhoud. Aangenomen mag worden dat er geen verschil is in beheer en onderhoud van deze systemen.

Krooszuivering vraagt ook onderhoud van de sloten, pompen, leidingen, doseersystemen en kassen.

Helofytenfilters worden over het algemeen eens per twee of drie jaar gemaaid. Het maaisel wordt afgevoerd en meestal gecomposteerd. Bij helofytenfilters ligt de focus niet op het produceren van biomassa. Biomassa is in feite een afvalproduct van helofytenfilters. Bij krooszuivering en wilgenzuivering ligt de focus wel op het produceren van biomassa. De biomassa-productie van kroos is, afhankelijk van de omstandigheden en het al dan niet uitvoeren van de zuivering in een kas, 15 tot 30 ton ds/ha/j. De biomassa-productie van wilgen is 10 tot 20 ton ds/ha/j (zie Tabel 2). Krooszuivering heeft dus een hogere biomassa-opbrengst dan wilgenzuivering, maar daar staat tegenover dat krooszuivering een intensiever oogstregiem heeft. Krooszuivering zal daarom meer mensuren kosten.

3.4 Kosten en baten

De hieronder genoemde kosten zijn exclusief kosten voor eventueel benodigde grondaankoop.

De kosten van helofytenfilters lopen sterk uiteen. Over het algemeen zijn horizontaal doorstroomde helofytenfilters goedkoper in aanleg, maar zij vergen daarentegen meer ruimte dan verticaal doorstroomde systemen of wortelzonesystemen. De aanlegkosten van helofytenfilters als nabehandelingstechniek van effluent van rwzi's lopen uiteen van € 15.000 tot €475.000/ha ([11]). Beheer, onderhoud en monitoring kost tussen €5.000,- en €25.000,-/ha/j. De behandelkosten komen dan uit op €1,- tot €125,-/i.e..

De kosten van een krooszuivering op grote schaal zijn nog niet bekend, maar op basis van het proefproject bij rwzi Eelde is een schatting gemaakt van de kosten ([62]). De aanlegkosten worden geschat op € 30.000,-/ha. Beheer, onderhoud, monitoring en oogsten kost ongeveer €18.000,-/ha/j. De behandelprijs voor het water komt, inclusief de opbrengsten door verkoop van het geoogste kroos, uit op €1,60 tot €4,80/i.e..

In [11] zijn de kosten per m³ behandeld afvalwater van verschillende (na)behandelingstechnieken opgesomd. Hieronder staan zij vermeld, aangevuld met de kosten van krooszuivering en wilgenzuivering:

- RWZI, basisbehandeling: ca. €1,00/m³
- Ultrafiltratie: ca. €0,35/m³
- UV-desinfectie (pathogenen): ca. €0,20/m³
- Coagulatie en (bio)filtratie (N en P): ca. €0,20/m³
- Langzaam Zandfilter (Leidsche Rijn): ca. €0,10/m³
- Helofytenfilters: ca. €0,05/m³
- Krooszuivering: ca. €0,045/m³
- Wilgenzuivering zonder lozing: ca. €0,030/m³ kosten - €0,013/m³ opbrengsten

Een standaardbehandeling in de rwzi kost ongeveer €1,- per m³. De nabehandelingskosten die hierboven vermeld staan, komen daarbovenop. Helofytenfilters en krooszuiveringen zijn aanzienlijk goedkoper dan de overige nabehandelingstechnieken. Wilgenzuivering kan kostenneutraal. Kroos- en wilgenzuiveringen leveren daarnaast nog nuttige biomassa op en vragen veel minder (fossiele) energie of leveren zelfs energie op.

3.5 Overige factoren (recreatie, educatie, natuur, waterberging)

Recreatie, educatie en natuurontwikkeling zijn bij wilgensystemen niet anders dan bij helofytenfilters. Mogelijk hebben helofytenfilters met verschillende subsystemen (verticaal doorstroomd systeem of wortelzonesysteem in combinatie met een horizontaal doorstroomd systeem) een hogere natuurwaarde (meer biodiversiteit).

Krooszuiveringssystemen hebben geen recreatieve waarde of natuurwaarde, maar wel een educatieve waarde.

Horizontaal doorstroomde helofytenfilters en wilgenplantages kunnen gebruikt worden om water te bergen. Dit kan bijvoorbeeld bij piekbelastingen door hevige regenval.

3.6 Samenvatting

In Tabel 6 is een samenvatting te zien van de eigenschappen en kosten van de hier besproken systemen.

Tabel 6: Samenvatting van eigenschappen van helofytenfilters, krooszuivering en wilgenzuivering.

Eigenschap	Helofytenfilter	Krooszuivering	Wilgenzuivering zonder lozing
Belasting (mm/d)	50 – 300	70	2 – 10
Oppervlak (m ² /i.e.)	0,5 - 2,5	2,9	25 – 100
Aanlegkosten (€/ha)	15.000 - 475.000	30.000	18.800
Beheer- en onderhoudskosten (€/ha/j)	5.000 – 25.000	18.000	320
Behandelkosten (€/i.e.)	1,00 – 125,00	1,60 – 4,80	1,86 - -0,81
Recreatieve waarde	++	-	++
Educatieve waarde	+	++	+
Natuurwaarde	++	-	++
Waterberging	+	-	+

4. Kansen in Nederland

4.1 Rioolwaterzuiveringsinstallaties

In Nederland zijn (in 2011) 345 rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi's) in gebruik. Tezamen verwerken zij iets meer dan 24 miljoen inwonersequivalenten (i.e.'s) aan vervuilingsvracht ([19]). Deze rwzi's produceren zuiveringsslib en effluent. Het effluent (het gezuiverde water) wordt geloosd op het oppervlaktewater. Het zuiveringsslib wordt soms vergist om biogas te produceren, waarmee elektriciteit en warmte worden gemaakt. Het digestaat (wat overblijft na de vergisting) wordt afgevoerd en verwerkt, evenals zuiveringsslib dat niet wordt vergist.

Als alle zuiveringsslib in Nederland gebruikt zou gaan worden om wilgenplantages mee te bemesten, zou hiermee een oppervlak gemoeid zijn van naar schatting 1.179.000 ha (35% van het landoppervlak van Nederland). Als alle effluent van rioolwaterzuiveringsinstallaties nabehandeld zou worden in wilgenplantages, vraagt dat 50.000 ha ([27]). Behandeling van alle zuiveringsslib is hiermee niet aan de orde, maar alle effluent kan nabehandeld worden op 1,6% van het landoppervlak van Nederland. Volgens deze berekening en uitgaande van een totale hoeveelheid i.e.'s van 24,3 miljoen ([19]), zou er 20,6 m² wilgenplantage per i.e. nodig zijn.

In Tabel 7 is een overzicht te zien van het aantal rwzi's in Nederland in 2011 per capaciteitsklasse, de totale capaciteit per klasse en het benodigd aantal hectaren wilgenzuivering als alle effluent nabehandeld zou worden. Tevens is het aantal hectaren per rwzi in elke klasse aangegeven. Bij de berekening van het aantal hectaren is uitgegaan van de berekening uit de vorige paragraaf.

Tabel 7: Overzicht van het aantal rwzi's en de totale capaciteit per capaciteitsklasse en het benodigde oppervlak wilgenplantages voor verwerking van het effluent ([19]).

Capaciteitsklasse	i.e.	aantal	ha	ha/rwzi
tot 5.000 i.e.	63.000	20	130	6,5
5.000 tot 10.000 i.e.	293.000	40	603	15,1
10.000 tot 25.000 i.e.	1.176.000	73	2.422	33,2
25.000 tot 50.000 i.e.	2.747.000	76	5.657	74,4
50.000 tot 100.000 i.e.	4.732.000	67	9.744	145
100.000 tot 250.000 i.e.	7.845.000	51	16.155	317
meer dan 250.000 i.e.	7.425.000	18	15.290	849
Totaal	24.281.000	345	50.000	

Grote rwzi's liggen meestal aan de rand van grote steden en de ruimte voor wilgenplantages is daar beperkt. Het behandelen van alle effluent in een wilgenzuivering is daardoor niet mogelijk. Kleine rwzi's liggen meestal in het landelijk gebied en daar zou ruimte kunnen zijn voor wilgenplantages. De kleinste rwzi's hebben gemiddeld een wilgenplantage nodig van 6,5 ha en rwzi's tot 10.000 i.e. een wilgenplantage van 15,1 ha. In het landelijk gebied zijn zulke oppervlakten vaak wel te vinden of te verkrijgen. Bij rwzi's tussen 10.000 en 25.000 i.e. zal bij sommige rwzi's wel en bij andere rwzi's niet genoeg ruimte te vinden zijn. Bij grotere rwzi's loopt het benodigd oppervlak snel op. Bij de grootste rwzi's zou meer dan 800 ha oppervlak nodig zijn en dat lijkt niet realistisch, vooral omdat deze rwzi's in de grote, verstedelijkte gebieden liggen.

Als bij alle rwzi's tot 10.000 i.e. en bij de helft van de rwzi's tussen 10.000 i.e. en 25.000 i.e. een wilgenplantage wordt aangelegd (in totaal 1.944 ha), levert dit per jaar circa 29.000 ton ds/j op aan biomassa, aannemende dat de productie 15 ton ds/ha/j is.

Met het gebruik van wilgenchips voor de opwekking van duurzame energie wordt de uitstoot van CO₂ uit fossiele brandstoffen vermeden. Om een beeld te krijgen van de hoeveelheid fossiele CO₂ die kan worden vermeden met wilgenchips, wordt het volgende rekenvoorbeeld gegeven:

De energie-inhoud van een ton ovdroge wilgenchips (0% vochtgehalte) is circa 18 GJ ([18]). Een m³ aardgas heeft een energie-inhoud van circa 32 MJ ([30]). Dit betekent dat 1 ton ovdroge wilgenchips eenzelfde energie-inhoud heeft als 562,5 m³ aardgas. Bij de verbranding van 1 m³ aardgas komt ongeveer 1,8 kg CO₂ vrij ([82]). Uitgaande van de bovenstaande berekening dat 1 ton ovdroge wilgenchips eenzelfde energie-inhoud heeft als 562,5 m³ ton aardgas, kan er worden gesteld dat met de verbranding van 1 ton ovdroge wilgenchips, de uitstoot van (562,5 x 1,8 =) 1012,5 kg (=1,0125 ton) fossiele CO₂ wordt vermeden.

Als het effluent van alle rwzi's tot 10.000 i.e. en de helft van de rwzi's tussen 10.000 en 25.000 i.e. wordt nabehandeld in wilgenplantages en het wilgenhout wordt gebruikt als brandstof als alternatief voor aardgas, wordt 29.360 ton fossiele CO₂-uitstoot vermeden.

4.2 Bedrijfszuiveringsinstallaties

Tabel 8 geeft een overzicht van het aantal bedrijfszuiveringsinstallaties (awzi's) per lozingstype, het totaal aantal i.e.'s en aantal per type, en het totale benodigde oppervlak voor nazuivering in een wilgenplantage. Het grootste aantal bedrijfszuiveringen loost op de riolering.

Tabel 8: Overzicht van het aantal awzi's per lozingskenmerk, het aantal i.e.'s en het benodigd oppervlak wilgenzuivering ([19]).

Installatiekenmerken	i.e.	aantal	ha	ha/awzi
Lozing op riolering/rwzi	4.819	122	9,9	0,08
Lozing op regionaal oppervlaktewater	3.886	28	8,0	0,29
Lozing op rijkswater	5.011	60	10,3	0,17
Bodemverzinking*)	-	-	-	-
Hergebruik van het effluent	250	1	-	-
Onbekende effluentbestemming*)	-	-	-	-
Totaal	13.966	211	28,2	

*) Geen gegevens beschikbaar.

De tabel laat duidelijk zien dat de hoeveelheid bedrijfsafvalwater veel kleiner is dan de hoeveelheid afvalwater uit rwzi's (communaal afvalwater). Met in totaal 28 ha aan wilgenplantage zou al het afvalwater van bedrijven in Nederland gezuiverd kunnen worden. Gemiddeld is dat 1.300 m² per bedrijf.

4.3 Perspectieven voor wilgenzuivering

Zoals in de vorige paragrafen is geschetst, liggen de grootste kansen voor wilgenplantages met een waterzuiveringsfunctie in de dunner bevolkte gebieden bij een rwzi en bij bedrijfslozingen. Daarnaast bestaan er kansen bij nieuwe of te renoveren wijken, waarbij zwart water (water uit wc's) en grijs water (water uit wasbakken, (af)wasmachines e.d.) apart wordt ingezameld en verwerkt. Het grijs water kan, na voorbezinking en vetafscheiding, lokaal in een wilgenzuivering gezuiverd worden.

Belangrijke spelers bij het inzetten van wilgenzuiveringen zijn waterschappen en bedrijven met een lozing. In de bedrijvensector gaat het vooral om bedrijven met een lozing van water met nutriënten en eventueel wat organisch materiaal. Lozingen met veel toxische stoffen zoals zware metalen, komen niet in aanmerking, al komen deze niet veel meer voor. Verder is het van belang dat het water voldoende nutriënten bevat om de bomen mee te bemesten. Afvalwater van de voedselverwerkende industrie, zoals brouwerijen, zou hiervoor in aanmerking kunnen komen. Ook afvalwater uit de glastuinbouw komt in aanmerking.

De lozende bedrijven en waterschappen hoeven niet zelf de wilgenplantages te exploiteren. Zij zouden dit kunnen uitbesteden aan een derde partij. Te denken valt aan agrariërs of natuurbeheerinstanties.

Win-winsituaties kunnen ontstaan als de bedrijven of waterschappen zelf een energievraag hebben die (geheel of gedeeltelijk) zou kunnen worden ingevuld met het geogoste hout. Voedselverwerkende bedrijven hebben meestal een warmtevraag, evenals de glastuinbouw. Ook waterschappen hebben energie nodig om de rwzi te laten draaien. Een eventueel overschot aan energie kan worden omgezet in elektriciteit die teruggeleverd wordt aan het elektriciteitsnet. Waterschappen doen dit nu al bij een overschot aan energie die vrijkomt bij de vergisting van zuiveringslib. Uiteraard kan het geogoste hout ook als snippers worden verkocht.

Tot slot wordt hier nogmaals het rekenvoorbeeld behandeld uit paragraaf 4.1 Rioolwaterzuiveringsinstallaties. Wanneer bij de helft van de bedrijfslozingen, alle rwzi's tot 10.000 i.e. en de helft van de rwzi's tussen 10.000 en 25.000 i.e. wilgenplantages worden aangelegd, wordt afvalwater behandeld in 1,944 ha wilgenplantage. Dit levert circa 29.000 ton ds/j aan biomassa op. Bij gebruik als energiebron wordt 29.360 ton fossiele CO₂-uitstoot vermeden wanneer het wordt gebruikt als alternatief voor aardgas.

5. Conclusies en vervolg

Wilgenplantages lijken een aantrekkelijke optie om rwzi-effluent en bedrijfsafvalwater te behandelen en om te zetten in biomassa voor onder andere groene energie. Hierdoor wordt uitstoot van fossiele CO₂ verminderd, en zo dragen wilgenplantages niet alleen bij aan het behalen van de doelen van de Kaderrichtlijn Water, maar ook aan CO₂-uitstootreductie. Wilgenplantages dragen daarnaast bij aan een hogere biodiversiteit en kunnen een educatieve en recreatieve waarde hebben. Tevens kunnen zij in het winterseizoen dienst doen als waterbergingsgebied.

Behandeling van afvalwater kan met een wilgenplantage kostenneutraal gebeuren. Hiermee scoren wilgenplantages gunstiger dan alle andere gangbare nazuiveringstechnieken. Het enige nadeel van wilgenplantages is dat zij veel ruimte vragen. In het drukbevolkte Nederland zal toepassing daarom beperkt kunnen blijven tot de minder drukbevolkte gebieden.

Kansen liggen vooral bij de kleinere rioolwaterzuiveringsinstallaties in dunner bevolkte gebieden en bij nutriëntenrijke afvalwaterstromen uit bedrijven. Wanneer deze bedrijven een warmte- of energievraag hebben, ontstaat een belangrijke win-winsituatie. Het zou interessant zijn om op basis van de resultaten van deze verkenning, een praktijkpilot vorm te geven.

Literatuur

- [1] Aasamaa, K., K. Heinsoo & B. Holm (2010). *Biomass production, water use and photosynthesis of Salix clones grown in a wastewater purification system*. Biomass and Bioenergy 34: 897-905.
- [2] Abrahamson, L.P., T.A. Volk, L.B. Smart & E.H. White (2012). *Short-rotation willow for bio-energy, bioproducts, agroforestry and phytoremediation in the Northeastern United States*. IEA Bioenergy Task 43. Report 2012:PR01.
- [3] Adegbidi, H.G., T.A. Volk, E.H. White, L.P. Abrahamson, R.D. Briggs & D.H. Bickelhaupt (2001). *Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State*. Biomass & Bioenergy 20: 399-411.
- [4] Agentschap NL (2012). *Het Agro convenant NBLH-sector. Resultaten 2008-2011 'een tussenstand'*. Agentschap NL.
- [5] Amofah, L.R., J. Mattsson & A. Hedström (2012). *Willow bed fertigated with domestic wastewater to recover nutrients in subarctic climates*. Ecological Engineering 47: 174-181.
- [6] Aronsson, P., K. Heinsoo, K. Pertuu & K. Hasselgren (2002). *Spatial variation in above-ground growth in unevenly wastewater-irrigated willow Salix viminalis plantations*. Ecological Engineering 19: 281-287.
- [7] Augustson, Å., A. Lind & M. Weih (2006). *Floristisk mångfald i Salix-odlingar (Floristic diversity in willow biomass plantations)*. Svensk Botanisk Tidskrift. 100: 1, 52-58.
- [8] Aylott, M.J., E. Casella, I. Tubby, N.R. Street, P. Smith & G. Taylor (2008). *Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short rotation coppice in the UK*. New Phytologist. 178: 358-370.
- [9] Białowiec, A., I. Wojnowska-Baryła & M. Agopsowicz (2007). *The efficiency of evapotranspiration of landfill leachate in the soil-plant system with willow Salix amygdalina L*. Ecological Engineering 30: 356-361.
- [10] Blom, J.J. & H. Termaat (2005). *Verregaande fosfaatverwijdering met helofytenfilters. Stand van zaken 2004*. STOWA-rapport 2005/19.
- [11] Boomen, R. van den & R. Kampf (2013). *Waterharmonica's in Nederland. 1996-2012: van effluent tot bruikbaar oppervlaktewater*. STOWA-rapport 2013/07.
- [12] Boosten, M. & P. Jansen (2010). *Flevo-energiehout. Resultaten van groei- en opbrengstmetingen en biodiversiteitsmetingen 2006-2008*. Stichting Probos, november 2010.
- [13] Boosten, M. & J. Oldenburger (2011). *Kansen voor de aanleg van wilgenplantages in Nederland*. Stichting Probos, juni 2011. In opdracht van Agentschap NL.
- [14] Boosten, M. & J. Oldenburger (2012). *Op weg naar 32 PJ uit bos, natuur, landschap en de houtketen! Stand van zaken in de NBLH-sector in 2011*. Stichting Probos, december 2012. In opdracht van Agentschap NL.
- [15] Börjesson, P. & G. Berndes (2006). *The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden*. Biomass & Bioenergy 30: 428-438.

- [16] Broier, H., A. Georgantzopoulou, J. van Gijn, A. Abebe Lashitew, M. Musafira, R. Sools & X. Yan (2007). *Fuel for Thought. Soil-plant interactions in Short-Rotation Willow Plantations*. Literature Review and Monitoring plan.
- [17] Burger, F. (2006). *Zur Ökologie von Energiewäldern*. Schriftenreihe des Deutschen Rates für Landespflege. 79: 74-80.
- [18] Caslin, B., J. Finnan & A. McCracken (Eds.) (2011). *Short rotation coppice willow best practice guidelines*. Carlow/Belfast, Teagasc Crops Research Centre & AFBI, Agri-Food and Bioscience Institute.
- [19] <http://www.cbs.nl>
- [20] Chen, G.-C., Z. Liu, J. Zhang & G. Owens (2012). *Phytoaccumulation of copper in willow seedlings under different hydrological regimes*. *Ecological Engineering* 44: 285-289.
- [21] <http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/indicatoren/nl0044-Capaciteit-afvalwaterzuiveringsinstallaties.html?i=15-82>
- [22] Cunningham, M.B., J.D. Bishop, H.V. McKay & R.B. Sage (2004). *Arbre monitoring – Ecology of short rotation coppice. Four year study involving wildlife monitoring of commercial SRC plantations planted on arable land and arable control plots*. The Game Conservancy Trust.
- [23] Curneen, S. & L. Gill. *The Treatment of On-Site Wastewater using Willow Bed Evapotranspiration Systems in Ireland*.
- [24] Dimitriou, I. & P. Aronsson. *Swedish experiences from wastewater irrigation on large-scale Short-Rotation Willow Coppice plantations*. In: *Short Rotation Crops for Bioenergy: New Zealand*. pp 225-228
- [25] Dimitriou, I. & P. Aronsson (2003). *Wastewater phytoremediation treatment systems in Sweden using short rotation willow coppice*.
- [26] Dimitriou, I., P. Aronsson, B. Mola & M. Weih (2011). *Willow short rotation coppice for energy and environmental benefits in Sweden*. Third International Congress of the Salicaceae in Argentina.
- [27] Dimitriou, I., H. Rosenqvist & P. Aronsson (2011). *Recycling of sludge and wastewater to short rotation coppice in Europe – biological and economic potential*. IEA Bioenergy Task 43 Report Series: ‘Promising resources and systems for producing bioenergy feedstocks’.
- [28] Dimitriou, I., B. Mola-Yudego & P. Aronsson (2012). *Impact of willow short rotation coppice on water quality*. *Bioenergy Research* DOI 10.1007/s12155-012-9211-5.
- [29] Dobbelaere, A. de (2011). *Ontwerpen van een agroforestry-systeem met korte omloopfout*. Masterproef. Universiteit Gent, Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen.
- [30] <http://www.ecn.nl>.
- [31] Erktan, A. & F. Rey (2013). *Linking sediment trapping efficiency with morphological traits/barriers on marly gully floors under ecological rehabilitation*. *Ecological Engineering* 51: 212-220.
- [32] Europese Commissie (2003). *Short-rotation Willow Biomass Plantations Irrigated and Fertilised with Wastewater. Results from a 4-year multidisciplinary field project in*

Sweden, France, Northern Ireland and Greece supported by the EU-FAIR Programme (FAIR5-CT97-3947). Final report, January 2003.

- [33] <http://www.fao.org/docrep/008/a0026e/a0026e11.htm>
- [34] Fillion, M., J. Brisson, W. Guidi & M. Labrecque (2011). *Increasing phosphorus removal in willow and poplar vegetation filters using arbuscular mycorrhizal fungi*. Ecological Engineering 37: 199-205.
- [35] Gregersen, P. & H. Brix (2001). *Zero-discharge of nutrients and water in a willow dominated constructed wetland*. Water Science and Technology 44(11-12): 407-412.
- [36] Guidi, W., E. Piccioni & E. Bonari (2008). *Evapotranspiration and crop coefficient of poplar and willow short-rotation coppice used as vegetation filter*. Bioresource Technology 99: 4832-4840.
- [37] Hodson, R.W., F.M. Slater & P.F. Randerson (1994). *Effects of digested sewage sludge on short rotation coppice in the UK*. In: Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system. Proceedings of a study tour, conference and workshop in Sweden, 5-10 June 1994. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Ecology and Environmental Research, Section of Short Rotation Forestry. Report 50. Uppsala, 1994.
- [38] Hooghart, J.C. & W.N. Lablans (red.) (1988). *Van Penman naar Makkink: een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen*. KNMI. Technische rapporten TR-111.
- [39] Hoorn van Dullemen, M. Van (2012). *Effluentpolishing met kroos. Deelrapport 4: Pilotstudie*.
- [40] Jans, R. & L. Kuiper (2001). *Eindrapport Project Flevo Energiehout 2000*. Stichting Bos en Hout.
- [41] Jansen, P. & M. Boosten (2013). *Optimalisering kosten en opbrengsten van wilgenplantages: een verkenning*. InnovatieNetwerk, rapportnr. 13.2.317, Utrecht, maart 2013.
- [42] Jossart, J-M. (2001). *Tertiary waste water treatment using short rotation willow coppice in Belgium*.
- [43] Kadlec, R.H. & S.D. Wallace (2009). *Treatment wetlands. Second edition*. CRC Press.
- [44] Kirt, E. (1994). *Vegetation filter experiments in Estonia*. In: Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system. Proceedings of a study tour, conference and workshop in Sweden, 5-10 June 1994. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Ecology and Environmental Research, Section of Short Rotation Forestry. Report 50. Uppsala, 1994.
- [45] <http://www.knmi.nl/klimatologie/monv/>.
- [46] Kuiper, L. (2001a). *Praktijkexperiment aanleg en onderhoud van een energieplantage in Zevenbergen*. Stichting Bos en Hout.
- [47] Kuiper, L. (2001b). *Praktijkexperiment met het eerste jaar onderhoud van energieplantages*. Stichting Bos en Hout.
- [48] Kuiper, L. (2003). *Samenvatting van de resultaten van zes jaar onderzoek naar energieteelt*. Centrum voor Biomassa Innovatie.

- [49] Kutera, J. & M. Soroko (1994). *The use and treatment of wastewater in willow and poplar plantations*. In: Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system. Proceedings of a study tour, conference and workshop in Sweden, 5-10 June 1994. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Ecology and Environmental Research, Section of Short Rotation Forestry. Report 50. Uppsala, 1994.
- [50] Kuusemets, V., K. Heinsoo, E. Sild & A. Koppel (2001). *Short rotation willow plantation for wastewater purification - case study at Aarike, Estonia*. Transactions on Ecology and the Environment 46: 61-68.
- [51] Kuzovkina, Y.A., M. Knee & M.F. Quigley (2004). *Cadmium and copper uptake and translocation in five willow (Salix L.) species*. International Journal of Phytoremediation 6(3): 269-287.
- [52] Kuzovkina, Y.A. & T.A. Volk (2009). *The characterization of willow (Salix L.) varieties for use in ecological engineering applications: Co-ordination of structure, function and autecology*. Ecological Engineering 35: 1178-1189.
- [53] Maier, J. & R. Vetter (2004). *Erträge und Zusammensetzung von Kurzumtriebs-Gehölzen (Weide, Pappel, Blauglockenbaum)*. pp. 87-92. In: Scholz (Red.). Energieholzproduktion in der Landwirtschaft. Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie. Seminar 29. Januar 2004. Bornimer Agrartechnische Berichte Heft 35. Institut für Agrartechnik Bornim.
- [54] Mantau, U., U. Saal, K. Prins, F. Steierer, M. Lindner, H. Verkerk, J. Eggers, N. Leek, J. Oldenburger, A. Asikainen & P. Anttila (2010). *EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report*. Hamburg, University of Hamburg – Centre of Wood Science.
- [55] Neinavaie, F. (2011). *Treatment and utilization of pulp industry residues using short rotation forestry*. Swedish University of Agricultural Sciences. Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences. Department of Crop production Ecology.
- [56] Nielsen, K.H. (1994). *Sludge fertilization in willow plantations*. In: Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system. Proceedings of a study tour, conference and workshop in Sweden, 5-10 June 1994. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Ecology and Environmental Research, Section of Short Rotation Forestry. Report 50. Uppsala, 1994.
- [57] O'Hogain, S., L. McCarton, A. Reid & J. Turner (2011). *A review of zero discharge wastewater treatment systems using reed willow bed combinations in Ireland*. Journal of Water Practice and Technology 6(3).
- [58] Obarska-Pempkowiak, H. (1994a). *Present state of the art in Poland concerning vegetation filters*. In: Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system. Proceedings of a study tour, conference and workshop in Sweden, 5-10 June 1994. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Ecology and Environmental Research, Section of Short Rotation Forestry. Report 50. Uppsala, 1994.

- [59] Obarska-Pempkowiak, H. (1994b). *Removal of nitrogen and phosphorus from municipal wastewater by willow – a laboratory approach*. In: Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system. Proceedings of a study tour, conference and workshop in Sweden, 5-10 June 1994. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Ecology and Environmental Research, Section of Short Rotation Forestry. Report 50. Uppsala, 1994.
- [60] Oldenburger, J. (2011). *Is er in de toekomst voldoende hout voor iedereen?* Bosbericht. Nr. 2-2011. Stichting Probos.
- [61] Otte, A. (2010). *Effluentpolishing met kroos*. Deelrapport 1: literatuurstudie.
- [62] Otte, A. (2012a). *Effluentpolishing met kroos*. Deelrapport 6: ontwerpmodel.
- [63] Otte, A. (2012b). *Jaarrapportage kroosexperiment 2012*. Bioniers, 1 december 2012.
- [64] Probos (2013). *Overzicht korte omloopplantages Nederland. Stand van zaken november 2013*. Niet gepubliceerde data. Stichting Probos
- [65] Randerson, P.F., C. Moran & A. Bialowiec (2011). *Oxygen transfer capacity of willow (*Salix viminalis* L.)*. Biomass and Bioenergy 35: 2306-2309.
- [66] Remijnse, T. (2013). *Afstudeerrapport. Potentie van wilgenenergieplantages in kippenuitlopen in Nederland*. Hogeschool Van Hall Larenstein.
- [67] Ridell-Black, D. (1994). *Sewage sludge as a fertiliser for short rotation energy coppice*. In: Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system. Proceedings of a study tour, conference and workshop in Sweden, 5-10 June 1994. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Ecology and Environmental Research, Section of Short Rotation Forestry. Report 50. Uppsala, 1994.
- [68] Robinson, B.H., T.M. Mills, D. Petit, L.E. Fung, S.R. Green & B.E. Clothier (2000). *Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation*. Plant and Soil 227: 301-306.
- [69] Rosenqvist, H., P. Aronsson, K. Hasselgren & K. Pertuu (1997). *Economics of using municipal wastewater irrigation of willow coppice crops*. Biomass & Bioenergy 12(1): 1-8.
- [70] Sage, R., M. Cunningham & N. Boatman (2006). *Birds in willow short-rotation coppice compared to other arable crops in central England and a review of bird census data from energy crops in the UK*. Ibis. 148: 184-197.
- [71] Schomaker, A.H.H.M., A.J. Otte, J.J. Blom, Th. Claassen & R. Kampf (2005). *Waterharmonica. De natuurlijke schakel tussen waterketen en watersysteem*. STOWA-rapport 2005/18.
- [72] SER (2013). *Energieakkoord voor duurzame groei*. Den Haag, Sociaal-Economische Raad.
- [73] STOWA (2005). *Verkenningen zuiveringstechnieken en KRW*. STOWA-rapport 2005/28.
- [74] Sugiura, A., S.F. Tyrrel, I. Seymour & P.J. Burgess (2008). *Water Renew systems: wastewater polishing using renewable energy crops*. Water Science & Technology 57(9): 1421-1428.

- [75] Swiontek Brzezinska, M., E. Lalke-Porczyk & W. Donderski (2007). *The bacteriological and sanitary state of sewage in an on-site willow wastewater treatment facility*. Polish Journal of Natural Sciences 22(2): 284-293.
- [76] Toome, M., K. Heinsoo, M. Ramstedt & A. Luik (2009). *Rust severity in bioenergy willow plantations treated with additional nutrients*. For. Path. 39: 28-34.
- [77] Truu, M., J. Truu & K. Heinsoo (2009). *Changes in soil microbial community under willow coppice: The effect of irrigation with secondary treated municipal wastewater*. Ecological Engineering 35: 1011-1020.
- [78] Tzanakakis, V.A., N.V. Paranychianakis & A.N. Angelakis (2009). *Nutrient removal and biomass production in land treatment systems receiving domestic effluent*. Ecological Engineering 35: 1485-1492.
- [79] Unseld, R., A. Möndel, B. Textor, F. Seidl, K. Steinfatt, S. Kaiser, M. Thiel, N. Karopka & M. Nahm (2010). *Anlage und Bewirtschaftung von Kurzumtriebsflächen in Baden-Württemberg. Eine praxisorientierte Handreichung*. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg.
- [80] Vandecasteele, B., P. Quataert & F.M.G. Tack (2005). *The effect of hydrological regime on the metal bioavailability for wetland plant species Salix cinerea*. Environmental Pollution 135: 303-312.
- [81] Verdonckt, P., S. Van Daele & L. Meiresonne (2011). *Warmte uit korteomloophout*. Brochure uitgegeven in het kader van het ADLO demonstratieproject VerKOht! En het EFRO-project EnergieBewust Boeren. Enerpedia.
- [82] <http://www.wikimobi.nl>.
- [83] Wu, S., D. Austin, L. Liu & R. Dong (2011). *Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas*. Ecological Engineering 37: 948-954.
- [84] Zacchini, M., F. Pietrini, G. Scarascia Mugnozza, V. Iori, L. Pietrosanti & A. Massacci (2009). *Metal Tolerance, Accumulation and Translocation in Poplar and Willow Clones Treated with Cadmium in Hydroponics*. Water Air Soil Pollution 197:23-34.
- [85] Zupančič Justin, M., N. Pajk, V. Zupanc & M. Zupančič (2010). *Phytoremediation of landfill leachate and compost wastewater by irrigation of Populus and Salix: Biomass and growth response*. Waste Management 30: 1032-1042.

Bijlage 1: Kosten/batenberekeningen

Berekening voor wilgenplantage

Grootte	1 hectare			20 hectare		
Levensduur	12	16	20 jaar	12	14	20 jaar
Kosten aanleg en onderhoud eerste 2 jaar	€ 4.000	€ 4.000	€ 4.000	€ 2.800	€ 2.800	€ 2.800 /ha
Kosten oogst per oogstcyclus (elke 2 jaar)	€ 750	€ 750	€ 750	€ 500	€ 500	€ 500 /ha,2j
Kosten oogst gehele levensduur	€ 4.500	€ 6.000	€ 7.500	€ 3.000	€ 3.500	€ 5.000 /ha
Kosten onderhoud (extra inboet, onkruidbestrijding etc) per oogstcyclus (naar schatting 5% van aanlegkosten)	€ 200	€ 200	€ 200	€ 140	€ 140	€ 140 /ha,j
Kosten onderhoud (extra inboet, onkruidbestrijding etc) gedurende hele levensduur minus eerste oogstcyclus (eerste twee jaar)	€ 1.000	€ 1.400	€ 1.800	€ 700	€ 840	€ 1.260 /ha
Kosten ruimen plantage aan het einde van de levensduur	€ 1.000	€ 1.000	€ 1.000	€ 1.000	€ 1.000	€ 1.000 /ha
Totale kosten aanleg, oogst, onderhoud en ruimen	€ 10.500	€ 12.400	€ 14.300	€ 7.500	€ 8.140	€ 10.060 /ha
Opbrengsten ovendroog (0% vocht)	180	240	300	180	210	300 ton droge stof (0% vocht)
Opbrengsten luchtdroog (35 % vocht)	252	336	420	252	294	420 ton luchtdroog (35 % vocht)
Opbrengsten vers (50 % vocht)	360	480	600	360	420	600 ton vers (50 % vocht)
transportkosten luchtdroge biomassa naar centrale (10 euro per ton)	€ 2.520	€ 3.360	€ 4.200	€ 2.520	€ 2.940	€ 4.200 /ha
<u>Opbrengsten verkoop luchtdroge biomassa aan centrale max. (60 euro /ton luchtdroog) op basis van huidige prijzen</u>	<u>€ 15.120</u>	<u>€ 20.160</u>	<u>€ 25.200</u>	<u>€ 15.120</u>	<u>€ 17.640</u>	<u>€ 25.200 /ha</u>
<u>Opbrengsten verkoop luchtdroge biomassa aan centrale min (30 euro /ton luchtdroog) op basis van huidige prijzen</u>	<u>€ 7.560</u>	<u>€ 10.080</u>	<u>€ 12.600</u>	<u>€ 7.560</u>	<u>€ 8.820</u>	<u>€ 12.600 /ha</u>
Resultaat max luchtdroge biomassa	€ 2.100	€ 4.400	€ 6.700	€ 5.100	€ 6.560	€ 10.940 /ha
Resultaat min luchtdroge biomassa	€ 5.460-	€ 5.680-	€ 5.900-	€ 2.460-	€ 2.260-	€ 1.660- /ha
<u>Opbrengsten verkoop verse biomassa aan handel max. (25 euro /ton vers) op basis van huidige prijzen</u>	<u>€ 9.000</u>	<u>€ 12.000</u>	<u>€ 15.000</u>	<u>€ 9.000</u>	<u>€ 10.500</u>	<u>€ 15.000 /ha</u>
<u>Opbrengsten verkoop verse biomassa aan handel min (10 euro /ton vers) op basis van huidige prijzen</u>	<u>€ 3.600</u>	<u>€ 4.800</u>	<u>€ 6.000</u>	<u>€ 3.600</u>	<u>€ 4.200</u>	<u>€ 6.000 /ha</u>
Resultaat max verse biomassa	€ 1.500-	€ 400-	€ 700	€ 1.500	€ 2.360	€ 4.940 /ha
Resultaat min verse biomassa	€ 6.900-	€ 7.600-	€ 8.300-	€ 3.900-	€ 3.940-	€ 4.060- /ha

Berekening voor rwzi van 10.000 i.e.

Grootte rwzi	10.000 i.e.	
Debiet	620.500 m ³ /j	
Debiet	1.700 m ³ /d	
N in	10,3 mg N/l	
N uit	3 mg N/l	
P in	0,56 mg P/l	
P uit	0,3 mg P/l	
Gewenste N verwijdering	12410 g N/d	
Gewenste P verwijdering	442 g P/d	
Minimale grootte hydr. Bel.	42,5 ha	
Minimale grootte N	22,6 ha	
Minimale grootte P	26,9 ha	
Verblijftijd	79 d	
Opbrengsten	21 ton luchtdroog/ha.j	26 ton CO2 uitgespaard/ha.j
Opbrengst verkoop aan centrale minimaal	€ 30 /ton luchtdroog	
Opbrengst verkoop aan centrale maximaal	€ 60 /ton luchtdroog	
Opbrengst minimaal	€ 630 /ha.j	
Opbrengst maximaal	€ 1.260 /ha.j	
Transportkosten	€ 210 /ha.j	
Kosten aanleg	€ 2.800 /ha	
Verwijderen aanplant na gebruik	€ 1.000 /ha	
Kosten pompen en buizen	€ 15.000 /ha	
Jaarlijkse kosten	€ 320 /ha.j	
Rente	5%	
Kapitaallasten	€ 538 /ha.j	
Totaal investering	€ 18.800 /ha	
Jaarlijkse kosten	€ 1.068 /ha.j	
Jaarlijkse opbrengsten minimaal	€ 630 /ha.j	
Jaarlijkse opbrengsten maximaal	€ 1.260 /ha.j	
Totaal jaarlijks minimaal	€ 438- /ha.j	
Totaal jaarlijks maximaal	€ 192 /ha.j	
Levensduur	20 jaar	
Totale opbrengsten minimaal	€ 12.600 /ha	
Totale opbrengsten maximaal	€ 25.200 /ha	
Totale kosten	€ 21.367 /ha	
Totaal resultaat minimaal	€ 8.767- /ha	
Totaal resultaat maximaal	€ 3.833 /ha	
Uitgespaarde CO2 uitstoot	26,33 ton CO2/ha.j (aardgas)	
Grootte wilgenzuivering	42,5 ha	
Totale opbrengsten minimaal	€ 26.775 /j	
Totale opbrengsten maximaal	€ 53.550 /j	
Totale kosten	€ 45.405 /j	
TOTAAL RESULTAAT MINIMAAL	€ 18.630- /j	
TOTAAL RESULTAAT MAXIMAAL	€ 8.145 /j	
TOTAAL UITGESPAARD CO2	22.376 ton t.o.v. aardgas	
Kosten per i.e. maximaal	€ 1,86 /i.e.	
Kosten per i.e. minimaal	€ 0,81- /i.e.	
Kosten per m ³ minimaal	€ 0,030 /m ³	
Kosten per m ³ maximaal	€ 0,013- /m ³	

