

BTO 2015.209(s) | Juni 2015

BTO rapport

Terugwinnen van
energie en grondstoffen
in de regio Amsterdam

BTO

Terugwinnen van energie en grondstoffen in de regio Amsterdam

BTO 2015.209(s) | Juni 2015

Opdrachtnummer

400367

Projectmanager

Kees Roest

Opdrachtgever

BTO - Speerpuntonderzoek

Kwaliteitsborger

Frank Oesterholt

Auteurs

Edwin de Buijzer

Kees Roest

Tessa van den Brand

Elize Versteeg

Jan Hofman

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

2 maanden na publicatie is het openbaar.

Jaar van publicatie
2015

Meer informatie
ir. Edwin de Buijzer
T 030-6069638
E edwin.de.buijzer@kwrwater.nl

Keywords
grondstoffen energie hergebruik
Amsterdam Waternet

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR Watercycle
Research
Institute

BTO 2015.209(s) | Juni 2015 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

BTO Managementsamenvatting

Inzicht in stof- en energiestromen kan Waternet ondersteunen bij strategische keuzes rond duurzaamheid

Auteur(s) Ir. Edwin de Buijzer, dr.ing. Kees Roest, dr.ir. Tessa van den Brand, Elize Versteeg MSc, dr.ir. Jan Hofman

Voor de regio Amsterdam is binnen het Speerpuntonderzoek voor Waternet in kaart gebracht welke energie- en grondstofstromen afkomstig zijn uit de watercyclus of uit aanpalende werkvelden en potentieel geschikt zijn voor hergebruik. Ook is geïnventariseerd welke methoden en technieken geschikt zijn om energie (biomassa) en grondstoffen zoals nutriënten, cellulose en metalen optimaal te gebruiken en te transformeren tot producten hoger in de waardepiramide. Uit het zo verkregen overzicht is een aanpak afgeleid die Waternet kan ondersteunen bij het maken van strategische keuzes voor het bereiken van duurzaamheidsambities:

1. Focus in eerste instantie op 'eindige' grondstoffen, zoals nutriënten (fosfaat) en (zeldzame aard-)metalen.
2. Bij terugwinning moet de nadruk liggen op stofstromen die producten kunnen opleveren hoog in de waardepiramide en/of stofstromen die relatief groot zijn.
3. Voor enkele specifieke stofstromen is het interessant om op korte termijn de benutting en verwaarding verder te onderzoeken: cellulose, vetzuren en lipiden, thermische energie en reststoffen van de drinkwaterproductie (in het bijzonder humuszuren).

Belang: inzicht in stofstromen nodig voor duurzaamheidsambities regio Amsterdam

Amsterdam heeft de ambitie om in 2040 zijn CO₂-emissies met 75% te hebben gereduceerd en afval volledig te recyclen. Als beheerder van de watercyclus wil Waternet weten welke kansen en mogelijkheden er zijn om (eventueel met partners als het Afval Energie Bedrijf en de gemeente Amsterdam) aan deze doelstellingen bij te dragen. Waternet heeft zelf als duurzaamheidsambitie: circulair handelen en klimaatneutraal in 2020. Ook streeft Waternet ernaar de klimaatvoetafdruk op andere gebieden te verkleinen, zoals afval en grondstoffen. Er was onvoldoende overzicht van de betreffende stofstromen en de mogelijkheden voor

verduurzaming om goede strategische beslissingen op te baseren.

Aanpak: inventarisatie stofstromen, hoeveelheden en verwerkingstechnieken

Gestart is met een inventarisatie van potentieel waardevolle stofstromen aanwezig in de regio Amsterdam. Per stofstroom is in beeld gebracht welke hoeveelheden aanwezig zijn en welke hoeveelheden beschikbaar zijn of beschikbaar te maken ('oogstbaar') zijn. Ook zijn mogelijke verwerkingsroutes verkend. Om vruchten op jaarbasis zo goed mogelijk te kwantificeren zijn meetwaarden gebruikt van Waternet, naast data uit (nationale) bronnen en extrapolatie.

Jaar van publicatie
2015

Meer informatie
ir. Edwin de Buijzer
T 030-6069638
E edwin.de.buijzer@kwrwater.nl

Keywords
grondstoffen energie hergebruik
Amsterdam Waternet

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR Watercycle
Research
Institute

BTO 2015.209(s) | Juni 2015 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Resultaten: inzicht in stromen en benuttingsmogelijkheden; aanpak strategische keuzes

Het onderzoek naar de stofstromen heeft onder meer de volgende aanbevelingen opgeleverd:

- Verzamel zoveel mogelijk van de aanwezige organische stofstromen ten behoeve van energiewinning (biogas).
- Zet daarom in de regio Amsterdam een effectief inzamelsysteem op voor landschapsbiomassa, groente- fruit- en mogelijk tuinafval.
- Koppel op termijn - als procedés beschikbaar komen voor het fabriceren van hoogwaardige producten - organische stofstromen weer los van de energiewinning.
- Verricht oriënterend metingen naar gehalten zwavel, cellulose en diverse metaalelementen (aardalkalimetalen, overgangsmetalen en metalloïden en enkele andere waardevolle metalen in het afvalwater en het slib van de rwzi's West en Westpoort).
- Verken de mogelijkheden voor lokale afzet, zoals de levering van fosfaat in de vorm van struviet, aan ICL Fertilizers of andere (duurzame) producenten.¹

Dit overzicht van mogelijkheden leidt tot een voorstel voor een aanpak die Waternet kan helpen bij het maken van strategische keuzes voor het bereiken van duurzaamheidsambities:

1. Focus in eerste instantie op 'eindige' grondstoffen, zoals nutriënten en metalen;
2. Bij terugwinning moet de nadruk liggen op stofstromen die producten kunnen opleveren hoog in de waardepiramide en/of stofstromen die relatief groot zijn;
3. Voor enkele specifieke stofstromen is het interessant om op korte termijn de benutting en verwaarding verder te onderzoeken: cellulose, vetzuren en lipiden, thermische energie en reststoffen van de drinkwaterproductie (in het bijzonder humuszuren).

¹ In juni 2015 is een contract gesloten met ICL Fertilizers.

Implementatie: gebruik overzicht en aanpak; maak afspraken met partners en een afwegingskader

De mogelijkheden om hoogwaardige producten te vervaardigen uit stofstromen afkomstig uit de watercyclus of aanpalende werkvelden zijn merendeels nog in ontwikkeling. Er is nog weinig (grootschalige) praktijkervaring en geen algemeen beeld. Het gemaakte overzicht van de energie- en grondstoffen heeft geleid tot een voorgestelde aanpak bij strategische keuzes ten dienste van de duurzaamheidsambities van Waternet, waaronder circulair handelen en klimaatneutraliteit.

Daarnaast is het aan te bevelen om:

- met partners afspraken te maken over het meten en publiceren van data van stofstromen, in vergelijkbare eenheden.
- een afwegingskader voor circulair handelen te ontwikkelen dat is gericht op (eindige) grondstoffen, aanvullend op de CO₂-footprint en economische aspecten.

Rapport

Dit Speerpuntonderzoek voor Waternet is beschreven in rapport *Terugwinnen van energie- en grondstoffen in de regio Amsterdam* (BTO-2015.209(s)).

Jaar van publicatie
2015

Meer informatie
ir. Edwin de Buijzer
T 030-6069638
E edwin.de.buijzer@kwrwater.nl

Keywords
grondstoffen energie hergebruik
Amsterdam Waternet

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

**Watercycle
Research
Institute**

BTO 2015.209(s) | Juni 2015 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vervaardigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Samenvatting

Amsterdam heeft de ambitie om 75% reductie van CO₂ emissies te bereiken en het afval volledig te recyclen in 2040. Waternet is, als beheerder van de watercyclus van Amsterdam, geïnteresseerd in de kansen en mogelijkheden om, al dan niet samen met partners als het Afval Energie Bedrijf (AEB) en de gemeente Amsterdam, bij te dragen aan deze doelstellingen. Waternet heeft als duurzaamheidsambitie: circulair handelen en klimaatneutraal in 2020. Daarnaast streeft Waternet ernaar om ook op andere aspecten als afval en grondstoffen haar klimaatvoetafdruk te verkleinen.

Het doel van het onderzoek is het in kaart brengen van energie en grondstoffen die omgaan in de regio Amsterdam, afkomstig uit de watercyclus of aanpalende werkvelden en die potentieel geschikt zijn voor hergebruik. Ook is geïnventariseerd welke methoden en technieken geschikt zijn om energie (biomassa) en grondstoffen als nutriënten, cellulose en metalen waaronder de zeldzame aardmetalen optimaal te gebruiken en te transformeren tot producten hoger in de waardepiramide. Om vrachten op jaarbasis zo goed als mogelijk te kwantificeren is gebruik gemaakt van meetwaarden van Waternet, data uit (nationale) bronnen en extrapolatie.

Voor het maken van strategische keuzes door Waternet wordt de volgende aanpak voorgesteld:

1. Focus in eerste instantie op 'eindige' grondstoffen, als nutriënten en metalen. Voor nutriënten betreft dit in het bijzonder fosfaat in de vorm van struviet, omdat fosfaat een eindige grondstof is met een essentiële functie voor het leven op aarde. Ook een aantal metalen zijn als eindig te beschouwen, in de zin van een bedreiging voor onze manier van leven en welvaartsniveau en om deze reden door de Europese Unie op de lijst van kritieke grondstoffen geplaatst.
2. De focus voor terugwinning moet gelegd worden op stoffstromen die producten kunnen opleveren hoog in de waardepiramide en/of stoffstromen die relatief groot zijn. Vooruitlopend op het kunnen vervaardigen van deze hoogwaardige producten als bijvoorbeeld bioplastics en voedsel, moet toegewerkt worden naar een effectief inzamelsysteem van meer organische reststromen, in het bijzonder biomassa in de vorm van groente, fruit (en tuin)afval. In de tussentijd kan met bewezen technologie de ingezamelde biomassa nuttig ingezet worden voor energiewinning. Door een slibdestructietechniek voor te schakelen en/of thermofiele vergisting toe te passen, wordt wellicht wel een hoger energetisch- en afvalverwijderingsrendement bereikt, maar geen hoogwaardigere producten. Ook het toepassen van vezels uit biomassa om plaatmateriaal te maken is een reële kans om een hoogwaardiger product te maken, die bovendien binnen Waternet afgenomen en toegepast kan worden en daarom zeker op demoschaal onderzocht moet worden. Het volgen, ondersteunen en initiëren van onderzoek gericht op deze hoogwaardige producten is een voorwaarde voor realisatie in de praktijk op redelijke termijn. Om dit grootschalig werkelijkheid te kunnen laten worden is het beschikbaar maken van meer biomassa de eerste stap, waaraan groente- en fruitafval een belangrijke bijdrage kan leveren.
3. In dit onderzoek zijn specifieke stoffstromen geïdentificeerd waarvan benutting en verwaarding voor de korte(re) termijn interessant is om verder te exploreren, zoals:

cellulose, vetzuren en lipiden, thermische energie en reststoffen van de drinkwaterproductie en in het bijzonder humuszuren.

Ook kan overwogen worden om reststromen van elders in te zetten in het eigen productieproces van Waternet, bijvoorbeeld waterijzer voor (aanvullende chemische) binding van fosfaat in de rwzi's.

Ook is het wenselijk om voor bepaalde stofstromen meer inzicht te verkrijgen in de werkelijk beschikbare hoeveelheden, financiële aspecten, de invloed op de CO₂ footprint, duurzaamheidsaspecten en dergelijke om de strategische keuzes op te baseren. Omdat deze gegevens momenteel nog niet voldoende voorhanden zijn is bovengenoemde prioriteitstelling gehanteerd.

Deze studie en voorgaande aanpak leiden tot de volgende aanbevelingen:

- Maak afspraken met partners voor het meten en publiceren in vergelijkbare eenheden van data van stofstromen. Dit kan bijvoorbeeld in combinatie met een monitoringssysteem waarin ontwikkelingen in stofstromen en verwerkingsmethoden bijgehouden worden.
- Voordat een specifieke stroom gevaloriseerd wordt, is het aan te bevelen de beschikbare vracht van desbetreffende stofstroom nauwkeuriger in beeld te brengen.
- Ontwikkel een afwegingskader voor circulair handelen gericht op (eindige) grondstoffen, aanvullend op de CO₂ footprint.
- Eerste prioriteit is het terugwinnen van eindige grondstoffen, daarna stofstromen die producten kunnen opleveren hoog in de waardepiramide en stofstromen die relatief groot zijn en tenslotte specifieke kansen.
- Initieer en stimuleer het opzetten van een effectief inzamelsysteem in de regio Amsterdam voor landschapsbiomassa en (gezien de omvang) in het bijzonder groente-fruit- en mogelijk tuinafval.
- Zamel zoveel mogelijk van de aanwezige organische stofstromen in en voeg deze op korte termijn toe aan de slibvergisting zodat meer biogas kan worden geproduceerd.
- Overweeg een slibdestructietechniek voor te schakelen aan de vergisting om de biogasopbrengst te vergroten en de afvalproductie te verkleinen.
- Maak op basis van vezels uit biomassa bouwmaterialen (oeverbeschoeiingen, plaatmateriaal) en pas het toe in de praktijk.
- Op termijn - als procedés beschikbaar komen voor het fabriceren van hoogwaardige producten - de stofstromen weer loskoppelen van de vergisting.
- Volg, ondersteun en initieer onderzoek gericht op fabricage van hoogwaardige producten uit biomassa en zuiveringsslib.
- Bepaal de hoeveelheid cellulose die gewonnen kan worden uit het zeefgoed van de rwzi's West en Westpoort. Het is hiervoor belangrijk dat er een goede en eenduidige analysemethode wordt ontwikkeld voor de bepaling van de fractie cellulose van droge stof uit de water- en sliblijn.
- Laat marktonderzoek uitvoeren naar de afzetmogelijkheden van humuszuren, in eerste instantie afkomstig van de productie van drinkwater.
- Verken de mogelijkheden voor lokale afzet, zoals de levering van fosfaat in de vorm van struviet, aan ICL Fertilizers of andere (duurzame) producenten¹
- Toets het zwavelgehalte in de waterlijn van rwzi Westpoort om te bepalen of het terugwinnen van zwavel potentie heeft.
- Verricht metingen naar het gehalte goud in influent, effluent en slib van de rwzi's West en Westpoort. Indien de gehalten van de eenmalige metingen bevestigd worden, dan

¹ In juni 2015 heeft Waternet een contract gesloten voor de levering van struviet aan kunstmestfabrikant ICL Fertilizers.

- vervolgonderzoek opstarten naar de mogelijkheden voor het terugwinnen van goud uit het afvalwater (mogelijk in combinatie met andere waardevolle metalen).
- Verricht oriënterend metingen naar gehalten van de stoffen zoals opgenomen in Bijlage III van deze rapportage in het afvalwater en het slib van de rwzi's West en Westpoort.
 - Ondersteun en participeer onderzoek naar kansen en mogelijkheden voor het terugwinnen van metalen uit de afvalwatercyclus.

Door het in kaart brengen van de energie en grondstoffen die omgaan in de regio Amsterdam zijn een aantal uitgangspunten en mogelijkheden verkregen voor benutting en valorisatie van deze stromen. Dit geeft richting aan de strategische keuzes om de ambitie tot circulair handelen en klimaatneutraliteit te verwezenlijken.

Inhoud

Samenvatting	1
Inhoud	5
1 Inleiding	7
1.1 Aanleiding	7
1.2 Achtergrond	8
1.3 Doelstelling en onderzoeksopzet	10
1.4 Kentallen	10
1.5 Leeswijzer	13
2 Organische stoffstromen	15
2.1 Inleiding	15
2.2 Landschapsbiomassa en zuiveringsslib	15
2.3 Groente-, fruit- (en tuin)afval	22
2.4 Reststromen uitgedrukt in CZV (chemisch zuurstof verbruik)	26
3 Verwerkingsroutes organische reststromen	33
3.1 Inleiding	33
3.2 Verwerkingstechnologieën organische reststromen	34
3.3 Producten	41
3.4 Afwegingen organische reststromen	43
3.5 Conclusie organische reststromen	50
4 Anorganische stoffstromen	51
4.1 Inleiding	51
4.2 Reststoffen drinkwaterproductie	51
4.3 Humuszuren	54
4.4 Stofstromen bedrijven en industrie	58
4.5 Nutriënten	60
4.6 Zwavel	66
4.7 Metalen	70
5 Thermische energie	81
5.1 Warmte uit het riool – Riothermie	81
6 Beschouwingen, integrale conclusie en discussie	85
6.1 Stofstromen Amsterdam: samengevat	85
6.2 Beschouwingen	87
6.3 Integrale afweging en conclusies	92
6.4 Adviezen aan Waternet	95
Bijlage I Data diverse bronnen	105
Bijlage II Humuszuur	107
Bijlage III Kritische en waardevolle metalen	108

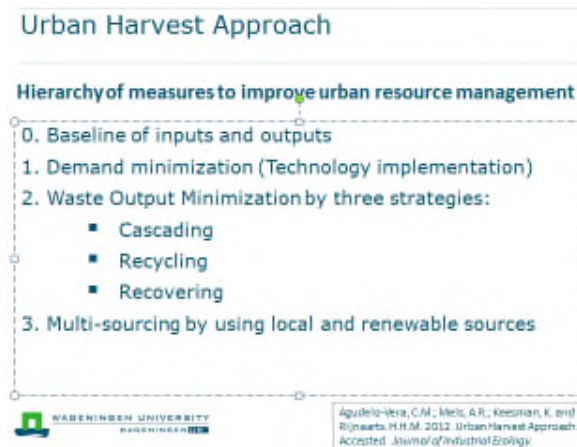
1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Amsterdam heeft de ambitie om in 2040 het afval volledig te recyclen en 75% reductie van CO₂ emissies te bereiken (40% reductie t.o.v. 1990) om uit te komen op 2,5 Mton CO₂ (Gemeente Amsterdam 2014). Dit is een ambitieuze doelstelling aangezien in Amsterdam nu slechts 15% van het huishoudelijk afval wordt gescheiden (*ter vergelijking*: Utrecht 36%, Nijmegen 62% en Cuijk 87%). Voor grof huishoudelijk afval is het contrast zelfs nog groter: Amsterdam 8% (met daarnaast 12% nascheiding), Utrecht 66%, Cuijk 91%.

Als beheerder van de watercyclus van Amsterdam is Waternet geïnteresseerd in de kansen en mogelijkheden om, al dan niet samen met partners als het Afval Energie Bedrijf (AEB) en de gemeente Amsterdam, bij te dragen aan deze ambitie. Hiervoor heeft Waternet zich de volgende duurzaamheidsdoelstellingen gesteld: circulair handelen en klimaatneutraal in 2020 (Nijman 2014). Naast het in 2020 klimaat neutraal zijn voor CO₂, streeft Waternet ernaar ook op andere duurzaamheidsaspecten als afval en grondstoffen haar klimaatvoetafdruk te verkleinen (Waternet 2015).

Het Afval Energie Bedrijf Amsterdam wil samen met Waternet stromen door de stedelijke leefomgeving (water, energie en grondstof/afval) zoveel mogelijk hergebruiken en hiervoor een gezamenlijk toekomstbeeld ontwikkelen. Een dergelijk toekomstbeeld kan leiden tot een gezamenlijke investeringsstrategie, gericht op 'urban harvesting' (Figuur 1).



FIGUUR 1: THE URBAN HARVEST APPROACH (AGUDELO-VERA ET AL. 2012)

Recente berekeningen tonen aan dat 'urban harvesting' een groot potentieel heeft voor het voorzien in de stedelijke vraag naar elektriciteit, warmte, water en energie. Binnen het gezamenlijke initiatief 'Clean Capital' werken Waternet, AEB en Havenbedrijf Amsterdam aan het versnellen van de implementatie van nieuwe technologie (technology pull).

Vanuit deze gedachte heeft Waternet KWR opdracht verleend om in het kader van het speerpuntonderzoek, als onderdeel van het Bedrijfstakonderzoek (BTO) Drinkwaterbedrijven, onderzoek te doen naar het terugwinnen van grondstoffen en energie in de regio Amsterdam. Het doel van dit speerpuntproject is om mogelijk waardevolle rest(afval)stoffen en -stromen

(energie, water & grondstoffen) in de urbane Amsterdam-regio in kaart te brengen, inclusief de technieken om deze optimaal te gebruiken. Naast een globale kwantificatie van verschillende stofstromen is ook bekeken waar en hoe deze stofstromen verzameld, behandeld en vermarkt kunnen worden.

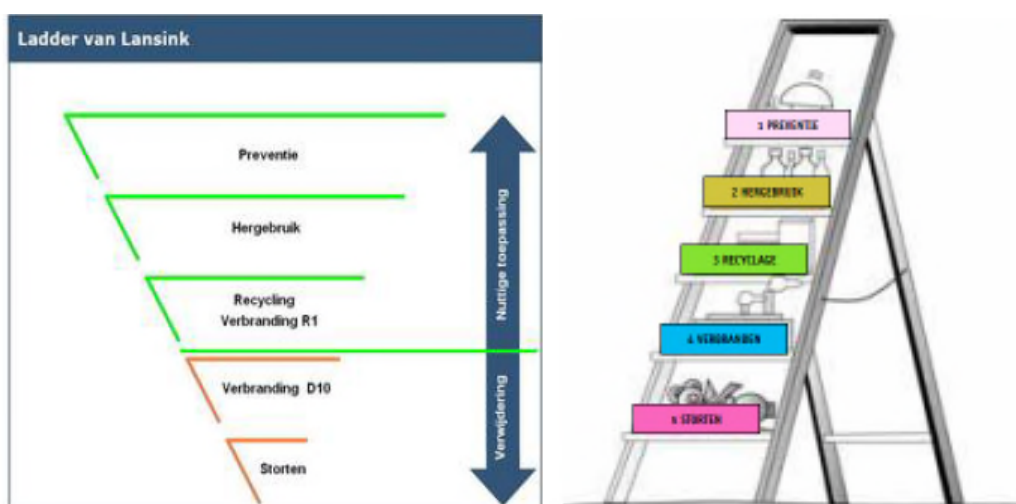
De uitkomsten van het onderhavige onderzoek dienen als basis voor de te maken strategische keuzes door Waternet in het kader van de circulaire economie. De uitkomsten van het onderzoek zijn tevens input voor een project van het Amsterdamse instituut voor Advanced Metropolitan Solutions (AMS) in uitvoering bij Wageningen Universiteit, TU Delft en MIT (Figuur 2), gericht op het in kaart brengen van de stofwisseling van de stad (Urban Pulse) en het TKI Watertechnologie-onderzoek naar het concept 'Power to Protein' (KWR) (zie ook paragraaf 3.2.4).



FIGUUR 2: METABOLISME VAN DE STAD (SPILLER 2014)

1.2 Achtergrond

Het afvalbeleid in Nederland was gebaseerd op de ladder van Lansink (Figuur 3), waarbij preventie en hergebruik van materialen het hoogst stonden aangeschreven.



FIGUUR 3: LADDER VAN LANSINK

Onder invloed van het zogenoemde “cradle2cradle principe” is de transitie naar een circulaire economie ingezet. Het afvalbeleid binnen een circulaire economie is vertaald in een waardepiramide zoals weergegeven in Figuur 4. Uitgangspunt daarbij is dat de herbruikbaarheid van producten en grondstoffen wordt gemaximaliseerd en waardevernietiging wordt geminimaliseerd.



FIGUUR 4: WAARDEPIRAMIDE (WATERNET & AEB 2012)

Een aanzienlijke hoeveelheid grondstoffen verdwijnt via het afvalwater uit de grondstoffenkringloop. Zo komt bijvoorbeeld twintig procent van de totale hoeveelheid fosfaat die in Nederland verbruikt wordt, op rioolwaterzuiveringsinrichtingen (rwzi's) terecht. Van de zwevende bestanddelen in afvalwater is dertig tot vijftig procent afkomstig uit toiletpapier, in de vorm van cellulose. Een herwaardering van grondstoffen en energie uit afvalwater past in de maatschappelijke transitie naar een circulaire economie en een waterzuivering die waarde creëert (Energie en Grondstoffenfabriek 2014).

In de watercyclus liggen veel kansen, zoals de productie van biogas, terugwinning van grondstoffen zoals fosfaat, metalen of cellulose, gebruik van organische stoffen als basis voor de 'biobased economy' zoals de productie van eiwit of bioplastics, het teruggeven van nutriënten aan de natuur, terugwinning en opslag van energie in de vorm van warmte. Het van de riolering afkoppelen van hemelwater leidt op rwzi's tot minder water met eenzelfde vracht aan stoffen. Dit maakt het terugwinnen van stoffen ('resource recovery') gemakkelijker en goedkoper, wat bijdraagt aan de (financiële) haalbaarheid.

De productie van energie past binnen de meerjarenaafspraken energie-efficiency Waterschappen: in 2008 is door de gezamenlijke waterschappen afgesproken om in 2030 tenminste 40% van hun energie zelf op te wekken op een duurzame manier (MJA-3 2008). Recent is door de Unie van Waterschappen een Energieakkoord gesloten. Eén van de doelstellingen hierin is de inzet van 14% duurzame energie in 2020. Biogas is nu de belangrijkste bron voor het opwekken van duurzame energie door Waterschappen.

1.3 Doelstelling en onderzoeksopzet

Het doel van het onderzoek is het in kaart brengen van energie en grondstoffen die omgaan in de regio Amsterdam gaan en die potentieel geschikt zijn voor hergebruik. Ook is geïventariseerd welke methoden en technieken geschikt zijn voor (centrale) inzameling, behandeling en transformatie tot producten hoger in de waardepiramide (Figuur 4). Daarbij is onderscheid gemaakt in verwerkingstechnieken die direct toepasbaar zijn (en vaak al in praktijk toegepast worden voor deze stofstroom) en technologieën die nog niet voor deze toepassing in gebruik zijn, dan wel zich nog in de onderzoeksfase bevinden. Het onderzoek is specifiek gericht op stofstromen uit de watercyclus en aanpalende werkvelden en richt zich op energie (biomassa) en grondstoffen als nutriënten, cellulose en metalen waaronder de zeldzame aardmetalen.

In het onderzoek is onderscheid gemaakt in organische reststromen en overige (anorganische) stofstromen. Om vrachten op jaarbasis zo goed als mogelijk te kwantificeren is gebruik gemaakt van meetwaarden van Waternet, data uit (nationale) bronnen en extrapolatie.

Door combinatie van de kwantitatieve data, de locaties waar deze waardevolle en her te gebruiken rest(afval)stoffen en -stromen vrijkomen en technologieën ontstaan mogelijke verwerkingsroutes. Aangeduid is waar in de keten (centraal of decentraal) de behandeling en winning optimaal geïmplementeerd kan worden om hergebruik te bevorderen. Het onderzoek bouwt hierbij voort op overzichten (Tabel 1) die reeds voor de regio beschikbaar zijn (o.a. Van der Hoek et al. 2013 & Circle-economy).

Tenslotte vindt een kwalitatieve afweging plaats welke verwerkingsroute de voorkeur heeft op basis van wat realistisch realiseerbaar is.

TABEL 1 THE FLOW OF MATERIALS AND RESOURCES THROUGH THE AMSTERDAM AREA (VAN DER HOEK ET AL. 2013)

Materials	Flow
Phosphate	95,000 ton/year
Food	500,000 ton/year
Water	44 million m ³ /year
Energy	97,0000 Mtoe/year
Material imports	90 million ton/year

1.4 Kentallen

In het onderzoek is gebruik gemaakt van algemene kentallen en kentallen met betrekking tot de reststromen van de Waternet organisatie.

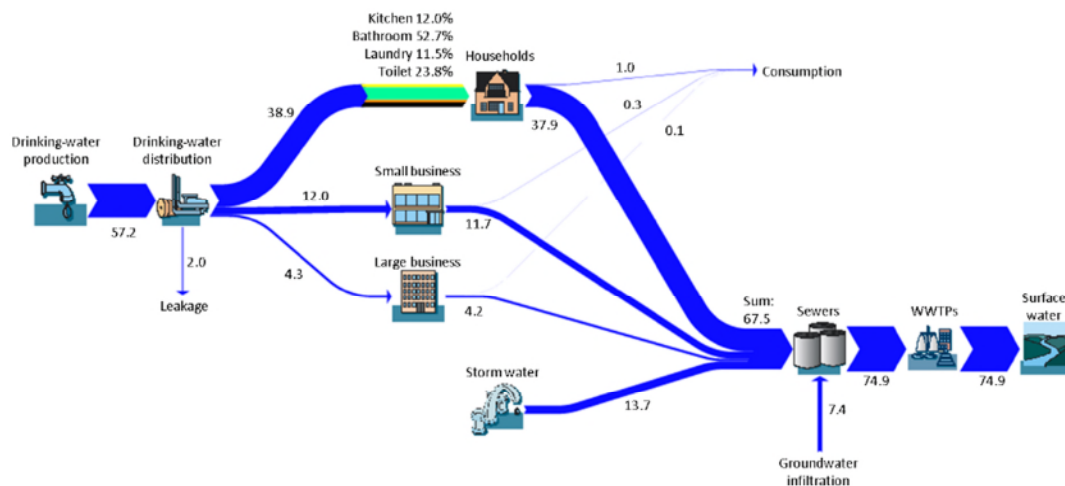
1.4.1 Gehanteerde algemene kentallen

Voor het bepalen van vrachten in het geval directe meetgegevens voor Amsterdam ontbreken, is in dit onderzoek gebruik gemaakt van extrapolatie. Hierbij zijn de onderstaande kentallen gehanteerd:

- aantal inwoners Amsterdam: 767.457 (CBS 2011).
- gemiddelde drinkwaterverbruik per persoon per dag: 120 l (Leefomgeving 2014).
- Geografische indeling: verschillende bronnen hanteren niet eenzelfde geografische indeling voor de regio Amsterdam. Waar bekend is in dit onderzoek de gebruikte geografische indeling vermeld.

1.4.2 Kentallen stofstromen Waternet

Het door Waternet geproduceerde drinkwater wordt gebruikt en uiteindelijk in het oppervlaktewater geloosd. Dit is schematisch weergegeven en voorzien van debietgegevens in Figuur 5.

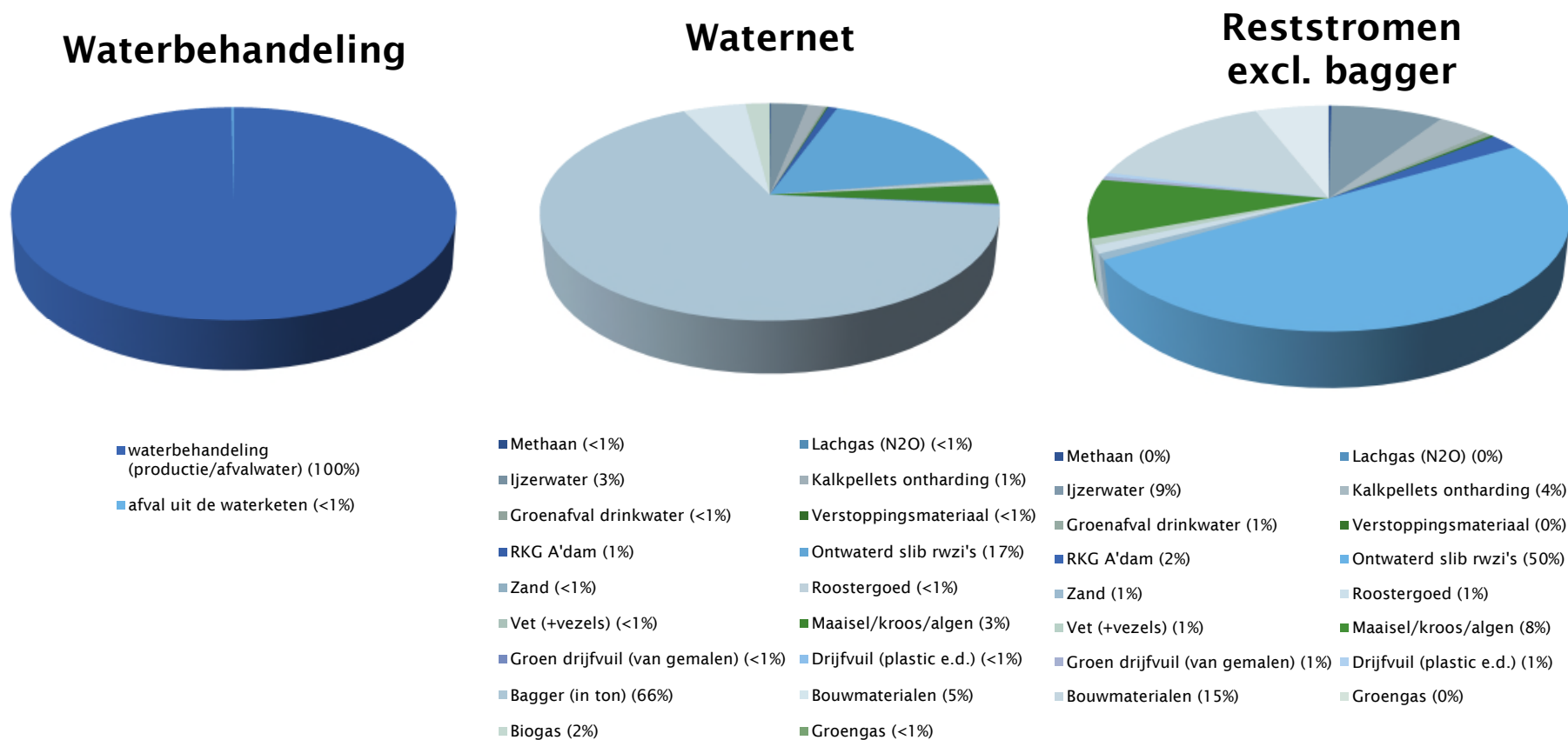


FIGUUR 5: FLOWCHART OF AMSTERDAM'S WATER CHAIN (VALUES IN MILLIONS M³/YEAR) (FOOIJ 2014)

Bij de productie van drinkwater en de inzameling en behandeling van het afvalwater door Waternet ontstaan afvalstoffen. Circa 0,2% van de tonnage betreft afval(rest)stromen uit de waterketen in beheer bij Waternet (linker diagram Figuur 6); meer dan 99% van de stofstromen betreft de primaire producten drinkwater en gezuiverd afvalwater (effluent) (Waternet 2014).

Door nader in te zoomen op de stroom reststoffen vanuit de Waternet organisatie als geheel blijkt bagger twee derde (66%) van de afvalstroom uitgedrukt in tonnen te vertegenwoordigen. Binnen de reststromen, exclusief bagger, vormt het ontwaterde slib van alle rwzi's in beheer van Waternet de grootste stroom (50% van de tonnage). Onderhavig onderzoek focust op de reststromen, exclusief bagger, zoals weergegeven in het rechter diagram in Figuur 6.

De verwerking van reststromen kost Waternet circa € 5.000.000,- per jaar en vertegenwoordigt in totaliteit circa 43.000 ton CO₂ (Waternet 2015). Het valoriseren van deze reststromen zorgt niet alleen voor een kostenbesparing, maar kan additionele voordelen opleveren.



FIGUUR 6: AANDEEL RESTSTROMEN WATERNET

1.5 Leeswijzer

De organische stofstromen zijn onderscheiden, gekarakteriseerd en gekwantificeerd in hoofdstuk 2. Iedere paragraaf start met een samenvattende kwantificatie van desbetreffende stofstroom, eveneens weergegeven als Sankey diagram. Aansluitend is een onderbouwing gegeven van de geïdentificeerde hoeveelheden. In hoofdstuk 3 is vervolgens beschreven op welke wijze de organische stofstroom verwerkt kan worden tot energie en/of grondstof. In hoofdstuk 4 zijn mogelijk interessante en (potentieel) in de regio Amsterdam beschikbare stofstromen met een meer anorganische samenstelling behandeld. Elke paragraaf over een specifieke anorganische stofstroom begint met een samenvattende kwantificatie van desbetreffende stofstroom, gevolgd door een overzicht van interessante verwerkingsmethoden, -technieken en producten en afgerond met een paragraaf afwegingen. In de afwegingen is beschouwd welke conclusies getrokken kunnen worden uit de gevonden informatie. In hoofdstuk 5 is een aantal aspecten over warmte uit het riool – riothermie – op een rij gezet voor Amsterdam. Het rapport is afgesloten met een hoofdstuk beschouwingen en een integrale conclusie en discussie.

2 Organische stofstromen

2.1 Inleiding

Er is een breed scala aan organische reststromen. Vaak wordt hiermee biomassa bedoeld voor niet-voedseltoepassingen. Door Nijman et al. (2010) wordt onder biomassa verstaan: de biologisch afbreekbare fractie van afvalstoffen, reststromen, non food celluloseachtig materiaal en ligno-cellulose (bestanddeel hout) en speciaal gekweekte biomassa (bijvoorbeeld algen).

Bij Waternet komt biomassa als rest-/afvalstroom vrij bij de sectoren drinkwater (o.a. houtchips), afvalwater (m.n. zuiveringsslib) en watersysteem (o.a. drijfvuil, water- en oeverplanten).

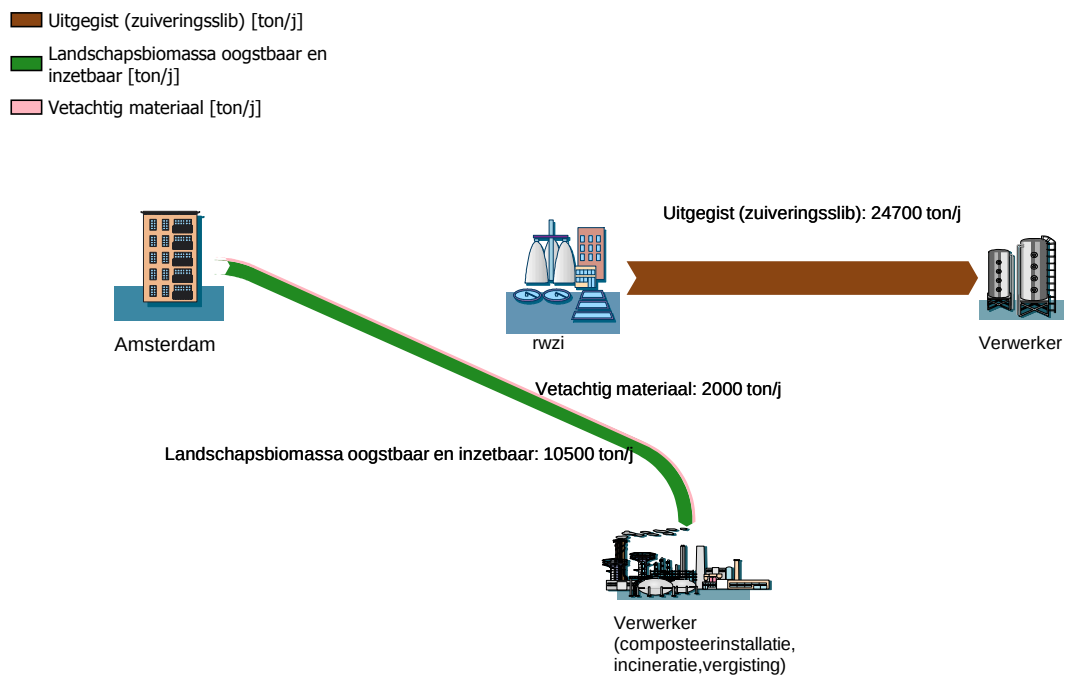
In dit hoofdstuk zijn diverse organische (biomassa) stromen onderscheiden, gekarakteriseerd en zo goed mogelijk gekwantificeerd. Hierbij ligt de focus op beschikbare jaarvruchten. Mogelijke kwaliteitsverschillen, seizoensinvloeden e.d. vallen buiten de scope van dit onderzoek en zijn niet expliciet onderzocht.

Achtereenvolgend worden behandeld:

- Landschapsbiomassa en zuiveringsslib
- Groente-/ fruit- (en tuin)afval
- Reststromen uitgedrukt in CZV (chemisch zuurstof verbruik)

2.2 Landschapsbiomassa en zuiveringsslib

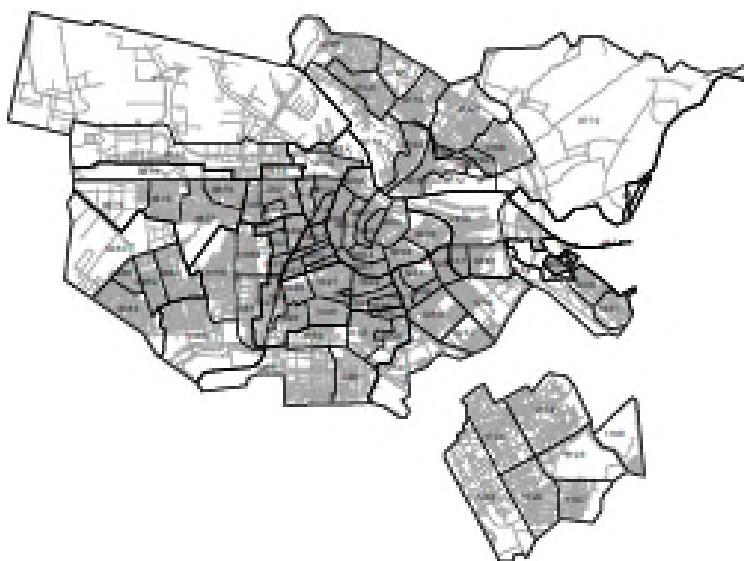
Samengevat In totaal komt er jaarlijks circa 12.000 ton droge stof aan landschapsbiomassa vrij in Amsterdam. Naar verwachting is daarvan 10.500 ton oogstbaar en inzetbaar voor bijvoorbeeld de opwekking van energie. Bij Waternet is daarnaast 24.700 ton droge stof uitgestuurd zuiveringsslib en 2.000 ton aan vetachtig materiaal voorhanden. Totaal aan deze biomassastromen is dus circa 35.700 ton per jaar inzetbaar.



FIGUUR 7: SANKEY DIAGRAM LANDSCHAPSBIOMASSA EN ZUIVERINGSSLIB AMSTERDAM (KWR)

In een onderzoek van Alterra (2008) is er voor Nederland onderzocht hoeveel landschapsbiomassa er afgevoerd wordt vanuit landschap, opgesplitst naar oorsprong en hoeveel daarvan oogstbaar is. Vervolgens zijn deze gegevens voor Nederland vertaald naar een realistische situatie van Amsterdam. Daarvoor zijn de verschillende biomassastromen opgedeeld in verschillende soorten gebieden (terreinen) waarvan het geoogst wordt (Tabel 2).

Op deze manier is rekening gehouden met het feit dat het bebouwde oppervlakte in Amsterdam vele malen groter is dan het gemiddelde van Nederland, en het agrarische oppervlak juist (veel) kleiner. Als geografische grens van de Gemeente Amsterdam is voor deze berekening aangehouden de postcode indeling 0000 tot en met 1491 zoals weergegeven in Figuur 8 (CBS 2011).



FIGUUR 8: POSTCODE GEBIEDEN AMSTERDAM (CBS 2011)

TABEL 2 BODEMGEBRUIK VAN AMSTERDAM IN VERGELIJKING MET NEDERLAND (CBS 2011)

Terrein	Amsterdam (ha)	Nederland (ha)
Verkeersterrein	1.367	117.149
Bebouwd terrein	7.875	344.874
Sem-bebouw terrein	1.512	51.391
Recreatie terrein	2.536	97.659
Agrarisch terrein	2.822	2.275.827
Bos en open natuurlijk terrein	463	485.003
Totaal bodemgebruik (ha)*	16.575	3.371.903

* Dit betreft landoppervlak exclusief binnenwateren en buitenwateren

Voor Tabel 3 is er een voorbeeld berekening gemaakt om de verhoudingen weer te geven en wat wel en niet is meegenomen in de biomassa berekening.

Voorbeeld berekening:

In Tabel 3 zijn de solitaire bomen bijvoorbeeld ingedeeld in het terrein bebouwd. De verhouding tussen het bebouwde terrein in Amsterdam en Nederland, exclusief water, is ongeveer (7.875/344.874 ha (CBS 2011)) 0,023. Door deze verhouding te vermenigvuldigen met de productie aan spilhout, takhout, overig en gras, heide van solitaire bomen in Nederland kan de totale productie in Amsterdam worden bepaald (129 ton droge stof per jaar). Van dit totaal is ongeveer 80% (4.552/5.652) oogstbaar wat betekent dat er circa 104 ton per jaar beschikbaar is.

TABEL 3 BIOMASSA DAT VOORKOMT UIT HET NEDERLANDSE LANDSCHAP, MET UITZONDERING VAN BOSSEN EN NATUURGEBIEDEN (ALTERRA 2008). MET HET BODEMGEBRUIK VAN AMSTERDAM OMGEREKEND NAAR DE HOEVEELHEID BIOMASSA DIE VRIJKOMT (EXCLUSIEF WATER)

	Nederland						Amsterdam						
	Productie (ton ds per jaar)			Droge stof (ton)			Indeling		Productie (ton ds per jaar)			Droge stof (ton)	
	spilhout	takhout, overig	gras, heide	totaal	Oogst- baar	Energiew aarde (PJ)	Eenheid		spilhout	takhout, overig	gras, heide	totaal	Oogst- baar
Solitaire bomen	4.558	1.094		5.652	4.552	0	bebouwd	5881 st	104	25	0	129	104
Loofbosjes (<0,5 ha)	131.224	31.494		162.718	130.174	2	recreatie	804 ha	3.408	818	0	4.225	3.380
Houtwallen	9.906	8.090		17.996	14.397	0	recreatie	101 km	257	210	0	467	374
Heggen (geschoren)		536		536	429	0	bebouwd	29 km	0	12	0	12	10
Heggen (losse hagen)		15.048		15.048	12.039	0	bebouwd	131 km	0	344	0	344	275
Singels	9.102	11.893		20.995	16.796	0	recreatie	149 km	236	309	0	545	436
Bomenrijen	62.489	17.977		80.466	64.389	1	bebouwd	967 km	1.427	410	0	1.837	1.470
Hoogstamboomgaarden	2.348	563		2.911	2.911	0	agraris	4 ha	3	1	0	4	4
Grienden (<0,5 ha)		176		176	141	0	recreatie	0,6 ha	0	5	0	5	4
Eendenkooien	1.062	2.055		3.117	2.494	0	recreatie	3,9 st	28	53	0	81	65
Heideveldjes (<0,5 ha)			1.872	1.872	1.872	0	recreatie	29 ha	0	0	49	49	49
Draslanden			6.666	6.666	6.666	0	agraris	4 ha	0	0	8	8	8
Wegbermen			225.000	225.000	225.000	4	verkeer	700 ha	0	0	2.626	2.626	2.626
Boerenerven	43.125	10.350		53.475	53.475	1	agraris	113 st	53	13	0	66	66
Erven van burgers	60.205	14.449		74.654	74.654	1	bebouwd	3883 st	1.375	330	0	1.705	1.705
Totaal	324.019	113.725	233.538	671.282	609.989	10			6.891	2.529	2.682	12.103	10.575

Uit de extrapolatie van biomassa gegevens die in geheel Nederland vrijkomen naar Amsterdam (Tabel 3) blijkt dat er 12.103 ton droge stof aan landschapsbiomassa in Amsterdam vrijkomt uit de postcodegebieden 0000 tot en met 1491, waarvan 10.575 ton daadwerkelijk oogstbaar is. Uitgesplitst naar soort biomassa komt in Amsterdam (postcode 0000-1491) respectievelijk 6.891, 2.592 en 2.682 ton droge stof per jaar vrij aan spilhout, takhout en niet houtig (gras en heide).

Opmerking Indien naast bovenstaande postcodegebieden ook bijvoorbeeld de waterleidingduinen in beheer bij Waternet, aanpalende havengebieden e.d. meegerekend zouden worden, dan zou de hoeveelheid biomassa die vrijkomt in de regio Amsterdam significant toenemen.

2.2.1 'Water-landschapsbiomassa'

Naast landschapsbiomassa afkomstig van het land, kan ook landschapsbiomassa geoogst worden uit het water. Bij o.a. gemalen vindt ophoping plaats van 'groen drijfvuil' (organisch materiaal – riet e.d.). Per jaar wordt hiervan door Waternet 1.100 ton verzameld (Klaversma & Mol 2013). Uitgaande van een droge stof percentage van 16,4% (Tabel 4) levert dit een bijdrage van circa 180 ton DS aan water-landschapsbiomassa.

Bij het beheren van oppervlaktewater ten behoeve van waterveiligheid en waterkwaliteitsbeheer worden ook waterplanten verwijderd. Dit betreft zowel inheemse soorten - als bijvoorbeeld riet - die de doorgang of kwaliteit belemmeren als ook bepaalde 'exoten' die specifiek bestreden worden. Voorbeelden van deze laatste categorie zijn de grote waternavel, parelvederkruid, cabomba en waterteunisbloem.

Om ervoor te zorgen dat het water voldoende door de waterlopen kan stromen, maait een waterschap haar (primaire) waterlopen jaarlijks één tot meerdere keren. Dit slootmaaisel wordt veelal op de slootkant gelegd om te drogen en 'weg te rotten'. Bij deze biologische omzetting komen broeikasgassen vrij in de atmosfeer. Om de volgende redenen vindt geen inzameling plaats (Oogstbaar landschap 2011):

- er is geen 'markt' voor slootmaaisel.
- er is een verschil in periode van maaien en mogelijk gebruik.
- het betreft kleine vrachten per locatie.
- er kan sprake zijn van verontreiniging door (vuil) bodemslib, onkruiden en/of zwerfafval als plastics en blikjes.
- door het ontbreken van geschikte machines.
- omdat slootmaaisel, anders dan afkomstig van natuurterreinen, aangemerkt is als afval.

Hoe groot de bron van organische stof afkomstig van slootmaaisel is, is voor de regio Amsterdam nog niet goed bekend. In opdracht van Waternet doet Ecofys hier onderzoek naar (Nijman 2015). Uit het nog lopende onderzoek door Ecofys zijn al wel resultaten beschikbaar van analyses van waterplanten uit het beheersgebied van Waternet (Tabel 4).

TABEL 4 ANALYSES WATERPLANTEN (NIJMAN 2015)

Categorie	Vocht (%)	Droge stof (%)	Anorganisch (%)	Ruw eiwit (%)	Ruw vezel (%)	Overig organisch
Onderwater planten	87,2	12,8	3,4	0,2	2,5	6,7
Oever planten	80,6	19,4	2,9	0,5	3,5	13
Kruidachtige planten	82,9	17,1	2,3	0,4	3,2	11,2
<i>Gemiddeld</i>	<i>83,6</i>	<i>16,43</i>	<i>28,7</i>	<i>3,6</i>	<i>3,1</i>	<i>10,3</i>

Hieronder is beoogd de jaarvrucht voor slootmaaisel in de regio Amsterdam bij benadering te bepalen.

Van de door Waternet verzamelde exoten als grote waternavel zijn geen gegevens voorhanden. Bij Waterschap Aa en Maas is in het voorjaar van 2014 (het seizoen waarin deze plant optimaal groeit) circa 2.000 ton geoogst (Kampschreur 2014a). Uitgaande van een droge stof percentage voor onderwaterplanten van 12,8% (Tabel 4) levert dit 256 ton droge biomassa op voor het beheersgebied van Waterschap Aa en Maas. Door op basis van de ratio van het oppervlakte van het beheergebied van het Hoogheemraadschap Amstel Gooi en Vecht en het beheergebied van Waterschap Aa en Maas te rekenen, is voor Waternet een indicatieve mogelijke opbrengst van circa 110 ton droge stof aan biomassa afkomstig van exoten bepaald. Naast het verwijderen van exoten in het voorjaar, wordt door Waternet ook op andere momenten in het jaar gemaaid, bijvoorbeeld om winterriet te verwijderen. Hiervan zijn geen hoeveelheden bekend. De verwachte oogst aan water-landschapsbiomassa kan dus (sterk) afwijken voor de regio Amsterdam van bovengenoemde hoeveelheden.

Dit levert aan landschapsbiomassa een indicatief totaal op van 12.393 (12.103+180+ >110) ton droge stof, waarvan gemiddeld 10.865 (10.575+180+ >110) ton droge stof oogstbaar is.

Opmerking Uit een studie van AEB blijkt dat aan landschapsbiomassa gebaseerd op hoeveelheden takhout, snippers, waterplanten, bladafval, maaisel en stamhout in Amsterdam meer dan 20.000 m³ en > 900 ton potentieel beschikbaar is (Agema 2014). Dit wijkt af van bovenstaande vrachten.

Naast bovenstaande water – en landschapsbiomassa zijn ook de volgende 2 biomassa categorieën beschikbaar in Amsterdam bij Waternet:

- Zuiveringsslib
- Vetachtig materiaal

2.2.2 Zuiveringsslib

Al het slib geproduceerd op de rwzi's in beheer bij Waternet wordt samengebracht en vergist in de Centrale slibverwerkingsinstallatie (CSI) op rwzi Amsterdam-West. In Tabel 5 staan de hoeveelheden slib die de vergisters op Amsterdam-West in 2012 en 2013 zijn in en uit gegaan (gemiddeld 24.700 ton droge stof per jaar), inclusief de hoeveelheid geproduceerd biogas.

TABEL 5 GEGEVENS VAN DE VERGISTING

Amsterdam-West	2012	2013
Vergisting ingaand (ton droge stof/jaar)	37.953	37.745
Uitgegist slib (ton droge stof/jaar)	23.189	26.283
Biogas productie (Nm ³ /jaar)	10.493.852	10.939.744

2.2.3 Vetachtig materiaal

Volgens Barendregt & Nijman (2009) wordt jaarlijks in Amsterdam ca. 520 ton verstoppingsmateriaal uit riolen en rioolgemalen verwijderd en circa 970 ton uit de drijfvaagputten op de rwzi-West. Voorheen werd door Waternet ook nog 450 ton uit vetafscijders van horecagelegenheden (ook wel putvet genoemd) afgevoerd. Deze laatste stroom wordt momenteel niet meer door Waternet ingezameld, maar door gespecialiseerde inzamelaars van vetachtige materialen uit horecagelegenheden e.d. werkzaam in Amsterdam. Het is onbekend hoeveel vetachtig materiaal zij gezamenlijk inzamelen, maar één van deze bedrijven, het bedrijf Hergebruikfrituurvet BV zamelt circa 200 ton/week in (10.400 ton/jaar).

In totaliteit wordt dus jaarlijks meer dan 12.000 ton vetachtig materialen door Waternet en anderen ingezameld en bij diverse verwerkingsbedrijven afgezet. Het ingezamelde materiaal heeft een groot aandeel aan organische componenten, waarvan een aanzienlijk deel vet is (Barendregt & Nijman 2009). Het vetachtige materiaal wordt onder meer omgezet in biodiesel (Greenmills), elektriciteit en warmte (Orgaworld).

Indien Waternet de twee eigen afvalstromen van vetachtig materiaal (520 ton en 970 ton) zou vergisten, wordt jaarlijks circa 268.000 Nm³ methaan extra geproduceerd. Dit heeft een verbrandingswaarde van 9,6 miljoen MJ/jaar en meer dan 2,6 MWh aan energie (Tabel 6), genoeg voor meer dan 800 huishoudens (naar Barendregt & Nijman 2009).

TABEL 6 OVERZICHT ENERGIE/OPBRENGST BIOMASSASTROMEN NA 128 DAGEN VERGISTING (NAAR BARENDREGT & NIJMAN 2009)

Biomassa	Massa (ton/jaar)	Normaolvolume (m ³ (n) CH ₄ /jaar)	Verbrandings-warmte (MJ/Jaar)	Arbeid (kWh)	Elektriciteit voorziening huishoudens (aantal/jaar)
Verstoppingsmateriaal riool en rioolgemalen	520	79652	2851536	792093	245
Drijfvuillaag RWZI-West	972	188299	6741110	1872530	580

2.2.4 Verwerkingsroutes

Landschapsbiomassa, waaronder water-landschapsbiomassa, zuiveringsslib en ingezamelde vetachtige materialen hebben een grotendeels organische oorsprong en vertonen overeenkomsten met andere onderscheiden organische reststromen, zoals GFT. Mogelijke interessante verwerkingsroutes voor organische reststromen en technologieën worden behandeld in hoofdstuk 3.



2.3 Groente-, fruit- (en tuin)afval

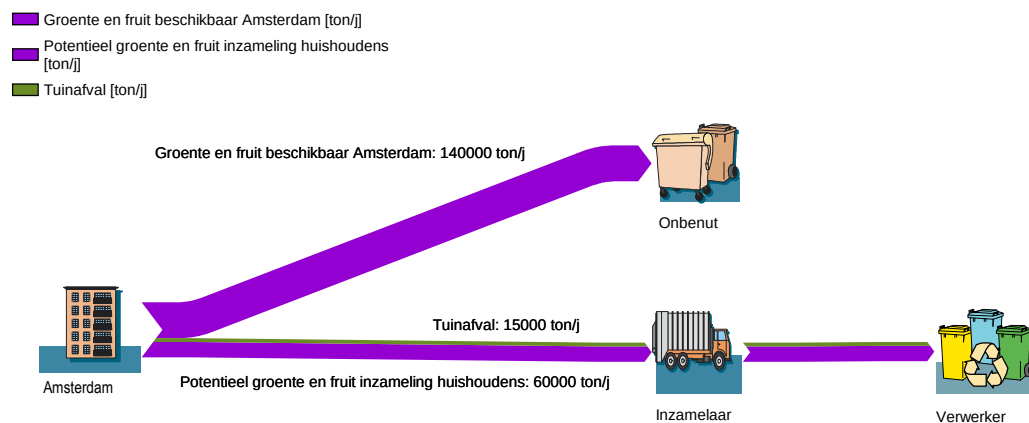
Samengevat Jaarlijks komt in de regio Amsterdam circa 140.000 ton groente en fruit afval vrij, waarvan circa 60.000 ton potentieel beschikbaar is. Daarnaast kan circa 15.000 ton tuinafval beschikbaar komen.

2.3.1 Groente- en fruitafval

Restafval van groente en fruit komt op de volgende plaatsen vrij:

1. Bij consumenten/particulieren.
2. Bij horeca, ziekenhuizen e.d.
3. Bij de (tussen)handel zoals (super)markten.
4. Bij op- en overslag bedrijven van groente en fruit.
5. Bij groente- en fruitverwerkende bedrijven.

Niet van al deze bronnen zijn afzonderlijk gegevens beschikbaar, maar er zijn wel data voor te generen.



FIGUUR 9: SANKEY DIAGRAM GROENTE- EN FRUITAFVAL IN AMSTERDAM

Ad 1. Consumenten/particulieren

Door te veel in te kopen eten consumenten ongeveer 10% van het voedsel dat zij inkopen niet op. Dit is ongeveer 40 kg voedsel per persoon per jaar (circa € 145,-/jaar) (Wageningenworld 2012). Andere studies gaan uit van de volgende min of meer vergelijkbare hoeveelheden groente en fruit afval:

- 73 kg per inwoner in Nederland aan voedselverlies is bepaald op basis van sorteeraanlyse en enquêtes. Hiervan is circa 44 kg vermijdbaar (eetbaar en dus verspilling, 60%) en circa 29 kilogram onvermijdbaar (oneetbaar, zoals schillen en botten, 40%) (Steenhuisen 2010 & Westerhoven 2013).
- 50 kilo voedsel per persoon per jaar verdwijnt jaarlijks ongebruikt in de afvalbak. Dit komt overeen met 137 gram voedsel per persoon per dag. (Milieucentraal 2014 & Wageningenworld 2014).
- In onderzoeken gericht op de lozing van GF(T) via het riool wordt uitgegaan van 225 gram GF(T) per persoon/per dag (=circa 80 kg/jaar), dan wel 150 (75 – 215) gram per persoon per dag (circa 55 kg/jaar) (Zandvoort 2012a). In ditzelfde onderzoek wordt gemeld dat het afval in het stadsdeel centrum van Amsterdam voor 30,8% bestaat uit GF en 12,8% tuinafval is (totaal 43,6%). Hieruit zou een GF-vracht per persoon per jaar volgen van zo'n 40 kg/jaar.

Een getal van 40 a 50 kg per Nederlander kan worden aangehouden voor (vermijdbare) voedselverspilling. Als daarnaast ook de verspilling van onvermijdbaar/oneetbaar voedsel meegenomen wordt - circa 29 kg per persoon (Westerhoven 2013), dan bedraagt de totale voedselverspilling dus zo'n 75 kg per Nederlander per jaar.

Ad 1 t/m 5

Uit het onderzoek naar voedselverspilling (Wageningenworld 2012) blijkt dat de voedselverspilling door consumenten circa 34% betreft gemiddeld voor Europa en dat de overige 66% van de tonnage verloren gaat bij de productie, oogst, verwerking en handel.

Voedselverspilling:

- Productie (boer): 36%
- Transport en opslag: 11%
- Verwerking (industrie): 13%
- Handel (retail): 7%
- Consument: 34%

Als het gemiddelde voor Europa ook voor Nederland en ook Amsterdam wordt aangehouden, dan bedraagt de potentiële hoeveelheid biomassa afkomstig van ongegeten voedsel uit de gehele voedselketen van productie en verwerking ongeveer 220 kg per inwoner van Amsterdam per jaar.



FIGUUR 10: VOEDSELVERSPLLING (WAGENINGENWORLD 2012)

Uitgaande van 767.457 inwoners in Amsterdam (CBS 2011) is er dus circa 58.000 ton (75 kg per persoon) ongegeten voedsel/voedselresten beschikbaar als biomassa. Afkomstig uit de gehele voedselketen is er een potentiële hoeveelheid biomassa beschikbaar van 170.000 ton per jaar (220 kg per persoon).

In werkelijkheid zal de hoeveelheid beschikbare biomassa afkomstig uit de gehele voedselketen vermoedelijk kleiner zijn, omdat lang niet al het voedsel van de inwoners van Amsterdam verbouwd wordt in de eigen regio en juist de agrarische productie een significante 'voedselverspillingspost' heeft van 36% (zie hierboven). Mogelijk geldt voor de andere onderdelen van de voedselketen dat Amsterdam wel een evenredig (of voor bijvoorbeeld transport en opslag zelfs een groter) aandeel heeft. Hieruit volgt een potentiële hoeveelheid biomassa aan ongegeten voedsel beschikbaar in Amsterdam van 108.000 ton per jaar (220 kg per persoon x 64%).

Uitgaande van bovenstaande cijfers is potentieel aan biomassa uit de gehele voedselketen in Amsterdam 108.000 a 170.000 ton per jaar beschikbaar (circa 140.000 ton/jaar).

Opmerking Overigens hanteert Paul Telkamp in (Terkamp 2014) voor Nederland circa 11 kg GF afval per persoon per jaar en circa 4 kg tuinafval. Voor Amsterdam zou dit 8.442 ton GF en 3.069 ton tuinafval betekenen. Dit is een aanzienlijk kleinere opbrengst, zelfs als rekening wordt gehouden met omzettingen in de riolering en dat een deel van het GF-afval niet ingezameld zal kunnen worden via het riool.

2.3.2 Tuinafval

Naast groente en fruitafval als bron voor biomassa, kan ook tuinafval ingezet worden. In de stad Amsterdam vindt (vrijwel) geen gescheiden inzameling plaats van groente-, fruit- en

tuinafval (GFT) en ook in de regio Amsterdam is gescheiden inzameling (heel) beperkt. Maar hoeveel tuinafval is mogelijk beschikbaar?

- In het eerder aangehaalde onderzoek naar lozing van GFT via het riool (Zandvoort 2012a) wordt gemeld dat het afval in het stadsdeel centrum van Amsterdam voor 12,8% tuinafval is (totaal GFT is 43,6%). Hieruit volgt een tuinafval-vracht per persoon van circa 17 kg/jaar. Dit zou voor Amsterdam zo'n 13.000 ton aan tuinafval betekenen.
- In de studie 'Factsheet Sluiten kringloop organisch afval'(WUR) wordt 18.000 ton tuinafval gehanteerd als aanwezig in het Amsterdamse huisvuil.

Uitgaande van bovenstaande cijfers is potentieel aan tuinafval in Amsterdam 13.000 a 18.000 ton per jaar beschikbaar (circa 15.000 ton/jaar).

2.3.3 Bij de afvalverwerking

In Amsterdam vindt geen gescheiden inzameling plaats van GF(T). Het (gemengde) huishoudelijke afval wordt door het Amsterdamse Energie Bedrijf (AEB) verwerkt door het te verbranden. In 2013 is voor de 8 (voormalige) stadsdelen van de gemeente Amsterdam en Afvalservice West (een zelfstandige stichting die de inzameling van huishoudelijk afval verzorgt in Amsterdam West), 232.330 ton aan huishoudelijk afval verwerkt. Met een gemiddeld aandeel GFT van 36,7% was er potentieel bij AEB 90.800 ton GFT beschikbaar over 2013 (Agema 2014b). Dit is minder dan verwacht op basis van de berekeningen uit paragraaf 2.3.1 en 2.3.2.

2.3.4 Inzameling GFT

Het wekelijks gescheiden inzamelen van GFT-afval is een wettelijke verplichting opgenomen in de Wet milieubeheer (Wm). Vooral om praktische redenen vindt in Amsterdam geen gescheiden inzameling van GFT plaats. De potentie is hierboven in beeld gebracht, maar hierbij is nog geen rekening gehouden met het feit dat ook bij gescheiden inzameling niet alle GFT als zodanig gescheiden ingezameld zal worden.

Om de potentiële biomassa in de vorm van GFT-afval separaat beschikbaar te krijgen voor verwerking en nuttige toepassing, dient het GFT gescheiden ingezameld te worden of moet het GFT bij de verwerking gescheiden kunnen worden van het overige huishoudelijke afval.

Het AEB verwacht dat bij bronscheiding een aandeel van 25% aan GF(T) in te zamelen zou zijn, wat voor het grondgebied van de gemeente Amsterdam een hoeveelheid van 58.100 ton GF(T) zou opleveren (Agema 2014).

Met verschillende scheidingstechnieken is het mogelijk om GF uit de stroom van het restafval te halen (o.a. Attero). Deze scheiding leidt vermoedelijk tot een (veel) grotere vervuilingsgraad en mogelijke contaminatie met ongewenste stoffen, ten opzichte van gescheiden ingezameld GFT. Dit beperkt de verwerking en toepassingsmogelijkheden (Verstraete 2015).

Volgens de Volkskrant (Trommelen 2014) schommelt de hoeveelheid gescheiden GFT per inwoner in Nederland rond de 79 kilo. Uitgaande van 767.457 inwoners in Amsterdam is een jaarvracht GFT van circa 61.000 ton beschikbaar. Dit is net wat hoger dan de door AEB verwachte hoeveelheid, wat vermoedelijk veroorzaakt wordt door de kleinere hoeveelheid aan tuinafval in het sterk verstedelijkte Amsterdam.

Een derde methode om GFT – of meer specifiek de GF-fractie – in te zamelen is via de (afvalwater)riolering. Het organische keukenafval wordt dan met een voedselvermaler

verkleind tot deeltjes van 2-5 mm en met behulp van water getransporteerd in het riool. In een quickscan voor het stadsdeel Centrum van Amsterdam - met een gemengd rioolstelsel - is voor 2010 indicatief gerekend met 6.780 ton/jaar keukenafval (GF) (Zandvoort 2012b & Zandvoort 2015).

Omdat GF-afval relatief eenvoudig afbreekbaar is, zal een gedeelte van het keukenafval al in de riolering worden omgezet; onder andere in biogas (broeikasgas methaan). Met het influent komt dus een kleinere vracht biomassa aan op de rwzi dan de bovengenoemde. Hoe groot de invloed van het rioolstelsel is, is voor de Nederlandse situatie - en in het bijzonder Amsterdam - niet bepaald.

Waternet heeft, in samenwerking met AEB en de gemeente Amsterdam, plannen om pilotonderzoek te gaan uitvoeren naar de wenselijkheid en doelmatigheid van het toepassen van voedselrestenvermalers voor afvoer van GF via een gescheiden rioolstelsel in Amsterdam (Zandvoort 2015).

Opmerking Overigens blijkt dat de minderkosten voor de afvalstoffenverwerking mogelijk ontoereikend zijn voor de investering door de burger in een voedselrestenvermaler (Zandvoort 2012b).

2.3.5 Omgekeerd inzamelen

Om tegemoet te komen aan een aantal praktische bezwaren rondom de inzameling van GFT in Amsterdam, de GFT-vracht beschikbaar te krijgen voor nuttige toepassingen en tegelijkertijd de GFT-vracht te vergroten kan ook overwogen worden om de kansen die het concept van 'Omgekeerd inzamelen' biedt te onderzoeken. In dit systeem vooral geschikt voor laagbouw, wordt GFT, plastic verpakkingen en papier gescheiden opgehaald aan huis, terwijl de burger voor grijs restafval de deur uit moet om het weg te brengen naar een ondergrondse container in de buurt. 'Dat levert soms wel de helft meer GFT-afval op' (Trommelen 2014). Bij hoogbouw blijkt omgekeerd inzamelen geen goede kwaliteit GFT op te leveren door vervuiling met grijs restafval (Versteeg et. al. 2012).

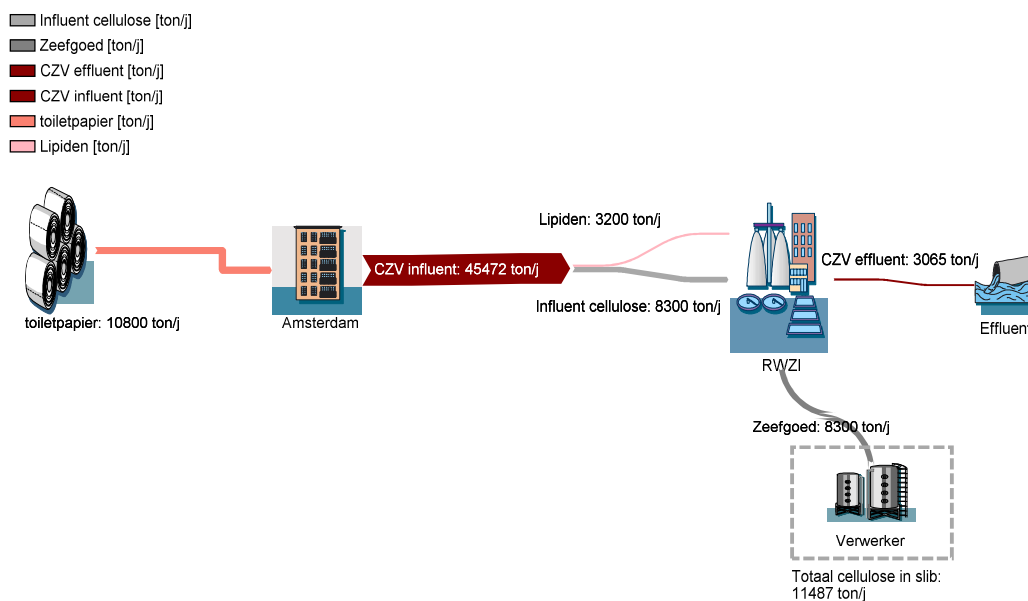
2.3.6 Verwerkingsroutes

Groente, fruit en tuinafval is een organische reststroom, waarvoor diverse verwerkingsmethoden in gebruik dan wel in onderzoek zijn, mede afhankelijk van het beoogde product. Omdat mogelijk verwerkingstechnologieën sterk overeenkomen met de opties voor het verwerken van andere organisch reststromen als bijvoorbeeld landschapsbiomassa, wordt dit voor de organische reststromen als geheel separaat behandeld in hoofdstuk 3 van dit rapport.

2.4 Reststromen uitgedrukt in CZV (chemisch zuurstof verbruik)

Samengevat Afvalwater ingezameld uit de regio Amsterdam is als influent van de rwzi's West en Westpoort samen een stofstroom - gemeten en uitgedrukt als CZV - van circa 45.500 ton CZV per jaar (Tabel 7). Na behandeling in de rwzi's West en Westpoort bevat het geloosde effluent nog 3.065 ton CZV per jaar.

Het influent CZV bestaat deels uit cellulose en lipiden welke in de Figuur 11 separaat onderscheiden zijn.



FIGUUR 11: SANKEY DIAGRAM CZV-STROMEN AMSTERDAM

TABEL 7 CZV GEGEVENS RWZI AMSTERDAM-WEST EN WESTPOORT IN 2012 (HOLTHUIJSSEN & KONING 2013A)

	Eenheid	Amsterdam-West	Westpoort	Totaal
Influent CZV	kg/jaar	32.935.812	12.535.866	45.471.678
Effluent CZV	kg/jaar	2.192.359	872.178	3.064.537

2.4.1 Cellulose

Cellulose dat in het afvalwater terecht komt, kent zijn oorsprong voornamelijk in toiletpapier. In Nederland gebruikt een gemiddelde inwoner per jaar circa 10 tot 14 kilo toiletpapier (STOWA 2010-19). Deze range komt overeen met de gevonden waarden in het rapport van Fooij (2014). Voor Amsterdam betekent dit dat op jaarbasis tussen de 7.700 en 10.700 ton toiletpapier wordt verbruikt.

Met de gegevens uit het Technisch jaarverslag afvalwater 2012 Waternet (Holthuijsen & Koning 2013a) is de totale som aan droge stof voor de verschillende stromen van de rwzi's West en Westpoort bepaald (kolom 2 Tabel 8). De totale som aan droge stof en de verwachte cellulosefractie geeft een geschatte totale vracht droge stof aan cellulose op jaarbasis per stroom. In 2012 is dan 11.487 ton droge stof aan cellulose afgevoerd via de sliblijn (onderaan laatste kolom Tabel 8).

Omdat op de rwzi's West en Westpoort geen fijnzeefinstallaties in gebruik zijn, wordt als indicatie voor de potentiële hoeveelheid af te scheiden zeefgoed (en cellulose) gerekend met 50% rendement voor zwevende stof van het influent (STOWA 2010-19). Voor 2012 resulteert dit in een potentiële afscheiding met het zeefgoed van 8.300 ton cellulose.

TABEL 8 FRACTIES VAN CELLULOSE VAN DROGE STOF GEHALTE BEPAALD IN EEN ONDERZOEK VAN WATERNET (STOWA 2010-19). DROGE STOF GEHALTES VAN RWZI'S WESTPOORT EN WEST (HOLTHUIJSEN & KONING 2013A)

	Fractie cellulose / ds	Droge stof ton/jaar	Berekende vracht cellulose ton/jaar
Influent	0,3-0,5	20.751	8.300
Zeefgoed	0,8	10.375	8.300
Primair slib	max. 0,3	14.842	4.453
Secundair slib	0,1-0,15	19.164	2.396
Uitgegist slib	~0,2	23.189	4.638
<i>Totaal sliblijn</i>			<i>11.487</i>

Opmerking De volgens bovenstaande methode bepaalde hoeveelheid cellulose afgevoerd via de sliblijn zou groter zijn dan de berekende hoeveelheid aangevoerd met het influent (Tabel 8) en ook groter zijn dan de hoeveelheid cellulose die met een fijnzeefinstallatie als zeefgoed afgescheiden zou kunnen worden. Het verbruik van toiletpapier in Amsterdam (tussen de 7.700 en 10.700 ton/jaar) bevestigt dat de bepaalde cellulose vracht afgevoerd via de sliblijn vermoedelijk te hoog is. De discrepantie is waarschijnlijk veroorzaakt doordat analyse van de fractie cellulose in de praktijk nog erg moeilijk blijkt en dat mogelijk verschillende gehanteerde analysemethoden verschillende resultaten opleveren. Een aanbeveling is dan ook het ontwikkelen van een goede analysemethode voor cellulose.

Onder meer door Chris Reijken van Waternet is in de afgelopen jaren aanvullend onderzoek verricht naar cellulose op rwzi's. Op basis van zijn expertise en inzichten is bovenstaande tabel geactualiseerd (Tabel 9) (Reijken 2015).

TABEL 9 VERWACHTE VRACHT CELLULOSE RWZI'S WEST EN WESTPOORT

	Fractie cellulose / ds	Droge stof ton/jaar	Berekende vracht cellulose ton/jaar
Influent	max. 0,3	20.751	max. 6.225
Zeefgoed	0,6 - 0,7	10.375	6.744
Primair slib	0,1 - 0,4	14.842	3.711
Secundair slib	0,01 - 0,2*	19.164	192
Uitgegist slib	0,1 - 0,05	23.189	1.739
<i>Totaal sliblijn</i>			<i>5.641</i>

* Afhankelijk of het een actief slib proces betreft met of zonder voorbezinktank. Omdat rwzi's West en Westpoort beschikken over voorbezinktanks is gerekend met 0,01.

Uitgaande van de berekeningswijze in Tabel 9, waarbij voor secundair slib een cellulose fractie van 0,01 is aangehouden (omdat de rwzi's West en Westpoort beschikken over voorbezinktanks) en voor zeefgoed een cellulose fractie van 0,6, zijn de berekende vrachten meer in lijn met de verwachtingen. De berekende vracht aan cellulose afgevoerd via de sliblijn en de hoeveelheid cellulose potentieel aanwezig in zeefgoed zijn kleiner dan wel gelijk aan de binnenkomende vracht. De berekende vrachten zijn ook meer in lijn met het verbruik van toiletpapier in Amsterdam.

Uitgaande van de te verwachten hoeveelheid af te scheiden zeefgoed op de rwzi's West en Westpoort en de fractie cellulose in zeefgoed (Tabel 9) is aan droge stof circa 6.700 ton cellulose per jaar beschikbaar voor hergebruik.

2.4.2 Lipiden

Samengevat Het huishoudelijk afvalwater op de rwzi's van Amsterdam bevat 3.200 ton/jaar aan lipiden (vetachtige stoffen).

Lipiden of lipoiden zijn vetten en vetachtige stoffen die in de biochemie een belangrijke rol spelen. Er is geen algemeen aanvaarde definitie maar meestal beschouwt men lipiden als vetachtige stoffen die onoplosbaar zijn in water maar wel oplosbaar in alcohol.

Aan de universiteit van Gent is veel onderzoek verricht naar hoe je een zo representatief mogelijk synthetisch afvalwater kunt produceren. Deze mix is gedocumenteerd in Tabel 10 (Aiyuk & Verstraete 2004). Soja olie is daarbij representatief als vet in het afvalwater met 500 mg/l. Voor afvalwater van rwzi's wordt deze stokoplossing verdund door 1,5 liter te verdunnen met 18,5 liter leidingwater (verdunningsfactor 13,33). Het influent heeft dan een CZV van 600 mg/l. Dit is in lijn met het CZV van het influent van de rwzi's West en Westpoort (Tabel 12).

Doorgaans bestaat sojaolie voor 99% uit vet (Voedingscentrum 2014). Volgens (Holthuijsen & Koning 2013a) wordt er in totaal in Amsterdam 84.582.218 m³ afvalwater per jaar verwerkt. Het vet totaal komt dan neer op 3.200 ton per jaar.

TABEL 10 REPRESENTATIEF SYNTHETISCH AFVALWATER

Component	Concentratie (mg/l)
Urea	1600
NH ₄ Cl	200
Na acetaat 3H ₂ O	2250
Peptone	300
MgHPO ₄ ·3H ₂ O	500
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	400
FeSO ₄ ·7H ₂ O	100
CaCl ₂	100
Starch	2100
Milk powder	2000
Dried yeast	900
Soy oil	500
Overall	
COD total	8000
COD solids	2500
COD particulate	5500

2.4.3 Vetzuren

In meerdere studies worden acetaat (HAc) en propionaat (HPr) als de meest voorkomende vetzuren in communaal afvalwater bestempeld. In de praktijk blijkt dat de concentratie acetaat en propionaat erg varieert.

TABEL 11 GEMETEN VETZUREN IN HET INFLUENT VAN ENKELE RWZI'S [- = NIET GEDETECTEERD] (LÓPEZ-VÁZQUEZ ET AL. 2008)

RWZI influent van	BOD (mg/l)	VFA (mg/l)	HAc (mg/l)	HPr (mg/l)
Hardenberg	308 ± 41	110	88	22
Deventer	211 ± 42	41	41	-
Katwoude	251 ± 81	102	91	11
Hoek van Holland	110 ± 39	45	39	5
Venlo	191 ± 92	91	77	-
Waarde	136 ± 57	175	93	82
Haarlem, Waarderpolder	64 ± 55	33	28	-

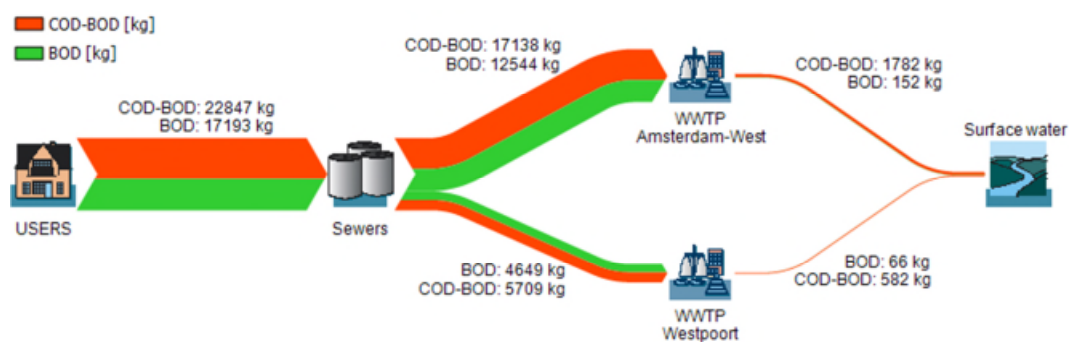
Op de TU Delft – in het laboratorium van professor Mark van Loosdrecht – wordt voor synthetisch afvalwater meestal een molaire ratio tussen acetaat en propionaat van 7:3 aangehouden, met een totaal van ongeveer 300 mg/l BZV aan vetzuren. Dit komt overeen met de gegevens voor rwzi Westpoort in het technisch jaarverslag, ervan uitgaande dat de gemeten BZV alleen uit vetzuren bestaat (zie Tabel 11). Voor rwzi Amsterdam-West geldt dit niet. Hier is de BZV concentratie lager, namelijk rond de 220 mg/l.

TABEL 12 BZV EN CZV INFLUENTGEGEVENS RWZI'S WEST EN WESTPOORT IN AMSTERDAM

rwzi	eenheid	2012	2011	2010	2009	2008
West						
jaardebiet	m3/jaar	64.006.430	61.976.047	61.085.016	56.294.315	59.214.940
CZV	kg/jaar	32.935.812	32.349.220	30.682.141	30.338.800	31.592.961
CZV	mg/l	515	522	502	539	534
BZV	kg/jaar	13.747.578	14.096.596	12.413.043	13.122.082	13.008.607
BZV	mg/l	215	227	203	233	220
CZV/BZV	-	2,4	2,3	2,5	2,3	2,5
Westpoort						
jaardebiet	m3/jaar	20.575.788	18.990.115	20.261.880	19.540.275	20.565.190
CZV	kg/jaar	12.535.866	12.610.385	14.642.705	14.020.015	14.206.729
CZV	mg/l	609	664	723	717	691
BZV	kg/jaar	5.804.028	5.567.765	6.269.167	6.510.410	6.327.677
BZV	mg/l	282	293	309	333	308
CZV/BZV	-	2,2	2,3	2,3	2,2	2,2

opmerking Bovenstaande getallen uit het technisch jaarverslag 2012 van Waternet komen niet overeen met de Sankey diagram uit Figuur 12 (figuur 2 uit het rapport van Fooij 2014).

De CZV en BZV concentraties in het effluent op de rwzi's zijn representatief gemeten waarden. In Amsterdam is het totaal aan CZV 2.582 ton en het totaal BZV (vetzuren) 219 ton per jaar in de effluentstromen (Fooij 2014). Zie Figuur 12 voor een overzicht van organische (CZV) stromen in de Amsterdamse afvalwaterketen.



FIGUUR 12: ORGANISCHE STROMEN IN AMSTERDAMS AFVALWATER (FOOIJ 2014)

3 Verwerkingsroutes organische reststromen

3.1 Inleiding

In Tabel 13 is een overzicht gegeven van de geïnventariseerde organische stromen in de regio Amsterdam.

TABEL 13 GEÏNVENTARISEERDE ORGANISCHE STOFSTROMEN (SAMENGEVAT)

Stofstroom (per jaar)	Hoeveelheid	Beschikbaar
Landschapsbiomassa	12103 ton droge stof	10.575 ton droge stof
Waterlandschapsbiomassa:		
- groen drijfvuil	180 ton droge stof	180 ton droge stof
- exoten	>110 ton droge stof	>110 ton droge stof
- overig maaisel	PM	PM
Zuiveringsslib	24.700 ton droge stof	24.700 ton droge stof
Vetachtig materiaal	12.000 ton	2.000 - 12.000 ton
Groente-fruit afval	140.000 ton	60.000 ton
Tuinafval	15.000 ton	GFT, incl. tuinafval = 75.000 à 90.800 ton
Cellulose	7.700 - 10.700 ton toiletpapier	6.700 ton droge stof cellulose
Lipiden	3.200 ton	3.200 ton
Vetzuren	219 ton	219 ton

Biomassa kan op verschillende manieren verwerkt worden tot energie en/of grondstoffen. De meeste verwerkingsroutes maken gebruik van een combinatie van onderstaande methoden, die in paragraaf 3.2 nader zijn toegelicht.

- direct hergebruik
- thermochemische verwerking
 - o raffineren
- biologische verwerking
 - o opwaarderen met lagere organismen
 - o omzetten
- scheiden
 - o extractie

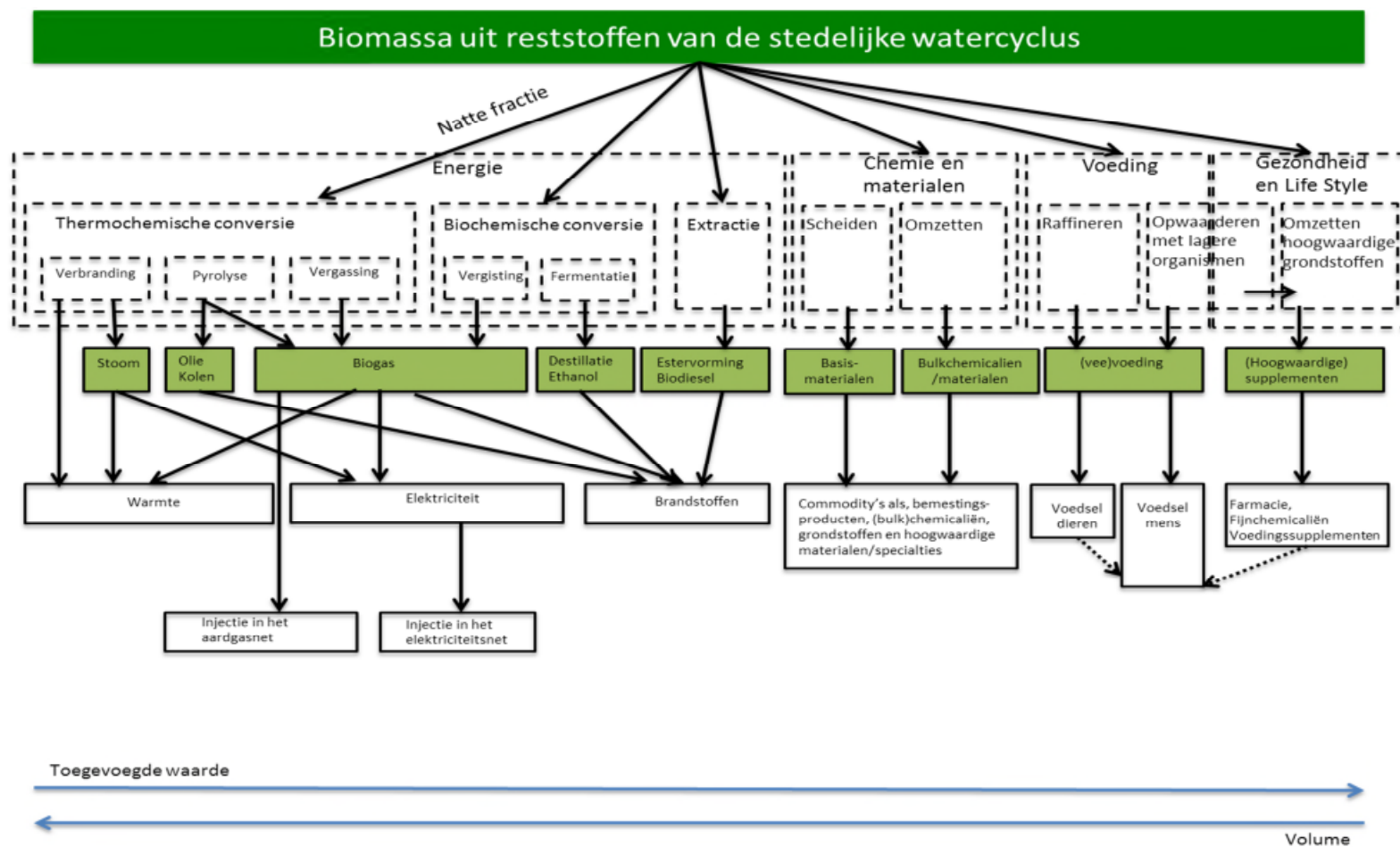
De quick-win van het nuttig en direct hergebruiken van organische reststromen is bijvoorbeeld het aan boeren aanbieden van gemaaid gras als veevoer (Waterschap Vallei en Veluwe 2014). Een andere vorm van direct hergebruik is bijvoorbeeld het gebruik van (versnipperd) snoeihout als bodemverbeteraar, meststof en bodembedekker.

Omdat droog materiaal meer waard is dan nat materiaal is het voor met name 'waterlandschapsbiomassa' interessant om het afval te splitsen in een droge en een natte fractie. Waterschap Vallei en Veluwe maakt hiervan gebruik door in haar composteringsinstallatie te Woudenberg het natte baggermateriaal langer te laten liggen en om te zetten tot grond; het droge materiaal wordt vervolgens biologisch omgezet tot compost. De verwachting is dat

hierdoor ook de verwerkingskosten dalen (Waterschap Vallei en Veluwe 2014 & biomassa-alliantie 2014). Door het drogen van de biomassa daalt het volume, waardoor bovendien de transportkosten dalen.

3.2 Verwerkingstechnologieën organische reststromen

Een schematisch overzicht van technologieën die gebruikt kunnen worden om biomassa om te zetten in producten is weergegeven in Figuur 13 (Kennisplatform Energie Conversie Parken 2014, bewerkt door KWR). In de figuur is bij de indeling van de technologieën de onderverdeling in de vier niveau's uit de waardepiramide van paragraaf 1.1 gehanteerd: energie, chemie & materialen, voeding, gezondheid & life style.

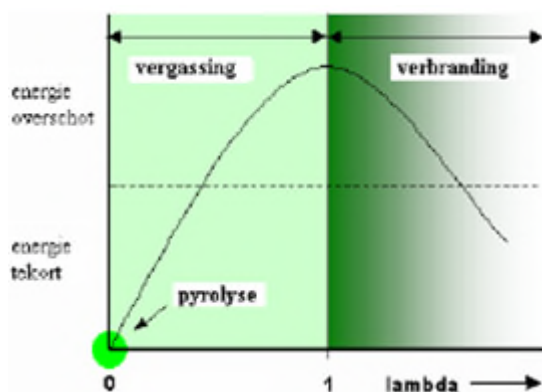


FIGUUR 13: VERWERKINGSROUTES VOOR BIOMASSA UIT RESTSTOFFEN VAN DE STEDELIJKE WATERCYCLUS (BEWERKT DOOR KWR)

3.2.1 Thermochemische verwerking

Bij thermochemische verwerking valt de biomassa uiteen als gevolg van de hoge temperatuur ($> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Dit omvat de processen (Figuur 14):

- Verbranding: hierbij wordt de warmte die vrijkomt gebruikt voor de opwekking van elektriciteit en warmte.
- Vergassing: biomassa wordt met een kleine hoeveelheid water verhit tot hoge temperaturen (meestal tussen 1300 en $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) in afwezigheid van zuurstof, zodat brandbaar synthesesgas ontstaat. Synthesegas kan na reiniging toegepast worden voor opwekking van elektriciteit of warmte, maar kan ook gebruikt worden als grondstof in de chemische industrie. Vergassing wordt in toenemende mate toegepast op organische (rest)stromen. Ook voor de (eind)verwerking van zuiveringsslib heeft deze techniek potentie. De ervaring met vergassing van zuiveringsslib is beperkt en in Nederland zelfs nog niet toegepast (Energiefabriek Nieuwegein). Door ECN wordt voorzien dat deze technologie over 5 tot 10 jaar grootschalig toepasbaar is (2014-2019) (ECN 2014). In 2016 wordt een STOWA-rapport verwacht over het superkritisch vergassen van zuiveringsslib. Het grote voordeel van superkritisch vergassen is het hoge energetische rendement.
- Pyrolyse: biomassa wordt, onder afsluiting van lucht, zo verhit dat de organische massa uit elkaar valt in kleinere bestanddelen. Hierdoor ontstaat, afhankelijk van de temperatuur, kool (biochar) of olie en komen brandbare gassen (synthesegas) vrij, die ook weer gebruikt kunnen worden voor de opwekking van elektriciteit en/of warmte.
- Torrefractie: houtige en verse (natte) biomassa wordt door zuurstofloze verhitting omgezet in bio-kolen. Bio-kolen kunnen in verbrandingsinstallaties worden gebruikt. Er zijn enkele installaties in Nederland in gebruik (Staatsbosbeheer 2015).



FIGUUR 14: VERHOUDING (LAMBDA) TUSSEN HOEVEELHEID TOEGEVOEGDE ZUURSTOF EN HOEVEELHEID ZUURSTOF DIE NODIG IS OM AL HET MATERIAAL VOLLEDIG OM TE ZETTEN IN DE VERBRANDINGSPRODUCTEN CO_2 EN H_2O (NAAR E KWADRAAT ADVIES 2012)

3.2.2 Raffineren

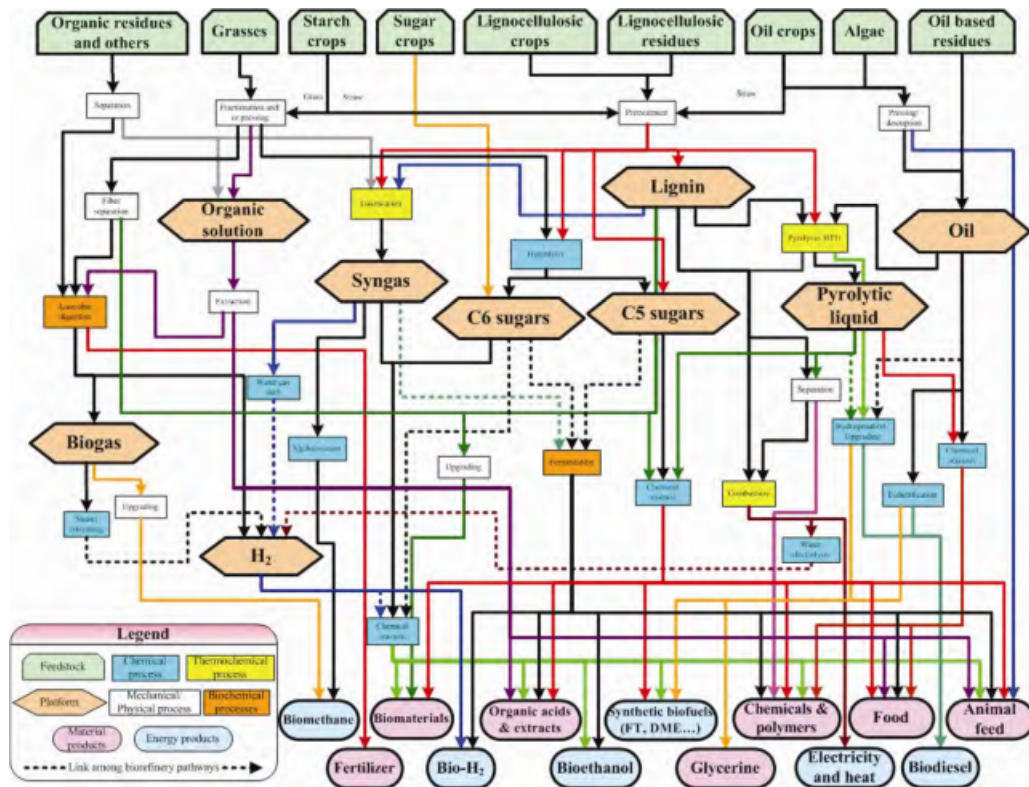
In analogie met de aardolieraffinage heeft ook bioraffinage tot doel de grondstof, in dit geval biomassa, uiteen te rafelen en de verschillende fracties verder te bewerken zodat de biomassa volledig benut kan worden (Figuur 16). Een groot verschil tussen bioraffinage en aardolieraffinage is dat veel nieuwe bioraffinageconcepten nog in ontwikkeling zijn of nog ontwikkeld moeten worden. Bioraffinage is daarmee een combinatie van het scheiden van de biomassa in fracties gevolgd door omzetting naar een vermarktbaar product. Het is dus meer een totaalconcept (Figuur 15).



FIGUUR 15: BIORAFFINAGE

In Figuur 13 is de term bioraffinage gebruikt om het ter plaatse tegelijkertijd opsplitsen en omzetten van bijvoorbeeld maaisel in veevoeder aan te duiden. Door gras te kneuzen en te vermalen en het grassap eruit te persen resteert grasvezel. Grasvezel kan na eventuele verdere bewerkingen geschikt gemaakt worden voor gebruik in bijvoorbeeld karton of als grondstof voor biomethaan. Het grassap bevat opgeloste eiwitten die gewonnen kunnen worden door verwarming, waardoor het eiwit een vaste vorm krijgt en zo kan worden afgescheiden en te gebruiken is in (dier)voeding. De resterende NPK-fractie – Kalium, Fosfor en Stikstof – kan als meststof worden hergebruikt (Platform Groene Grondstoffen 2010). Bij Waterschap Aa en Maas wordt hiernaar praktijkonderzoek gedaan. Maaisel wordt in dit onderzoek ter plaatse met een mobiele installatie geraffineerd in vezels (veevoer), eiwitten (veevoer), P (meststof), suikers en/of biogas (Kampschreur 2014b).

In een thermische druk hydrolyse (TDH) installatie wordt bij hoge druk (4-10 bar) en hoge temperaturen (140-180°C) het slib ontsloten, zodat bacteriën het organische materiaal verder kunnen afbreken. Structuren die normaal moeilijk omgezet kunnen worden door bacteriën, zoals lignine in planten en cellen in slib, worden gehydrolyseerd. Hierdoor is het organische materiaal beter te benutten voor de bacteriën en komt er meer organische stof beschikbaar voor de vergisting, wat leidt tot een hogere biogasproductie.



FIGUUR 16: OVERZICHT CLASSIFICATIE BIORAFFINAGE (IEA BIOENERGY TASK 42 ON BIOREFINERIES 2009)

3.2.3 Biologische verwerking

Organische reststromen kunnen ook biologisch verwerkt worden, door:

- Composteren: omzetting van biomassa onder aerobe omstandigheden door micro-organismen
- Vergisten: in afwezigheid van zuurstof wordt biomassa (van circa 15% droge stof) bij een temperatuur van doorgaans tussen de 30 en 50°C microbiologisch omgezet in biogas (CH_4 en CO_2), met water als residu (digestaat). Het biogas kan na reiniging worden verbrand voor de opwekking van elektriciteit en/of warmte, of eventueel na opwerking worden bijgemengd in het aardgasnet.
- Bij droog vergisten wordt biomassa met een droge-stof-gehalte van 30-40% gebruikt en ontbreekt een roermechanisme (energiezuiniger). Droog vergisten is interessant als veel grasachtig/vezelig materiaal vrijkomt als bermgras, natuurgas en (hark)roostergoed. (Wiersma 2009).

Bijvoorbeeld bij Waterschap Vallei en Veluwe bestaan plannen voor het bouwen van een co-vergister, waarbij naast mest ook in verwerkingscapaciteit voor maaisel wordt voorzien.

Bij Wageningen Universiteit wordt onderzocht of lignine - een houtstof aanwezig in bijvoorbeeld snoeihout - biologisch is om te zetten in basischemicaliën als fenol, maar ook benzeen, toluen of xyleen. Hieruit kunnen vervolgens oplosmiddelen en plastics gemaakt worden. Ook de smaakstof vanille (met een hoge waarde) kan uit lignine gewonnen worden (WageningenWorld 2014b).

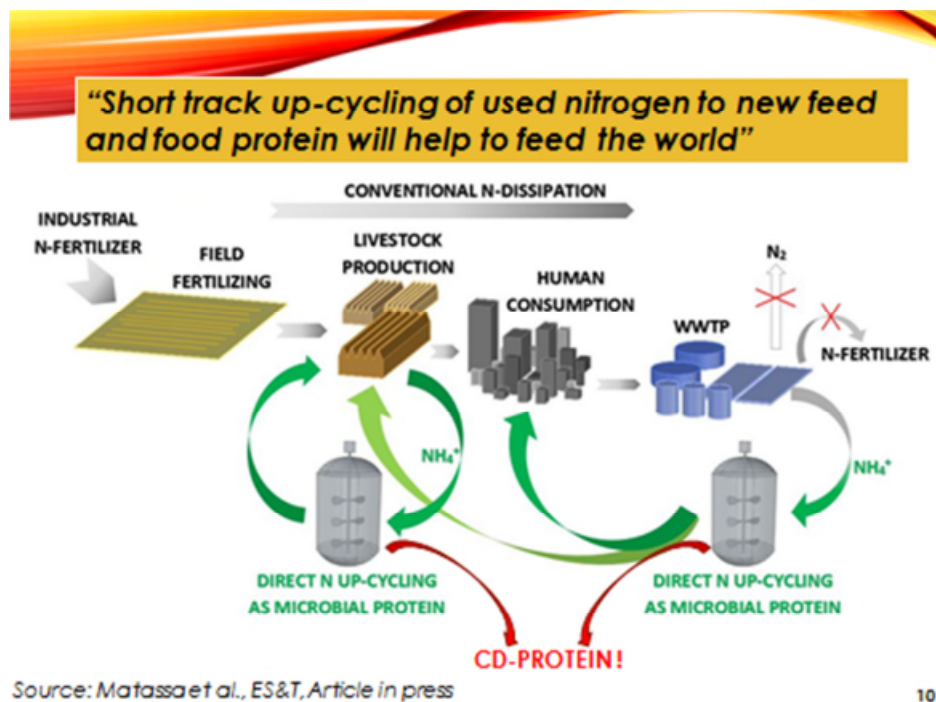
3.2.4 Opwaarderen met lagere organismen

Het kweken van insecten op organische reststromen of het kweken van microschaaldieren als watervlooien op zuiveringsslib (STOWA 2014-W-03) zijn voorbeelden van het opwaarderen van stedelijke biomassa met lagere organismen. Niet zozeer de omzetting zelf als wel de vermenigvuldiging en groei van insecten vormt hierbij het product. Deze insecten (sprinkhanen bijvoorbeeld) kunnen dienen als (eiwitrijke) voedingsbron voor dieren en mogelijk zelfs mensen.

Een ander voorbeeld is het toepassen van algen. Algen kunnen groeien op verschillende soorten afvalwater. Ze groeien snel en hebben een hoog olie gehalte (2 - 50% van het drooggewicht). Bovendien kunnen algen via fotosynthese CO₂ fixeren (reductie CO₂-footprint) en gebruiken ze allerlei nutriënten. Uit algen kunnen vervolgens diverse nuttige grondstoffen teruggewonnen worden (Cai et al. 2013), zoals vetten. Het restant kan vervolgens gebruikt worden als stikstofbron en/of als eiwitrijk voedsel voor dieren. Momenteel wordt veel onderzoek gedaan naar hoe algen kunnen groeien en producten kunnen vormen. Door de hoge kosten is het momenteel nog niet (financieel) interessant om vetten uit algen te winnen.

Ook het concept van "Power to Protein" ontwikkeld door professor Willy Verstraete aan de Universiteit van Gent uit België kan onder deze categorie geplaatst worden. Bij dit concept wordt met de grondstoffen CO₂ uit biogas van de vergisting, NH₄ uit digestaat van de vergister en H₂ uit steamreforming van biomethaan of verkregen door elektrolyse met 'off peak' groene energie (goedkoop en duurzamer) single cell proteïnen (SCP) gemaakt. SCP kunnen dienen als (vee)voeding. Het voordeel van het Power to Protein-concept is dat laag gewaardeerde reststromen, die nu gebruikt worden om energie op te wekken, opgewaardeerd worden naar een hoogwaardige toepassing als diervoeder of voedsel geschikt voor menselijke consumptie. Door het combineren van de productie van SCP en de (communale) afvalwaterzuivering (rwzi) ontstaat de mogelijkheid om de stikstofkringloop kort te sluiten, waarbij ammonium direct wordt omgezet tot eiwitten. Dit heeft grote energetische voordelen omdat de vernietiging van ammonium door nitrificatie tot nitraat en vervolgens via denitrificatie tot stikstofgas (op de rwzi), als ook de productie van ammoniak uit stikstofgas via het Haber Bosch proces vermeden wordt. Beide processen consumeren ongeveer evenveel energie.

Figuur 17 geeft de route weer die het concept Power to Protein gebruikt om de stikstofproductie die de rwzi over heeft, te verbinden met de stikstofvraag die ontstaat bij de productie van diervoeder of eiwitrijk voedsel voor menselijke consumptie. Op deze manier kan afvalwaterzuivering bijdragen aan de voedselvraag in de vorm van eiwitproductie die een alternatief kan bieden voor de huidige conventionele routes met soja (KWR 2015a).



FIGUUR 17: HET POWER TO PROTEIN CONCEPT

3.2.5 Omzetten

Net als bij chemische en biologische omzettingen, veranderen de eigenschappen van een stof bij het omzetten in een ander product. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om organische materiaal met (specifieke) microbiële mengculturen anaeroob om te zetten in carboxylaten als acetaat, *n*-butyraat, of *n*-caproaat, maar kan bijvoorbeeld ook methaan gemaakt worden. Dit procedé, bekend onder de naam van "carboxylaat platform" is ontwikkeld door professor Lars Angenent van Cornell University, United States of America.

Als vervolg hierop wordt binnen het team van Angenent gewerkt aan de verlenging van vetzuren (VFA) zodat die zich kunnen afscheiden van water en vervolgens als grondstof voor biodiesel op de markt gebracht kunnen worden. Mogelijk zijn met het carboxylaat platform ook feed (basischchemicaliën) voor de procesindustrie te maken of zelfs probiotica (Angenent 2015).

3.2.6 Scheiden

Scheiden en sorteren komt vrijwel in elke verwerkingsroute voor, van grof tot fijn. Het uit laten lekken van het water uit vers geoogste waterplanten is een eenvoudig voorbeeld, maar ook het afscheiden van zand door bezinking of met een cycloon. Door toepassing van hoogwaardigere technieken als membranen of fijnzeven is het mogelijk basismaterialen – bijvoorbeeld cellulose uit het influent van een rwzi of vezels uit landschapsbiomassa – af te scheiden.

3.2.7 Extractie

Extractie is een methode om stoffen af te zonderen uit een bepaald materiaal en deze stof over te brengen naar een andere fase. Het scheidingsmechanisme is gebaseerd op het verschil in oplosbaarheid van de stof. De overgang van de stof zal plaatsvinden door het verschil in affiniteit of chemische potentiaal tussen beide fasen tot er zich een thermodynamisch evenwicht heeft ingesteld.

Een voorbeeld is de extractie van (restanten) olie uit koolzaad voor de productie van biobrandstoffen. Met behulp van extractie wordt ook olie gewonnen uit algen. Het verkrijgen van het product alginaat uit korrelslib is een scheidingsproces, gebaseerd op extractie met een basische oplossing.

3.3 Producten

Met behulp van (een combinatie van) de beschreven technologieën zijn uit biomassa in principe een breed scala aan producten te maken (zie Tabel 14). Deze tabel is gebaseerd op de indeling van de waardepiramide uit paragraaf 1.1. Tevens is hierin aangegeven of het gevormde product als eindproduct of veeleer als grondstof of tussenproduct gezien moet worden.

TABEL 14 PRODUCTEN TE VERKRIJGEN UIT BIOMASSA

Producten te verkrijgen uit biomassa	Eindproduct	Grondstof/tussenproduct
<i>pharma, fijn chemicaliën & fun (gezondheid en life-style)</i>		
geur/kleur/smaakstoffen		X
Voedingssupplementen		X
Geneesmiddelen/probiotica	X	X
pigmenten		X
alginaat		X
lipiden		X
<i>voeding voor mens en dier</i>		
(plantaardige) Eiwitten (veevoer)		X
Dierlijke eiwitten (als insecten)		X
Eiwitten via Power to Protein		X
Suikers		X
<i>bulkchemicaliën en materialen</i>		
Meststof/compost*	X	
Bodemverbeteraar	X	
Stikstof	X	X
Fosfaat	X	X
Humuszuren	X	
Vezels (t.b.v. papier, veevoer, etc.)		X
Cellulose		X
technisch zand (uit gemineraliseerd slib)	X	
CO ₂	X	
biogas (CH ₄ en CO ₂)		X
Synthesegas (H ₂ en CO) (als brandstof)	X	X
Synthesegas (H ₂ en CO) (t.b.v. chemicaliën)		X
bio ethanol		X
Caproaat		X
Basischemicaliën als phenol, benzeen, toluen, xyleen		X
Vetzuren		X
Oplosmiddelen		X
(bio)plastics (PHA)		X
Biocomposiet		X
bio-olie		X
(zware)metalen		X
Kalium		
Zwavel		
Algen (geen eindproduct, dus bij technologie opgenomen)		
<i>transportbrandstof</i>		
Transportbrandstof (LNG/SNG)	X	
<i>brandstof & warmte</i>		
Electra & warmte	X	

**GFT- en groencompost hebben een relatief laag gehalte nutriënten, waardoor deze vanuit regelgeving primair als organische bodemverbeteraar worden gezien (STOWA 2014).*

3.4 Afwegingen organische reststromen

In paragraaf 3.2 is een overzicht gegeven van mogelijke verwerkingstechnologieën om uit organische reststromen diverse potentiële (tussen)producten te maken (Tabel 14). In het kader van de circulaire economie is het belangrijk om reststromen in een zo hoogwaardig mogelijke toepassing terug te laten keren in de economie. Dit uitgangspunt is door Waternet ook vastgelegd in haar visie op het benutten van biomassa (Nijman 2014). Vanuit het perspectief van een circulaire economie moet er vooral ingezet worden op het omvormen van biomassastromen in producten genoemd onder “Pharma, fijn chemicaliën & fun” van Tabel 14, dan wel “Voeding voor mens en dier” en niet zozeer op energie en brandstof.

De route om organische reststromen om te vormen tot deze hoogwaardige producten is niet voor alle benodigde technieken al operationeel. In onderstaande tabel is per technologie een inschatting gemaakt over de termijn waarop deze technologie (technisch) toepasbaar is op praktijkschaal. Voor een aantal technieken geldt dat deze technologie al wel toegepast wordt op praktijkschaal (“in gebruik”), maar nog niet op zuiveringsslib (“voor rwzi”) of andere biomassastromen, dan wel dat de technologie nog niet is toegepast (op enige schaalgrootte) in de praktijk en zich nog in de onderzoeksfase (“toepasbaar”) bevindt. Als voor een toepassing bovendien nog belemmeringen in wetgeving aanwezig zijn, dan is het lastig te bepalen wat een redelijke termijn is voor (niet-pilot) toepassingen in de praktijk. Voor het samenstellen van het overzicht (Tabel 15) is gebruik gemaakt van literatuurstudie, KWR ervaringen en gesprekken met kennisdragers uit het werkveld.

In de case study Greening Amsterdam’s Sewerage System (Universiteit Utrecht 2013) is uitgegaan van het gebruik van GF voor de opwekking van biogas; andere kansen in het kader van de circulaire economie zijn niet meegewogen.

TABEL 15 OVERZICHT TECHNOLOGIEËN VOOR VERWERKING EN BENUTTING VAN BIOMASSA, MET INDICATIE VOOR REALISATIE OP PRAKTIJSCHAAL

Technologie	Direct	Realiseerbaar in de praktijk		
		Binnen 5 jaar	Meer dan 5 jaar	
Vergisten (vooral natte biomassa)	X			ECN, Yellowgasmachine
(mee)Verbranden	X			
Composteren (droge biomassa)	X			
(superkritische) Vergassing droge biomassa	x (in gebruik)	x (voor rwzi's)		
Kweken van algen	x (in gebruik)	x (toepassing)	x (als voeding)	
Kweken van insecten	x (in gebruik)	x (toepassing)	x (als voeding)	
Kweken van micro-organismen (eiwitten) [Power to Protein-concept]	x (in gebruik)	x (toepassing)	x (als voeding)	
Scheiden				
Strippen (CO ₂ of N ₂)	X			
(fijn)Zeef	X			
Organisch/GFT	X			
Zand	X	x (technisch zand)		
Metalen	x (grof) x (demo)	x (enkele metalen) x	x (uit water/slib)	
Bioraffinage				
Solid Oxide Fuel Cell		x(toepassing)		
Membraantechnologie				
Eutectic Freeze Crystallisation (EFC)				
(slib)destructie technologieën				
Vibro cav (thermische druk) hydrolyse (voorbehandeling)	x			
Pyrolyse	x (in gebruik)	x (voor rwzi's)		
Fischer-Tropisch synthese			x	Google
Hydro Thermal Upgrading			x	Google
Torre fractie (pyrolyse bij lagere temperaturen)	X (in gebruik/demo)	x		Stramproy Green Steenwijk, Topell

Uit Tabel 15 blijkt dat niet elk van de genoemde technologieën al direct toepasbaar is op praktijkschaal voor het verwerken van organische reststromen tot nuttige (tussen)producten. Technologieën die momenteel al (grootschalig) toegepast worden, zijn technologieën die laagwaardige producten leveren conform de waardepiramide. Naast het verder scheiden van de reststroom betreft dit vooral (mee)verbanden, composteren (droge biomassa) en vergisten (natte biomassa). Vergisten kan daarbij vooraf gegaan worden door diverse methoden van slibdestructie voor het verhogen van het rendement. De grootschalig bewezen technologieën leveren dus in eerste instantie (tussen)producten op in de onderste helft van de waardepiramide. Pyrolyse en het maken van biocomposiet vinden al wel op beperkte (demo/pilot-) schaal plaats.

3.4.1 Alternatieven voor landschapsbiomassa gericht op hoogwaardigere producten

Voor biomassastromen die niet voor veevoeder worden benut, vindt een verschuiving plaats van composteren naar vergisten (Landschap Noord-Holland 2013). Niet-houtachtige biomassa bestaat vrijwel geheel uit grasachtige vegetatie waarvoor geen concurrerende toepassingen zijn. Inzameling van niet-houtachtige biomassa is lastig te organiseren omdat het veel en relatief kleine locaties betreft en de groei en het oogsten van de biomassa seizoenafhankelijk zijn. Daarom varieert de omvang en samenstelling van deze stroom biomassa gedurende het jaar. Ook de regelgeving is nog niet ingespeeld op deze functie van het landschap. Daarom is op dit moment niet het gehele potentieel van niet-houtachtige biomassa inzetbaar voor het opwekken van energie.

Ook het vetachtig materiaal aanwezig binnen Waternet zou bij de te vergisten stromen gevoegd kunnen worden, waardoor de totale energieproductie wordt vergroot passend bij de duurzaamheidsdoelstellingen van Waternet. Door een slibdestructietechniek voor de vergisting te plaatsen kan bovendien de biogasopbrengst nog vergroot worden.

In lijn met de visie op biomassa, wordt door Waternet (Staatsbosbeheer en ook Waterschap Reest en Weiden) gewerkt aan het maken van biocomposiet, een hoogwaardigere toepassing op basis van vezels uit landschapsbiomassa. Uit dergelijke vezels worden bijvoorbeeld al wegwijspaddestoelen van de ANWB gemaakt (NPSP Composieten 2014). Door onbewerkte vezels uit grasachtige vegetatie, cellulose en/of waterplanten te drogen (tot ca. 85% droge stof) en te vermengen met (bio)hars, kan bij hogere temperatuur middels persen plaatmateriaal gemaakt worden. Biocomposiet kan als bouw materiaal gebruikt worden, bijvoorbeeld voor gevelbekleding of oeverbeschoeiing. De toepassing van biocomposiet als oeverbeschoeiing is voor Waternet interessant, omdat Waternet zowel de leverancier van de grondstof (landschapsbiomassa) als ook afnemer (launching customer) van de oeverbeschoeiing voor de watergangen kan zijn. Waternet zou daarmee, op de stap van de productie van het biocomposiet materiaal na, de gehele waardeketen in handen hebben. Het gebruik van biocomposiet als oeverbeschoeiing is een toepassing hoogwaardiger dan de productie van (transport)brandstof en daarmee een stap voorwaarts in de toekomst (en hoger in de waardepiramide).

Voor organische landschapsbiomassa die vervuild is met plastics, zoals 'groen drijfvuil' verzameld bij de gemalen, is Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) technologie mogelijk interessant. Hierbij wordt middels een kraakproces transportbrandstof, kraakgas (welke verstoekt kan worden) en een kleine stroom met mineralen en metalen gevormd. Momenteel is nog onduidelijk of genoemde stromen voldoende calorische waarde hebben voor toepassing van deze techniek. Ook zijn de hoofdproducten nog relatief laagwaardig en is er nog geen business case opgesteld. Als mocht blijken dat het vetachtig materiaal afkomstig uit het riool en de rioolgemalen eveneens vervuild is met plastics, dan is de SOFC-technologie mogelijk ook voor deze reststroom interessant.

3.4.2 Alternatieven voor zuiveringsslib gericht op hoogwaardigere producten

De huidige actiefslibsystemen op rwzi's – ook op de rwzi's West en Westpoort – zijn zo ontworpen dat in het zuiveringsslib veel verontreinigingen worden geconcentreerd. Het selectief verwijderen van deze verontreinigingen uit het zuiveringsslib lijkt vooralsnog economisch niet haalbaar. Het composteren van zuiveringsslib dat relatief schoon is voor wat betreft zware metalen (door een relatief klein aandeel industriële lozers en regenwater) is de meest voor de hand liggende route om in de huidige Nederlandse situatie zuiveringsslib op te werken tot bodemverbeteraar.

Een structurele afzet van significante hoeveelheden slibcompost als meststof lijkt voor de Nederlandse en Vlaamse markt op de korte en ook middellange termijn niet realistisch. Daar zijn vier hoofdredenen voor (STOWA 2014):

1. Het regelgevend kader in Nederland en Vlaanderen maakt de afzet van slibcompost in de landbouw in de praktijk onmogelijk. Volgens STOWA (2014-35) krijgt slibcompost in de Nederlandse wetgeving bijvoorbeeld voorlopig geen End-of-Waste-status Europese wetgeving lijkt meer mogelijkheden te bieden. De huidige wet- en regelgeving in Nederland biedt wel mogelijkheden voor uitzonderingen.
2. De markt stelt vragen bij de kwaliteit van slibcompost. Naast de gehalten zware metalen gaat het daarbij om minder goed gedefinieerde mogelijke verontreinigingen als hormoonstoffen, medicijnresten, microplastics, etc. Zelfs wanneer de regelgeving de zware metalengehalten in slibcompost zou toestaan, zouden deze andere verontreinigingen bij de huidige (gebrekkige) inzichten de acceptatie door afnemers van slibcompost zeer bemoeilijken.
3. De competitie met andere meststoffen, in het bijzonder dierlijke mest. Naast de feitelijke concurrentie die hierdoor in de markt zou optreden, is het ook aannemelijk dat vertegenwoordigende organisaties van meststofproducenten tegen slibcompost als 'nieuwe toetreders' in het geweer zouden komen.
4. De segmenten waarin minder kwaliteitseisen gelden voor meststoffen – in het bijzonder de grond- weg- en waterbouw – zijn onvoldoende groot om een significant aandeel van het Nederlandse zuiveringsslib te kunnen absorberen.

Voor het succesvol positioneren van slibcompost als product is het noodzakelijk dat sprake is van een voldoende goed gedefinieerd product zonder heel grote variaties in samenstelling. Hiervoor is menging van verschillende (schone) zuiveringsslibsoorten nodig om een goede en constante kwaliteit te maken en te leveren. Wanneer er sprake is van 'vele soorten slibcompost' is het moeilijker één onderscheidend vermogen ten opzichte van andere meststoffen en bodemverbeteraars te creëren.

Het aanwenden van zuiveringsslib als bodemverbeteraar betekent dat nutriënten als stikstof en fosfaat maar ook koolstof nuttig worden ingezet. Ten opzichte van de huidige situatie waarin uiteindelijk al het zuiveringsslib verbrand wordt (met al dan niet terugwinning van fosfaat uit het slib of het bodemas) is dit een verbetering, ook energetisch.

Momenteel komen nieuwe slibverwerkingstechnieken als thermische drukhydrolyse in combinatie met thermofiele vergisting in aanmerking als alternatieve verwerkingstechnologie voor zuiveringsslib. Hiermee wordt wel een hoger energetisch en afvalverwijderingsrendement bereikt, maar geen hoogwaardigere producten. Voor de lange termijn wordt aanbevolen verder onderzoek te doen naar de uitloging van metalen in combinatie met een scheiding van organische en anorganische stof (STOWA 2014).

Van zuiveringsslib naar slibcompost in Amsterdam?

Voor Amsterdam geldt dat zowel het zuiveringsslib afkomstig van de rwzi's West als Westpoort, maar ook het slib van de overige rwzi's in beheer van Waternet wordt verzameld op de rwzi West. Het slib van de Amsterdamse rwzi's West en Westpoort, met een relatief groot aandeel industriële lozers, is daarom niet de meest geschikte bron voor de productie van (schone) compost. Mogelijk zou dit voor een andere rwzi uit het beheergebied van Waternet, bijvoorbeeld rwzi Ronde Venen wel een mogelijkheid zijn. Door het veel kleinere volume en de bestaande sliblogistiek biedt dit voor de regio Amsterdam een te geringe meerwaarde. De optie van het opwerken van Amsterdams zuiveringsslib tot slibcompost valt daarmee af.

Zuiveringsslib als meststof voor biogewassen

Uit onderzoek van de Universidad Politécnica van Madrid en de Universidad Miguel Hernández van Elche (2014) blijkt dat bij gebruik van zuiveringsslib als meststof de biomassaproductie van energiegewassen wordt vergroot. Voor het gewas kardoem (*Cynara cardunculus*) - een distel verwant aan de artisjok - werd in dit onderzoek een toename van de biomassaproductie tot 40% gerapporteerd en tot 68% meer oliezaden. Volgens de onderzoekers zijn medicijnresten en andere risicostoffen voor de teelt van biogewassen geen bezwaar, zolang deze maar strikt gescheiden blijven van voedingsgewassen (Waterforumonline 2014).

Als zuiveringsslib als meststof zou worden gebruikt voor biogewassen die uitsluitend bestemd zijn voor toepassingen als biobrandstof of bouwmaterialen (niet voedsel toepassingen), dan zou het bezwaar van de te hoge concentraties zware metalen in het gewas mogelijk kunnen komen te vervallen. Om te voorkomen dat de bodem te vervuild raakt met zware metalen zou dit alleen moeten gelden voor metalen die in hoge mate worden opgenomen in het gewas. Door gebruik van zuiveringsslib als meststof voor de productie van biogewassen die *niet* bestemd zijn voor de voedselvoorziening, zou op termijn een interessant alternatief kunnen ontstaan voor de duurzame verwerking van zuiveringsslib. De huidige wetgeving voorziet niet in deze mogelijkheid.

Net als de gemeente Amsterdam en Schiphol heeft Waternet in de regio Amsterdam areaal "ongebruikte ruimte". Deze braakliggende terreinen zijn tijdelijk in gebruik voor 'stadslandbouw'. Het doel hiervan, vastgelegd in een Green Deal, is om deze ruimte - zolang deze nog niet voor een ander doeleinde ingezet wordt - nuttig te gebruiken voor de productie van biomassa in het kader van de circulaire economie. Momenteel wordt hierop olie-vlas en hennep geteeld. De uit deze biogewassen verkregen lijnzaadolie is verkocht aan een (duurzame) verfproducent (Rigo Verffabriek voorheen Ursa Paint) en de vezels worden gebruikt door een producent van biocomposiet (NPSP Composieten uit Haarlem). Door deze grond te bemesten met (uitgegist) zuiveringsslib, kan de opbrengst verhoogd worden en de hoeveelheid slib, die anders moet worden verbrand, verkleind. De huidige wetgeving staat deze mogelijkheid niet toe.

Voor Waternet is de verwerkingsroute voor zuiveringsslib als meststof voor niet-voedsel biogewassen interessant en relatief eenvoudig te realiseren in de praktijk - want eigenaar/gebruiker van de grond, leverancier van slib en afzet van het geproduceerde biogewas als energiebron via de vergister en/of AEB of als bron voor vezels voor biocomposiet -. Wel moet nader uitgezocht worden hoe dit ingepast kan worden in het eerder genoemde BOOM-besluit (zie ook 4.7.1) en overige wet- en regelgeving.

3.4.3 Alternatieven voor GFT afval gericht op hoogwaardigere producten

Technieken om GFT afval een hoogwaardigere toepassing te geven dan het huidige (mee)verbranden zijn ruimschoots voorhanden. Afhankelijk van de kwaliteit kan GFT worden gecomposteerd of vergist. Middels raffinage kan GFT ook als grondstof voor veevoer dienen. Daarnaast is het een mogelijke voedingsbron voor micro-organismen, algen of insecten om zodoende hoogwaardige producten te maken. Tenslotte bestaat de mogelijkheid om bioplastics te maken van GFT afval. De essentiële vraag hierbij is echter hoe de in Amsterdam potentieel aanwezige hoeveelheid GF(T) beschikbaar gemaakt kan worden voor de circulaire economie. Daarvoor zijn de onderstaande inzamelingsscenario's denkbaar, waarbij tussen haakjes een korte overweging is bijgevoegd:

1. Invoering gescheiden afvalinzameling op straat/wijkniveau (moeilijk)
2. Inzameling via het riool (wettelijk (nog) niet toegestaan en verstandig?)
3. Scheiding huisvuil en GFT bij de vuilverwerker AEB (kwaliteit van het product?)

In samenwerking met de Amsterdamse partners als gemeente en AEB moet hieruit een keuze worden gemaakt.

3.4.4 Alternatieven voor cellulose gericht op hoogwaardigere producten

De huidige verwerking van cellulose in de rwzi's West en Westpoort kost (beluchtings)energie. Door in het afvalwater aanwezige cellulose te scheiden van het influent ontstaat een product dat voor verschillende toepassingen gebruikt kan worden. Naast het gebruik van de cellulosevezels als grondstof voor isolatiemateriaal of biocomposiet, kan het ook toegepast worden als afdruipremmer bij het leggen van asfalt of als bron voor de productie van bioplastics. Deze toepassingen maken van een afvalstroom die nu nog energie kost een product op niveau 3 van de waardepiramide in de categorie 'bouwmaterialen'.

In het STOWA onderzoek *Verkenning mogelijkheden "grondstof RWZI"* is voor cellulose geconstateerd (zie ook Tabel 16) dat het een grote potentie heeft, maar ook dat de kosten van de terugwinning momenteel hoger zijn dan de opbrengsten (STOWA 2013-31). Naar verwachting kunnen rwzi's door afscheiding van cellulose efficiënter functioneren. Om de voordelen voor de rwzi van het toepassen van een fijnzeefinstallatie om cellulose af te scheiden uit het influent te kwantificeren, wordt momenteel onderzoek verricht op de rwzi Aarle-Rixtel van Waterschap Aa en Maas. KWR is coördinator van dit project.

TABEL 16 RESULTATEN SELECTIE GRONDSTOFFEN (STOWA 2013-31)

TABEL 2 RESULTATEN SELECTIE GRONDSTOFFEN			
Grondstof	Belangrijkste reden geselecteerd of afgevalven	Risico	Potentie
GESELECTEERDE GRONDSTOFFEN			
Alginaat	aantrekkelijke marktprijs en eigenschappen	kosten productie hoger dan opbrengst;	hoog
Cellulose	beschikbare techniek al aanwezig is	aandeel cellulose daalt in afvalwater; kosten productie hoger dan opbrengst	hoog
Fosfaat	schaarse grondstof en technieken beschikbaar	struivert uit afvalwater niet onder wettelijke voorwaarden valt	hoog
Stikstof	aandeel terug te winnen stikstof significant is ten opzichte van gebruik aan kunstmest	bepaalde concentraties in rejectiewater	laag
CZV als brandstof	hoogste energieopbrengst en bewezen techniek	opbrengsten brandstof minder worden	hoog
CZV als bioplastisch	aantrekkelijke marktprijs	benodigde schaal (te) groot	hoog
CO ₂	als bijproduct beschikbaar is na opwerking biogas	daling afzetprijs	laag
NIET GESELECTEERDE GRONDSTOFFEN			
Algen	financieel niet haalbaar in Nederland	bepaalde hoeveelheid zonlicht	niet aanwezig
Kalium	concentratie in afvalwater veel te laag	zuiverheid product, naast kalium ook natrium aanwezig	laag
Zwavel	kosten voor winning een factor 10 hoger liggen dan mogelijke afzetprijs	concurrentie is de olie-, en gasindustrie waar zwavel als bijproduct wordt gevormd	niet aanwezig
Humuszuren*	concentratie en kwaliteit humuszuren is onbekend	onbekend	onbekend
CZV als syngas*	technische en financiële haalbaarheid onbekend	complexiteit en onderhoud installaties	onbekend
CZV als vetzuur*	technische en financiële haalbaarheid nog niet aan te tonen	concurrentie met energievoorziening en CZV nodig voor stikstofverwijdering	onbekend
Slib als bouwstof	geen markt, complexe wetgeving	geen afzetmarkt	niet aanwezig
Slib als meststof	geen ruimte voor door mestoverschot	gehalte zware metalen	niet aanwezig
Slib als bodemverbeteraar	gehalte aan zware metalen te hoog voor toepassing in landbouw	gehalte zware metalen	laag
Geneesmiddelen	geen acceptatie van teruggewonnen product	lage concentraties, en merendeel zijn afbraakproducten	niet aanwezig
Lipiden	mogelijkheden onbekend	onbekend	Onbekend
Metalen*	onbekendheid over terug te winnen vorm	onbekendheid of winbare vorm interessant is voor markt	onbekend
Water	lokale situatie bepaalt kansen;	bij voldoende beschikbaarheid grondwater loont opwerking effluent zeer waarschijnlijk niet	lokaal bepaald

* onderzoek vereist om vast te stellen of de stof voldoende potentie heeft om in de 'Grondstoffen RWZI' te worden opgenomen.

3.4.5 Alternatieven voor lipiden en vetzuren gericht op hoogwaardigere producten

De huidige omzetting van lipiden en vetzuren in de rwzi's West en Westpoort kost (veel) beluchtingsenergie en levert vervolgens een (kleinere) hoeveelheid energie op, in de vorm van biogas. Als lipiden en vetzuren uit het afvalwater worden afgescheiden, wordt een product verkregen met een breed scala aan toepassingsmogelijkheden. Zo zijn lipiden en vetzuren goed vergistbaar en vormen ze het basismateriaal om hoogwaardigere producten uit te vervaardigen, zoals synthese gas (onder andere via het carboxylaatplatform) of

grondstoffen voor bijvoorbeeld verf. Daarnaast kunnen ze dienen als voedingsbron bij het opwaarderen van reststromen door lagere micro-organismen tot bijvoorbeeld voedsel voor dier en mens.

3.5 Conclusie organische reststromen

- Veel procedés voor de vervaardiging van hoogwaardige producten uit organische reststromen uit de regio Amsterdam zijn nog in ontwikkeling en niet op korte termijn grootschalig toepasbaar. In de meeste gevallen is zowel technologisch onderzoek als marktonderzoek noodzakelijk om de procedés marktrijp te krijgen.
- Om de potentie van GFT en een aantal stromen landschapsbiomassa als grote bron voor biomassa te benutten, dient eerst een effectief inzamelsysteem opgezet te worden.
- Om snel tot hoogwaardige(re) marktrijpe producten te komen moet de productie van bouwmaterialen als oeverbeschoeiingen en/of plaatmateriaal uit vezels opgeschaald worden naar praktijkschaal.
- Naar de (verdere) toekomst kijkend lijkt het Power to Protein-concept een veelbelovend totaalconcept voor het terugwinnen van grondstoffen uit organische rest(afval)stromen uit de regio Amsterdam voor de productie van hoogwaardige producten.

3.5.1 Adviezen aan Waternet m.b.t. organische stofstromen

- Maak afspraken over het ontsluiten van data van organische stofstromen in vergelijkbare eenheden en volgens dezelfde definities.
- Voordat een specifieke stroom gevaloriseerd wordt, is het aan te bevelen de beschikbare vracht van desbetreffende stofstroom nauwkeuriger in beeld te brengen.
- Initieer en stimuleer het zoveel mogelijk inzamelen van potentieel beschikbare organische stofstromen uit de regio Amsterdam en (gezien de omvang) in het bijzonder groente- fruit- en mogelijk tuinafval.
- Gebruik de bestanddelen (m.n. vezels) uit beschikbare biomassa om oeverbeschoeiingen en plaatmateriaal te maken. Dit kan binnen Waternet, in eerste instantie op demoschaal, worden toegepast.
- Overige, nieuw ingezamelde, biomassa op korte termijn toevoegen aan de slibvergisting indien het goed vergistbaar is en leidt tot meer biogas; anders omzetten in compost.
- Op termijn - als procedés beschikbaar komen om hoogwaardige producten te fabriceren - de stofstromen weer loskoppelen van de vergisting.
- Bepaal de hoeveelheid cellulose die gewonnen kan worden uit het zeefgoed van de rwzi's West en Westpoort. Het is hiervoor belangrijk dat er een goede en eenduidige analysemethode wordt ontwikkeld voor de bepaling van de fractie cellulose van droge stof uit de water- en sliblijn.
- Ondersteun het verder ontwikkelen van verwerkingsmethoden voor de vervaardiging van hoogwaardige producten uit organisch reststromen, in de vorm van zowel technologisch onderzoek als marktonderzoek. Dit kan bijvoorbeeld door aan te sluiten bij de Biomassa-alliantie en te investeren in de ontwikkeling van het concept Power to Protein.

4 Anorganische stofstromen

4.1 Inleiding

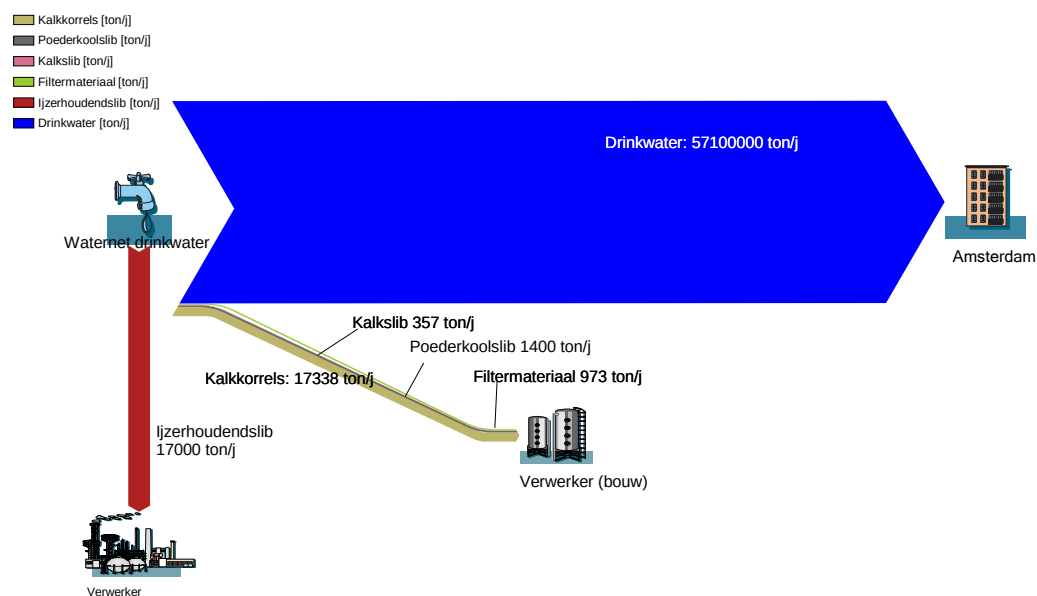
In hoofdstuk 2 en 3 is aandacht besteed aan stofstromen met een hoog organisch gehalte, ook wel biomassa genoemd. In dit hoofdstuk worden mogelijk interessante en (potentieel) in de regio Amsterdam beschikbare stofstromen met een meer anorganische samenstelling behandeld. De verschillen tussen de anorganische stofstromen zijn relatief groot, zodat in dit hoofdstuk er voor is gekozen om elke paragraaf over een bepaalde stofstroom af te ronden met een overzicht van interessante verwerkingsmethoden, -technieken en producten.

Behandeld worden:

- Reststoffen drinkwaterproductie
- Humuszuren
- Stofstromen bedrijven en industrie (organisch en anorganisch)
- Nutriënten (N, P en K)
- Zwavel
- Metalen

4.2 Reststoffen drinkwaterproductie

Samengevat Bij de productie van drinkwater voor Amsterdam komt jaarlijks 7.338 ton kalkkorrels, 1.400 ton poederkoolslib, 973 ton filtermateriaal, ca. 357 ton kalkslib en 17.000 ton aan ijzerhoudend slib vrij (cijfers over 2013).



FIGUUR 18: SANKEY DIAGRAM, RESTSTOFFEN DRINKWATERPRODUCTIE AMSTERDAM

4.2.1 Reststoffen

Drinkwaterpompstation Leiduin en Weesperkarspel van Waternet zijn verantwoordelijk voor het leveren van drinkwater ten behoeve van Amsterdam en omgeving (57,1 Mm³ in 2010). Bij de productie van het drinkwater worden per waterwinstation en productielocatie de volgende reststoffen geproduceerd (Tabel 17 - Tabel 18): kalkkorrels, kalkslib, poederkoolslib, filtermateriaal en een (zeer) geringe hoeveelheid korrelkool (afkomstig van de koolfilters).

TABEL 17 AFVOERGEGEVENS PRODUCTIELOCATIE LEIDUIN (RESTSTOFFENUNIE 2014 & RESTSTOFFENUNIE 2015A).

Reststof	Afvoer in tonnen				
	2010	2011	2012	2013	2014
Kalkkorrels	5.281	5.666	5.390	5.330	1.153
Poederkoolslib	763	1.207	1.071	785	822
Filtermateriaal				544	0

TABEL 18 AFVOERGEGEVENS PRODUCTIELOCATIE WEESPERKARSPER (RESTSTOFFENUNIE 2014 & RESTSTOFFENUNIE 2015A).

Reststof	Afvoer in tonnen				
	2010	2011	2012	2013	2014
Kalkkorrels	1.810	2.055	1.966	2.008	1.914
Poederkoolslib	298			615 *	0
Kalkslib			357		
Filtermateriaal					352

* berekend o.b.v. opgave Waternet (Platform Ronde Noord-Holland 2014) van 1.400 ton/jaar en rekening houdend met gegevens Leiduin.

TABEL 19 AFVOERGEGEVENS WATERWINSTATION IR. CORNELIS BIEMOND TE NIEUWEGEIN (RESTSTOFFENUNIE 2014 & RESTSTOFFENUNIE 2015A).

Reststof	Afvoer in tonnen
	2014
Filtermateriaal	77
Steekvast waterijzer	10.069

TABEL 20 AFVOERGEGEVENS LOENDERVEEN (RESTSTOFFENUNIE 2014 & RESTSTOFFENUNIE 2015A).

Reststof	Afvoer in tonnen	
	2013	2014
Vloeibaar waterijzer	5.111	7.067
Steekvast waterijzer		13.557
Filtermateriaal		37

Bij de productie van het drinkwater komen daarnaast ook humuszuren en ijzerhoudend slib vrij. Paragraaf 4.3 gaat specifiek in op humuszuren.

Aan ijzerhoudend slib – tegenwoordig (ijzerhoudend) riviersediment genoemd – komt jaarlijks circa 15.000 ton/jaar beschikbaar (Platform Ronde Noord-Holland 2014, Klaversma & Mol 2013). In 2013 heeft Waternet zelf ook vloeibaar waterijzer afgezet, buiten Reststoffenunie om; in 2014 niet meer (Reststoffenunie 2014 & Reststoffenunie 2015a).

In het concept Beleidsplan klimaatneutraal/circulair handelen van Waternet uit 2014 wordt uitgegaan van 17.000 ton/jaar ijzerhoudend slib (steekvast en vloeibaar samen).

4.2.2 Verwerkingsroutes

Kalkkorrels worden als bijproduct van de drinkwaterproductie gevormd bij het onthardingsproces. De kalkkorrels van Waternet zijn in 2013 100% afgezet in de betonwarenindustrie. Belangrijkste reden hiervoor was dat de korrels op deze manier in Amsterdam werden verwerkt én toegepast. Zo bestaan bijvoorbeeld de betonklinkers op het plein voor het Centraal station in Amsterdam deels uit kalkkorrels. In eerdere jaren werden de kalkkorrels van Waternet toegepast in de staalindustrie (tot 2011) en in minder mate als bodemisolatie. Kalkkorrels kunnen ook ingezet worden als grondstof voor bemesting, ligboxen voor koeien, neutralisatie van afvalwater en in de glasindustrie.

In 2014 is op de locatie Weesperkarspel van Waternet onderzoek gedaan naar het produceren van puur calciumcarbonaat korrels. Door calcië (in plaats van granaatzand) als entmateriaal voor de ontharder te gebruiken, ontstaan kalkpellets van 100% calciumcarbonaat. Na bewerking kunnen deze korrels als grondstof dienen in de tapijtindustrie, zoals nu ingezet bij de Nederlandse tapijtfabrikant Desso (Reststoffenunie 2015b & bestresourcesfromwater 2015). Als de pellets gedroogd, vermalen en gezeefd worden, is het ook weer geschikt als entmateriaal voor de eigen ontharder (Waterforumonline 2014a). Deze route wordt op dit moment onderzocht en beproefd binnen een TKI-project. Ook is onderzoek opgestart om het restant van de kalkkorrels om te zetten in kalkmelk als groen alternatief voor natronloog en als mogelijke hulpstof bij de productie van biocomposiet.

Poederkoolslib wordt tot nu toe vooral toegepast als vulmiddel in geluidswallen, mits voldaan is aan wet- en regelgeving. In 2013 is een partij poederkoolslib van Waternet gestort, wegens een te hoge concentratie arseen. Gezocht wordt nog naar hoogwaardigere toepassingen van dit (in principe) hoogwaardige restproduct. Als het kool nog rest-adsorptiecapaciteit heeft en ongewenste stoffen als hormoonverstorende stoffen, medicijnresten e.d. bindt, kan het mogelijk een meerwaarde bieden in de afvalwaterzuivering. Een voorwaarde hierbij is dat er geen desorptie van bijvoorbeeld arseen optreedt.

Filtermateriaal afkomstig van Waternet wordt samen met filterzanden van andere waterproductielocaties centraal ingezameld. Nadat voldoende materiaal is verzameld, wordt deze 'uitgekeurd' overeenkomstig de regels uit het besluit Bodemkwaliteit en vervolgens toegepast in een werk (zoals een geluidswal, golfbaan of rijbaan in een stortplaats). Ook wordt het materiaal ingezet als waterzuiverend medium. Het zand heeft namelijk vaak een "ijzerrandje" en is daarmee geschikt voor binding van fosfaat, koper, arseen of zwavel uit het water (Kolk 2015). Een voorbeeld is de met 'ijzerzand' omhulde drain voor de verwijdering fosfaat uit bodemwater (Koopmans et al. 2011).

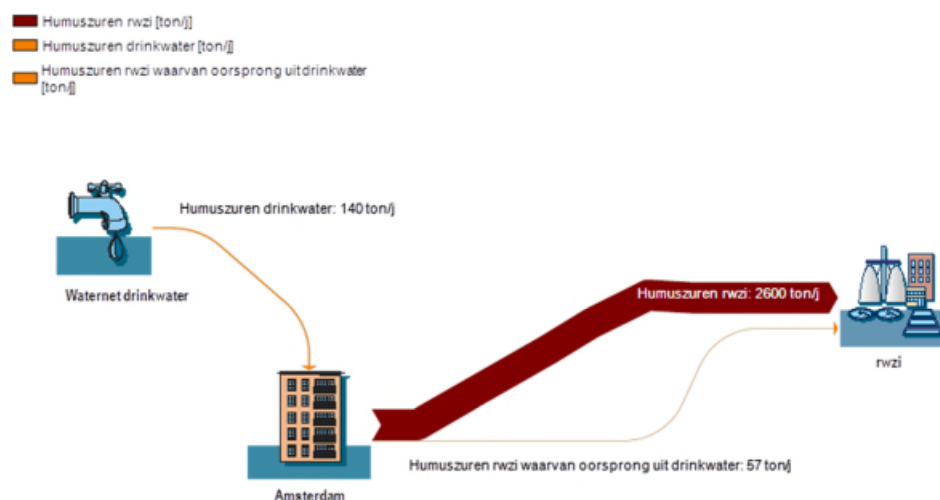
Het bij de ontharding in Weesperkarspel in 2012 vrijgekomen kalkslib werd lokaal opgeslagen en is daar vermengd geraakt met andere reststoffen. De samenstelling van dit mengsel maakte hoogwaardige toepassing onmogelijk. Na keuring is het ingezet als bouwstof in een stortinrichting, om bijvoorbeeld afval af te dekken of rijbanen aan te leggen. Wanneer kalkslib 'zuiver(-der)' is, is toepassing in de landbouw een optie.

Het steekvast waterijzer van Waternet is in 2013 voor 100% gebruikt als toeslagstof/kleurstof bij de productie van baksteen. Een oudere -laagwaardigere toepassing- is het toepassen in een werk (als vulmateriaal).

Van het vloeibaar waterijzer is in 2013 27% ingezet in de biogasmarkt om zwavel te binden en 73% op rwzi's om fosfaat en sulfide uit het water te binden. In 2014 is onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om stabiele 'harde' ijzerkorrels te produceren uit het vloeibare waterijzer. Deze korrels kunnen worden ingezet voor het verwijderen van arseen in de drinkwaterbereiding, verwijdering van fosfaat uit oppervlaktewater en verwijdering van H_2S uit biogas. Naar alle drie de toepassingsmogelijkheden wordt in 2015 TKI-onderzoek gedaan.

4.3 Humuszuren²

Samengevat Bij de productie van drinkwater voor Amsterdam is jaarlijks 140 ton (390 kg/dag) aan humuszuren als reststof beschikbaar. Daarnaast komt op de 2 rwzi's van Amsterdam samen 2.600 ton CZV aan humuszuren binnen (7.200 kg/dag); hiervan is voor 57 ton (156 kg/dag) drinkwater de bron.



FIGUUR 19: SANKEY DIAGRAM HUMUSZUREN AMSTERDAM

4.3.1 Humuszuren algemeen

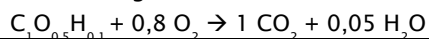
Humuszuren zijn organische stoffen die van nature vrijkomen bij een langzame afbraak van de veenbodem. Doordat er in de bodem sprake is van een zuurstoftekort, worden niet alle organische stoffen volledig afgebroken. De aanwezigheid van humuszuren in de bodem draagt bij aan een gezond bodemleven en bodemstructuur. Daarom zijn humuszuren erg geschikt als meststof. Door toepassing van het humuszuur in o.a. de landbouw kan het gebruik van kunstmest en fosfaat sterk gereduceerd worden en uitspoeling naar het grondwater worden verminderd (Vitens 2014).

In Europa wordt humuszuur gewonnen uit bruinkool, via een chemisch proces. Dit is belastend voor het milieu (o.a. CO_2 footprint) en is kapitaal intensief.

² Humuszuren zijn organische stoffen en een restproduct van de drinkwaterproductie. In de rapportage zijn ze derhalve ondergebracht in de paragraaf over reststoffen drinkwaterproductie.

Er is geen eenduidige relatie gevonden in de literatuur tussen humuszuren en (vermeden) CO₂. Op basis van de verbrandingsreactie van een humuszuur is deze wel indicatief te bepalen (zie ook Bijlage II). Volgens (Rodrigues et al. 2009) is de vereenvoudigde structuurformule van humuszuren: C₁O_{0,5}H_{0,1}N_{0,02}S_{0,02}. De verbrandingsreactie, zoals hieronder weergegeven, laat zien dat 1 C-humuszuur (C₁O_{0,5}H_{0,1}) in potentie wordt omgezet tot 1 CO₂. Een kilogram humuszuur bevat 581 gram carbon, wat overeenkomt met 48,4 C-mol. 1 Kilogram humuszuur resulteert bij verbranding in 48 mol CO₂, dus 2,13 kilogram CO₂.

Verbrandingsreactie:



4.3.2 Humuszuren in grondwater

Humuszuren zijn onderdeel van het natuurlijk organisch materiaal (NOM) dat zich in water bevindt. In grondwater is circa 60% van het NOM humuszuur (Cornellisse 2014). Omdat humuszuur vooral een product is uit veengrond, hangt de concentratie van NOM in het grondwater sterk af van de locatie en de aanwezige grondsoort (Matilainen et al. 2010). De concentratie kan oplopen tot 10 mg/l (Cornellisse 2014). De NOM concentraties in grondwater nemen op jaarbasis sterk toe, gemiddeld met 0,05 mg/l/jaar (Eikebrokk et al. 2004).

TABEL 21 EEN REGIONALE TREND VOOR DE TOENAME VAN MG DOC*L-1*JAAR-1 OVER DE PERIODE VAN 1990-2001 (EIKEBROKK ET AL. 2004).

Regio	Mediaan
Oost centraal Europa	0,06
Noord Nordic	0,05
Zuid Nordic	0,08
UK / Ierland	0,13
West centraal Europa	0,03
Canada	0,04
Vermong/Quebec	0,06
Adirondacks	0,06
Appalachian plateau	0,03
Upper midwest	0,06
Virginia Blue Ridge	-0,04

4.3.3 Humuszuren in drinkwater Amsterdam

Als er veel natuurlijk organisch materiaal (NOM) in het water zit, kan dit problemen opleveren bij de behandeling en distributie van het drinkwater (Grefte 2013). Het ruwe water van het pompstation van Waternet bevatte 9 mg C/l DOC (Baghoth et al. 2009), waarvan 60% afkomstig is van NOM. In het grondwater zit dus in totaal gemiddeld 5,4 mg NOM/l.

Bij het zuiveren tot drinkwater wordt een groot gedeelte van de humuszuren door adsorptie aan actief (poeder)kool verwijderd. In Weesperkarspel gaat dit om 2 mg C/l en in Leiduin om 2,7 mg C/l (Dignum 2014). Ten behoeve van Amsterdam is in 2010 57,1 Mm³ (Foolij 2015) drinkwater geproduceerd, in een verhouding van 3:7 afkomstig van Weesperkarspel en Leiduin. Deze waterproductie op deze twee pompstations levert daarmee een totaal vracht aan humuszuren op van 142 ton C NOM (390 kg/dag) dat jaarlijks vrijkomt en als reststof beschikbaar is.

Uit persoonlijke communicatie met Marco Dignum (Waternet) blijkt dat in het drinkwater afkomstig van Weesperkarspel nog ongeveer 1,9 mg C/l en in Leiduin 0,62 mg C/l aan

humuszuren zit. Deze metingen zijn uitgevoerd in respectievelijk 2007 en 2008. Op basis van een gewogen gemiddelde van het drinkwater afkomstig van pompstation Weesperkarspel en Leiduin (zijnde 3:7), blijkt dat gemiddeld 1 mg C/l aan humuszuur in het drinkwater van Amsterdam zit.

4.3.4 Humuszuren in afvalwater Amsterdam

Met een gehalte van 1 mg C/l aan humuszuren in het drinkwater is de vracht die binnenkomt op de 2 rwzi's samen in Amsterdam en toe te kennen is aan het drinkwatergebruik 57 ton C humuszuren per jaar (156 kg C humuszuren per dag).

Van het op een rwzi binnenkomende CZV blijkt 6% humuszuren (lignine) te zijn (Energiefabriek 2009). Dit betekent dat het influent van de rwzi's West en Westpoort circa 31 mg/l CZV aan humuszuren bevat. De vracht aan humuszuren die met het influent de rwzi's West en Westpoort binnenkomt, bedraagt daarmee 2.600 ton CZV-humuszuur per jaar (circa 7.000 kg/dag).

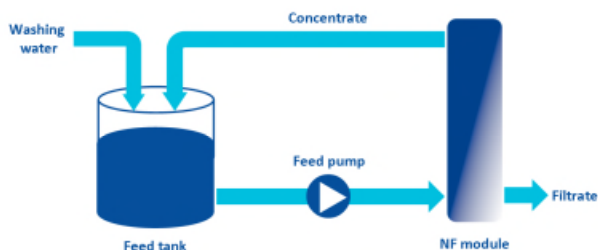
Of humuszuren daarnaast ook gevormd worden in een rioolwaterzuiveringsinstallatie is niet bekend (STOWA 2013-31). Deze potentiële bron voor humuszuren is daarom buiten beschouwen gelaten.

4.3.5 Verwerkingsroutes

Humuszuren kunnen worden toegepast in de agrarische sector als biologische plant- en bodemverbeteraar omdat het de fosfaatbeschikbaarheid verbetert. Hierdoor wordt indirect de wortelgroei gestimuleerd, wat resulteert in een effectievere opname van toegediende mineralen uit meststoffen en een hogere productie. Afnemers hebben dan minder (kunst)mest en fosfaat nodig. Dit zorgt tevens voor minder uitspoeling van meststoffen naar het grondwater.

Om humuszuren afkomstig uit de waterketen te kunnen toepassen in de agrarische sector moet het vrij zijn van dioxine, landbouwgif en zware metalen (STOWA 2013-31).

Bij de productie van drinkwater op locatie Spannenburg van Waterbedrijf Vitens wordt anionenwisseling toegepast om NOM te verwijderen uit het water. Het zoutrijke regeneraat (brijn) bevat veel NOM in de vorm van humuszuren (Vitens 2014). Met dead-end nanofiltratie (DENF) worden de humuszuren afgescheiden (Figuur 20) en vervolgens als bodemverbeter product HumVi voor op de markt gebracht. Een gedeelte van de humuszuren wordt ingezet als ingrediënt voor diervoeder (Waterspiegel 2015). Vanaf het derde kwartaal van 2013 heeft Vitens samen met haar partner Triferto 270 ton humuszuren (800 ton ingedikt) afgezet, welke anders waren afgevoerd naar een afvalverbrandingsinstallatie.



FIGUUR 20: HET DENF-PROCES (LAARMAN ET AL. 2013)

Ook de zoutrijke reststroom van het DENF-proces wordt hergebruikt als regeneratievloeistof in de ionenwisseling. Hiermee is aangetoond dat het opwaarderen van een humusrijke reststroom tot een verklaarbaar product technisch mogelijk is. De praktijk moet nog uitwijzen of de verwerkingsroute voor humuszuren tot bodemverbeteraar en ingrediënt van diervoeder op de lange termijn duurzamer en economisch haalbaar is.

Of de humuszuren van de rwzi via dezelfde route te verwerken zijn tot een product is niet aangetoond. Vermoedelijk zijn aanvullende maatregelen nodig, bijvoorbeeld ter verwijdering van zware metalen. Een hoogwaardige toepassing als die van ingrediënt in diervoeder ligt in deze situatie minder voor de hand.

4.3.6 Afwegingen

Het opwaarderen van de vracht humuszuren afkomstig van de drinkwaterproductie is de logische eerste stap in het hergebruik van humuszuren. Voor de verwerkingsroute van humuszuren uit het brijn afkomstig van de drinkwaterproductie is een technologie en afzetmarkt beschikbaar.

4.3.6.1 Humuszuren drinkwaterproductie

In tegenstelling tot Vitens maakt Waternet bij de bereiding van drinkwater gebruik van adsorptie van humuszuren aan actief (poeder)kool. De humuszuren van Waternet moeten dus eerst gescheiden worden van het poederkool om tot eenzelfde product te komen.

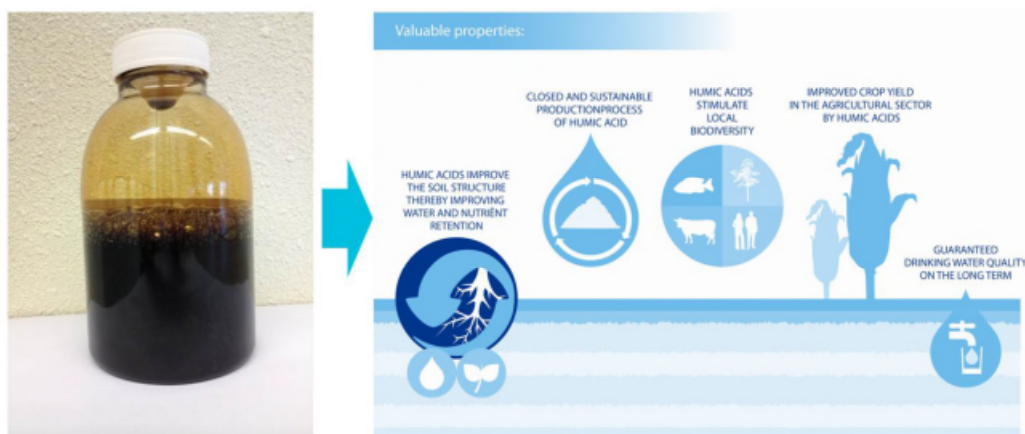
Momenteel vindt de inzet van humuszuren als bodemverbeteraar (nog) niet op grootte schaal plaats. Humuszuren zijn geschikt als vervanger van het – intussen verboden - middel EDTA ter versterking van de wortelvorming bij planten. Deze markt is klein en de financiële waarde is gering. De inzet van humuszuren als bodemverbeteraar draagt bij aan het verlagen van de CO₂ belasting van het milieu. Het terugwinnen en hergebruiken van humuszuren vindt dus plaats vanuit de gedachte van zero waste/circulaire economie en niet zozeer vanuit economisch gewin (Verstraete 2014).

De afzetmarkt voor humuszuren afkomstig van de drinkwaterbereiding is nu mogelijk (nog) te klein voor een zinvolle toetreding op deze markt door Waternet. Dit mede omdat drinkwaterbedrijf PWN voornemens is om haar humuszuren op de markt te brengen. Dit wordt momenteel onderzocht in het TKI-project NOMixed. Versterking van de markt voor de inzet van humuszuren als ingrediënt voor diervoeder biedt mogelijk wel weer perspectief. Daarom is marktonderzoek wenselijk. Mogelijk leidt dit ook tot een andere afzetmarkt voor humuszuren geadsorbeerd aan poederkool van Waternet, bijvoorbeeld als bodemverbeteraar in de land- en tuinbouw.

4.3.6.2 Humuszuren afvalwater

Voor hergebruik van de veel grotere vracht aan humuszuren uit het influent van de rwzi's in Amsterdam is aanvullend onderzoek nodig, onder meer naar de herkomst en mogelijkheden voor afscheiding.

Mogelijk kan het marktonderzoek, marktontwikkeling en vervolgens de verwerking en afzet van de humuszuren effectiever landelijk plaatsvinden, bijvoorbeeld via de Reststoffenunie. Afhankelijk van de behoefte in de markt naar humuszuren kan overwogen worden vervolgens ook de humuszuren van de rwzi te gaan hergebruiken.



FIGUUR 21: HET DENF-PROCES (TREVISAN ET AL. 2010) NAAR (LAARMAN ET AL. 2013)

4.4 Stofstromen bedrijven en industrie

Het Amsterdamse havengebied herbergt vele industriële bedrijven, waaronder ook grote en internationale bedrijven. In zijn algemeenheid heeft een bedrijf een viertal routes om van zijn “rest-/afvalstoffen” af te komen, te weten:

1. Lozing op oppervlaktewater (directe lozing).
2. Lozing op het gemeentelijk rioolstelsel, indien aanwezig (indirecte lozing).
3. Emissie naar de lucht.
4. Afvoer als vaste stof (met als doel hergebruik, verbranding, storten o.i.d.).

Voor dit onderzoek is onderscheid gemaakt in rest-/afvalstromen van de agri- en levensmiddelenindustrie en overige industrieën. Dit omdat agri- en levensmiddelenbedrijven met name organische reststoffen lozen, terwijl overige industrieën zich van een breed scala aan reststoffen ontdoen variërend van zand tot bijvoorbeeld chemisch afval. Het soort reststromen is van grote invloed op de hergebruiksmogelijkheden. Hergebruik van bepaalde rest- en afvalstromen in het kader van de circulaire economie, lijkt op dit moment nog niet opportuun omdat het relatief ver afstaat van het werkveld van Waternet in de regio Amsterdam.

4.4.1 Directe lozing op oppervlaktewater door overige industrieën

Voor de directe lozing van stoffen door bedrijven op het oppervlaktewater geldt dat deze stofstromen vallen onder het activiteitenbesluit, dan wel onder de vergunningplicht in het kader van de Waterwet. In het kader van BRZO en/of IPPC zijn de (grotere) bedrijven met een potentieel grote milieu-impact, verplicht jaarlijks opgave te doen bij bevoegd gezag van de emissies naar water, bodem, lucht en afvoer van afval, in de vorm van een elektronisch Milieujaarverslag (eMJV).

Wat werkelijk geloosd is, is daarmee bekend bij het bevoegd gezag. Voor de regio Amsterdam betreft dit de Omgevingsdienst Noordzeekanaalgebied en Rijkswaterstaat. Gegevens over geloosde concentraties en vrachten op het oppervlaktewater zijn door genoemd bevoegd gezag³ niet verstrekt. Er heerst een grote mate van terughoudendheid op het beschikbaar stellen van emissie gegevens van bedrijven op oppervlaktewater (zie ook Schouten et al. 2014). Door het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) worden deze

³ Rijkswaterstaat heeft na meerdere verzoeken van een drietal bedrijven uit de regio Amsterdam de geloosde hoeveelheid stikstof beschikbaar gesteld. Dit is echter onvoldoende representatief om te kunnen gebruiken voor extrapolatie.

gegevens ingezameld bij bevoegde gezag en geaggregeerd tot openbare emissiedata voor heel Nederland. Hierbij wordt geen regio-indeling gehanteerd, waardoor het niet goed mogelijk is de vrachten voor de regio Amsterdam te bepalen.

Uit een eerdere studie uitgevoerd door Tauw rondom de fosfaatkansenkaart voor Amsterdam, is gebleken dat de respons van de doelgroep overige industrieën op een enquête (zeer) laag was. Het verkrijgen van deze gegevens bij de bedrijven zelf blijkt dus ook erg lastig te zijn.

Om bovengenoemde redenen is besloten de stofstromen van bedrijven en industrie via directe lozingen niet nader te kwantificeren.

4.4.2 Indirecte lozingen

Indirecte lozingen van bedrijven die aangesloten zijn op het gemeentelijk rioolstelsel uitmondend op een van de twee Amsterdamse rwzi's van Waternet, zijn meegenomen in de betreffende stofstroom. Hiervan zijn veel gegevens bekend (onder meer in het technologisch jaarverslag van Waternet) en de indirecte lozingen zijn daarmee afdoende gedekt. Overigens worden reststromen van de agro- en levensmiddelenindustrie die zijn aangesloten op de riolering van Amsterdam vooral geloosd naar rwzi Westpoort.

4.4.3 Lucht

In hoofdlijnen geldt dezelfde lijn voor de emissies naar de lucht. Ook hierover rapporteert een bedrijf in een (al dan niet verplicht) milieujaarverslag. Gezien het werkveld van Waternet ligt dit wat ver af van de scope van dit onderzoek en is daarom buiten beschouwing gelaten.

4.4.4 Afval

Voor transport en het ontdoen van vast afval is de Europese Afvalstoffenlijst (EURAL) regelgeving van toepassing. Hierbinnen worden alle getransporteerde vrachten vastgelegd, waaronder ook die van zuiveringsslib. Deze gegevens worden door de 'ontdoeners' van de afvalstof geaggregeerd gerapporteerd via het elektronische Milieujaarverslag. Deze zijn eveneens niet beschikbaar gesteld.

4.4.5 Agrarische bedrijven

Agrarische bedrijven produceren zowel organische als anorganische reststromen. Organische reststromen worden merendeels binnen het bedrijf hergebruikt als meststof en bodemverbeteraar. Mest is de grootste vracht aan anorganische reststromen van agrarische bedrijven. Omdat het areaal van veehouderijen veelal te klein is, om binnen de vigerende wetgeving, de dierlijke mest nuttig te kunnen toepassen als nutriëntenbron op het eigen areaal is er een mestoverschot.

Mest biedt ook een enorme potentie aan energie en water en is verantwoordelijk voor een grote mate van belasting van het oppervlaktewater en grondwater. In 2009 is in Amsterdam 53,6 miljoen kg dunne en 4,2 miljoen kg vaste mest geproduceerd (Tabel 26). Het aandeel mest geproduceerd in Amsterdam is ten opzichte van heel Nederland gering (< 0,1%) en is daarmee in omvang niet direct een bron voor terugwinning.

Naast mest heeft een veehouderij ook uitval. De Amsterdamse veestapel is met 8.220 dieren verwaarloosbaar klein (< 0,01%) ten opzichte van Nederland. Wat opvalt, is dat er geen kippen (professioneel) gehouden worden in de regio van Amsterdam (Tabel 22). De hoeveelheid dierlijk afval in Amsterdam afkomstig uit de veehouderij is dan ook klein en wordt daarom in dit onderzoek niet nader onderzocht en gespecificeerd.

TABEL 22 VEESTAPEL AMSTERDAM IN 2010, TER VERGELIJKING MET NEDERLAND

Veestapel	Amsterdam	Nederland
Rundvee	2868	3975194
Varkens	1203	12254972
Kippen	-	101247711
Overige vee	4149	5261094
<i>totaal</i>	<i>8220</i>	<i>122738971</i>

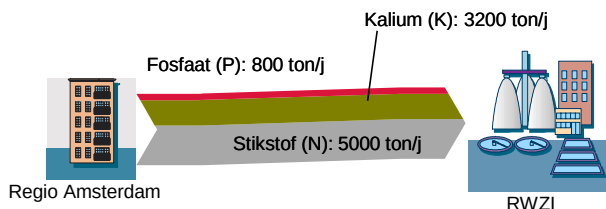
4.4.6 Individuele bedrijven

Van individuele bedrijven in de regio Amsterdam zijn onvoldoende gegevens beschikbaar om zinvol te kunnen gebruiken in het onderzoek.

4.5 Nutriënten

Wanneer in de (wetenschappelijke) literatuur wordt gesproken over het terugwinnen van nutriënten, gaat het voornamelijk om de componenten fosfaat, stikstof en kalium.

Samengevat Van de nutriënten stikstof (N), fosfaat (P) en kalium (K) komt bij benadering in totaal 9.000 ton per jaar aan op de rwzi West en Westpoort in Amsterdam.



FIGUUR 22: SANKEY DIAGRAM NUTRIËNT-STROMEN RWZI WEST EN WESTPOORT IN AMSTERDAM

De potentiële beschikbaarheid van deze nutriënten in de regio Amsterdam op basis van huishoudelijk afvalwater inclusief urine, dierlijke mest en cultuurgrond is in Tabel 23 weergegeven.

TABEL 23 VRACHTEN NUTRIËNTEN IN AMSTERDAM VANUIT VERSCHILLENDE OORSPRONG (IN TON PER JAAR) (CBS 2011)

Oorsprong	Stikstof	Fosfaat	Kalium
Afvalwater	4.425	606	2.281
Mest (in kg)	270	90	380
Cultuurgrond	350	113	493
<i>Totaal (afgerond)</i>	<i>5.000</i>	<i>800</i>	<i>3.200</i>

4.5.1.1 Nutriënten in huishoudelijk afvalwater

Zoals blijkt uit Tabel 23 is afvalwater de belangrijkste potentiële bron voor de nutriënten stikstof, fosfaat en kalium. Urine is verantwoordelijk voor 75% van de stikstof in

huishoudelijk afvalwater. Gemiddeld wordt er 550 kg urine per persoon per jaar uitgescheiden, waarvan ongeveer 4 kilo stikstof. Stikstof kan opgedeeld worden in de categorieën: urea (80%), ammonia (7%), creatine (6%) en het overige deel komt van aminozuren.

Fosfaat wordt hoofdzakelijk uitgescheiden als anorganische fosfaten, met als doel de pH van urine te bufferen en kent een vracht van 365 g per persoon per jaar. Urine is verantwoordelijk voor 50% van de fosfaatvracht van al het huishoudelijk afvalwater (STOWA 2010-12). Van de totale hoeveelheid fosfaat die in Nederland gebruik wordt, komt twintig procent op rioolwaterzuiveringen terecht (Energie en Grondstoffenfabriek 2014).

Kalium wordt voornamelijk aangetroffen als een vrij ion en de uitscheiding van dit element bedraagt ongeveer 1,1 kg per persoon op jaarbasis. Van al het huishoudelijke afvalwater is urine verantwoordelijk voor 40% van het kalium gehalte.

Op basis van het aantal inwoners in Amsterdam en het aantal kilo dat op jaarbasis gemiddeld door 1 persoon via urine wordt uitgescheiden, is de jaarvracht voor N, P en K geschat, die via de urine in het huishoudelijke afvalwater terecht komt (Tabel 24).

TABEL 24 BEREKENDE WAARDEN VRACHTEN N, P EN K IN HUISHOUDELIJK AFVALWATER VAN AMSTERDAM OP BASIS VAN DE GEMIDDELTE UITSCHIEDING VIA DE URINE

Locatie	Inwoners aangesloten*	Inkomende N- vracht (ton/jaar)	Inkomende P- vracht (ton/jaar) Urine	Inkomende K- vracht (ton/jaar) urine
RWZI West	564.113	3.009	412	1.551
RWZI Westpoort	265.510	1.416	194	730
Totaal	829.623	4.425	606	2.281

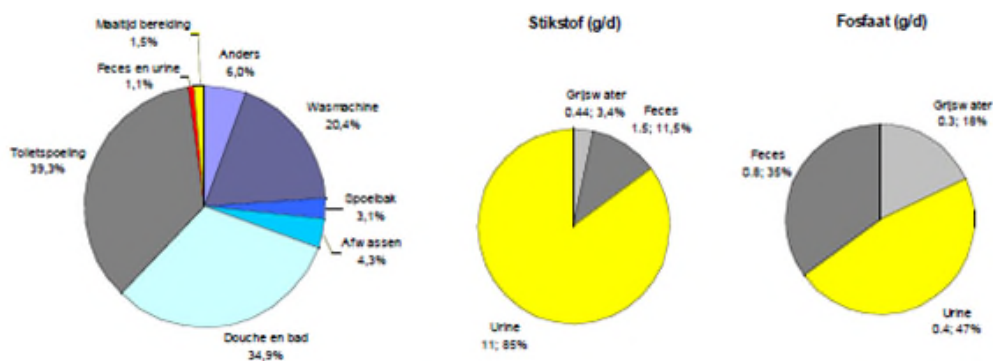
* (Holthuijsen & Koning 2013a)

Uit het technisch jaarrapport 2012 van Waternet (Holthuijsen & Koning 2013a) blijkt dat de vracht van N en P in het influent van de rwzi's West en Westpoort respectievelijk 4.653 en 636 ton per jaar bedraagt. Deze berekende vrachten – op basis van meetwaarden van het influent – komen goed overeen met de berekende gegevens voor huishoudelijk afvalwater van Amsterdam uit Tabel 24. Dit duidt erop dat er geen andere significante lozingsbronnen voor N en P zijn aangesloten op het gemeentelijk rioolstelsel uitmondend in de Amsterdamse rwzi's West en Westpoort.

Van kalium zijn geen meetgegevens van het influent van de rwzi's West en Westpoort voorhanden. Daarom kan voor kalium niet met zekerheid worden uitgesloten dat er relevante andere dan huishoudelijke bronnen zijn aangesloten op de riolering.

4.5.1.2 Nutriënten in urine

Zoals blijkt uit het bovenstaande is urine een significante bron van nutriënten in huishoudelijk afvalwater. Volgens STOWA (STOWA 2010-12) is urine verantwoordelijk voor 85% van de stikstof en 47% van het fosfaat in huishoudelijk afvalwater.



FIGUUR 23: VOLUME HUISHOUDELIJK AFVALWATER IN LITER/PERSOON/DAG EN IN % DE HERKOMST VAN STIKSTOF EN FOSFAAT IN HUISHOUDELIJK AFVALWATER IN GRAM/PERSOON/DAG (STOWA 2010-12)

Op bepaalde locaties is het urine en fecaliën aandeel van het afvalwater vele malen hoger dan in gemiddeld huishoudelijk afvalwater. In uitgaansgelegenheden gaan veel mensen naar het toilet, en wordt het afvalwater amper verdund met grijswater lozingen. Door Waternet is recentelijk onderzocht (Klaversma 2014) hoeveel urine – en daarmee stikstof en fosfaat – op deze plaatsen verzameld zou kunnen worden (Tabel 25). Hierbij is vooral rekening gehouden met mannelijke bezoekers, omdat er dan gebruik gemaakt kan worden van waterloze urinoirs.

TABEL 25 URINE MET STIKSTOF EN FOSFAAT DAT APART INGEZAMELD KAN WORDEN OP EVENEMENTENTERREIN. DATA KOMT UIT (KLAVERSMA 2014, LEAF 2013)

Locatie	Verzameling urine (m ³ /jaar)	N (berekend) (kg/jaar)	P (berekend) (kg/jaar)
Heineken Music Hall	192	1.396	103
Amsterdam Arena	630	4.582	336
Ziggo Dome	197	1.433	105
Pathé Arena	225	1.636	120
Arenapark	66	480	35

4.5.1.3 Nutriënten in mest

Met de productie van mest door vee wordt stikstof, fosfaat en kalium uitgescheiden. Gegevens over de uitscheiding van dierlijke mest over de periode van 2007 - 2011 in heel Nederland zijn opgenomen in Tabel 26. Om de hoeveelheid stikstof, fosfaat en kalium dat via deze weg vrijkomt in de regio Amsterdam te bepalen, is gebruik gemaakt van de verhouding in de mestproductie tussen Amsterdam en Nederland (Tabel 26).

TABEL 26 MESTPRODUCTIE IN 1.000 KG, 2009 (CBS 2011)

	Amsterdam	Nederland	Factor
Dunne mest	53.635	69.410.139	1.294
Vaste mest	4.255	3.292.413	774
Som	57.890	72.702.552	1.256

TABEL 27 TOTALE VRACHT VAN N, P EN K DAT VRIJKOMT OP CULTUURGROND IN NEDERLAND IN 1.000 KG PER JAAR (CBS 2011) DE BEREKENDE HOEVEELHEID NUTRIËNTEN IN MEST IN AMSTERDAM

	2007	2008	2009	2010	2011	Gemiddeld
Nederland						
Stikstof uitscheiding	340	360	340	340	310	338
Fosfaat uitscheiding	110	110	110	110	100	108
Kalium uitscheiding	490	500	480	480	440	478
Amsterdam						
Stikstof uitscheiding	0,27	0,29	0,27	0,27	0,25	0,27
Fosfaat uitscheiding	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,09
Kalium uitscheiding	0,39	0,40	0,38	0,38	0,35	0,38

Aan de nutriënten stikstof, fosfaat en kalium is potentieel aanwezig in Amsterdam respectievelijk 270, 90 en 380 kg per jaar (Tabel 28), uitgescheiden via dierlijke mestproductie.

4.5.1.4 Nutriënten van cultuurgrond

Cultuurgronden in de regio Amsterdam zijn naast leverancier van biomassa, ook een mogelijke bron voor nutriënten. Cultuurgrond is al het groen in de stad, bijvoorbeeld het helmgras in de berm langs de weg, maar ook snoeimateriaal uit parken. Op basis van CBS gegevens uit 2011 is bekend hoeveel stikstof, fosfaat en kalium, met cultuurgrond als bron, in potentie beschikbaar is voor terugwinning in de gemeente Amsterdam.

TABEL 28 OPPERVLAKTE CULTUURGROND (IN ARE) EN MINERALENIJTSCHIEDING (IN TON PER JAAR) VOOR AMSTERDAM (CBS 2011)

	Amsterdam
Oppervlakte cultuurgrond (are)	197.531
Stikstof uitscheiding	350
Fosfaat uitscheiding	113
Kalium-uitscheiding	494

4.5.2 Verwerkingsmethodiek

4.5.2.1 Stikstof

De meeste literatuur die ter beschikking is, gaat over stikstofverwijdering (anammox, nitrificatie, denitrificatie etc.) en niet zozeer over het terugwinnen van stikstof. Stikstof kan worden teruggewonnen uit rejectiewater via strippen - dit is de gangbare en meest efficiënte manier om stikstof te winnen. Volgens STOWA (STOWA 2013-31) is dit echter economisch niet haalbaar wanneer de concentraties lager zijn dan 5 gram per liter. Bovendien is er een aerobe nazuivering nodig om te kunnen voldoen aan de lozingseisen voor stikstof (STOWA 2013-31). De stikstofconcentratie van het influent van rwzi West is gemiddeld 0,05 g/l en daarom is strippen niet rendabel.

Omdat circa 80% (75 - 85%) van de totale stikstof in huishoudelijk afvalwater afkomstig is van urine, dat minder dan 1% van het volume beslaat (Wilsenach et al. 2007) ligt de focus in de literatuur op het terugwinnen van stikstof uit de urinestroom. Maurer et al. (2006) beschrijft vier technieken die ingezet zouden kunnen worden voor het terugwinnen van stikstof uit urine:

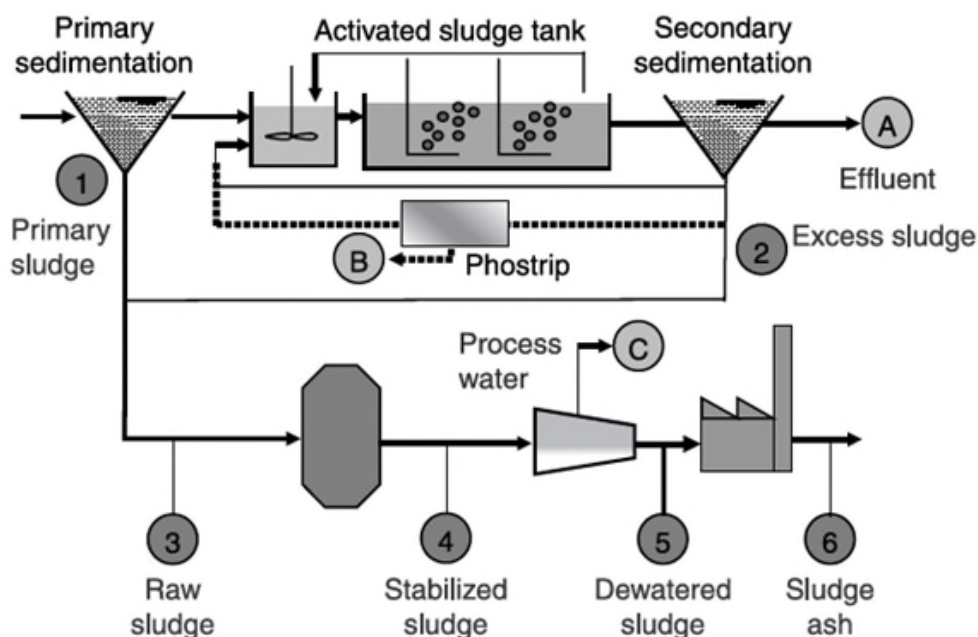
1. ion exchange
2. ammonia stripping
3. isobutyladehydediurea (IBDU) precipitatie
4. struvietvorming

Omdat struvietvorming stikstofterugwinning combineert met fosfaat (en ook kalium) verwijdering (Wilsenach et al. 2007) is struvietvorming de beste optie voor hergebruik van nutriënten volgens Maurer et al. (2006). Het proces van struvietvorming is bovendien stabiel dan andere technieken en het product is eenvoudig af te scheiden. Het strippen van ammonia resulteert bijvoorbeeld in een onstabiel product op normale druk.

Een andere mogelijkheid is het toepassen van een AB-systeem, mits het influent de juiste karakteristieken heeft (Graaff et al. 2014). Een AB (Adsorption-Belebung)-systeem is een tweetraps afvalwaterzuiveringssysteem met een hoog belaste eerste trap met een korte verblijftijd. In de A-trap wordt vooral CZV en fosfaat ingevangen, waardoor er meer potentie is voor de vergisting. Door toepassing van de nieuwe (koude) anammox kan stikstofverwijdering in de B-trap gerealiseerd worden.

4.5.2.2 Fosfaat

Fosfaat kan uit afvalwater verwijderd worden door biologisch defosfateren of (chemische) precipitatie. Op het doseren van ijzer, aluminium, lime of magnesium volgt een precipitatiereactie. De neerslag kan afgescheiden worden en als chemisch slib worden afgevoerd. Door een combinatie van biologisch en chemisch defosfateren ontstaat ijzer of aluminium houdend fosfaatslib. Dit slib kan chemisch worden aangezet tot vrijgave van/omzetting naar calciumfosfaat, een belangrijke grondstof voor de fosfaatindustrie. Over het terugwinnen van fosfaat is heel veel literatuur voorhanden, met een nadruk op struvietvorming. Onder meer (Morse et al. 1998) presenteren een lijst met technologieën voor de verwijdering en het terugwinnen van fosfaat. Volgens (Maurer et al. 2006) komt alleen struvietvorming in aanmerking voor het (economisch) terugwinnen van fosfaat in de praktijk. Fosfaatterugwinning heeft potentie omdat het een grondstof is die schaars voorradig en eindig is. Figuur 24, die is ontleend aan (Cornel & Schaum 2009), laat zien uit welke stromen fosfaat kan worden teruggewonnen. De letters geven potentiële posities aan voor het terugwinnen van fosfaat uit de waterlijn; de getallen geven locaties aan voor de opties in de sliblijn.



FIGUUR 24: ILLUSTRATIE VAN VERSCHILLENDE PLAATSEN VOOR DE INSTALLATIE VAN FOSFAAT TERUGWINUNITS (CORNEL & SCHAUM 2009)

Uit onderzoek is gebleken dat het lastig is om fosfaat terug te winnen uit de waterlijn. In feite komt alleen fosfaatrijk proceswater in aanmerking, met een potentieel van ongeveer 10 - 40% terugwinning van fosfaat. Circa 90 - 95% van het fosfaat eindigt in de sliblijn als er geen biologische fosfaatverwijdering plaatsvindt (Cornel & Schaum 2009). In zo'n geval is fosfaatterugwinning uit as van de slibverbranding een mogelijk interessante optie.

In de praktijk zijn voor het terugwinnen van fosfaat momenteel een aantal verwerkingsroutes in gebruik. Via struviet (MgNH_4PO_4) kan fosfaat teruggewonnen worden op een rwzi (STOWA 2013-31) of via de asreststroom na verbranding van het slib (Waterforumonline 2015). Met deze laatste route, aangeduid als 6 in Figuur 24, kan een veel groter gedeelte van het fosfaat teruggewonnen worden.

Op de rwzi West in Amsterdam wordt fosfaat teruggewonnen dat vrijkomt bij de gisting van het slib, in de vorm van struviet. Dit zogenaamde Fosfaatje (Airprex-technologie) wordt toegepast op de locatie aangeduid met 4 in Figuur 24 en voorkomt operationele problemen van ongewenste struvietvorming in de installatie (verstopping). Waternet produceert op de rwzi West maximaal 900 ton struviet per jaar.

4.5.2.3 Kalium

In het rapport STOWA 2013-31 wordt gesteld dat kalium niet wordt gezien als een potentiële grondstof omdat de zuiverheid in het geding is (naast kalium ook natrium aanwezig) en de concentraties veel te laag zijn in het huishoudelijk afvalwater. Om die reden is niet verder gekeken naar verwerkingstechnieken voor kalium.

4.5.3 Afwegingen

Fosfaat is een essentieel bestanddeel voor meststoffen omdat zonder fosfaat geen enkel gewas kan groeien. De verwachting is dat over circa 50 jaar de natuurlijke bronnen van fosfaat in onder meer Marokko en China uitgeput raken. Het is daarom essentieel om bestaande bronnen te gaan hergebruiken, zeker gezien de groeiende (wereld)bevolking.

Van de totale hoeveelheid fosfaat die in Nederland gebruikt wordt, komt twintig procent terecht op rioolwaterzuiveringen (Energie en Grondstoffenfabriek 2014). Op rwzi's teruggewonnen fosfaat kan daarmee een significante bijdrage leveren aan het sluiten van de fosfaatkringloop. Zeker nu sinds 2015 op afvalwaterzuiveringsinstallaties teruggewonnen fosfaat binnen de Nederlandse wetgeving niet langer gezien wordt als 'afvalstof' maar als 'meststof', verdient het terugwinnen van zoveel mogelijk fosfaat op rwzi's een hoge prioriteit. Naar verwachting zal de prijs van fosfaat ook stijgen waardoor het terugwinnen en hergebruiken ook financieel steeds interessanter wordt.

Uit de literatuur blijkt dat voor huishoudelijk afvalwater, zeker indien het aandeel urine relatief hoog is, de vorming van struviet in de sliblijn de meest geëigende weg is voor het terugwinnen van fosfaat op rwzi's.

In de regio Amsterdam is een bedrijf als ICL Fertilizers een potentiële afnemer van het struviet. ICL Fertilizers heeft aangegeven per jaar circa 125.000 ton struviet (Platform Ronde Noord-Holland 2014) te kunnen toepassen bij de productie van kunstmest en wil op termijn onafhankelijk zijn van fosfaaterts uit mijnen. Voorwaarden hiervoor zijn dat het struviet zo min mogelijk organische resten bevat en biologisch veilig is. Struviet geproduceerd op rwzi's kan vermoedelijk wel aan deze kwaliteitseisen voldoen. De productiecapaciteit van een grote rwzi als de rwzi West is in verhouding echter dusdanig klein (< 1%) dat het voor een bedrijf als ICL Fertilizers mogelijk niet voldoende interessant is. Deze mogelijkheid bij ICL Fertilizers dient nader verkend te worden.

Bij de struvietwinning komt niet alleen fosfaat beschikbaar voor hergebruik, maar wordt ook een klein gedeelte van het stikstof uit het influent vastgelegd en beschikbaar gemaakt voor hergebruik. Deze geringe stikstofverwijdering – met nitrificatie/denitrificatie – kost anders uitsluitend energie.

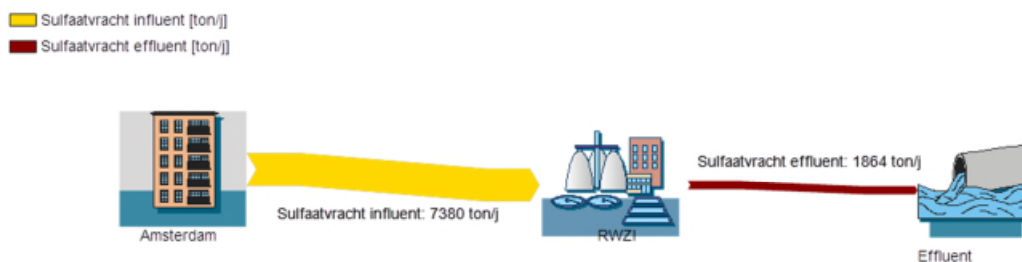
Professor Willy Verstraete van Gent Universiteit België (Verstraete 2014) heeft overigens zijn bedenkingen over het terugwinnen van nutriënten als N en P ten behoeve van bodemverbetering/meststof. Gezien de relatief kleine schaal waarop rwzi's teruggewonnen nutriënten kunnen aanleveren ten opzichte van andere bronnen (als fosfaat uit erts), in combinatie met de kwaliteit, zal de interesse bij de (grootte/bulk) kunstmestindustrie gering zijn. Wellicht zijn deze relatief kleine stromen wel lokaal interessant te maken met een kleine (duurzame) producent. Het verkennen van deze route verdient dan ook aanbeveling.

STOWA stelt (STOWA 2013-31) dat kalium niet gezien wordt als een potentiële grondstof omdat de zuiverheid in het geding is (naast kalium ook natrium aanwezig) en de concentraties veel te laag zijn in het huishoudelijk afvalwater.

4.6 Zwavel

Samengevat De totale vracht sulfaat die de rwzi's West en Westpoort binnenkomt met het influent is 7.380 ton/jaar (20.219 kg/dag).

Momenteel is de aanwezigheid van zwavelcomponenten in en rondom de rwzi onderbelicht. Ondanks dat sulfide een belangrijke rol speelt bij het corroderen van leidingen, zijn er nauwelijks gegevens beschikbaar van de werkelijke concentratie sulfide in rioolstelsels.



FIGUUR 25: SANKEY DIAGRAM ZWAVELSTROMEN AMSTERDAM

4.6.1 Sulfaat

Normaal gesproken varieert de concentratie sulfaat in een rwzi tussen de 20 tot 100 mg/l SO_4 (Moussa et al. 2006, STOWA 2013-31). Sulfaat in afvalwater is voornamelijk afkomstig uit drinkwater (STOWA 2013-31). De concentratie sulfaat is daarmee sterk afhankelijk van de lokale samenstelling van het drinkwater (STOWA 2013-31). De concentratie sulfaat in het drinkwater heeft onder andere een relatie met het sulfaat gehalte van het grondwater. Het gehalte sulfaat in grondwater kan zeer sterk variëren en wordt vooral bepaald door de absolute afstand tot de zee (Figuur 27).

Door het instromen van sulfaatrijk industrieel afvalwater kan de sulfaatconcentratie in het influent van een rwzi oplopen tot wel 500 mg/l (Lens et al. 1998). Volgens het technisch jaarverslag van Waternet, bedroeg de sulfaatconcentratie in het effluent 56 mg/l in 2013. Dit komt qua orde grootte overeen met metingen van steekmonsters van het influent en effluent van rwzi Amsterdam-West (Tabel 29). De grote verschillen in de gemeten concentraties in de steekmonsters zijn veroorzaakt doordat er veel regen is gevallen gedurende het nemen van de monsters in de winter, terwijl dit niet het geval was in de zomer periode.

TABEL 29 MEETGEGEVENS VAN STEEKMONSTERS VAN HET INFLUENT EN EFFLUENT VAN RWZI AMSTERDAM-WEST EN HENGLO. DEZE SAMPLES ZIJN GEANALYSEERD IN 2011; WEEK 9 (WINTER) EN WEEK 35 (ZOMER)

Locatie	Influent SO_4 mg/l		Effluent SO_4 mg/l	
	winter	zomer	winter	zomer
Amsterdam-West	38,1	74,5	35,5	62,7
Hengelo	51,6	67,0	37,2	45,7

Met een jaargemiddelde sulfaatconcentratie van 56 mg/l in het effluent en de aanname dat de effluent concentratie maar een fractie lager zal zijn dan de concentratie in het influent, is aangenomen dat het influent 60 mg/l sulfaat bevat. Volgens het technisch jaarverslag 2013 komt er 64.172.037 m³/jaar aan influent binnen op rwzi Amsterdam-West. De vracht aan sulfaat in het influent is dan 3.594 ton per jaar, ofwel 9.846 kg/dag.

Volgens het technisch jaarverslag van Waternet is in 2013 op rwzi Westpoort 18.930.235 m³ afvalwater behandeld en bevat het effluent gemiddeld 118 mg/l sulfaat. Er zijn geen gegevens van de sulfaatconcentratie in het influent bekend. Het aandeel industriële lozingen op rwzi Westpoort is groot. In lijn met de resultaten van (Lens et al. 1998) zou het sulfaat gehalte van het influent van rwzi Westpoort veel hoger kunnen zijn, tot zelfs wel 500 mg/l. Aangenomen wordt dat het influent 200 mg/l sulfaat bevat. De vracht aan sulfaat in het influent van rwzi Westpoort zou dan 3.786 ton per jaar bedragen, ofwel 10.372 kg/dag.

De totale vracht aan sulfaat die jaarlijks binnenkomt op beide Amsterdamse rwzi's bedraagt daarmee circa 7.380 ton.

4.6.2 Extrapolatie zwavelbalans rwzi Hengelo

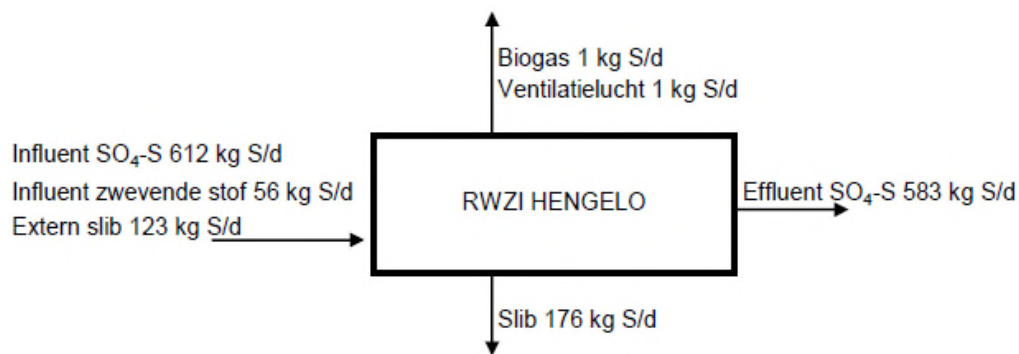
Om een zo representatief mogelijk beeld te krijgen van de andere zwavelcomponenten in de rwzi's van Amsterdam, is gebruik gemaakt van de zwavelbalans van rwzi Hengelo (Figuur 26). Dit is de enige in de literatuur gedocumenteerde zwavelbalans van een Nederlandse rwzi. De gegevens van rwzi Hengelo zijn vervolgens omgerekend, aan de hand van de ratio van de hydraulische capaciteit, naar een situatie die realistisch zou kunnen zijn voor de rwzi's West en Westpoort. Deze hydraulische ratio is: rwzi Hengelo : Amsterdam-West : Westpoort als 12.200 : 30.000 : 9.000 m³ per jaar. De berekende gegevens voor de zwavelstromen zijn weergegeven in Tabel 30.

De totale sulfaatvracht die de rwzi Amsterdam-West bereikt volgens de eerdere berekening – gebaseerd op de metingen van Waternet – blijkt fors hoger te liggen (9.846 kg/d) dan de resultaten uit de omrekening van de gegevens van rwzi Hengelo (1.434 kg/d).

TABEL 30 ZWAVELSTROMEN VAN RWZI HENGELO OMGEREKEND NAAR ZWAVELSTROMEN VOOR RWZI AMSTERDAM-WEST EN WESTPOORT, NAAR RATO VAN HYDRAULISCHE CAPACITEIT

Stroom (kg S/dag)	RWZI Hengelo	Berekende gegevens RWZI Amsterdam-West	Berekende gegevens RWZI Westpoort	RWZI Amsterdam West + Westpoort
Influent SO ₄ -S	612	1.505	451	1.956
Influent zwevende stof	56	138	41	179
Extern slib	123	302	91	393
Biogas	1	2,5	1	3,2
Ventilatie lucht	1	2,5	1	3,2
Slib	176	433	130	563
Effluent SO ₄ -S	583	1.434	430	1.864
Totaal	1.552	3.816	1.145	4.961

Op basis van deze berekening zou de jaarvracht van het influent voor de twee Amsterdamse rwzi's samen 714 ton sulfaat bedragen (1.956 kg S/dag).



FIGUUR 26: ZWAVELBALANS VAN RWZI HENGEL IN 2009 (STOWA 2011-21)



FIGUUR 27: GIS TEKENING MET CONCENTRATIE SULFAAT IN HET GRONDWATER IN NEDERLAND (KWR)

4.6.3 Verwerkingsroute

Technologieën met betrekking tot zwavel waren in eerste instantie gericht op verwijdering, omdat sulfide veel geur- en corrosie-overlast tot gevolg heeft. Er zijn verschillende technieken op de markt die sulfide kunnen verwijderen en deze zijn onder te verdelen in: biologisch, chemisch en fysisch.

Op rwzi's is de combinatie van luchtinjectie (biologische omzetting) en condensatie (fysische methode) de meest toegepaste methodiek voor de ontzwaveling van gistingsgas. Door toevoeging van een beperkte hoeveelheid zuurstof (lucht) wordt het H_2S -gehalte van het gistingsgas beperkt. Door afkoeling en compressie tot ca. 6 °C wordt het in water opgeloste deel van het H_2S met het vocht afgescheiden. Bij hoge(re) concentraties H_2S wordt soms ook ijzer - vaak in de vorm van ijzerchloride ($FeCl_3$), soms als ijzer(hydr)oxide - gedoseerd aan de gistingstank, dan wel het gecondenseerde biogas nog door een actieve kool filter geleid (KWR 2015b).

Ook chemische oxidatiemiddelen worden bij afvalwaterzuiveringen ingezet om zowel de geur, de toxiciteit van H_2S als de corrosievorming te beheersen. Voorbeelden van deze oxidatiemiddelen zijn ijzerchloride, waterstofperoxide, chlorine en kalium permangaat.

Volgens (STOWA 2013-31) is terugwinning van zwavel alleen mogelijk vanuit het biogas, omdat concentraties in de waterlijn te laag zijn (tussen 20 en 35 mg $\text{SO}_4\text{-S/l}$). De productie van elementair zwavel of zwavelzuur uit biogas of andere zwavelrijke gasstromen is een bewezen techniek die al op grote schaal op diverse locaties wordt toegepast.

Een mogelijkheid om zwavel terug te winnen is het Claus proces. Dit proces verwijdert zwavel (H_2S) uit de gasfase en maakt het mogelijk daaruit elementair zwavel terug te winnen. Het Claus proces is één van de meest gedocumenteerde processen voor het ontszavelen van gas. Het wordt veel toegepast bij H_2S -gehalten boven de 100 ppm en grote gasdebieten, zoals in de olie- en gasindustrie. Het Claus proces lijkt vooralsnog niet geschikt voor toepassing op rwzi's.

Eventueel gevormd sulfide kan ook precipiteren met een (zwaar) metaalion. Dit resulteert primair in het terugwinnen van zware metalen (zie ook paragraaf 4.7), maar kan in potentie ook het terugwinnen van zwavelcomponenten betekenen.

4.6.4 Afwegingen

STOWA (STOWA 2013-31) stelt dat het winnen van zwavel niet haalbaar is omdat:

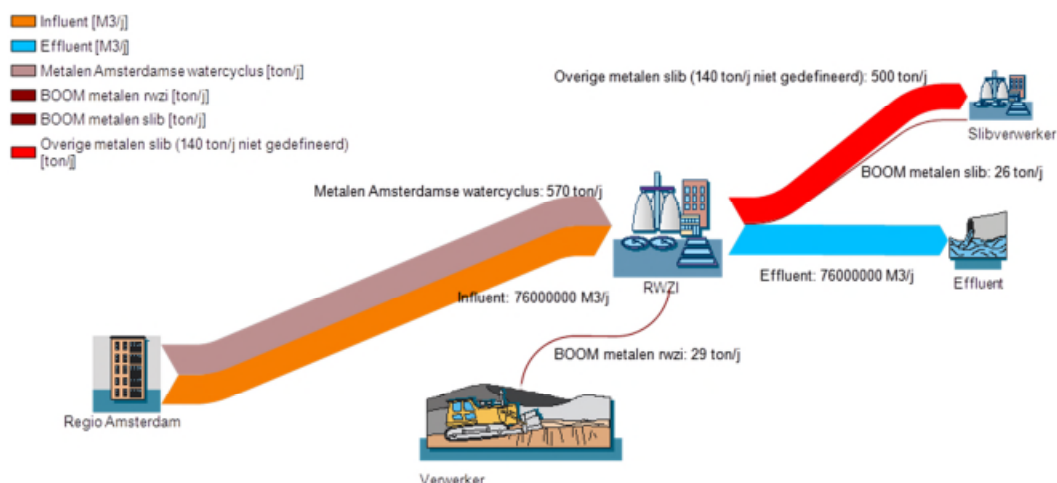
- zwavel als restproduct in toenemende mate beschikbaar komt bij de winning van olie en aardgas en daardoor een zeer goedkope en ruim beschikbare grondstof is;
- de kosten voor de winning van zwavel uit biogas op rwzi's al ver boven de huidige prijs van zwavel liggen.

Bij deze conclusies gaat STOWA er vanuit dat de concentratie zwavel in de waterlijn lager is dan 35 mg $\text{SO}_4\text{-S/l}$. Van het influent van de rwzi Westpoort zijn geen gegevens bekend. Gezien het relatief grote aandeel industriële lozingen op rwzi Westpoort zou de concentratie sulfaat in rwzi Westpoort wel eens (veel) hoger kunnen liggen wat kan leiden tot andere conclusies. Het is daarom wenselijk het zwavelgehalte in de waterlijn van rwzi Westpoort te toetsen aan bovenstaand uitgangspunt ($< 35 \text{ mg/l SO}_4\text{-S}$).

4.7 Metalen

Samengevat De totale jaarvracht aan metalen voor de Amsterdamse waterketen bedraagt meer dan 570 ton. Naast 29 ton aan zogenaamde BOOM-metalen (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, en Zn) en circa 500 ton aan bemeten overige metalen is er nog een onbekende vracht groter dan 140 ton aan overige niet gemeten "interessante stoffen en metalen".

Met de afvoer van het slib van de rwzi West naar AEB wordt jaarlijks circa 26 ton aan BOOM-metalen (Besluit Overige Organische Meststoffen, nu Besluit Gebruik Meststoffen) en meer dan 500 ton aan gekwantificeerde overige –al dan niet zeldzame/aard- metalen getransporteerd afkomstig uit de watercyclus.

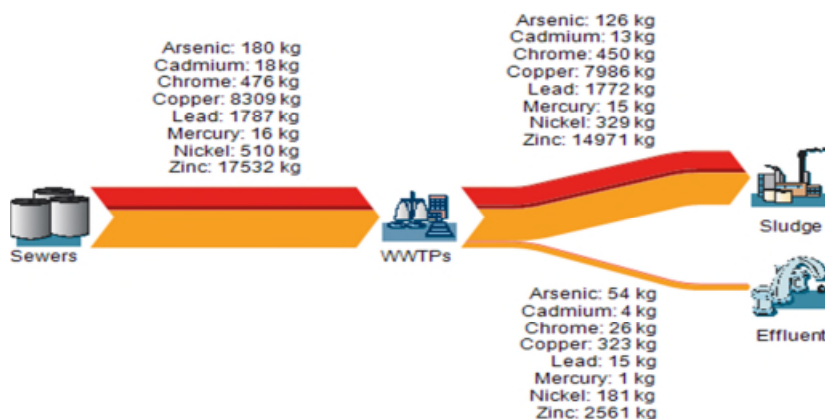


FIGUUR 28: SANKEY DIAGRAM METALEN IN DE AFVALWATERKETEN AMSTERDAM

4.7.1 BOOM-metalen in de watercyclus

Via het gemeentelijk rioolstelsel van de gemeente Amsterdam wordt jaarlijks circa 29 ton aan 8 zogenaamde BOOM-metalen (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, en Zn) ingezameld en getransporteerd naar de twee rwzi's van Amsterdam (Figuur 29).

BOOM staat voor het Besluit kwaliteit en gebruik Overige Organische Meststoffen. Deze regelgeving is op 1 januari 2008 vervallen en ondergebracht onder het Besluit bodemkwaliteit (Bbk) en Besluit gebruik meststoffen (Bgm), beide zijn geldend voor de rwzi. Met de invoering van het BOOM-besluit is de afzet van zuiveringsslib afkomstig van rwzi's naar de landbouw tot stilstand gekomen. Effluent van rwzi's en het afgevoerde slib wordt structureel geanalyseerd op de 8 metalen As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, en Zn.



FIGUUR 29: METAL FLOWS IN AMSTERDAM'S WASTE WATER (FOOIJ 2014)

Vanuit een meer brongerichte benadering is in een onderzoek uit 2010 een influent jaarvrucht voor beide rwzi's gevonden van 7,3 ton koper, een lozing met het effluent op oppervlaktewater van circa 0,3 ton koper en een afvoer naar het AEB via het ontwaterde slib van 7,1 ton koper (Figuur 30) (van der Helm et al. 2010). Deze vrachten zijn in lijn met de waarden gebaseerd op metingen in het effluent zoals gerapporteerd door Fooij (2014) (Figuur 29).

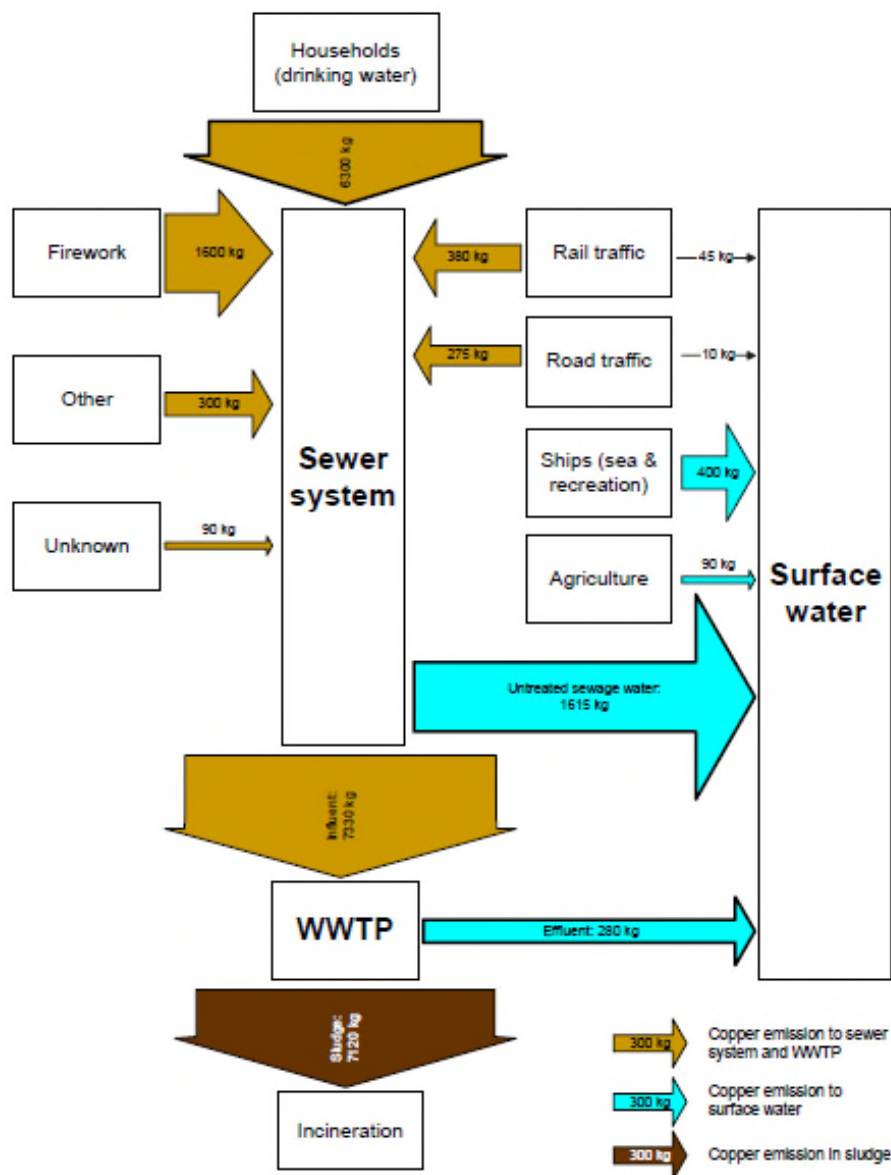
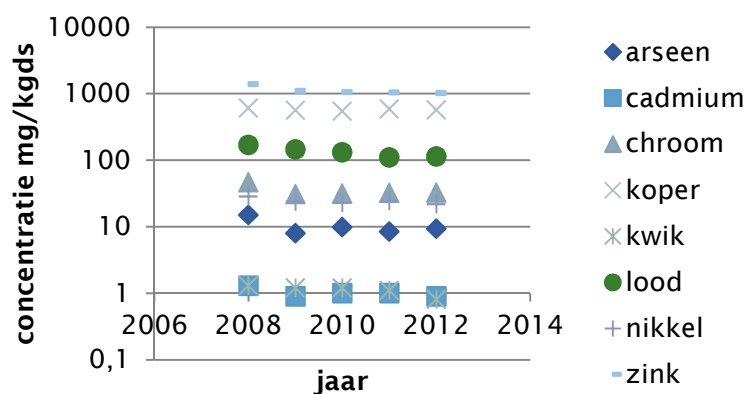


Figure 10 Copper mass balance for the city of Amsterdam (per year).

FIGUUR 30: MASSABALANS VOOR KOPER VAN DE STAD AMSTERDAM (VAN DER HELM ET AL. 2010)

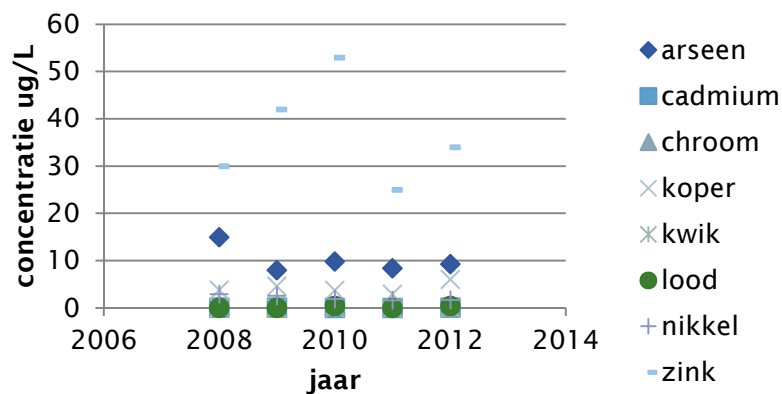
Van de 29 ton aan BOOM-metalen uit het influent wordt circa 3 ton geloosd op oppervlaktewater; het grootste gedeelte (circa 26 ton) wordt ingevangen in het slib en met het ontwaterde en vergiste slib naar AEB getransporteerd en daarmee uit de watercyclus verwijderd (Fooij 2014). De gemeten concentratie van de 8 BOOM-metalen in het slib vertonen over de periode 2008-2012 een geringe spreiding (Holthuijsen & Koning 2013b). De grootste vracht in het slib betreft de BOOM-metalen zink en (in mindere mate) koper.



FIGUUR 31: VERLOOP VAN ZWARE METALEN IN HET SLIB OVER EEN PERIODE VAN 5 JAAR (2008-2012). (HOLTHUIJSEN & KONING 2013B)

De gemeten concentraties in het effluent (

Figuur 32) zijn ook redelijk constant, maar fluctueren sterker dan in het slib (Figuur 31). Alleen zink vormt hierop een uitzondering met een grote spreiding, waardoor de jaarvrucht voor zink significant minder betrouwbaar en daardoor meer indicatief is (Tabel 33).



FIGUUR 32: CONCENTRATIES VAN ZWARE METALEN IN HET EFFLUENT VAN AMSTERDAM-WEST IN EEN PERIODE VAN 5 JAAR (2008-2012) (HOLTHUIJSEN & KONING 2013B)

Van de 26 ton aan de 8 BOOM-metalen komt naar verwachting het grootste gedeelte terecht in de bodemslakken van de verbrandingsovens van AEB.

TABEL 31 VRACHTEN ZWARE METALEN IN EFFLUENT EN SLIB DAT RWZI AMSTERDAM-WEST VERLIET IN 2012

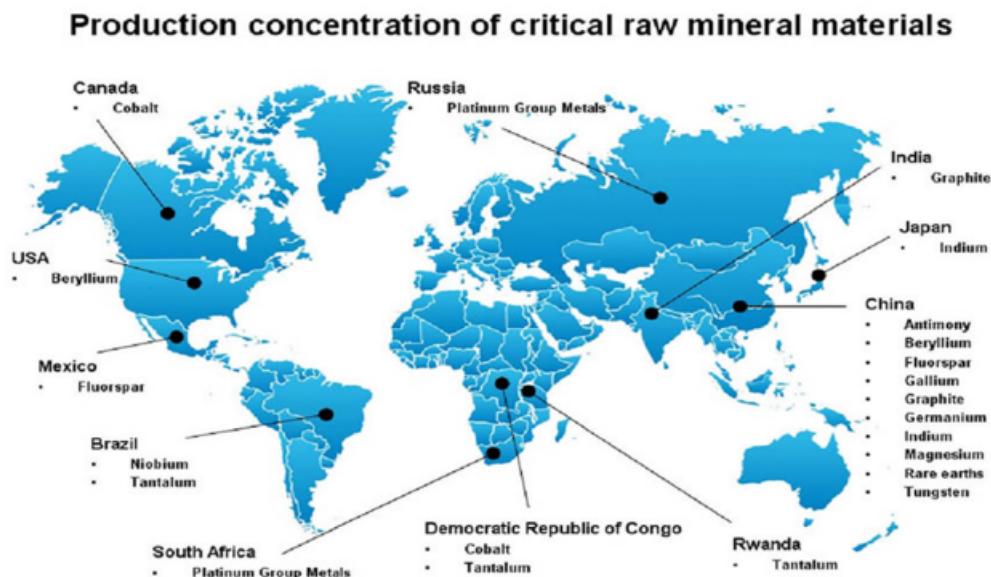
	Effluent	vracht kg/jaar	Slib
	ug/l		mg/kg ds
Arseen	1,1	72,6	9,3
Cadmium	0,1	5	0,9
Chroom	0,3	21,5	32,6
Koper	6	383,8	570
Kwik	0	0,1	0,8
Lood	0,4	26,6	113,6
Nikkel	1,7	106,1	21,8
Zink	34	2206,3	1025,8

4.7.2 Overige metalen

Naast de 8 bovengenoemde BOOM-metalen bestaat er een scala aan metaal-elementen (aardalkali-, overgangs-, hoofgroepmetaal of metalloïde), die in sterk wisselende hoeveelheden voorkomen in de afvalwaterketen. Deze stoffen zijn vaak:

- moeilijk te vervangen
- slecht te recyclen
- eindig bij gelijkblijvende consumptie (bijvoorbeeld zilver is in 27 jaar op; Indium (in laptops) binnen 11 jaar; koper in 59 jaar en zink in 44 jaar)
- slechts op een beperkt aantal plaatsen in de wereld beschikbaar, vaak in een minder politiek stabiele regio
- in het erts waaruit het gewonnen wordt in lage concentraties aanwezig
- milieubelastend. De mijnbouw en raffinage van de ertsen is energie-intensief, heeft (grote) milieuvervuiling tot gevolg en soms radioactieve bijproducten.

Zowel om sociaaleconomische, milieutechnische als om geopolitieke redenen is het voor Europa en Nederland niet wenselijk om voor de levering van deze belangrijke grondstoffen aangewezen te zijn op landen zoals genoemd in Figuur 33. De schaarste en de leveringsrisico's hebben bovendien een prijsopdrijvend effect.



FIGUUR 33: BELANGRIJKSTE WINNINGSLOCATIES VAN KRITISCHE MINERALEN IN DE WERELD (EUROPESE UNIE 2010)

Een aantal van deze metalen zijn door de Europese Unie daarom benoemd als in een 'kritieke staat': ze worden schaars (om economisch te winnen) of er ontstaat voor de Europese Unie een leveringsrisico (Europese Unie 2010). Bijlage III bevat de lijst met de metaalelementen – uit de groepen metalen, aardalkalimetalen, overgangsmetalen en metalloïden uit het Periodiek systeem der elementen – die door de Europese Unie als kritiek zijn vastgesteld, aangevuld met enkele andere waardevolle metalen. Van een aantal metalen – vooral de BOOM-metalen – is bekend dat deze in het influent, effluent en het slib aanwezig zijn (4.7.1) en ook terug winbaar zijn. Bijvoorbeeld koper wordt op demo-schaal al gewonnen in Moerdijk uit huishoudelijk afval via “hydrometallurgisch” extractie (Elemetal 2014). Binnen het wetenschappelijk onderzoek is momenteel ook veel aandacht aan het terugwinnen van stoffen. Zo wordt bij de ontwikkeling van nanotechnologie nadrukkelijk ook gekeken naar verwijdering van metalen.

Eén van de toegevoegde 'waardevolle' metalen is goud. In 2013 is eenmalig de concentratie goud gemeten van het influent, effluent en het afgevoerde slib van rwzi West door KWR en Vitens (Bauerlein 2014). Het effluent van de rwzi West bevat in dit monster 2,8 ug/l. Door combinatie van deze effluentwaarde met het gezamenlijke jaardebiet van de rwzi's West en Westpoort, volgt een potentiële vracht in het effluent van circa 230 kg goud per jaar. Het influent blijkt circa 3,6 ug/l goud te bevatten, wat overeenkomt met een vracht van circa 300 kg/jaar. Een jaarvracht van 300 kg goud heeft een potentiële financiële waarde van ongeveer € 8 miljoen per jaar.

In het slib van de rwzi is goud niet gedetecteerd en is daarom de detectiegrens van < 0,10 mg/kg droge stof gerapporteerd. Hieruit blijkt dat goud, in tegenstelling tot vele andere metalen, de rwzi nauwelijks via het slib verlaat. Bij het terugwinnen van goud moet dus gefocust worden op het influent of effluent.

4.7.3 Indicatieve bepalingen overige stoffen

Voor de aanwezigheid van de in Bijlage III genoemde stoffen in de afvalwaterketen is slechts beperkt data voorhanden.

Waterschap Vallei en Veluwe heeft het naar een eindverwerker afgevoerde slib van de rwzi's enkele malen geanalyseerd op een aantal elementen voorkomend in Bijlage III, naast de (verplichte) BOOM-metalen (Waterschap Vallei en Veluwe 2013). Door deze waarden te combineren met de slibafvoer van 18.360 ton in 2013 van de rwzi West en Westpoort naar AEB, volgen indicatieve vrachten voor het slib opgenomen in Tabel 32.

Door STOWA zijn vrachten gepubliceerd in de as van het zuiveringsslib in Nederland (STOWA 2013-31). Door het aandeel van de rwzi's West en Westpoort ten opzichte van Nederland totaal te bepalen op basis van inwoner equivalenten (circa 6%) zijn van enkele metalen aanvullende indicatieve vrachten bepaald, die zijn bijgevoegd in Tabel 32.

TABEL 32 VRACHTEN METALEN EN OVERIGE INTERESSANTE STOFFEN IN SLIB AFKOMSTIG VAN RWZI AMSTERDAM-WEST (KWR)

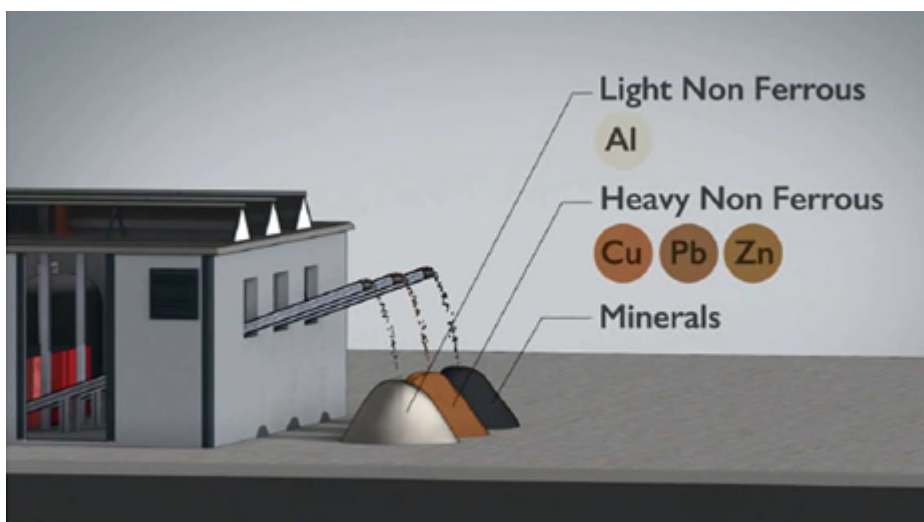
Element	BOOM-metalen (kg/jaar)	Overige metalen (kg/jaar)	Opgenomen in Bijlage III (kg/jaar)
Cu	3442		
Cr	475		
Ni	615		
Pb	1590		1590
Zn	18126		
As	123		
Cd	18		
Hg	10		
Fe		378	
Al		264	
K			
Mg		142838	142838
Mn		4997	
Mo		124	
Na			
Tl		43	
V		172	
W		208	208
Ag		92	92
Sn		330	330
Ba		3528	
Ca		340246	
Co		93	
Te		18	
Sb		65	65
Ce			
Ti		33878	
Au		228	228
Br		296	
Ma			
Se		37	
Sr		4065	
<i>Totaal</i>	<i>24.399</i>	<i>531.902</i>	<i>143.762</i>

4.7.4 Verwerkingsroutes

Metaalrecycling is niet alleen noodzakelijk ter voorkoming van afval en het uitputten van schaarse grondstoffen, maar ook voor het mogelijk besparen van energie en het verminderen van de uitstoot van CO₂. (Metaal Recycling Federatie 2014). Om metalen uit de watercyclus te winnen zijn diverse technologieën in gebruik of in onderzoek.

Het (vergiste) zuiveringsslib van Waternet wordt (mee)verbrand bij AEB. De resterende bodemas (circa 25% van de input) loogt na de voorbehandeling, waarbij ook ferro en non-ferro metalen worden teruggewonnen, nog teveel uit voor toepassing als funderingsmateriaal na 2017. Om ook na 2017 aan deze (stringentere) eisen te voldoen is in 2012 de 'Green Deal Verduurzaming nuttige toepassing AEC (Afval Energie Centrale)-bodemas' getekend met als doel een vrij toepasbare grondstof te creëren uit bodemas (Green Deal Verduurzaming nuttige toepassing AEC-bodemas 2012).

AEB werkt aan het terugwinnen van waardevolle grondstoffen en het opwaarderen van haar bodemassen met het Inashco proces. Getracht wordt om door droge scheiding meer metaaldeeltjes van aluminium, koper, lood en zink terug te winnen uit de bodemas van de verbrandingsoven (Figuur 34). Naast bodemas die vrij toepasbaar is als funderingsmateriaal kan hiermee een extra metalen-stroom met een hogere financiële waarde worden verkregen.



FIGUUR 34: INASHCO PROCES (AEB)

Elemetal uit Delft richt zich in haar onderzoek primair op de verwijdering van koper uit bodemas van verbrandingsinstallaties en is recent ook onderzoek gestart naar de extractie van zink.

Ook biologische verwijdering van metalen uit afvalwater is mogelijk. Zware metalen zijn met behulp van sulfaat reducerende bacteriën uit afvalwater te verwijderen, bijvoorbeeld in het SANI-zuiveringsproces (Sulfaat reductie Autotrofe denitrificatie en nitrificatie geïntegreerd proces) (Brand 2014).

Een methode in ontwikkeling is het verwijderen van zware metalen uit afvalwater door adsorptie aan een adsorbens gemaakt van zeewier. Het zeewier adsorbeert zware metalen in ionische vorm uit het afvalwater. Door het wier voor te behandelen met een zuur of base kan de opnamecapaciteit worden verhoogd (Cleanwater 2011). Een dergelijke concentreringsstap is een stimulans voor het (kunnen) terugwinnen van metalen.

4.7.5 Afweging

De in Nederland geproduceerde hoeveelheid zuiveringsslib bevat gezamenlijk ca. 136.000 kg koper (CBS 2011). Uitgaande van een prijs van € 5, -/kg oud koper, vertegenwoordigt de terugwinning van koper uit slib een financiële waarde van bijna € 700.000, -/jaar. Als blijkt dat het koper vooral vrijkomt met as van de eindverwerking, dan hoeft slechts een klein volume behandeld te worden, met eenzelfde financiële potentie.

Als blijkt dat het zuiveringsslib bijvoorbeeld eenzelfde hoeveelheid van het zeldzame aardmetaal Adverbium of Dysporium bevat als Telluur, dan bedraagt de financiële waarde per zeldzaam aardmetaal in zuiveringsslib bijna € 1.000.000,-/jaar. Naar verwachting kan (deels) eenzelfde technologie gebruik worden bij het terugwinnen van verschillende metalen. Hierdoor ontstaat synergievoordeel, waardoor het financiële rendement stijgt.

Ook in de media is veel belangstelling voor dit onderwerp. Recent is nog een persbericht verschenen onder de kop 'Er zit goud in ons afval(water)' en op 24 maart 2015 is een persbericht geplaatst met als titel 'Menselijke ontlasting bevat een aanzienlijke hoeveelheid edelmetalen, zo blijkt uit een nieuwe studie van Amerikaanse wetenschappers.' Hierin staat geschreven dat in de uitwerpselen van mensen kleine deeltjes goud en zilver zitten, maar ook zeldzame metalen die worden gebruikt bij de productie van elektronica, zoals palladium en vanadium. Gouddeeltjes zijn zelfs in een dergelijk grote mate aanwezig dat het lucratief zou kunnen zijn om goud te winnen uit het riool, aldus de auteurs (Smith 2015).

Volgens STOWA is het terugwinnen van zware metalen uit as de beste optie die nu al beschikbaar is (STOWA 2013-31). Door vastlegging in het slib en vervolgens verbranding zijn in as de hoogste concentraties metalen aanwezig. Gezien de beperkte opbrengsten zal terugwinning van de meeste metalen waarop geanalyseerd wordt - zijnde vooral de BOOM- en macro-metalen (als ijzer, aluminium, magnesium) - financieel onhaalbaar zijn, bij de huidige (volatiele) grondstofprijzen. Vooral aluminium, magnesium en titanium maar ook koper en mangaan lijken een potentieel aantrekkelijke opbrengst te hebben. Het is nog onbekend in welke vorm deze potentieel interessante metalen teruggewonnen kunnen worden en wat de afzetmogelijkheden zijn in de te winnen vorm. Ook zijn nog niet van alle metalen de concentratie in afvalwater en/of slib bekend. Vooral voor de zeldzame aardmetalen kan de concentratie mogelijk interessant genoeg worden om terugwinning interessant te maken (STOWA 2013-31). Gezien de onzekerheid over de technische (en daarmee ook financiële) haalbaarheid is het terugwinnen van metalen niet meegenomen in het concept van de 'Grondstoffen rwzi'.

Voor een goede onderbouwing van de te maken strategische keuze van Waternet in het kader van het terugwinnen van grondstoffen uit de watercyclus en rekening houdend met het EU-standpunt ('kritieke staat') betreffende deze stoffen (zie ook paragraaf 6.3) en de veelal lage concentraties in het erts waaruit de metalen worden gewonnen, verdient het aanbeveling onderzoek te doen en oriënterend metingen te verrichten naar gehalten van de stoffen zoals opgenomen in Bijlage III in het afvalwater en het slib van de rwzi's West en Westpoort. Dit geldt in het bijzonder voor die metalen waarvan nog geen enkele representatieve waarde beschikbaar is, om daarmee de potentie van het terugwinnen van deze metalen uit de afvalwaterketen te kunnen bepalen.

Omdat het gehalte aan metalen per rwzi sterk verschilt (STOWA 2014-35) en de technologie voor het terugwinnen van metalen uit afvalwater en slib nog in ontwikkeling is en niet (grootschalig) toegepast wordt in de praktijk, is het aan te bevelen om nu al actief te gaan participeren in (of zelf te ontwikkelen van) initiatieven voor onderzoek en ontwikkeling.

5 Thermische energie

5.1 Warmte uit het riool – Riothermie

5.1.1 Energie in de watercyclus

Wanneer de energiehuishouding in de watercyclus wordt geanalyseerd, valt op dat veruit het grootste deel van het energieverbruik zit in het genereren van warm tapwater. Leerdam et al. (2011) hebben aangetoond dat gemiddeld in Nederland 117 W/per persoon⁴ aan primaire energie wordt gebruikt voor zuivering en levering van drinkwater, inzameling en zuivering van afvalwater en de bereiding van warm water. De bereiding van warm water vergt ruimschoots het grootste aandeel: 94 W/persoon gemiddeld aan primaire energie (~80%). De hoeveelheid thermische energie is daarmee ongeveer vier keer zo hoog als de potentiële chemische energie van de aanwezige organische stof (CZV). CZV vertegenwoordigt theoretisch 27 W per persoon.

Directe terugwinning van warmte uit afvalwater, bijvoorbeeld door het toepassen van douchewarmtewisselaars, is daarom een efficiënte methode om het verlies van warmte uit huishoudens tegen te gaan. Waternet doet onderzoek naar de rentabiliteit van deze methode.

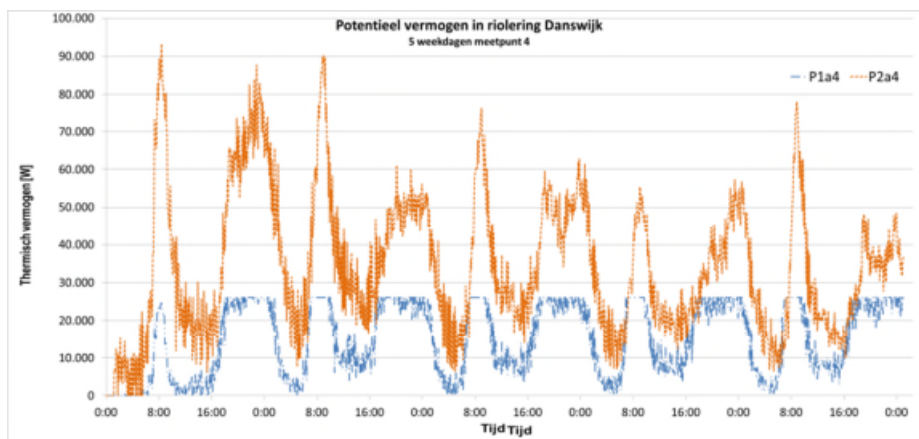
Ook met toepassing van een warmtewisselaar, verlaat veruit het meeste warme water gebouwen en woningen via het riool. Het riool is daarmee een belangrijk warmtelek. Voor een moderne goed geïsoleerde woning kan dit zelfs oplopen tot 50% van het energieverbruik van de woning. Het terugwinnen van warmte uit het riool kan dus aantrekkelijk zijn, omdat daarmee primaire brandstoffen kunnen worden bespaard en daarmee ook de uitstoot van broeikasgassen kan verminderen. In dit hoofdstuk wordt een aantal aspecten over warmte uit het riool – riothermie – op een rij gezet.

5.1.2 Beschikbare en winbare warmte

De theoretisch beschikbare warmte in of het potentieel vermogen van het riool is sterk dynamisch en hangt samen met verbruikspatronen van warm tapwater. Warm water wordt vanuit tal van woningen op het riool geloosd en de lozingen zijn doorgaans gespreid in de tijd en relatief kortstondig. Metingen in Amsterdam Noord (Meidoornweg) en modelberekeningen bevestigen dat (Hofman et al. 2014).

De dynamiek in het afvalwater laat zich goed voorspellen met behulp van gesimuleerde drinkwaterverbruikspatronen met SIMDEUM™. SIMDEUM™ geeft debieten, temperaturen en tijdsduur van een afname voor alle tappunten in een gebouw of woning. Deze informatie kan vertaald worden naar de afvalwaterlozing in het riool door rekening te houden met tijdvertraging en dispersie tussen het gebruiks- en lozingsmoment, maar ook met warmteverlies in de woning (Model SIMSEM). Door de afvalwaterpatronen (debiet, temperatuur) die zo ontstaan te voeden aan een rioleringsmodel, kan de warmtebalans van een rioolstelsel worden gesimuleerd en kan de beschikbare warmte in kaart worden gebracht. Dit is in het kader van het Bedrijfstakonderzoek (BTO) gedaan voor de Danswijk in Almere (gescheiden stelsel). Figuur 35 toont het berekend potentieel vermogen in het verzamelriool van de Danswijk.

⁴ Er is gerekend met primaire energie om de verschillende energiecomponenten vergelijkbaar te maken. Drinkwaterbereiding en -transport, en afvalwaterzuivering maken voornamelijk gebruik van elektrische energie. Om elektrische energie om te rekenen in primaire energie, is een rendement van 40% aangehouden. Voor het verwarmen van water is uitgegaan van gas met een rendement van 100%.



FIGUUR 35: POTENTIEEL VERMOGEN VAN HET RIOOLWATER IN DE DANSWIJK, ALMERE IN VOOR- EN NAJAAR. AFVOER 6.000 INWONEREQUIVALENTEN. BLAUWE LIJN: MAXIMALE AFKOELING AFVALWATER 1°C, ORANJE LIJN: SIMULATIE VAN EEN TEGENSTROOM WARMTEWISSELAAR IN RIOOLSECTIE (BLOEMENDAL ET AL. 2014)

Op basis van de resultaten van de simulaties van de Danswijk zijn kentallen opgesteld die gebruikt kunnen worden voor het schatten van het potentieel vermogen. De resultaten staan vermeld in Tabel 33.

TABEL 33 KENTALLEN VOOR ROTHERMIE OP BASIS VAN DE DANSWIJK, ALMERE. LOCATIE 1: 50 I.E., 2: ± 500 I.E., 3: ± 2.500 I.E., 4: 6.000 I.E. (BLOEMENDAL ET AL. 2014)

	Locatie	1	2	3	4	eenheid
winter	gemiddelde temperatuur	22.5	16.6	20.1	20.4	C
	gemiddeld vermogen	0.7	2	17	19	kW
	st.dev. / gemiddeld	0.94	0.54	0.54	0.65	-
	vermogen/inwoner	16	4	7	3	W
Voorjaar/herfst	gemiddelde temperatuur	23.7	19.4	22.1	21.8	C
	gemiddeld vermogen	0.8	4	21	25	kW
	st.dev. / gemiddeld	0.94	0.47	0.52	0.54	-
	vermogen/inwoner	18	8	9	4	W
zomer	gemiddelde temperatuur	25.0	22.1	24.1	24.3	C
	gemiddeld vermogen	0.9	5	26	32	kW
	st.dev. / gemiddeld	0.95	0.47	0.51	0.50	-
	vermogen/inwoner	20	11	11	5	W

Geconcludeerd kan worden dat

- Het beschikbare vermogen en daarmee de winbare energie sterk fluctueert over de dag.
- Bij lange stukken leiding met minder dan circa 500 inwonerequivalenten de rioolwatertemperatuur gevoeliger is voor de temperatuurcondities van de omliggende bodem.
- Vanaf circa 5.000 aangesloten inwonerequivalenten het zinvol lijkt om energiewinning uit afvalwater te overwegen (vanuit energetisch/technisch perspectief).
- De combinatie met WKO een logische keuze lijkt: het sluit goed aan bij de optredende temperatuurniveaus en de seizoencyclus.

Naast de theoretisch beschikbare warmte is het van belang om de werkelijk te winnen warmte te kunnen bepalen. Op basis van het model van de Danswijk in Almere is daarvoor een schatting gemaakt. Aan praktische informatie hierover ontbreekt het in Nederland nog, omdat er nog geen grootschalige riothermiesystemen operationeel zijn. Er kan weliswaar

geleerd worden van de situatie in het buitenland (Zwitserland, Duitsland, Scandinavië), maar de situatie daar is wezenlijk anders. Het vaststellen van praktisch winbare energiehoeveelheden vergt experimenteel onderzoek op praktijkschaal ter plaatse onder Nederlandse condities.

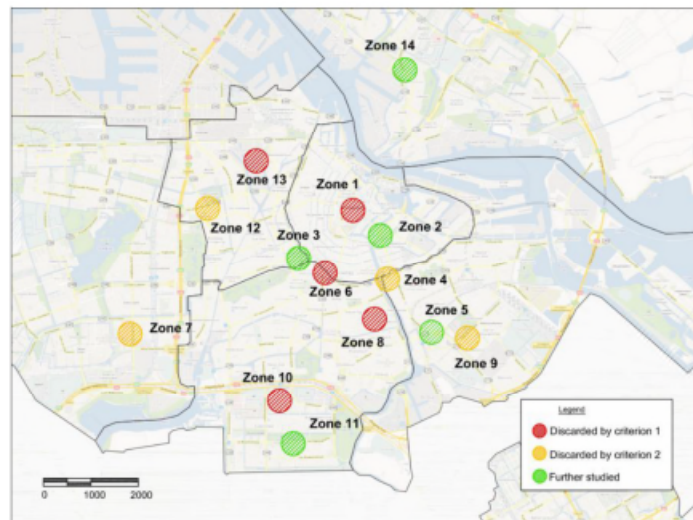
5.1.3 Geschikte locaties voor riothermie

Zoals hierboven is vermeld, is het van belang dat er voldoende afvoerdebiet (> 5.000 ie) aanwezig is om riothermie, energetisch gezien, zinvol te kunnen toepassen. Een tweede belangrijke voorwaarde voor toepassing van riothermie, is de aanwezigheid van een afnemer van de warmte. Warmtewinning uit het riool is alleen zinvol als de warmte kan worden afgezet. Om seizoensfeesten en dynamiek op te vangen is een combinatie van riothermie met een WKO-systeem een voor de hand liggende optie en in de praktijk bijna een noodzaak. Daarmee is in feite een derde belangrijke voorwaarde voor riothermie benoemd: de mogelijkheden voor realisatie en combinatie met een WKO-systeem.

Omdat het bij toepassingen van riothermie om laagwaardige warmte gaat, kan (vanuit economisch perspectief) de warmte bovendien niet over te grote afstanden worden getransporteerd. Dit betekent dat de winlocatie, de afnemer en het WKO systeem allemaal dicht bij elkaar moeten liggen. Door gebruik te maken van geografische informatie systemen gekoppeld aan modelberekeningen kunnen vraag en aanbod met elkaar gekoppeld worden.

5.1.4 Riothermie in Amsterdam

Door Monsalve (2011) is in kaart gebracht waar riothermie in Amsterdam potentie heeft. In Figuur 36 is het resultaat van deze studie vermeld. Uit deze studie kwam naar voren dat slechts vijf locaties mogelijk interessant zijn voor toepassing van riothermie (ook financieel). Omdat de stad zich snel ontwikkelt, kan het beeld uit 2011 ondertussen gewijzigd zijn. Mogelijk hebben zich nieuwe potentiële afnemers gevestigd, zijn er nieuwe WKO-systemen gerealiseerd of zijn er wijzigingen geweest in de productie van (warm) afvalwater. Daarnaast heeft recent onderzoek meer gedetailleerde informatie opgeleverd zoals de dynamiek in de beschikbare warmte. Een hernieuwde en meer gedetailleerde inventarisatie van potentiële locaties leidt mogelijk tot nieuwe inzichten.



FIGUUR 36: ONDERZOCHE ZONES MET POTENTIE VOOR RIOTHERMIE IN AMSTERDAM. ROOD: AFSTAND TOT EINDGEBRUIKER TE GROOT EN/OF DIAMETER LEIDING TE KLEIN. GEEL: AFGEVALLEN NA INSPECTIE TER PLEKKE, GROEN: POTENTIËLE LOCATIES VOOR RIOTHERMIE

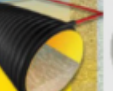
De kans dat in Amsterdam ten opzichte van 2011 nog nieuwe locaties worden gevonden die in aanmerking komen voor grootschalige riothermie wordt vrij klein geacht, in het bijzonder door het ontbreken van afnemers van de warmte en de beschikbaarheid van andere warmtebronnen.

Een beter alternatief dat wel levensvatbaar is, is warmteterugwinning op woningniveau, door het toepassen van douchewarmtewisselaars. Een proefproject op dat vlak loopt momenteel in Amstelveen bij het studentenhuusvestingscomplex 'Uilenstede'.

Warmtewinning van de rwzi's in Amsterdam lijkt momenteel niet zinvol, gezien de beschikbaarheid van warmte uit de naburige afvalverbranding (AEB) en het daaraan gekoppelde warmtenet.

Een overzicht van riothermiesystemen die momenteel op de markt verkrijgbaar zijn, is te vinden in Tabel 34.

TABEL 34 OVERZICHT RIOTHERMIESYSTEMEN (HEIJMANS 2014)

Systeem	Wavin	Thermwin	Rabtherm	Therm Liner	Berding/LBn	PKS Thermipe	Hydra Thermipe
							
Leverancier	Wavin	Huber	Kroondehly	Uhrig Bau & Geveke	Berding beton & LBn Beton	Frank GmbH	Frank & Socea & Heijmans
Levensduur	Onbekend	15jr	Onbekend	15jr	Onbekend	50jr	100jr
Type	Geïntegreerd	Bovengronds	Inbouw	Inbouw	Inbouw	Geïntegreerd	Geïntegreerd
Boorbuis?	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Ja

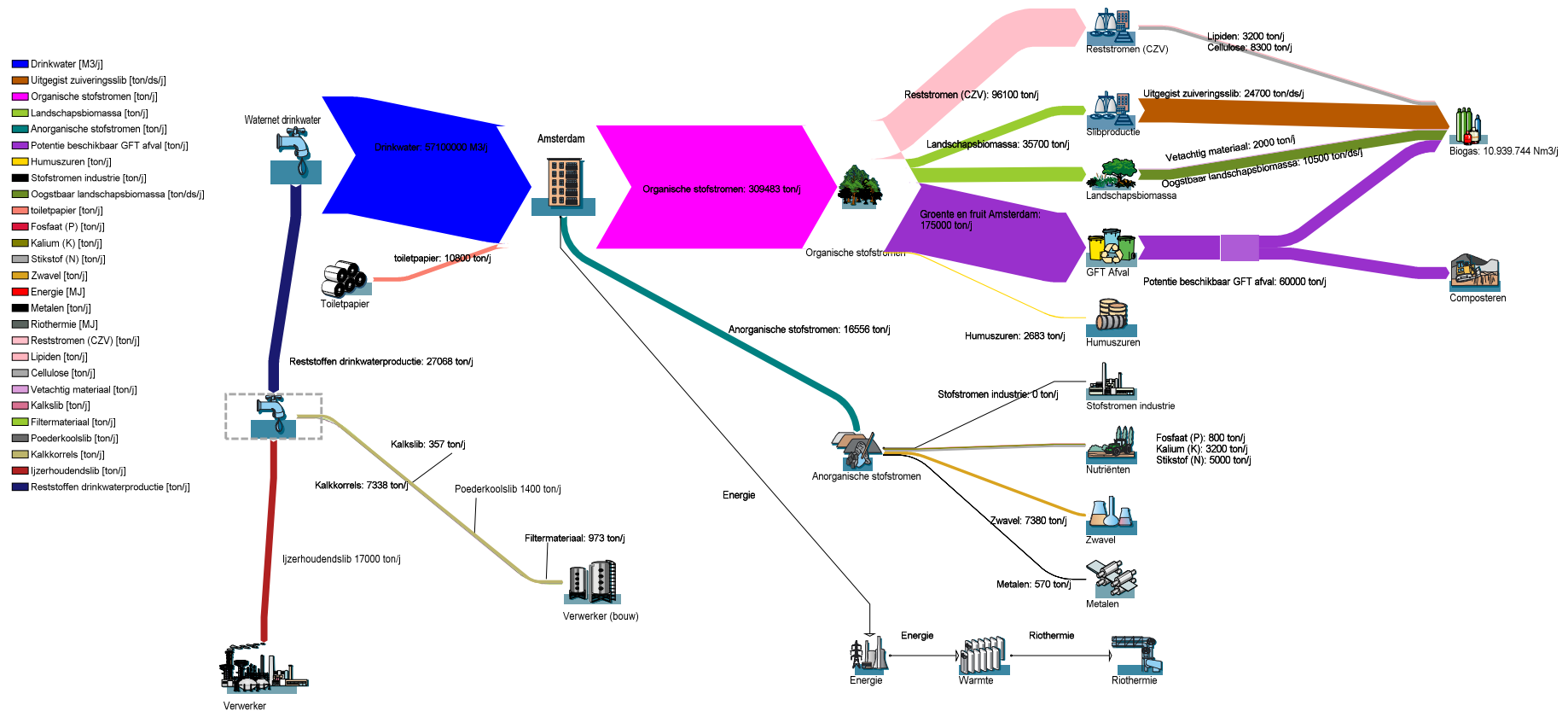
6 Beschouwingen, integrale conclusie en discussie

6.1 Stofstromen Amsterdam: samengevat

In Tabel 35 is een samenvatting gegeven voor de in dit onderzoek geïnventariseerde stofstromen. In Figuur 37 zijn deze gegevens gevisualiseerd in de vorm van een Sankey diagram, waarbij de dikte van de pijlen laat zien waar de grootste stofstromen zich bevinden.

TABEL 35 GEÏNVENTARISEERDE STOFSTROMEN REGIO AMSTERDAM (SAMENGEVAT)

Stofstroom (per jaar)	Hoeveelheid	Beschikbaar
landschapsbiomassa	12.103 ton droge stof	10.575 ton droge stof
<u>Waterlandschapsbiomassa</u>		
- groen drijfvuil	180 ton droge stof	180 ton droge stof
- exoten	>110 ton droge stof	>110 ton droge stof
- overig maaisel	PM	PM
Zuiveringsslib	24.700 ton droge stof	24.700 ton droge stof
Vetachtig materiaal	12.000 ton vetachtige materialen	2.000-12.000 ton vetachtig materialen
Groente-fruit afval		60.000 ton
Tuinafval	140.000 ton	GFT (incl. tuin)=75.000 a
Cellulose	15.000 ton	90.800 ton
Lipiden	7.700 - 10.700 ton	6.700 ton droge stof
Vetzuren	toilet papier	cellulose
	3.200 ton	3.200 ton
	219 ton	219 ton
<u>Reststromen drinkwaterproductie:</u>		
- kalkkorrels	7.338 ton	7.338 ton
- poederkoolslib	1.400 ton	1.400 ton
- filtermateriaal	973 ton	973 ton
- kalkslib	ca. 357 ton	ca. 357 ton
- ijzerhoudend slib	17.338 ton	17.338 ton
<u>Humuszuren</u>	2.740 ton	2.740 ton
- Humuszuren oorsprong drinkwater	140 ton	140 ton
- Humuszuren CZV rwzi	2.600 ton	2.600 ton
Stofstromen bedrijven/industrie	PM	PM
<u>Nutriënten:</u>		
- stikstof	5.000 ton	5.000 ton
- fosfaat	800 ton	800 ton
- kalium	3.200 ton	3.200 ton
Zwavel	7.380 ton	1.864 ton
<u>Metalen:</u>	570 ton	
- BOOM		29 ton
- overige		500 ton
<u>Energie:</u>		
- riothermie	PM	PM



FIGUUR 37: SANKEY DIAGRAM STOFSTROMEN REGIO AMSTERDAM

6.2 Beschouwingen

Er zijn een aantal beschouwingen over welke stofstromen, verwerkingsroutes en technologieën het beste zijn, gericht op het terugwinnen van energie en grondstoffen uit stofstromen die (potentieel) beschikbaar zijn in de regio Amsterdam.

Achtereenvolgend worden de volgende onderwerpen en visies belicht:

- Zero Waste
- Bio Based Economy
- STOWA / Grondstoffenfabriek
- Green deal grondstoffen
- Professor Mark van Loosdrecht, TU Delft
- Professor Willy Verstraete, Gent Universiteit België

6.2.1 Zero Waste

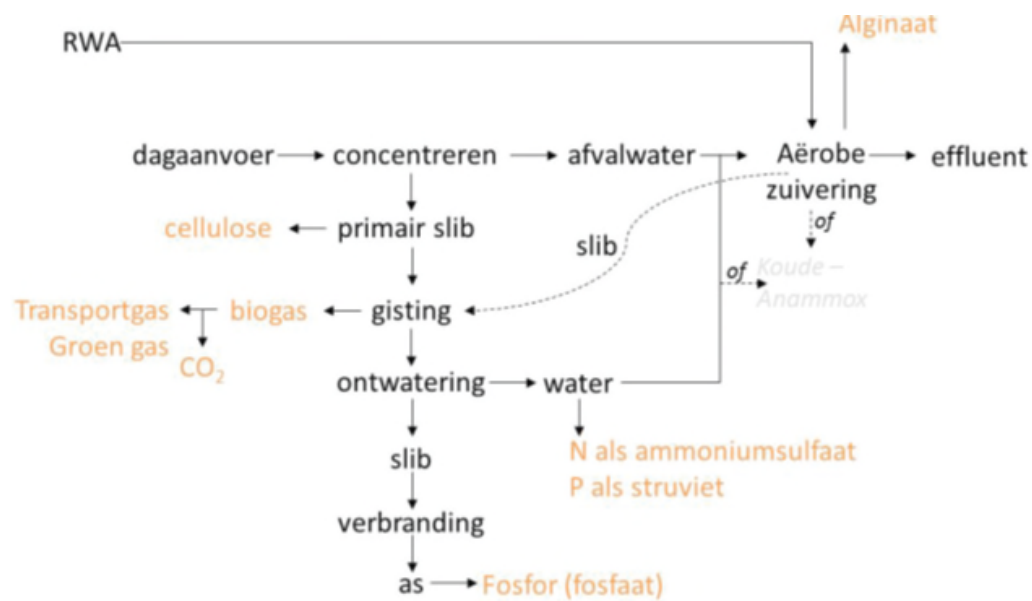
Het uitgangspunt van Zero Waste is dat alle waardevolle componenten in de afvalstromen (water, energie en nutriënten) worden herwonnen en gevaloriseerd. Bijvoorbeeld drinkwaterbedrijf Vitens heeft hierop haar doelstelling gebaseerd om alle geproduceerde reststoffen in te zetten voor hergebruik.

6.2.2 Bio Based Economy

Een belangrijk begrip in de Bio Based Economy is cascadering. Dat houdt in dat alle componenten van de biomassa zo goed mogelijk benut worden, en dat als eerste de componenten worden gebruikt met de hoogste toegevoegde waarde in kwaliteit en kwantiteit voor de gehele keten. In een Bio Based Economy gaat het dus om gebruik van alle grondstoffen, maar ook om het zo hoogwaardig mogelijk inzetten van die grondstoffen. Zo kan het gebruikt worden voor de ingewikkelde technologische processen voor medicijnen en chemicaliën. De toegevoegde waarde van biomassa wordt bepaald door de toepassing.

6.2.3 STOWA / Grondstoffenfabriek

In 2013 is een STOWA onderzoek gepubliceerd met een verkenning van de mogelijkheden voor een rwzi als leverancier van grondstoffen (STOWA 2013-31). Deze visie is weergegeven in Figuur 38. In deze figuur staat aangegeven welke processtroom op een rwzi geschikt is voor de productie van welk product.



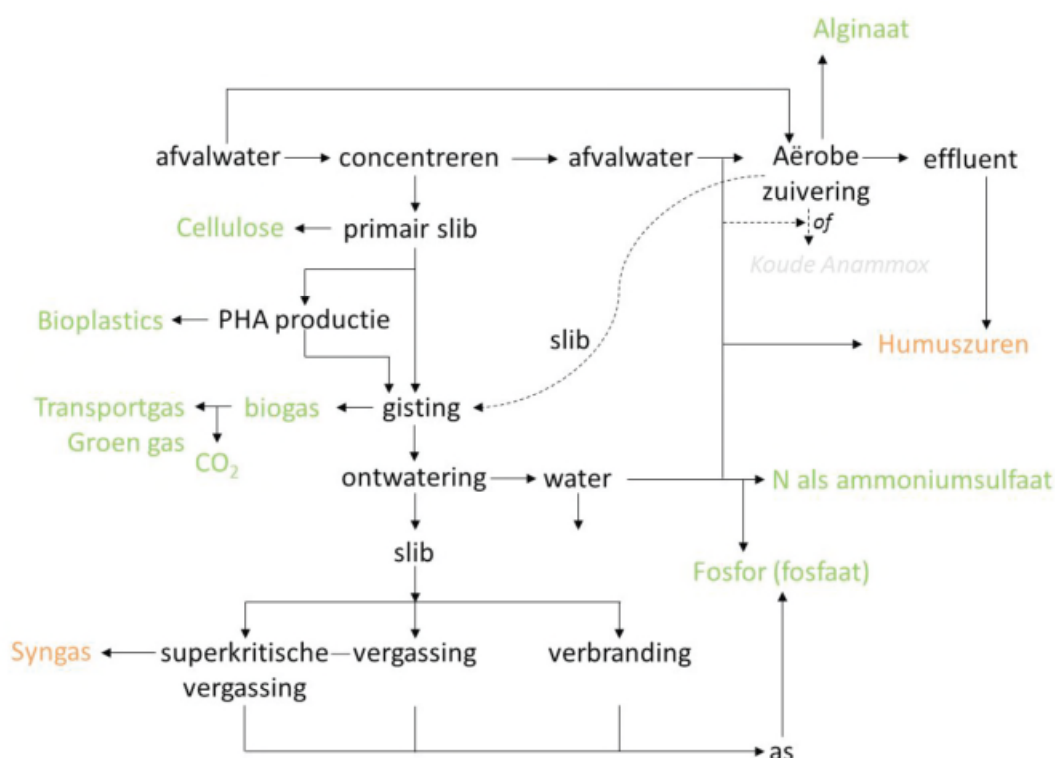
FIGUUR 38: CONCEPT GRONDSTOFFEN RWZI (STOWA 2013-31)

In genoemd onderzoek is een analyse gemaakt van de markt en de technisch en financiële haalbaarheid om stoffen terug te winnen. Het resultaat daarvan is opgenomen in Tabel 36. Uitgaande van de resultaten uit Tabel 36 is Figuur 39 samengesteld, met een schematisch overzicht van alle mogelijke routes om de (in het STOWA onderzoek) geselecteerde grondstoffen terug te winnen.

TABEL 36 RESULTATEN SELECTIE GRONDSTOFFEN (STOWA 2013-31)

Grondstof	Belangrijkste reden geselecteerd of afgevalen	Risico	Potentie
GESELECTEERDE GRONDSTOFFEN			
Alginaat	aantrekkelijke marktprijs en eigenschappen	kosten productie hoger dan opbrengst;	hoog
Cellulose	beschikbare techniek al aanwezig is	aandeel cellulose daalt in afvalwater; kosten productie hoger dan opbrengst	hoog
Fosfaat	schaarse grondstof en technieken beschikbaar	struvel uit afvalwater niet onder wettelijke voorwaarden valt	hoog
Stikstof	aandeel terug te winnen stikstof significant is ten opzichte van gebruik aan kunstmest	beperkte concentraties in rejectiewater	laag
CZV als brandstof	hoogste energieopbrengst en bewezen techniek	opbrengsten brandstof minder worden	hoog
CZV als bioplastic	aantrekkelijke marktprijs	benodigde schaal (te) groot	hoog
CO ₂	als bijproduct beschikbaar is na opwerking biogas	daling afzetprijs	laag
NIET GESELECTEERDE GRONDSTOFFEN			
Algen	financieel niet haalbaar in Nederland	beperkte hoeveelheid zonlicht	niet aanwezig
Kalium	concentratie in afvalwater veel te laag	zuiverheid product, naast kalium ook natrium aanwezig	laag
Zwavel	kosten voor winning een factor 10 hoger liggen dan mogelijke afzetprijs	concurrentie is de olie-, en gasindustrie waar zwavel als bijproduct wordt gevormd	niet aanwezig
Humuszuren*	concentratie en kwaliteit humuszuren is onbekend	onbekend	onbekend
CZV als syngas*	technische en financiële haalbaarheid onbekend	complexiteit en onderhoud installaties	onbekend
CZV als vetzuur*	technische en financiële haalbaarheid nog niet aan te tonen	concurrentie met energievoorziening en CZV nodig voor stikstofverwijdering	onbekend
Slib als bouwstof	geen markt, complexe wetgeving	geen afzetmarkt	niet aanwezig
Slib als meststof	geen ruimte voor door mestoverschot	gehalte zware metalen	niet aanwezig
Slib als bodemverbeteraar	gehalte aan zware metalen te hoog voor toepassing in landbouw	gehalte zware metalen	laag
Geneesmiddelen	geen acceptatie van teruggewonnen product	lage concentraties, en merendeel zijn afbraakproducten	niet aanwezig
Lipiden	mogelijkheden onbekend	onbekend	Onbekend
Metalen*	onbekendheid over terug te winnen vorm	onbekendheid of winbare vorm interessant is voor markt	onbekend
Water	lokale situatie bepaalt kansen;	bij voldoende beschikbaarheid grondwater loont opwerking effluent zeer waarschijnlijk niet	lokaal bepaald

* onderzoek vereist om vast te stellen of de stof voldoende potentie heeft om in de 'Grondstoffen RWZI' te worden opgenomen.



FIGUUR 39: SCHEMATISCH OVERZICHT VAN ALLE MOGELIJKE ROUTES OM DE - IN HET STOWA ONDERZOEK - GESELECTEERDE GRONDSTOFFEN TERUG TE WINNEN. (GRONDSTOFFEN IN GROEN: GESELECTEERD; IN ORANJE: POTENTIEEL INTERESSANTE GRONDSTOFFEN WAAR NOG VERDER ONDERZOEK VOOR NODIG IS); KOUDE ANAMMOX IS EEN TECHNIEK IN ONTWIKKELING (GRIJS EN CURSIEF). (STOWA 2013-31)

6.2.4 Green deal grondstoffen

Waterschappen beschouwen het afvalwater steeds meer als een bron van duurzame energie en grondstoffen. Op 20 november 2014 is de Green Deal Grondstoffen getekend om het winnen van grondstoffen uit afvalwater door waterschappen de komende jaren verder te brengen. De Green Deal sluit aan bij het programma Van Afval Naar Grondstof van het ministerie van Infrastructuur en Milieu, waarmee een bijdrage wordt geleverd aan de circulaire economie.

De Green Deal Grondstoffen richt zich op het verder stimuleren van het winnen van waardevolle grondstoffen. Uit afvalwater kan naast fosfaat ook cellulose, polymeren, alginaat en CO_2 worden gewonnen. Deze grondstoffen kunnen opnieuw worden gebruikt, bijvoorbeeld fosfaat als groene meststof in de landbouw, cellulose (als afdruiptremmer) voor asfalt, maar ook als basis voor bioplastic of biocomposiet productie en CO_2 voor tuinbouwkassen of de procesindustrie.

Onder de vlag van de Green Deal Grondstoffen starten de waterschappen kansrijke demonstratieprojecten die van aanbesteding tot realisatie door het Rijk (financieel) worden ondersteund en gevolgd om van te leren. Het Rijk neemt belemmeringen in regelgeving weg en zoekt actief mee naar oplossing van allerlei praktische problemen, bijvoorbeeld rond vergunning verlening.

6.2.5 Zienswijze professor Mark van Loosdrecht (TU Delft)

Volgens professor Mark van Loosdrecht van de Technische Universiteit Delft is voor de huidige verwerking van biomassa maar één technologie geschikt uit de lijst met technologieën (Tabel 15, paragraaf 3.4), namelijk vergisten (Loosdrecht 2014). De vergistbaarheid kan daarbij verbeterd worden met thermische druk hydrolyse. Overige technologieën zijn veelbelovend, maar nu (nog) niet (economisch) haalbaar in Nederland.

Afvalwater dient naar zijn mening in principe centraal gezuiverd te worden. In een zeer specifiek geval zou decentraal zuiveren gunstiger kunnen zijn, bijvoorbeeld bij het gescheiden en decentraal verwerken van (geconcentreerd) afvalwater afkomstig uit vliegtuigen.

Het bijmengen van GFT in het riool is volgens Van Loosdrecht geen goed idee. Er wordt “veel” (organische stof/CZV, stikstof en fosfaat) bijgevoegd aan “weinig” (de vervuilingsgraad (concentratie) in afvalwater is veel kleiner dan in GFT). Bovendien zou dan niet alleen de hoeveelheid organisch stof in het influent toenemen - daar doen we het tenslotte voor -, maar zal ook de concentratie N en P toenemen. Een verhoogd N en P-gehalte verwerken kunnen bestaande rwzi's niet zonder meer aan, terwijl veelal voor CZV nog wel capaciteit beschikbaar is (al dan niet na relatief kleine ingrepen). Het effect hiervan is dat het effluent van de rwzi een hoger gehalte aan N, P en (opgeloste) CZV zal bevatten en ook meer inert materiaal. Toch kan het voor hoogbouw interessant zijn om te kijken wat qua duurzaamheid en gemak de beste afvoermethode voor GFT is.

Een andere, mogelijkheid is het bijmengen van (met name primair) slib van de afvalwaterbehandeling aan de GFT-stroom. Voor Amsterdam is dit echter momenteel geen reële mogelijkheid, omdat het GFT nu niet gescheiden ingezameld wordt.

6.2.6 Zienswijze professor Willy Verstraete (Gent Universiteit, België)

De huidige focus op de productie van biogas als energiebron is volgens professor Willy Verstraete van Gent Universiteit onterecht en vooral relevant om politieke redenen (Verstraete 2014). Zo verplicht Europa in haar richtlijn 2009/28/EG ter bevordering van hernieuwbare energie dat Nederland in 2020 een aandeel van 14% hernieuwbare energie realiseert en dat 10% van de brandstoffen in de transportsector afkomstig moet zijn uit hernieuwbare bronnen (Planbureau voor de Leefomgeving).

Dit verklaart ook (deels) de interesse in omzettingroutes gericht op transportbrandstof als via het carboxylaatplatform of vetzuren (o.a. Paques), terwijl de focus beter hoger in de waardepiramide gelegd zou moeten worden.

De ontwikkelingen ten behoeve van cellulose zijn volgens Verstraete moeizaam, mede omdat hiervoor te weinig marktpotentie aanwezig is.

Verstraete heeft bedenkingen over het terugwinnen van nutriënten als N en P ten behoeve van bodemverbetering/meststof. Gezien de relatief kleine schaal waarop rwzi's teruggewonnen nutriënten kunnen aanleveren ten opzichte van andere grondstofbronnen (als fosfaat uit erts) in combinatie met de kwaliteit, zal de interesse bij de (grootte/bulk) kunstmestindustrie vermoedelijk gering zijn. Wellicht zijn de relatief kleine stromen van teruggewonnen nutriënten van rwzi's wel lokaal interessant te maken met een kleine speler.

Het terugwinnen van metalen uit de afvalwaterketen ziet Verstraete nu niet als (financieel) haalbaar, gezien de (mogelijk afwijkende) kwaliteit van de grondstof in combinatie met de aangeboden hoeveelheid (te klein ten opzichte van andere bronnen voor metalen). Volgens

Verstraete hebben bedrijven met grote hoeveelheden metalen dan ook (nog) geen interesse getoond in het terugwinnen van metalen uit de afvalwaterketen. Dit geldt bijvoorbeeld voor een technologie- en recyclingbedrijf als Umicore, België.

In de visie van Verstraete heeft het terugwinnen en nuttig hergebruiken van water de hoogste prioriteit, gevolgd door energie (uit biogas/biomethaan ten behoeve van mobiliteit), vetzuren, en de mogelijkheid van het kort sluiten van de stikstofkringloop (vanuit NH_4).

Deze aspecten komen samen in de combinatie van het High Rate Activated Sludge/UF/RO concept met biosorptie en anaerobe vergisting en het Power to Protein concept (Matassa et al. 2015). Grondstoffen voor het Power to Protein concept zijn CO_2 uit het biogas van de vergisting, NH_4 uit digestaat van de vergister en H_2 uit reformen van biomethaan of via elektrolyse met 'off peak' groene energie (= goedkoop en duurzamer).

Voor wat betreft de inzameling van GF(T) is volgens Verstraete overigens de uitkomst van een recente studie dat GF niet tot verstoppingen leidt in het riool. Het riool kan het dus aan om GF-afval te transporteren.

6.3 Integrale afweging en conclusies

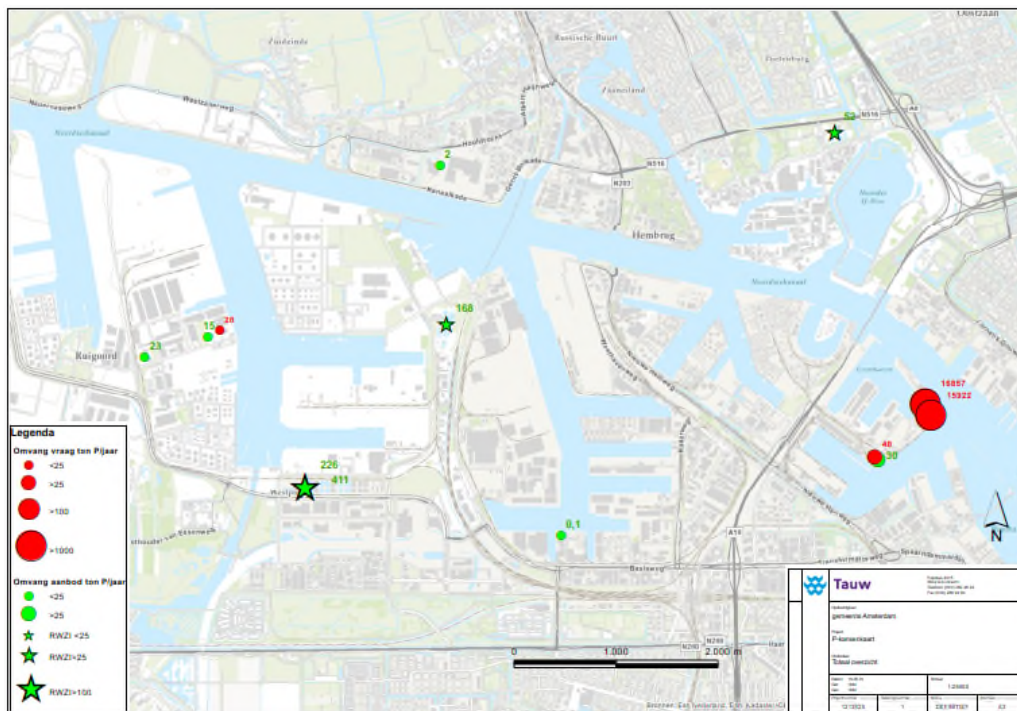
Voor het maken van strategische keuzes door Waternet, waar nu en werkend naar de toekomst toe op te focussen, wordt de volgende aanpak voorgesteld.

Stap 1

Allereerst is het belangrijk om te richten op 'eindige' grondstoffen. In deze studie zijn twee stofstromen onderzocht die aan dit criterium voldoen, namelijk nutriënten en metalen. Voor de stofstroom nutriënten betreft dit in het bijzonder fosfaat, omdat fosfaat een eindige grondstof is met een essentiële functie voor het leven op aarde.

Ook een aantal metalen zijn als eindig te beschouwen, in de zin van een bedreiging voor onze manier van leven en welvaartsniveau. Denk hierbij aan metalen die nodig zijn voor de productie van accu's, windmolens en elektronica als laptop, smartphone e.d. Om deze reden zijn ze door de Europese Unie geplaatst op de lijst met metalen in 'kritieke staat' (paragraaf 4.7.2) en het is daarom de taak van de overheid om het terugwinnen van deze metalen te stimuleren.

Het terugwinning en (hoogwaardig) hergebruiken van fosfaat en metalen verdient daarom de hoogste prioriteit. Fosfaat aanwezig in de afvalwaterketen wordt binnen Waternet – in de vorm van struviet – al teruggewonnen. De 900 ton per jaar die maximaal kan worden teruggewonnen met het 'Fosvaatje', kan mogelijk duurzaam worden afgezet bij ICL Fertilizers. Als grondstof voor kunstmest komt fosfaat dan weer beschikbaar als meststof voor de groei van gewassen en wordt de fosfaatkringloop gesloten. Gezien de eisen die ICL Fertilizers voor deze toepassing mogelijk zal stellen in combinatie met het relatief kleine aanbod vanuit Waternet, dient overleg hierover opgestart te worden. Mogelijk kan het aanbod van fosfaat (struviet) verhoogd worden door procesaanpassingen, samenwerking met andere waterschappen of bedrijven uit de regio. Voor de regio Metropool Amsterdam is in de vorm van een zogenaamde fosfaatkansenkaart inzichtelijk gemaakt welke leveranciers (bronnen) en mogelijk afnemers van fosfaat aanwezig zijn (Tauw 2013).



FIGUUR 40: FOSFAATKANSENKAART: TOTAAL OVERZICHT AMSTERDAM (TAUW 2013)

Door de inzet van struviet als meststof wordt naast fosfaat bovendien een (klein) gedeelte van het nutriënt stikstof uit de afvalwaterketen nuttig ingezet. Dit is tegelijkertijd een beperkte energiebesparing (zie ook paragraaf 4.5.3).

Het terugwinnen van metalen uit de afvalwatercyclus is in ontwikkeling en wordt (nog) niet (grootschalig) toegepast in de praktijk. Op dit moment is nog onbekend in welke vorm de potentieel interessante metalen teruggewonnen kunnen worden en wat de afzetmogelijkheden hiervan zijn. Daarnaast verschilt het gehalte aan metalen per rwzi sterk. Dit betekent dat aanvullend onderzoek nodig is. Het betreft zowel onderzoek naar de gehalten van de stoffen zoals opgenomen in Bijlage III in het afvalwater en het slib van de rwzi's West en Westpoort als (deelname in) onderzoek naar het verder ontwikkelen van methoden en technieken voor het terugwinnen van metalen uit de afvalwatercyclus.

Stap 2

Na de eindige grondstoffen zou de focus voor terugwinning gelegd moeten worden op stofstromen die producten kunnen opleveren hoog in de waardepiramide en/of stofstromen die relatief groot zijn. Zoals ook blijkt uit Figuur 37 zijn de organische reststromen en in het bijzonder biomassa in de vorm van groente, fruit (en tuin) afval in omvang het grootst. Biomassa heeft ook de potentie om er hoogwaardig(re) producten uit te maken. Nu wordt een groot deel van de beschikbare biomassa ingezet voor de productie van 'brandstof en warmte'.

De technologie voor het vervaardigen van hoogwaardigere producten uit organische reststromen op praktijkschaal is merendeels nog in ontwikkeling. Vooruitlopend daarop kan toegewerkt worden aan het inzamelen van meer organische reststromen, om daarmee de transitie naar de circulaire economie te versterken. Naast het inzamelen van beschikbare biomassa (denk aan maaisel e.d.), moet deze toename vooral mogelijk gemaakt worden door

meer groente- en fruitafval beschikbaar te maken. Het is dus uiterst belangrijk dat voor landschapsbiomassa en vooral voor groente- fruit- en mogelijk tuinafval toegewerkt wordt naar een effectief inzamelsysteem.

In de tussentijd kan met bewezen technologie de ingezamelde biomassa nuttig ingezet worden voor energiewinning. Door een slibdestructietechniek voor te schakelen en/of thermofiele vergisting toe te passen, wordt wellicht wel een hoger energetisch- en afvalverwijderingsrendement bereikt, maar geen hoogwaardigere producten. Vanuit het vergisten van biomassa is de verschuiving naar productie van transportbrandstof (als LNG) al gaande. Producten uit de categorie 'bulkchemicaliën en materialen', maar ook 'voeding voor mens en dier' en zelfs 'pharma, fijn chemicaliën & fun' worden steeds bereikbaarder. Een voorwaarde is dat hiervoor voldoende uitgangsmateriaal beschikbaar is.

Voor de categorie 'bulkchemicaliën en materialen' voorziet de industrie bijvoorbeeld al dat 10% van alle verpakkingen in 2020 uit bioplastic zal bestaan, waarbij groente- en fruitafval kan dienen als bron voor de bioplastics (Wageningenworld 2014a). Ook het toepassen van vezels uit biomassa om plaatmateriaal te maken is een reële kans om een hoogwaardiger product te maken, die bovendien binnen Waternet afgenomen en toegepast kan worden en daarom zeker op demoschaal onderzocht moet worden. Dergelijke toepassingen zijn een stimulans voor het bereiken van (nog) hoogwaardigere producten uit de waardepiramide, als bijvoorbeeld synthesesgas, lipiden, vetzuren, eiwitten (via het Power to Protein concept) of probiotica (uit algen).

Het volgen, ondersteunen en initiëren van onderzoek gericht op deze hoogwaardige producten is een voorwaarde voor realisatie in de praktijk op redelijke termijn. Om dit grootschalig werkelijkheid te kunnen laten worden is het beschikbaar maken van meer biomassa de eerste stap, waaraan groente- en fruitafval een belangrijke bijdrage kan leveren.

Stap 3

Naast de onder stap 1 en stap 2 genoemde kansen, zijn specifieke stofstromen geïdentificeerd waarvan benutting en valorisatie voor de korte(re) termijn interessant is om te exploreren, zoals:

- Cellulose: allereerst dient de hoeveelheden cellulose die winbaar is via het zeefgoed van de rwzi's West en Westpoort nauwkeurig vastgesteld te worden. Als blijkt uit het lopende onderzoek op de rwzi Aarle-Rixtel van Waterschap Aa en Maas dat het toepassen van een fijnzeefinstallatie om cellulose af te scheiden uit het influent significante (ook financiële) voordelen heeft voor de rwzi, dan overwegen om het product cellulose op praktijkschaal te gaan terugwinnen uit het influent van de rwzi's West en Westpoort.
- Vetzuren en lipiden: dit zijn stoffen die het mogelijk maken om hoogwaardige producten te maken. Welke route daarvoor het meest geschikt is, is nog niet uitgekristalliseerd en mede afhankelijk van de markten die Waternet zou willen bedienen
- Reststoffen drinkwaterproductie: Restproducten van de drinkwaterproductie worden al grotendeels hergebruikt. Onderzoek naar meer en hoogwaardigere toepassingen loopt.
- Humuszuren: voor de afzet van humuszuren in de markt, bijvoorbeeld als ingrediënt voor diervoeder, bieden humuszuren afkomstig van het zuiveren van drinkwater het meeste perspectief. Om dit inzichtelijk te krijgen is marktonderzoek nodig. Als de vraag naar humuszuren op termijn stijgt, kan overwogen worden ook andere bronnen (zoals rwzi effluent) te onderzoeken.

- Thermische warmte: Levering van warmte op enige afstand van het aanwezige warmtenet in Amsterdam biedt mogelijk kansen, voor koppeling met een kleinschaliger WKO-systeem (bijvoorbeeld voor een zwembad) of zelfs op woningniveau. Door de actuele politieke belangstelling voor warmte/riothermie is een update van het onderzoek uit 2011 gewenst.

Tenslotte kan ook overwogen worden om (meer) externe reststromen – al dan niet teruggewonnen – in te zetten in het productieproces van Waternet. Denk hierbij bijvoorbeeld aan vergistbare stromen voor energiewinning en waterrijzer van de drinkwaterproductie voor (aanvullende chemische) binding van fosfaat in de rwzi's.

Om bovengenoemde kansen voor terugwinning effectief te verzilveren is het verstandig om in een vroegtijdig stadium potentiële afnemers van de grondstoffen of eindproducten te benaderen en te vernemen welke kansen en belemmeringen zij zien.

Het is wenselijk om voor bepaalde stofstromen meer inzicht te verkrijgen in de werkelijk beschikbare hoeveelheden, financiële aspecten, de invloed op de CO₂ footprint, duurzaamheidsaspecten en dergelijke om de strategische keuzes op te baseren. Omdat deze gegevens momenteel nog niet voldoende voorhanden zijn, is bovenstaande prioriteitstelling gehanteerd. Gaandeweg komen meer van de gewenste aanvullende gegevens beschikbaar en kan waar nodig bijgestuurd worden.

6.4 Adviezen aan Waternet

- Maak afspraken met partners voor het meten en publiceren in vergelijkbare eenheden van data van stofstromen. Dit kan bijvoorbeeld in combinatie met een monitoringssysteem waarin ontwikkelingen in stofstromen en verwerkingsmethoden bijgehouden worden.
- Voordat een specifieke stroom gevaloriseerd wordt, is het aan te bevelen de beschikbare vracht van desbetreffende stofstroom nauwkeuriger in beeld te brengen.
- Ontwikkel een afwegingskader voor circulair handelen gericht op (eindige) grondstoffen, aanvullend op de CO₂ footprint.
- Eerste prioriteit is het terugwinnen van eindige grondstoffen, daarna stofstromen die producten kunnen opleveren hoog in de waardepiramide en stofstromen die relatief groot zijn en tenslotte specifieke kansen.
- Initieer en stimuleer het opzetten van een effectief inzamelsysteem in de regio Amsterdam voor landschapsbiomassa en (gezien de omvang) in het bijzonder groente-fruit- en mogelijk tuinafval.
- Zamel zoveel mogelijk van de aanwezige organische stofstromen in en voeg deze op korte termijn toe aan de slibvergisting zodat meer biogas kan worden geproduceerd.
- Overweeg een slibdestructietechniek voor te schakelen aan de vergisting om de biogasopbrengst te vergroten en de afvalproductie te verkleinen.
- Maak op basis van vezels uit biomassa bouwmaterialen (oeverbeschoeiingen, plaatmateriaal) en pas het toe in de praktijk.
- Op termijn - als procedés beschikbaar komen voor het fabriceren van hoogwaardige producten - de stofstromen weer loskoppelen van de vergisting.
- Volg, ondersteun en initieer onderzoek gericht op fabricage van hoogwaardige producten uit biomassa en zuiveringsslib.
- Bepaal de hoeveelheid cellulose die gewonnen kan worden uit het zeefgoed van de rwzi's West en Westpoort. Het is hiervoor belangrijk dat er een goede en eenduidige analysemethode wordt ontwikkeld voor de bepaling van de fractie cellulose van droge stof uit de water- en sliblijn.

- Laat marktonderzoek uitvoeren naar de afzetmogelijkheden van humuszuren, in eerste instantie afkomstig van de productie van drinkwater.
- Verken de mogelijkheden voor lokale afzet, zoals de levering van fosfaat in de vorm van struviet, aan ICL Fertilizers of andere (duurzame) producenten.⁵
- Toets het zwavelgehalte in de waterlijn van rwzi Westpoort aan het door STOWA gehanteerde uitgangspunt ($< 35 \text{ mg/l SO}_4\text{-S}$), om te bepalen of het terugwinnen van zwavel potentie heeft.
- Verricht metingen naar het gehalte goud in influent, effluent en slib van de rwzi's West en Westpoort. Indien de gehalten van de eenmalige metingen bevestigd worden, dan vervolgonderzoek opstarten naar de mogelijkheden voor het terugwinnen van goud uit het afvalwater (mogelijk in combinatie met andere waardevolle metalen).
- Verricht oriënterend metingen naar gehalten van de stoffen zoals opgenomen in Bijlage III in het afvalwater en het slib van de rwzi's West en Westpoort.
- Ondersteun en participeer onderzoek naar kansen en mogelijkheden voor het terugwinnen van metalen uit de afvalwatercyclus.

Door het in kaart brengen van de energie en grondstoffen die omgaan in de regio Amsterdam zijn een aantal uitgangspunten en mogelijkheden verkregen voor benutting en valorisatie van deze stromen. Dit geeft richting aan de strategische keuzes om de ambitie tot circulair handelen en klimaatneutraliteit te verwezenlijken.

⁵ In juni 2015 heeft Waternet een contract gesloten voor de levering van struviet aan kunstmestfabrikant ICL Fertilizers.

7 Referenties

- Afval Energie Bedrijf (AEB) <http://www.aebamsterdam.nl/>
- Agema, S. (2014), mailbericht AEB, 24 september 2014.
- Agema, S. (2014b), Rapportage aanvoer huishoudelijk afval 2011-2014.
- Agudelo-Vera CM, Leduc WRWA, Mels AR, Rijnaarts HHM (2012) Harvesting urban resources towards more resilient cities. *Resources, Conservation and Recycling* 64:3-12.
- Aiyuk, S. & Verstraete, W. (2004) Sedimentological evolution in an UASB treating SYNTHES, a new representative synthetic sewage, at low loading rates. *Bioresource Technol.*, 93, 269-278.
- Alterra, B. de Vries, A. de Jong, R. Rovers, F. Haccou, J. Spijker, C. van den Berg, C. Niemeijer, D. Frank & W. J. (2008) Energie à la carte: de potentie van biomassa uit het landschap voor energiewinning. Alterra-rapport 1679.
- Amsterdam, G. (2013) Amsterdam in Cijfers, 2013.
- Angenent, L. mondelinge informatie, 15 januari 2015.
- Baghoth, S. A., M. Dignum, A. Grefte, J. Kroesbergen & G. L. Amy Characterization of NOM in a drinking water treatment process train with no disinfectant residual. *Water Science and technology: Water supply*, 9(7), 379-386, 2009.
- Barendregt & Nijman (2009) Vergistbaarheid van afvalstromen, Waternet
- Bauerlein, KWR, nog niet gepubliceerd, 2014.
- Bestresourcesfromwater, www.bestresourcesfromwater.com, 2015.
- Biomassa-alliantie, www.biomassa-alliantie.nl, 2014.
- Bloemendal, M., Hofman, J., Moerman, A., Blokker, M. and Agudelo-Vera, C. (2014) Terugwinnen energie uit leidingen. BTO 2014.xxx (in voorbereiding), KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Bond beter leef milieu (2005) Literatuur- en praktijkonderzoek naar een preferentieel inzamel- en verwerkingssysteem voor groenten-, fruit- en tuinafval. <http://www.bondbeterleefmilieu.be/dl.php?i=188&d=1>.
- Boshoff, G., J. Duncan & P. D. Rose (2004) Tannery effluent as a carbon source for biological sulphate reduction. *Water research*, 38(11), 2651-2658.
- Brand van den, T.P.H. Sulphate reducing bacteria in wastewater treatment, PhD Thesis, Applied Sciences Biotechnology, Technical University of Delft, 15 oktober 2014.

- Cai, T., S. Y. Park & Y. Li Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19(0), 360-369, 2013.
- CBS (2004) milieu compendium 2004; milieu in Cijfers.
- CBS (2011) Gemeente Op Maat: Amsterdam, www.cbs.nl/NR/rdonlyres/4B047049-9FF6-4DE4-9125-BDDE7905140F/0/Amsterdam.pdf, ISBN: 978-90-357-1848-7.
- Circle economy, www.circle-economy.com, 2014.
- Cleanwater, Regionaal Innovatie Programma Fryslan 2011-2013, provincie Fryslan.
- Colleran, E., S. Finnegan & P. Lens (1995) Anaerobic treatment of sulphate-containing waste streams. *Antonie van Leeuwenhoek*, 67(1), 29-46.
- Cornel, P. & P. Schaum (2009) Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs. *Water Science and technology*, 59(6), 1069-1076.
- Cornellisse, E. mailbericht, 1 augustus 2014.
- Dignum, M. mailbericht, 6 augustus 2014.
- ECN, www.ECN.nl, 2014.
- Energie en Grondstoffenfabriek, Positionpaper, oktober 2014.
- Energiefabriek, d. (2009) <http://waterenenergie.stowa.nl/mwg-internal/de5fs23hu73ds/progress?id=53Appt3Ega>.
- Energiefabriek Nieuwegein, www.hdsr.nl/publish/.../ap_5_energiefabriek_nieuwegein_voorstel, Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden.
- Eikebrokk, B., R. D. Vogt & H. Liltved NOM increase in Northern European source waters: discussion of possible causes and impacts on coagulation/contact filtration processes. *Water Science and technology*, 4(4), 47-54, 2004.
- E kwadraat advies, Rapportage Biomassapotentieel Waterschappen, augustus 2012.
- Elemetal, www.elemetal.eu/news/installation-ecr-pilot-20-moerdijk, 2014.
- Europese Unie (2010) Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, website geraadpleegd in 2014.
- Fooij, de H. (2014) concept rapport hoofdstuk 2.
- Fooij, de H. (2015, Wastewater as a resource: Strategies to recover resources from Amsterdam's wastewater, Msc thesis, University of Twente, 8 januari 2015.
- Graaff, M. de, K. Roest, T. van den Brand, H. Huiting & M. Zandvoort Vervolgonderzoek A-trap: bouwstenen voor het A-trap procesontwerp, KWR 2014.077, 2014.

- Green Deal Verduurzaming nuttige toepassing AEC-bodemas, 2012,
http://www.verenigingafvalbedrijven.nl/fileadmin/user_upload/Documenten/PDF2013/Green_Deal_bodemas.pdf
- Grefte, A. (2013) NOM in de waterzuivering. vakantie cursus 2013.
- Heijmans, www.heijmans.nl, september 2014.
- Helm, A. van der, E. Klaversma & J. Hofman (2010) Copper in the water cycle.
- Hoek, J.P. van der, A. Struker, and J. E. M. de Danschutter Amsterdam as a sustainable European metropolis: integration of water, energy and material flows. International Water Week, IWW Conference "Integrated Water Solutions for a Green Economy", Amsterdam, The Netherlands, 4-6 November 2013.
- Hofman, J., Wols, B. and Boderie, P. (2014) Warmte uit het riool; Metingen en modellering. KWR 2013.xxx (in voorbereiding), KWR Watercycle Research Institute en Deltares.
- Holthuijsen, S. & S. Koning (2013a) Technisch Jaarverslag Afvalwater 2012. Waternet.
- Holthuijsen & Koning (2013b) Opties voor speerpunten ter verbetering van stofstromen (energie etc), 2013.
- IEA Bioenergy Task 42 on Biorefineries, Classificatiesysteem, 2009.
- Janse, T. (2012) Analyse influentdebieten ter inschatting 'vreemd water' aanvoer. Waternet.
- Kampschreur, M. (2014a), mondelinge informatie Waterschap Aa en Maas, 2014.
- Kampschreur, M. (2014b), presentatie bioraffinage pilot, 18 september 2014.
- Karhadkar, P. P., J.-M. Audic, G. M. Faup & P. Khanna (1987) Sulfide and sulfate inhibition of methanogenesis. Water research, 21(9), 1061-1066.
- Kasteren, J. van (2013) Peking: papier hier [online].
<http://www.trouw.nl/tr/nl/5009/Archief/archief/article/detail/3455765/2013/06/10/Peking-Papier-hier.dhtml> [accessed January 21 2014].
- Kennisplatform Energie Conversie Parken, www.ecp-biomass.eu/node/81, 2014.
- Klaversma, E. & S. Mol (2013) Stofstromen balans Waternet (voorlopig rapport 29 maart 2013), Waternet.
- Klaversma, E. (2014) Urine inzamelen en duurzaam verwerken. Techniek, onderzoek & projecten, Waternet.
- Kolk van der O., mailbericht, Reststoffenunie, 2 februari 2015.
- Koopmans, G., Wim Chardon, Paul Belder, Bert-Jan Groenenberg Verwijdering fosfaat uit bodemwater met ijzerzand, H2O nummer 20, 2011.
- KWR (2015a), Power to Protein, nog niet gepubliceerd, 2015.

- KWR (2015b), Verwijdering van H₂S uit biogas door middel van granulair ijzeroxide, nog niet gepubliceerd, 2015.
- Laarman, A.J., P. Sjoerdsma, B. Bolt, D. Schippers, & R. Thijssen (2013) Value from Water: the use of ion exchange in the decolourisation of drinking water, paper International water week Amsterdam.
- Landschap Noord-Holland, Van reststromen biomassa naar bio-energie, 2013.
- Lau, G. N., K. R. Sharma, G. H. Chen & M. C. M. Van Loosdrecht (2006) Integration of sulphate reduction, autotrophic denitrification and nitrification to achieve low-cost excess sludge minimisation for Hong Kong sewage. *Water Science and Technology*, 53(3), 227-235.
- LeAF, Fosfaatmijn Arenaboulevard; visieontwikkeling urinescheiding Arena Boulevard. projectnummer: 12820, 2013.
- Leefomgeving, C. v. d. Huishoudelijk waterverbruik per inwoner, 1995-2010.
<http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/indicatoren/nl0037-Waterverbruik-per-inwoner.html?i=3-126>, 2014
- Leerdam, R.v., Roest, K., Graaff, M.d. and Hofman, J. De watercyclus als energiebron. KWR 2010.082, KWR Watercycle Research Institute, 2011.
- Leerdam, R.v., K. Roest, M. de Graaff & J. Hofman De watercyclus als energiebron; case studies van Nederland, Amstelveen en het Liburgs heuvelland (Wijlre). KWR. 2010.082, 2010.
- Lens, P. N. L., A. Visser, A. J. H. Janssen, L. W. Hulshoff Pol & G. Lettinga (1998) Biotechnological treatment of sulfate-rich wastewaters. *Critical reviews in environmental science and technology*, 28(1), 41-88.
- López-Vázquez, C. M., C. M. Hooijmans, D. Brdjanovic, H. J. Gijzen & M. C. M. van Loosdrecht (2008) Factors affecting the microbial populations at full-scale enhanced biological phosphorus removal (EBPR) wastewater treatment plants in The Netherlands. *Water Res.*, 42(10-11), 2349-2360.
- Loosdrecht, M. (2014), mondelinge informatie, 16 november 2014.
- Metaal Recycling Federatie, www.mrf.nl, 2014.
- Matilainen, A., M. Vepsäläinen & M. Sillanpää (2010) Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 159(2), 189-197.
- Matassa S., W. Verstraete Anaerobic digestion as a platform for nitrogen upcycle by means of hydrogen-oxidizing bacteria., to be published, 2015.
- Maurer, M., Pronk, W., & Larsen, T. A. (2006). Treatment processes for source-separated urine. *Water research*, 40(17), 3151-3166.
- Milieucentraal, www.milieucentraal.nl/voorkomvoedselverspilling, 2014.

- MJA-3 Meerjarenaafsprak energie-efficiëntie 2001-2020, Unie van Waterschappen, 22 mei 2008.
- Monsalve, S.N. (2011) Energy in the Urban Water Cycle: A Case Study of Heat Recovery in the Sewer System of Amsterdam. MSc, Delft University of Technology, Delft.
- Morse, G. K., S. W. Brett, J. A. Guy & J. N. Lester (1998) Review: Phosphorus removal and recovery technologies. Science of The Total Environment, 212(1), 69-81.
- Moussa, M. S., O. G. Fuentes, H. J. Lubberding, C. M. Hooijmans, M. C. M. van Loosdrecht & H. J. Gijzen (2006) Nitrification Activities in Full-scale Treatment Plants with Varying Salt Loads. Environmental Technology, 27(6), 635 - 643.
- Nielsen, P. H. (1987) Biofilm Dynamics and Kinetics during High-Rate Sulfate Reduction under Anaerobic Conditions. Appl. Environ. Microbiol., 53(1), 27-32.
- Nijman, M., Benutten van biomassa, Waternet, 2014.
- Nijman, M., e.a. Kansen voor zon, wind en biomassa, Waternet, 2010.
- Nijman, M., Metingen Waternet en onderzoek Ecofys in 2014, mailbericht 20 februari en 29 april 2015, Waternet, 2015 .
- NPSP Composieten, mondelinge informatie, Haarlem, 2014.
- Odegaard, H., S. Osterhus, E. Melin & E. B. (2010) NOM removal technologies - Norwegian experiences. Drinking water engineering science, 3, 1-9.
- Odegaard et al. (2010) Verwijderen humuszuren: coagulation / ionexchange. Review over option coagulation (Matilainen et al. 2010) ook opties (andere dan coagulatie, en iets meer uitleg in. Presentatie Hans Huiting met technologiën (email 1-8-2014).
- Oogstbaar landschap, www.oogstbaarlandschap.nl: verslag deskundigen dag slootmaaisel, 2011.
- Oude Elferink, S. J. W. H., A. Visser, L. W. Hulshoff Pol & A. J. M. Stams (1994) Sulfate reduction in methanogenic bioreactors. FEMS Microbiology Reviews, 15(2-3), 119-136.
- Planbureau voor de Leefomgeving, Hernieuwbare bronnen o.b.v. de Europese richtlijn 2009/28/EG ter bevordering van hernieuwbare energie.
- Platform Groene Grondstoffen, Tekens van transitie, 2010.
- Platform Rotonde Noord-Holland, 5 november 2014.
- Poinapen, J., M. C. Wentzel & G. A. Ekama (2009) Biological sulphate reduction with primary sewage sludge in an upflow anaerobic sludge bed (UASB) reactor - Part 1: Feasibility study. Water SA, 35(5), 525-534.
- Reijken, C., mailbericht 6 maart 2015, Waternet, 2015.

- Reststoffenunie, Statusrapport Waternet 2013, 2014.
- Reststoffenunie, www.reststoffenunie.com, 2015.
- Reststoffenunie, mondelinge informatie, 2015.
- Kolk van der O., mailbericht, Reststoffenunie, 2 februari 2015).
- Rodrigues, A., A. Brito, P. Janknrecht, M. F. Proenca & M. Nogueira Quantification of humic acids in surface water: effects of divalent cations, pH, and filtration. *Journal of environmental monitoring*, 11, 377-382, 2009.
- Schouten S. & D. van Duin (in opdracht van Biobased connections), Het Dilemma van 'data delen' in de biobased economy, november 2014.
- Smith K. Voor miljoenen euro's aan goud verdwijnt door het toilet, *US Geological Survey naar Nu.nl*, 24 maart 2015.
- Spiller M. Metabolisme van de stad, presentatie WaterInnovation, 11 december 2014.
- Staatsbosbeheer, www.staatsbosbeheer.nl/Nieuws%20en%20achtergronden/Themas/Biomassa/Wat%20is%20biomassa/verwerking.aspx, 2015.
- Steenhuisen, F., Marcel van Westerhoven Voedselverliezen bij huishoudens en bedrijfscatering in Nederland, CREM, 2010.
- STOWA Fosfaat, van leegloop naar kringloop, rapportnummer 2010-12.
- STOWA Influent fijnzeven in RWZI's, rapportnummer 2010-19.
- STOWA Zwavel in de RWZI, rapportnummer 2011-21.
- STOWA, M. Hortsink, M. bakker-Verdurmen, A. de Jong & J. Blom Thermische energie op de RWZI - Vraag en aanbod, rapportnummer 2013-03.
- STOWA, E. van Voorthuizen, A. Zilverentant & G. Ijpelaar (2013) Verkenning mogelijkheden "grondstof RWZI", rapportnummer 2013-31.
- STOWA, Verkenning van de haalbaarheid van slibverwerking met microschaaldieren, rapportnummer 2014-W-03, 2014.
- STOWA, J. IJzerman, M. Mulder, A. Brinkman & S. van Miltenburg (2014) Perspectieven en knelpunten van zuiveringsslib voor bodemkundig gebruik, rapportnummer 2014-35.
- Suplee, M. W. & J. B. Cotner (1996) Temporal changes in oxygen demand and bacterial sulfate reduction in inland shrimp ponds. *Aquaculture*, 145(1-4), 141-158.
- Tauw, Quick scan P-kansenkaart bedrijven Metropool Amsterdam, 2013.
- Telkamp, P., GF in riool, STOWA Afvalwaterketensymposium, 27 mei 2014.

- Trevisan, S., Francioso, O., Quaggiotti, S., & Nardi, S. (2010). Humic substances biological activity at the plant-soil interface: from environmental aspects to molecular factors. *Plant signaling & behavior*, 5(6), 635-643.
- Trommelen, J., GFT, Volkskrant, 2014.
- Universiteit Utrecht Greening Amsterdam's Sewerage System, case study, 1 november 2013.
- Universidad Politécnica van Madrid en Universidad Miguel Hernández van Elche, To use sewage sludge to obtain bioenergy, 18 november 2014.
- Versteeg et. al. Empirical study for optimizing route planning (scriptie) ROVA, 2012.
- Verstraete, W. mondelinge informatie, 26 november 2014.
- Verstraete, W. mondelinge informatie, januari 2015.
- Vitens (2014) <https://www.vitens.nl/overvitens/water/paginas/humuszuren.aspx>, 31 juli 2014.
- Voedingscentrum (2014) <http://www.voedingscentrum.nl/encyclopedie/soja.aspx>, 31 juli 2014.
- Voorthuizen, E. van, A. Zilverentant & G. Ijpelaar (2013) Verkenning mogelijkheden 'grondstof rwzi'. STOWA, Amersfoort, The Netherlands.
- WageningenWorld, Over datum, nr. 1 2012.
- WageningenWorld (2014a), Voedselketens, 2014.
- WageningenWorld (2014b), Climate saving soils, nr. 2, pagina 34-39, 2014.
- Waterforumonline (2014a), Kalkpellets uit ontharder hergebruikt als entmateriaal, 10 november 2014.
- Waterforumonline (2014b), 26 november 2014.
- Waterforumonline, EcoPhos gaat in Duinkerken fosfaat terugwinnen uit vliegas HVC en SNB, 4 maart 2015.
- WaterinnovationNH, Provincie Noord Holland, 2014.
- waternet & AEB, Onderzoek synergie AEB-Waternet; kansen bij integratie van de water-, energie- en grondstofcyclus, 2012.
- Waternet, concept Beleidsplan klimaatneutraal/circulair handelen van Waternet, 2014.
- Waternet, Programmaplan Klimaatneutraal 2020, Waternet, 19 februari 2015.
- Waterschap Vallei en Veluwe, persbericht, 2014.
- Waterschap Vallei en Veluwe Technologisch jaarverslag, 2013

Waterspiegel Waterkwaliteit nog te vaak stiefkind, maart 2015.

Westerhoven van, M., Bepaling voedselverliezen bij huishoudelijk afval in Nederland, CREM, 2013.

Wiersma, T. & I. Kolkman Biomassaonderzoek vijf Noordelijke waterschappen, E kwadraat advies, 2009.

Wilsenach, J. A., C. A. H. Schuurbiers & M. C. M. van Loosdrecht Phosphate and potassium recovery from source separated urine through struvite precipitation. Water Research, 41, 458-466, 2007.

World watch institute (2007) Matters of scale - into the toilet [online].
www.worldwatch.org/node/5142 [accessed 17 March 2014]

WUR, Factsheet Sluiten kringloop organisch afval.

Zandvoort, M., (2012a) GFT in het riool, Waternet, 2012.

Zandvoort, M.(2012b), Is het haalbaar om het GFT afval van stadsdeel centrum via het riool af te voeren, interne memo Waternet, 2012.

Zandvoort, M., mailbericht, 2015.

Bijlage I Data diverse bronnen

Onderstaand tabel uit (Holthuijsen & Koning 2013a).

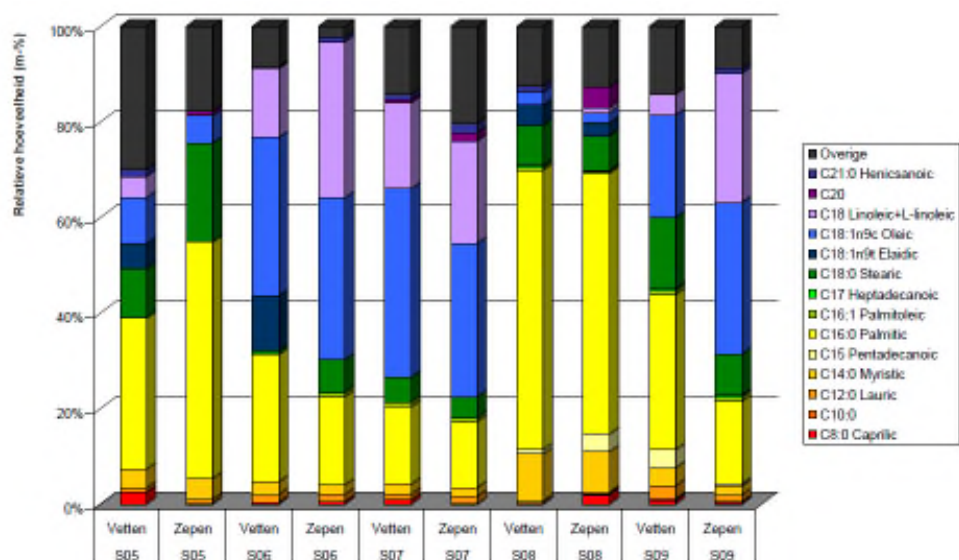
Tabel 6.4: Resultaten effluënten rwzi's 2012

Installatie	Debiet [10 ⁶ m ³ /j]	BZV [mg/l]	CZV [mg/l]	ZWS [mg/l]	N-totaal [mg/l]	P-totaal [mg/l]
Amstelveen	10,6	3,3	35	6,5	9,7	0,6
Amsterdam west	64,0	2,6	33	5,7	6,8	0,6
Blaricum	2,9	2,4	27	5,9	3,1	0,5
Hilversum	4,6	7,0	45	23	32	0,9
Horstermeer	8,9	4,0	33	12,0	11,4	0,7
Huizen	3,4	2,4	27	4,4	5,7	0,5
Loenen	0,9	3,8	35	7,1	8,6	3,4
Maarssen	1,3	3,2	32	7,3	7,3	0,6
Ronde Venen	4,4	3,2	45	5,7	6,2	0,3
Uithoorn	4,1	3,5	37	10,6	7,1	0,6
Weesp	3,6	11,2	66	18,1	31,3	0,7
Westpoort	20,6	4,2	41	13,8	7,0	0,6

Rapportage Leaf, bijlage 3 volgens [Barendregt & Nijman (2009)]

Tabel 5. Samenstelling riooloverstopingsmaterialen (berekend uit resultaten Nedlab)

		SV05	SV06	SV07	SV08	SV09
Vet-totaal	g/kg OS	6.5	365.5	704.2	368.3	61.1
Zepen-anionisch	g/kg OS	0.3	0.1	0.0	0.3	0.8
Zepen	g/kg OS	55.5	35.8	219.1	28.8	50.0
Eiwitten	g/kg OS	463.5	43.1	29.0	21.0	61.7
% organisch onbekend		47	56	5	58	83
Vezels	g/kg OS	289.4	716.1	408.4	116.8	652.1
Vezels (van % organisch onbekend)	(%)	61	129	857	20	79



Tabel uit: (Fooij 2014):

Tabel – Toilet paper consumptie (World watch institute 2007)

	Toilet paper use [kg/p/year]	Total Amsterdam use [ton/year]	Toilet paper as percentage of suspended solids [%]
Minimum range Ruiken et al. (2013)	10	7787	41,5
Stowa (2013)	10,8	8410	44,8
Average range Ruiken et al. (2013)	11,5	8955	47,7
Maximum range Ruiken et al. (2013)	13	10123	53,9
World watch institute (2007)	13,8	10746	57,2
Trouw (2013)	15	11681	62,2

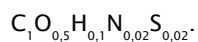
Bijlage II Humuszuur

Humuszuur compositie op basis van elementen compositie

TABEL 37 COMPOSITIE VAN HUMUSZUREN, ZOALS BESCHREVEN IN (RODRIGUES ET AL. 2009)

C	48.36
O	26.91
H	4.42
N	0.78
S	0.78

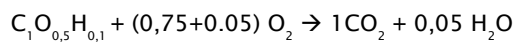
Dit levert de volgende structuur formule op:



TABEL 38 ELEMENTAIRE VERHOUDINGEN VAN HUMUSZUREN. GEEFT AAN G VAN DEZE ELEMENT PER KG HUMUSZUUR AAN. KOMT VAN (ESSINGTON)

C	581
H	36.8
O	341
N	41.4
S	4.4

1 c-humuszuur ($C_1 O_{0,5} H_{0,1}$) wordt in potentie omgezet tot 1 CO_2



1 kg humuszuur bevat 581 g C, en dus 48.4 c-mol, resulterende in 48mol CO_2 = 2130 g CO_2 /kg humuszuur.

Referenties:

Essington, M. E. Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach. book.

Rodrigues, A., A. Brito, P. Janknecht, M. F. Proenca & M. Nogueira (2009) Quantification of humic acids in surface water: effects of divalent cations, pH, and filtration. Journal of environmental monitoring, **11**, 377-382.

Bijlage III Kritische en waardevolle metalen

TABEL 39 KRITISCHE EN WAARDEVOLLE METALEN (KWR)

	Metaal	Afkorting	Element nummer
1	Cadmium	Cd	48
2	Chroom	Cr	24
3	Koper	Cu	29
4	Kwik	Hg	80
5	Nikkel	Ni	28
6	Lood	Pb	82
7	Zink	Zn	30
8	Arseen	As	33
9	Antimoon	Sb	51
10	Beryllium	Be	4
11	Kobalt	Co	27
12	Gallium	Ga	31
13	Germanium	Ge	32
14	Indium	In	49
15	Magnesium	Mg	12
16	Niobium	Nb	41
17	Platinum	Pt	78
18	Palladium	Pd	46
19	Iridium	Ir	77
20	Rhodium	Rh	45
21	Ruthenium	Ru	44
22	Osmium	Os	76
23	Yttrium	Y	39
24	Scandium	Sc	21
25	Lanthanium	La	57
26	Cerium	Ce	58
27	Praseodymium	Pr	59
28	Neodymium	Nd	60
29	Promethium	Pm	61
30	Samarium	Sm	62
31	Europium	Eu	63
32	Gadolinium	Gd	64
33	Terbium	Tb	65
34	Dysprosium	Dy	66
35	Holmium	Ho	67
36	Erbium	Er	68
37	Thulium	Tm	69
38	Ytterbium	Yb	70
39	Lutetium	Lu	71
40	Tantalium	Ta	73
41	Tungsten/Wolfram	W	74

(vervolg)	Metaal	Afkorting	Element nummer
42	Renium	Re	75
43	Lithium	Li	3
44	Goud	Au	79
45	Zilver	Ag	47
47	Tin	Sn	50