



Micronutriënten in de Kringloop Eindrapportage WP4

Afvalwater en huishoudelijk organisch afval
Herkomst, bestemming en stofstroom analyse
Scenariostudies voor terugwinning uit huishoudelijke organische reststromen

Miriam van Eekert (WU)
Iemke Bisschops (LeAF)



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Micronutriënten in de Kringloop

Eindrapportage WP4

Afvalwater en huishoudelijk organisch afval
Herkomst, bestemming en stofstroom analyse
Scenariostudies voor terugwinning uit huishoudelijke organische reststromen

Miriam van Eekert (WU)
Iemke Bisschops (LeAF)

Wageningen University & Research
Wageningen, december 2023

Miriam van Eekert, Iemke Bisschops, 2023. *Micronutriënten in de Kringloop, Eindrapportage WP4; Afvalwater en huishoudelijk organisch afval, Herkomst, bestemming en stofstroom analyse, Scenariostudies voor terugwinning uit huishoudelijke organische reststromen*. Wageningen, Wageningen University & Research. 152 blz.

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/642932>

Opdrachtgever

TKI WT, TKI AF

Deze activiteit is mede gefinancierd uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.



Deze licentie stelt hergebruikers in staat het materiaal in welk medium of formaat dan ook te distribueren, remixen, aanpassen en erop voort te bouwen, uitsluitend voor niet-commerciële doeleinden, en alleen zolang de toeschrijving aan de maker wordt gegeven. Als u het materiaal remixt, aanpast of erop voortbouwt, moet u het gewijzigde materiaal onder identieke voorwaarden licentiëren.

Samenwerkingspartners





Inhoud

Lijst van gebruikte termen en afkortingen	7
Woord vooraf	9
Samenvatting	11
1 Micronutriënten in de afval- en afvalwaterketen	19
1.1 Aanleiding van project: waarom zijn micronutriënten belangrijk?	19
1.2 Globaal overzicht van het Nederlandse organisch restromen die in deze studie zijn opgenomen	21
1.2.1 Afvalketen	22
1.2.2 Afvalwaterketen	22
1.3 Leeswijzer	22
2 Aanpak van onderzoek	24
2.1 Algemene aanpak	24
2.2 Bronnen	24
2.2.1 Expert raadpleging	24
2.2.2 Databases	24
2.3 Dataselectie	25
2.3.1 Systeembegrenzing	25
2.3.2 Data validatie	25
2.4 Tools en berekeningen	25
2.4.1 Berekeningen afval	25
2.4.2 Berekeningen afvalwater en slib	26
3 Materiaalstromen binnen het systeem	28
3.1 Algemeen	28
3.1.1 Afvalwater	29
3.1.2 Influent and effluent	30
3.1.3 Slib	30
3.1.4 Afvalwatersysteem: conclusies en overzicht	31
3.2 Huishoudelijk afval	32
3.2.1 GFT(e) en groenafval	32
3.2.2 Restafval	34
3.2.3 Huishoudelijk organisch afvalstelsel: conclusies en overzicht	36
4 Micronutriënten – stofstromen in systeem	37
4.1 Algemeen	37
4.2 Boor	40
4.3 Koper	41
4.4 IJzer	43
4.5 Magnesium	45
4.6 Mangaan	46
4.7 Molybdeen	48
4.8 Zink	50
4.9 Cadmium	52
4.10 Lood	54
4.11 Kwik	54
4.12 Concluderende opmerkingen ten aanzien van micronutriënten stromen in de keten	57
5 Micronutriënten: technologieën voor terugwinning	59

6	Scenario studies	62
6.1	Inleiding	62
6.2	Geselecteerde stromen en scenario's	62
6.3	Uitwerking van scenario's: uitgangspunten, opgenomen informatie en beperkingen	62
6.4	Algemene beperkingen en kennishiaten	63
6.5	Juridische aspecten	63
6.6	Scenario's bioafval (GFE/swill)	64
6.7	Scenario's zuiveringslib	65
6.8	Urine	66
7	Conclusies en aanbevelingen	67
7.1	Conclusies	67
7.2	Aanbevelingen	69
8	Referenties	70
Bijlage 1	Database gebruik	72
Bijlage 2	Literatuuronderzoek	73
Bijlage 3	Micronutriënten in compost - analyse resultaten verschillende bronnen	74
Bijlage 4	Eindrapport scenariostudie	76

Lijst van gebruikte termen en afkortingen

B	Boor/Borium
BVOR	Belangvereniging Organische Reststromen
[C]	concentratie
Cu	Koper
Cd	Cadmium
CLO	Compendium voor de Leefomgeving
DS	Droge stof
Fe	IJzer
GFE	Etensrestenfractie van huishoudens
GFT	Groente-, Fruit- en Tuin-(afval)
GFTe	Groente-, Fruit- en Tuin-(afval) en etensresten
Hg	Kwik
HH	Huishoudens
K	kalium
MC	Concentratie micronutriënten
MFA	Mass Flow Analysis
Mg	Magnesium
MH	Micronutriënten / Zware metalen
Mn	Mangaan
Mo	Molybdeen
ONF	Organische Natte Fractie
Pb	Lood
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinstallatie
TN	Totaal stikstof
TP	Totaal fosfor
TRL	Technology Readiness Level
V	Vracht
VA	Vereniging Afvalbedrijven
WAR	Werkgroep Afval Registratie
WD	Watson Database
Zn	Zink

Woord vooraf

Deze rapportage bevat de resultaten van het onderzoek dat is uitgevoerd in het kader van het TKI project Micronutriënten in de kringloop (LWV20.249), en dan met name van WP4 (Case Afvalwater keten) en het dwarsdoorsnijdend thema D (Effect op systeemniveau).

Dit rapport had niet tot stand kunnen komen zonder de medewerking van de projectpartners en twee MSc studenten, Toby Schadenberg en Stephen Martina, die hun MSc thesis hebben uitgevoerd in het kader van dit project.

Samenvatting

Inleiding

De Europese Unie streeft naar een volledig circulaire economie voor de agrovoedselketen in 2050. De landbouw gaat met de toenemende vraag naar voedsel meer input van meststoffen, waaronder nutriënten nodig hebben. Macro- (stikstof, fosfor en kalium) en micronutriënten (bijvoorbeeld borium, magnesium en mangaan) zijn essentiële elementen voor planten. Scenariostudies voorspellen dat op korte termijn schaarste aan deze elementen zal ontstaan. Daarnaast heeft de Europese Unie de ambitie uitgesproken om in de toekomst in grotere mate onafhankelijk te zijn van de import van dit soort grondstoffen. Aangezien de meeste elementen eindig zijn of schaars (bijvoorbeeld door geopolitieke redenen) is het nodig om de nutriënten op een andere manier dan rechtstreeks uit de exosfeer (mijnen) beschikbaar te krijgen. Op dit moment worden deze nutriënten, behalve in bijvoorbeeld compost slechts beperkt teruggewonnen en hergebruikt en is het agrovoedsel systeem nog grotendeels lineair. Om meer circulariteit te bereiken zouden macro- en micronutriënten teruggewonnen kunnen worden uit de huishoudelijke (organische) afvalstromen om deze vervolgens te hergebruiken in de landbouw. Daartoe dienen de stromen van micronutriënten in het agrovoedselsysteem, de reststromen die hierin worden gevormd en de samenstelling daarvan in kaart te worden gebracht.

Om meer inzicht te krijgen in de situatie met betrekking tot micronutriënten in Nederland is het project "Micronutriënten in de kringloop" opgezet. Dit project heeft onder andere tot doel om de concentraties en vrachten van micronutriënten te verzamelen en op die manier mogelijke interventiepunten in het agrovoedselsysteem te identificeren waar terugwinning of hergebruik in bijvoorbeeld compost van micronutriënten mogelijk is om zo de Nederlandse micronutriëntenkringloop te sluiten. Hierbij is gekeken naar de organische vaste stromen (GFT, GFTe, tuinafval) en hun verwerking, restafval en naar huishoudelijk afvalwater zoals dat op dit moment wordt behandeld in RWZIs alsmede het slib en waterstromen die daarbij vrijkomen (**Figuur I**). In dit project is met name onderzocht wat de concentraties en vrachten zijn van de micronutriënten borium (B), koper (Cu), ijzer (Fe), magnesium (Mg), mangaan (Mn), molybdeen (Mo) en zink (Zn), en de zware metalen cadmium (Cd), lood (Pb), en kwik (Hg) in de afvalstromen van huishoudens in Nederland.

Daarnaast zijn een aantal reststromen geselecteerd om nader te bekijken met betrekking tot de potentie om micronutriënten in de kringloop te brengen. Van deze stromen, bioafval (GFE/swill), zuiveringsslib en urine, is zo goed mogelijk in beeld gebracht wat de vrachten zijn aan diverse micronutriënten die hierin omgaan, en wat nu de gangbare verwerkingsroute is (baseline scenario). Ook zijn voor elk van de stromen een aantal alternatieve verwerkingsscenario's, die mogelijk kunnen bijdragen aan het terugbrengen van de diverse micronutriënten in de kringloop, verder uitgewerkt. Hierbij zijn ook de wettelijke kaders die bij deze stromen en verwerkingen spelen bepalen wat er juridisch wel en niet mogelijk is beknopt toegelicht.

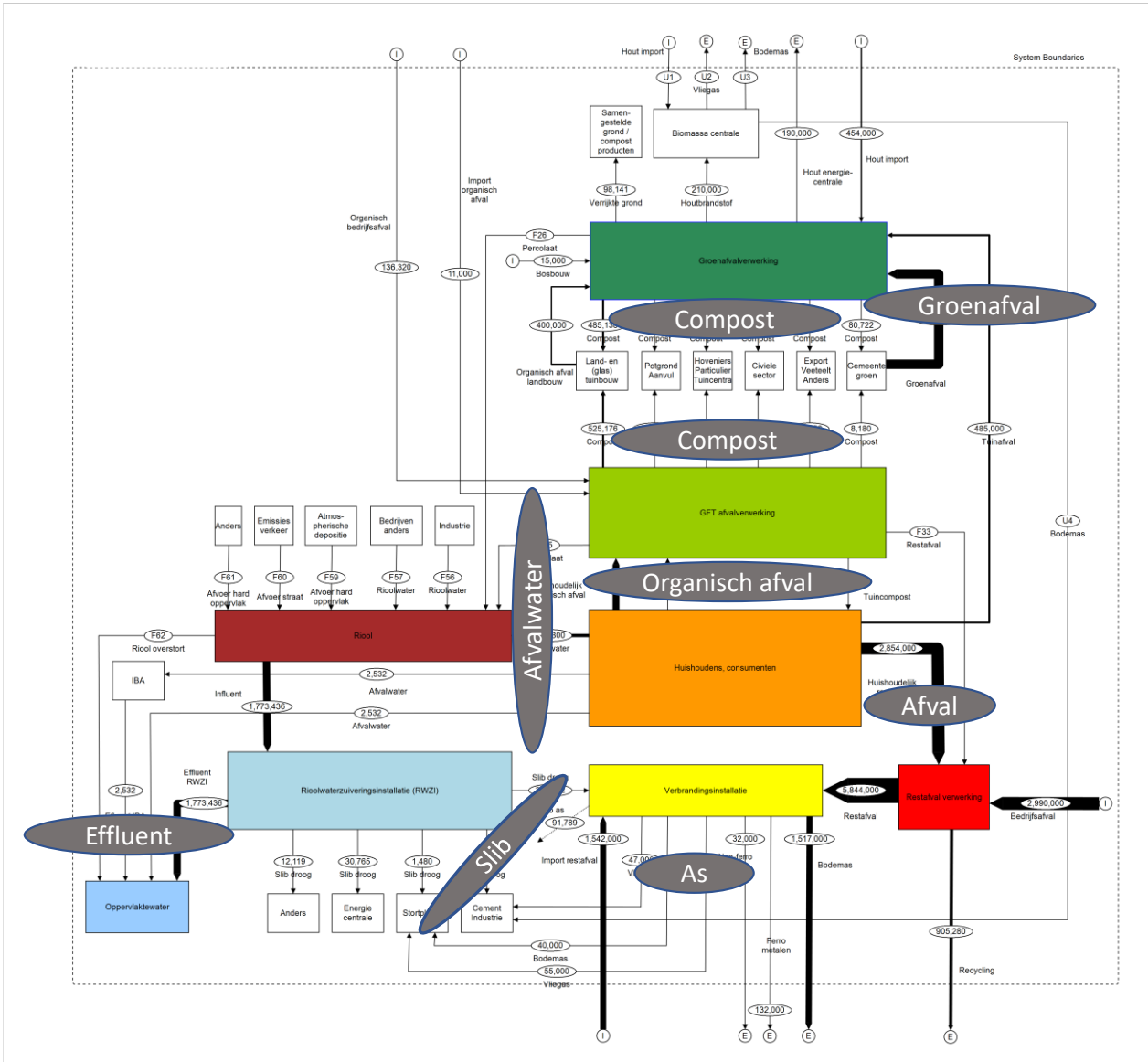
Bij de verwerking van afvalstromen tot meststoffen heeft men te maken met wettelijke kaders rond afvalstoffen en meststoffen, en specifiek bij GFE/swill ook met regelgeving m.b.t. dierlijke bijproducten. In zowel Nederlandse als Europese meststoffenregelgeving staat gedefinieerd welke afvalstoffen gebruikt kunnen worden als (bestanddeel van) meststoffen. GFE/swill valt onder bioafval, dat als compost (NL en EU) of als digestaat (EU) gebruikt kan worden. Zuiveringsslib is opgenomen in de Nederlandse meststoffenwetgeving. Urine valt echter onder afvalwater en dit beperkt de mogelijkheden. Struviet is onder voorwaarden wel toegestaan als meststof.

Er zijn verschillende routes om van een afvalstof tot een goedgekeurde meststof te komen:

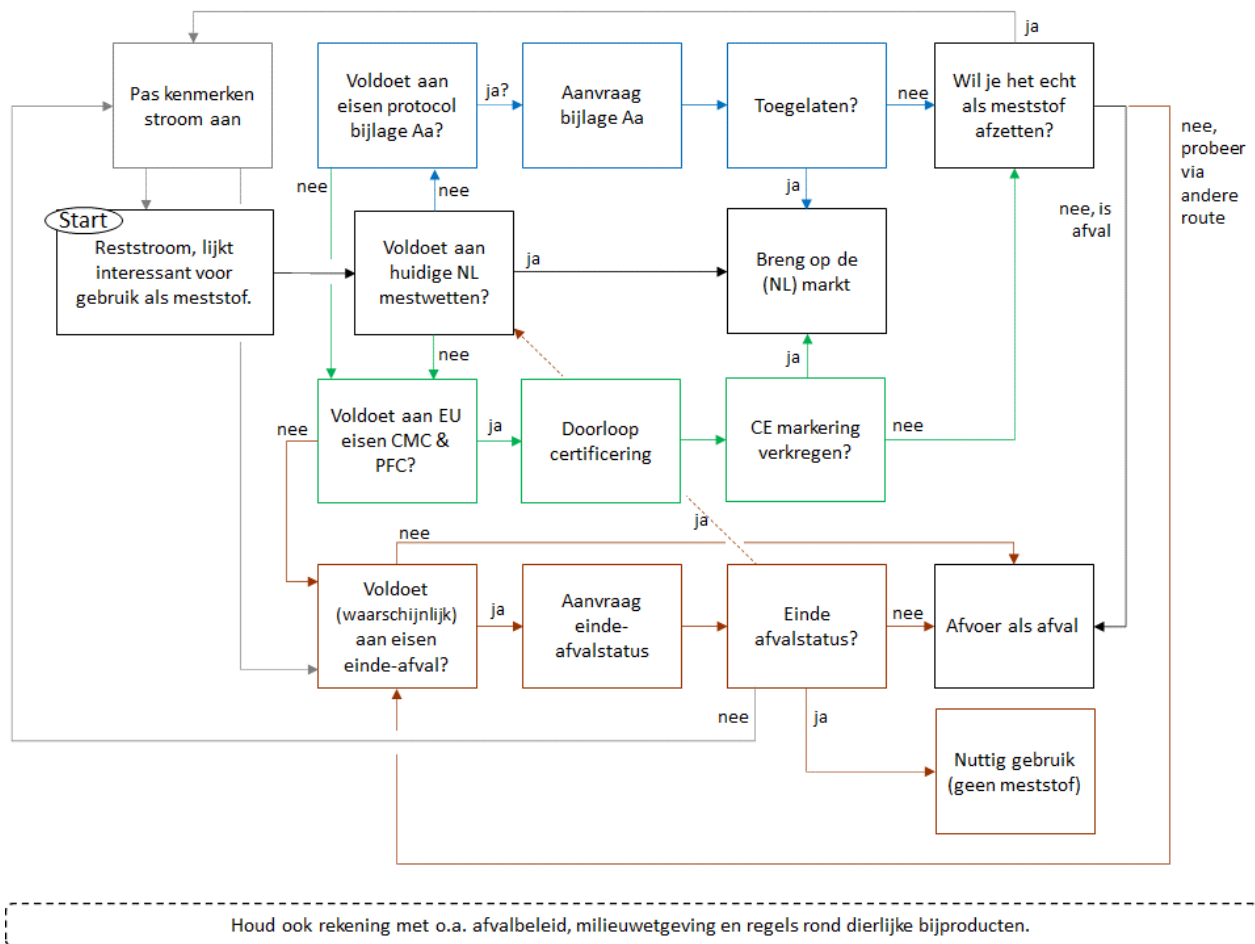
- Voldoen aan de eisen die binnen de Nederlandse wetgeving gesteld worden. Dit betekent dat voldaan wordt aan de algemene eisen in de verschillende besluiten en regelingen, of toelating krijgen op de zogenaamde 'Bijlage Aa', waarop reststromen staan die bij ministerieel besluit zijn toegelaten voor gebruik in de landbouw.

- Voldoen aan de eisen voor EU-meststoffen, dit betekent voldoen aan eisen voor componenten in meststoffen en eisen voor meststoffenproducten. Hier zijn opties voor bioafval, struviet en producten uit slibas. Na een certificeringstraject kan het product als CE-meststof verhandeld worden.
- Het traject van de einde-afval status.

Figuur II geeft een schematische weergave van deze routes, op hoofdlijnen. In het wettelijk kader zijn naast de wetgeving m.b.t. meststoffen ook het afvalbeleid en de milieuwetgeving van belang.



Figuur I Belangrijkste stromen (in grijze cirkels) en verwerking of eindstation (in kleur) van organische afvalstromen afkomstig uit huishoudens en van consumenten van voedsel.



Figuur II Schematisch beknopt overzicht op hoofdlijnen van de routes van afval- naar meststof.

Resultaten van vrachtanalyses en scenariostudies

De grootteorde van de vrachten waarin de verschillende elementen in de in deze studie meegenomen stromen (**Figuur I**) in het huishoudelijk organisch afval(water) systeem aanwezig zijn varieert van 0,1 tot 100.000 ton per jaar. De belangrijkste conclusies op basis van de (uit de literatuur en databases) verkregen datasets zijn:

- De micronutriënten zijn allemaal in meer of mindere mate aanwezig in de afvalstromen die zijn meegenomen in deze studie.
- Het is in het algemeen niet mogelijk om sluitende balansen op te stellen door gebrek aan analyses, meetafwijkingen maar ook door onbekende/niet-gekwantificeerde stromen. Hierdoor zijn er wellicht niet geïdentificeerde kansen voor kringloopsluiting
- Er zijn voor de meeste elementen meer gegevens beschikbaar voor gehalten in compost dan GFT(e) en groenafval. B, Fe, Mn en Mo worden minder vaak geanalyseerd in uitgaande stromen.
- Voor het afvalwatersysteem zijn vooral slib(as)data schaarser dan de waterdata. B, Fe, Mg, Mn en Mo worden minder vaak geanalyseerd in uitgaande stromen.

Voor de micronutriënten in relatie tot het afvalwatersysteem kan worden geconcludeerd:

- Bij het vergelijken van de gegevens van de verschillende stromen die uit de RWZIs komen zijn er duidelijke verschillen tussen de elementen.
- De grootste vrachten in de slib droge stof zijn Fe, Mg, Zn en mindere mate Cu, Mn, en Pb en voor het effluent zijn dat B, Fe, Mg, en in mindere mate Mn en Zn.
- Als een balans wordt opgesteld voor effluent, slib (droge stof) en slib as is het duidelijk dat het grootste deel van de vracht en concentratie van een aantal elementen in de droge-stof van het slib eindigt (Cu, Fe, Zn, Cd, Pb en Hg), maar voor enkele elementen ook een aanzienlijke hoeveelheid in Nederlands oppervlaktewater stroomt, namelijk B, Mg, Mn en in mindere mate Mo (**Tabel I**).
- Aangezien de in de studie meegenomen zware metalen vooral in de slibfractie achterblijven zou het effluent van RWZIs een mogelijkheid voor terugwinning van B, Mg en Mn kunnen zijn. Het is niet duidelijk

of de (lage) concentraties in de waterfase een belemmering vormen. Daarnaast dient ook rekening gehouden te worden met de aanwezigheid van andere (storende) verbindingen zoals organische microverontreinigingen.

- De as van de slibverbrandingsinstallaties lijkt een goed terugwinningspunt te zijn voor micronutriënten in het slib. Echter, gezien het feit dat er voor het merendeel van de elementen geen sluitende balans kan worden gemaakt ($100 \pm 10\%$) kunnen de resultaten van de studie slechts worden gebruikt als een indicatie voor terugwinningsmogelijkheden. De balansen zijn voor een aantal elementen (met name voor B, Cu, Mo, Zn, Cd, Hg en Pb) niet sluitend voor effluent en slib ten opzichte van het influent, omdat verschillende bronnen zijn gebruikt om deze respectievelijke gegevenspunten te kwantificeren en er in algemene zin onvoldoende gegevens zijn (bijvoorbeeld voor samenstelling slibas). De gegevens voor de samenstelling van slibas zijn gedateerd en het verdient daarom aanbeveling om deze stroom meer frequent te analyseren. Hetzelfde geldt voor bijvoorbeeld B in het in- en effluent van de zuivering.

Tabel I Verdeling van de in het influent van RWZIs aanwezige micronutriëntvrachten over de uitgaande stromen van de RWZI.

	B	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Zn	Cd	Pb	Hg
Effluent	136%	5%	14%	80%	78%	39%	13%	18%	18%	12%
Slib (droog)	3%	53%	79%	15%	21%	16%	45%	117%*	216%*	102%*
As¹	2%	57%	170%*, ¹	6%	45%	48%	38%	86%	207%	5 ² %

NA niet beschikbaar.

* de waarden zoals verkregen voor het slib zijn hoger dan gevonden in het influent

¹ wellicht hogere as waarden door Fe-dosering bij ontwateren?

² lage Hg waarde in as vanwege vervluchtiging.

Voor de micronutriënten in relatie tot het huishoudelijk organisch afval kan worden geconcludeerd:

- Het is niet mogelijk om een balans te maken voor de micronutriënten in het huishoudelijk organisch afval systeem. Vooralsnog wordt alleen de uit GFT(e) en groenafval gevormde compost regelmatig geanalyseerd op micronutriënten. Slechts een klein deel van het bron gescheiden organisch afval eindigt na bewerking in de civiele sector, andere onbekende sectoren of wordt verbrand. De compost en andere producten (bijvoorbeeld potgrond en bodemverrijkers) komen uiteindelijk weer terecht in de voedselketen of in groenvoorzieningen. De micronutriënten blijven in dat geval dus deels in de keten bij toepassing van compost in de land- en glastuinbouw.
- Een deel van het organisch huishoudelijk organisch afval eindigt in het restafval en wordt verbrand. Door een gebrek aan analysegegevens kan slechts beperkt inzicht worden verkregen in de concentraties en vrachten micronutriënten die hiermee (al dan niet) verloren gaan. Voor zover bekend worden de assen uit de verbranding momenteel vooral gebruikt in de bouw, maar gezien de hoeveelheden van de gemeten elementen zou dit restafval als een interessant punt voor terugwinning kunnen zijn. De slibassen van de verbrandingsovens bevatten in ieder geval een aanzienlijke hoeveelheid Cu en Zn.

Conclusies voor het hele systeem:

Grote fracties van de micronutriënten worden momenteel al teruggevoerd via de compost. Voor B, Mg, Mn en in mindere mate Mo geldt dat ze voornamelijk in het effluent van de zuivering aanwezig zijn (**Tabel II**). Deze elementen worden in veel mindere mate teruggevonden in de slibfractie van de zuivering. Cu, Fe, Zn, Cd, Pb en Hg zijn vooral in de slibfractie aanwezig, waarvan met name Fe in grote hoeveelheden. Cu, Mo en Zn zouden (van de in deze studie meegenomen micronutriënten het gemakkelijkst uit restafval kunnen worden teruggewonnen (als alleen de hoeveelheid in aanmerking wordt genomen en aanwezigheid van andere elementen worden genegeerd).

Tabel II Overzicht van grootte orde van de micronutriëntstromen in productstromen (compost, effluent en slib) van het huishoudelijk organisch afvalstelsel, grootteorde van de gecombineerde stromen en fracties van het micronutriënt in totale productstroom. Daar waar cellen grijs zijn is het aandeel van de productstroom in totale vracht gelijk aan 25% of hoger). De donkergrijze vlakken geven aan welke elementen zijn geanalyseerd in as van restafvalverbranding. Deze vrachten zijn hoger dan de compost, effluent en slibstromen.

	Grootte orde stromen compost, effluent en slib totaal (kg/jaar)	Fracties (van totaal) uitgezonderd as restafval			Geanalyseerd in restafval	Opmerkingen
		Compost	Effluent	Slib		
		B	10 ⁵ -10 ⁶	0,1		
Cu	10 ⁵ -10 ⁶	0,2	0,1	0,7		A/B/D
Fe	10 ⁷ -10 ⁸	0,7	0,1	0,3		B/C/D/E
Mg	10 ⁷ -10 ⁸	0,1	0,7	0,1		B/C/D
Mn	10 ⁵ -10 ⁶	0,5	0,4	0,1		B/C/D/E
Mo	10 ³ -10 ⁴	0,3	0,5	0,2		A/B/E
Zn	10 ⁵ -10 ⁶	0,3	0,2	0,6		A/B/D
Cd	10 ² -10 ³	0,5	0,1	0,5		A/B/C/D/E
Pb	10 ⁴ -10 ⁵	0,5	0,0	0,4		A/B/C/D
Hg	10 ² -10 ³	0,3	0,1	0,7		A/B/C/D/E

A = disbalans over RWZI.

B = onvoldoende data huishoudens.

C = geen restafval(as) gegevens.

D = geen gegevens biomassakrachtcentrales en andere mogelijk interessante stromen.

E = disbalans slibverbranding.

F = gering aantal metingen.

Naast de grootte orde van de stromen kan ook de concentratie van de micronutriënten ten opzichte van de zware metalen (Cd, Hg, Pb) in de verschillende stromen een indicator voor de mogelijkheden voor terugwinning van de micronutriënten (**Tabel III**). Uit de data blijkt dat ijzer (Fe) en magnesium (Mg) in alle stromen (compost, effluent, slib) in substantiële hoeveelheden aanwezig zijn ten opzichte van de gerapporteerde zware metalen. Aangezien de GFT en groencompost al worden ingezet in de voedselketen lijken dus met name ook de stromen gerelateerd aan de waterzuivering aantrekkelijk voor terugwinning van deze nutriënten mits de aanwezigheid van organische microverontreinigingen en andere storende verbindingen de terugwinning niet belemmert. Aangezien de vracht zware metalen in het effluent van RWZIs relatief laag is, liggen in deze stroom kansen voor hergebruik of terugwinning van bijvoorbeeld Fe en Mg. Dit geldt ook voor boor, mangaan en zink, maar de concentraties van die elementen is aanmerkelijk lager. In de RWZI een scheiding plaatsvindt tussen B, Mn, en Mg die vooral in het effluent zitten en de rest van de elementen, waaronder de zware metalen die voornamelijk in de slib fractie zitten. Dit zou een extra aanleiding kunnen zijn om terugwinning te onderzoeken.

Tabel III Ratio's van micronutriënten in een stroom ten opzichte van de som van zware metalen (Cd, Hg en Pb). Voor de berekening is gebruik gemaakt van de gegevens over de totale vrachten in de stromen. Hierbij is de vracht van het micronutriënt gedeeld door de som van de Cd, Hg en Pb vracht in elke stroom). Ratio's > 10 zijn groen. Ook weergegeven is de totale vracht zware metalen (ZM) (Cd+Hg+Pb).

Stroom	B	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Zn	ZM (ton)
GFT compost	1	1	164	77	7	0	4	22
Groen compost	1	1	248	66	10	0	3	18
Influent	21	12	316	1215	19	1	47	15
Effluent	157	4	249	5355	83	1	34	2,6
Slib (droge stof)	0	3	118	84	2	0	10	31
As (slibverbranding)	0.2	3	265	38	4	0	9	19

Voor geselecteerde stromen zijn de volgende scenario's uitgewerkt om te onderzoeken of deze stromen verder kunnen worden opgewerkt om zo de terugwinning en hergebruik van micronutriënten in de keten te kunnen stimuleren ten opzichte van de huidige toegepaste praktijk zoals hierboven beschreven:

- GFE/swill (etensresten)
 - Vergisten, eventueel scheiden vast/vloeibaar en terugwinnen van nutriënten,
 - Cascadering met bijvoorbeeld terugwinning van vetzuren, de rest vergisten en eventueel drogen en pelletiseren.

De aparte verwerking van GFE/swill tot digestaat is praktisch en waarschijnlijk ook juridisch haalbaar, hierbij zijn betere data nodig om goed in te kunnen schatten of aan alle eisen voor CE-certificering wordt voldaan. Bij cascadering wordt uiteindelijk ook digestaat geproduceerd; de meer hoogwaardige stoffen die in eerdere stappen gemaakt kunnen worden hebben wel te maken met een afvalstatus, wat de toepassing beperkt. Voor de toekomst is dit wel een interessante route om GFE/swill meer hoogwaardig te verwerken.

- Zuiveringslib, directe afzet in de landbouw van:
 - (Behandeld) Slib,
 - Schone (industriële) slibstromen,
 - Restfracties: assen of slib na extractie van nutriënten,
 - Slib uit brongescheiden systemen.

Na uitwerken van de scenario's "saneren aan de bron", "thermofiele vergisting" en "brongescheiden systemen" blijkt dat geen van deze routes aantoonbaar leidt tot een slibsamenstelling die aan de wettelijke normen voor landbouwkundig gebruik voldoet. Mogelijke uitzonderingen hierop zijn zeer schone slibstromen uit bijvoorbeeld de levensmiddelenindustrie. Koper en zink zijn de probleemstoffen bij het voldoen aan de wettelijke eisen. Van de vrachten die hiervan op het riool worden geloosd is het merendeel afkomstig van consumenten. Het afkoppelen van industrieën is dus geen algemene oplossing, hoewel dit plaatselijk mogelijk wel kansen kan geven. Om dit te kunnen evalueren is informatie nodig over slib van individuele RWZI's en het type afvalwater dat daar wordt verwerkt.

Afkoppelen van al het toiletwater geeft een reductie van circa 15% voor beide stoffen, dit is niet voldoende. Ook het slib van de aparte verwerking van toiletafvalwater voldoet niet aan de eisen. Extractie van mineralen via de slibas-route is op zich veelbelovend, in de EU-meststoffenverordening is er een bestanddelen categorie die hierbij past. Een mogelijke toepassing buiten de landbouw is het inzetten van metaalzoutoplossingen uit P-winning uit slibas op RWZI's ter vervanging van ijzerchloride dat gedoseerd wordt om P te verwijderen.

- Urine
 - Verwerkingsmethode o.b.v. filtratie en verdamping (ontwikkeld door projectpartner Semilla),
 - Struvietprecipitatie met 'bijvangst' van micronutriënten., directe afzet in de landbouw van:

De inzameling van urine is een logistieke uitdaging, maar er zijn kansen als de aparte verwerking van urine in de belangstelling blijft staan. Net als bij de andere reststromen ontbreekt het aan data specifiek voor Nederlandse urine, en in het algemeen aan goed bruikbare meetgegevens voor de verschillende micronutriënten in urine. Voor de evaluatie van een eventuele opname op Bijlage Aa of een einde-afvalstatus is de beschikbaarheid van goede meetgegevens onmisbaar. Struviet is een onder voorwaarden erkende meststof, waarmee de juridische hindernis van de afvalstatus van urine zou worden overkomen. Uit onderzoek aan struvietvorming uit urine is gebleken dat de hoeveelheid zware metalen in struviet laag is. Hoewel dit gunstig is voor het voldoen aan de normen voor gebruik als meststof, betekent dit ook dat het terugwinningspotentieel voor metalen laag is. De beschikbare data voor micronutriënten in struviet is tot dusver beperkt.

Aanbevelingen

- De beschikbaarheid van gegevens met betrekking tot kwantiteit en kwaliteit van organische reststromen, zoals concentraties micronutriënten, maar ook zware metalen en andere (organische) microverontreinigingen, moet worden verbeterd. Dit is nodig voor zowel de ingaande stromen (water, GFT, restaval) als de uitgaande stromen (effluent, slib, slibas, compost, assen uit de restafvalverbranding). De analyses zouden gedurende langere tijd op een consistente manier moeten worden uitgevoerd en gerapporteerd. Met name voor de micronutriënten B, Fe, Mg, Mn en Mo zijn voor wat betreft de waterketen meer gegevens nodig. Aanbevolen wordt om vaker en op meer locaties nutriëntenmetingen te doen, bijvoorbeeld de afvoer naar het riool en de afvoer naar de vaste stof.
- Het beschikbaar maken van gegevens met betrekking tot op heden niet gebruikte stromen zoals swill moet worden gestimuleerd. Wellicht helpt hierbij om dit soort stromen niet per definitie als afval te oormerken

maar eerder als reststromen en dat wat overblijft na extractie van de gewenste teruggewonnen materialen pas als "afval" wordt gezien.

- Een groot percentage van de micronutriënten Cu, Fe, en Zn komt in het RWZI-slib terecht. Er zijn echter ook relatief grote hoeveelheden van de zware metalen Cd, Hg en Pb die datzelfde slib verontreinigen. Daarom moeten de mogelijkheden worden onderzocht om deze zware metalen eruit te filteren om het slib te kunnen gebruiken in bijvoorbeeld de landbouw en zo deze micronutriënten in de kringloop te houden.
- Het hergebruik van effluent staat weer meer in de belangstelling. Gezien de aanwezigheid van B, Zn, Mg en Mo in het effluent van de RWZI is het interessant om de mogelijkheid van (her)gebruik van effluent in de landbouw te onderzoeken. Er zal echter nog wel meer onderzoek gedaan moeten worden naar de aanwezigheid van andere (storende) (an)organische (micro)verontreinigingen die (her)gebruik kunnen belemmeren.
- Gescheiden inzamelen GFTe stromen zou zo veel mogelijk bevorderd kunnen worden. Een volgende stap zou kunnen zijn om groenafval en GFT verder te scheiden voordat het wordt gecomposteerd.
- Er is een heel scala aan methodes om micronutriënten terug te winnen uit stromen maar deze zijn in het algemeen weinig tot niet selectief. Het verdient aanbeveling om de mogelijkheden hiervoor verder te onderzoeken.
- Assen uit de restafvalverbranding zouden een bron van micronutriënten kunnen zijn. Er is slechts beperkt bekend welke elementen in de assen aanwezig zijn.

1 Micronutriënten in de afval- en afvalwaterketen

1.1 Aanleiding van project: waarom zijn micronutriënten belangrijk?

De wereldbevolking groeit en de prognoses zijn dat in 2050 de voedselproductie 50% hoger moet zijn dan in 2012 om iedereen te kunnen voeden (FAO, 2017). Om deze productie te kunnen bewerkstelligen zijn, naast andere maatregelen (bijvoorbeeld gerelateerd aan teeltmethodes and keuze van gewassen), onder andere voldoende meststoffen nodig. Voor plantengroei en dierlijke en humane groei zijn respectievelijk 14 en 22 elementen essentieel (naast CHO) (Bindraban, Dimkpa, Nagarajan, Roy, & Rabbinge, 2015) (Tabel 1-2).

Deze macro- en micronutriënten worden gedolven uit mijnen, zoals voor P en K maar ook langs chemische weg (Haber Bosch voor stikstof) gewonnen (Mehta, Khunjar, Nguyen, Tait, & Batstone, 2015). Echter, die routes vragen veel energie (stikstof) of zijn eindig met betrekking tot voorraden (P en K). Normaliter worden de micronutriënten naar behoefte gedoseerd en is het agrofood systeem nog grotendeels lineair. De beschikbaarheid van sommige nutriënten is echter beperkt. Vanwege de snelle groei van de wereldbevolking en daardoor een toenemende vraag, worden verschillende micronutriënten steeds schaarser. De meeste vraagscenario's concluderen dat er tegen het midden van de eeuw een tekort zal zijn aan enkele essentiële micronutriënten (de Haes et al., 2012; Voortman, Bastein, Bree, & Bussink, 2012). Dergelijke tekorten zullen leiden tot tekorten in de landbouw en vervolgens tot menselijke en dierlijke micronutriëntentekorten. Tabel 1-1 geeft een schatting van de aanvoer van micronutriënten op basis van hun geografische concentratie en de uitputtingstijd van minerale ertsen. Het is belangrijk om op te merken dat deze gegevens alleen een orde van grootte vertegenwoordigen.

Tabel 1-1 Productiekenmerken van verschillende micronutriënten, gebaseerd op (de Haes et al., 2012; U.S. Geological Survey, 2017).

Symbool	Geografische concentratie ^a	Productie (kton/jaar) schatting voor 2016	R/P ^c	R/P risico classificatie ^d
B	Hoog ^b	9400 ^b	40	+++
Cu	Medium	19400	37	+++
Fe	Medium	1360000	60	+++
Mg	Hoog ^b	27700 ^b	307	+
Mn	Medium	16000	43	+++
Mo	Hoog	227	66	++
Zn	Medium	11900	18	+++

^a: hoeveelheid of maat voor mijnbare nutriënten.

hoog = top 3 landen >75% van de wereldwijde productie.

medium = top 3 landen hebben tussen 50% en 75% van wereldwijde productie.

laag = top 3 landen hebben <50% van de wereldwijde productie.

^b: productie in VS niet meegenomen.

^c: reserves/productie ratio = aantal jaren tot uitputting van voorraad.

^d: risico in relatie tot R/P .

+ = laag (R/P > 100).

++ = substantieel (R/P 60 - 100).

+++ = hoog (R/P < 60).

Vanwege de huidige lineaire nutriëneconomie bestaat er een duidelijk risico op een tekort aan micronutriënten in de komende eeuw. Op wereldwijde schaal zijn boor, koper, molybdeen, en zink geologisch schaars (Henckens, Driessen, & Worrell, 2014). Onderzoek heeft aangetoond dat kalium (een macronutriënt), selenium, en kobalt ook waarschijnlijk schaars worden in de 21^{ste} eeuw (Chardon & Oenema, 2013; Hees, 2013).

De grotere voedselproductie en de dreigende tekorten aan energie en beschikbaarheid van nutriënten maken onderzoek naar de mogelijkheden van terugwinning uit afval en andere residuen en hergebruik van de teruggewonnen nutriënten in de landbouw noodzakelijk. Toepassing van herwonnen nutriënten leidt tot een meer circulair agrofood systeem.

De Europese Unie streeft ernaar om tegen 2050 een volledig circulaire economie te bereiken. Om dit te bereiken is het zogenaamde Circulaire Economie Actieplan (CEAP) ontwikkeld. Een essentieel onderdeel van dit plan is het circulair produceren van voedsel, water en voedingsstoffen (European Parliament, 2021). Dit betekent dat Nederland, net als de andere EU-lidstaten, zal moeten werken aan het sluiten van de nutriëntencyclus. In overeenstemming met dit Europese doel is het project "Micronutriënten in de kringloop" opgezet. Hiervoor is het noodzakelijk om de huidige herkomst en bestemming en eventuele bronnen en putten van de micronutriënten in de keten beter in kaart te brengen.

Tabel 1-2 Essentiële nutriënten voor planten en dieren (Bindraban et al., 2015; Chardon & Oenema, 2013; Kupfernagel, Reitsma, Steketee, de Ruijter, & Blom, 2017; Taiz & Zeiger, 2002; Tripathi et al., 2015; Voortman et al., 2012) ((x)= niet essentieel voor alle planten). Grijs gearceerde elementen zijn onderdeel van het in dit rapport beschreven onderzoek.

Symbool	Element	Classificatie ^a	Essentieel voor		Concentratie
			planten	dieren	
Al	Aluminium	Micro	(x)		
B	Boor	Micro	x		0-20 mg/kg DW
Ca	Calcium	Macro	x	x	
Cl	Chloor	Micro	x	x	100 mg/kg DW
Co	Kobalt	Micro	(x)	x	
Cr	Chroom			x	
Cu	Koper	Micro	x	x	6 µg/g DW
F	Fluor			x	
Fe	IJzer	Micro	x	x	50-150 µg/g DW
I	Jodium	Micro	(x)	x	
P	Fosfor	Macro	x	x	
K	Kalium	Macro	x	x	
Mg	Magnesium	Macro	x	x	2000 mg/kg DW
Mn	Mangaan	Micro	x	x	10-100 µg/ g DW
Mo	Molybdeen	Micro	x	x	0,1-2,0 mg/kg DW
N	Stikstof	Macro	x	x	
Na	Natrium	Micro	(x)	x	10 mg/kg DW
Ni	Nikkel	Micro	(x)	x	0,1 mg/kg DW
S	Zwavel	Macro	x	x	
Se	Selenium	Micro	(x)	x	Variabel
Si	Silicium	Micro	x	x	
Sn	Tin			x	
V	Vanadium	Micro	(x)	x	
Zn	Zink	Micro	x	x	15-20 mg/kg DW

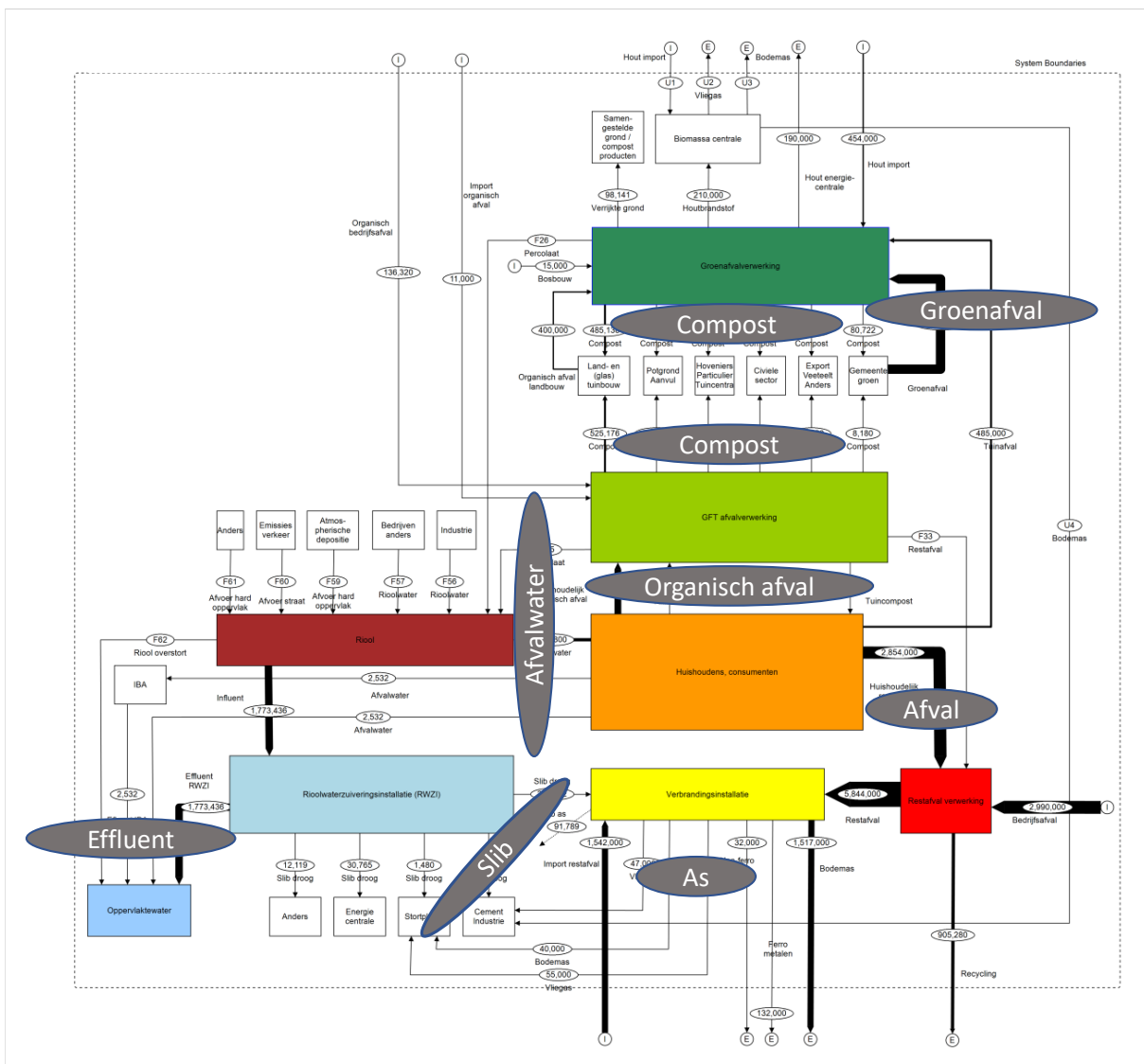
^a classificatie gebaseerd op de vereiste hoeveelheden voor planten: micronutriënten 1 – 50 mg/kg voeding en macronutriënten 0.1 – 50 g/kg.

Het lange-termijndoel van het project "Micronutriënten in de cyclus" is om een basis te leggen voor het sluiten van de kringloop van een aantal essentiële micronutriënten binnen Nederland (Verhulst, 2021): borium (B), koper (Cu), ijzer (Fe), magnesium (Mg), mangaan (Mn), molybdeen (Mo) en zink (Zn) zijn meegenomen in de studie. Koper en zink kunnen ook worden beschouwd als zware metalen, maar binnen dit project worden ze beschouwd en gedefinieerd als micronutriënten op zich, omdat ze essentiële voedingsstoffen zijn voor planten (Tabel 1-2). Ook de zware metalen cadmium (Cd), kwik (Hg) en lood (Pb) zijn in deze studie meegenomen omdat het vóórkomen van deze elementen in (herwonnen) stromen hergebruik zou kunnen belemmeren. Dit heeft geleid tot een overzicht van de huidige voedingsstofstromen op basis van de beschikbare gegevens (richtjaar 2018/2019). Binnen dit overzicht werden putten en potentiële herstel-/verwijderingsbronnen binnen het systeem geïdentificeerd.

1.2 Globaal overzicht van het Nederlandse organisch restromen die in deze studie zijn opgenomen

In het project Micronutriënten in de Keten zijn de micronutriënten stromen onderzocht in het agrofood systeem met de nadruk op organisch afval afkomstig uit huishoudens, i.e. GFT(e) en huishoudelijk afvalwater (Figuur 1-1). De stofstroomanalyses hebben zich tot nu toe voornamelijk gericht op stikstof en fosfor (bijvoorbeeld (Smit, van Middelkoop, van Dijk, & van Reuler, 2015)). Micronutriënten zijn nog niet structureel meegenomen in dit soort analyses.

Micronutriënten en zware metalen komen Nederlandse huishoudens binnen via voedsel en via tuinbemesting (compost, potgronden, kunstmest of (organische) meststoffen). Van daaruit verlaten micronutriënten en zware metalen de huishoudens via verschillende stromen: groenafval, huishoudelijk organisch afval, huishoudelijk rioolwater en de organische fractie van (rest)afval. Tuinafval en huishoudelijk organisch afval worden meestal verwerkt door verschillende organische afvalverwerkers. Huishoudelijk rioolwater wordt voornamelijk verwerkt in rioolwaterzuiveringsinstallaties. Er zijn nog twee andere bronnen van micronutriënten en zware metalen in rioolwaterzuiveringsinstallaties: industrieel afvalwater en water dat in het riool terecht komt door afwatering van hemelwater. De slibresten van de rioolwaterzuiveringsinstallaties worden momenteel voor het grootste deel verbrand. Restafval gaat voornamelijk naar verbrandingsovens en soms naar stortplaatsen.



Figuur 1-1 Belangrijkste stromen (in grijze cirkels) en verwerking of eindstation (in kleur) van organische afvalstromen afkomstig uit huishoudens en van consumenten van voedsel.

1.2.1 Afvalketen

Een deel van het huishoudelijk afval bestaat uit organisch materiaal dat na inzameling wordt verwerkt, vaak in een composteringsinrichting. Tijdens compostering wordt het organisch materiaal onder gecontroleerde omstandigheden via aerobe, biologische afbraak omgezet naar een stabiel materiaal (compost) dat kan worden opgeslagen en gebruikt. Micronutriënten en zware metalen kunnen verloren gaan tijdens het aerobe composteerproces, voornamelijk via het percolaat en de daaropvolgende afvalwaterbehandeling. In Nederlandse composteerinstallaties wordt het percolaat deels gebruikt om het organisch afval tijdens het proces te bevochtigen, waardoor het verlies van micronutriënten via deze route (en zware metalen) klein is. De rest komt via de afvalwaterbehandeling terug in de keten (T. Brethouwer, 2021). De concentratie zware metalen in het materiaal wordt niet significant beïnvloed tijdens de compostering: voor en na het proces is het percentage zware metalen in het ruwe materiaal ongeveer hetzelfde. De concentratie zal ten opzichte van uitgangsmateriaal wel toenemen omdat het volume van het substraat tijdens composteren afneemt. De micronutriënten zijn vooral aanwezig in de kleine groedelen (groen bladmateriaal etc.). Grotere delen (hard, verhout materiaal en schors) worden gebruikt als groene brandstof en mulch en bevatten minder micronutriënten (Haynes, Belyaeva, & Zhou, 2015). Het anorganische deel van het huishoudelijk afval wordt al dan niet na gescheiden inzameling (voor glas, paper, plastic etc.) verder verwerkt en/of verbrand. De assen bevatten de zware metalen en de micronutriënten.

1.2.2 Afvalwaterketen

Het afvalwater van huishoudens kan worden onderverdeeld in zwartwater, grijs water en atmosferische depositie (neerslag). Zwartwater is afvalwater afkomstig van toiletten, wat in Nederland over het algemeen betekent dat het fecaliën, urine, water en toiletpapier bevat met daarin (organische) microverontreinigingen zoals (resten van) geneesmiddelen en pathogenen. Grijs water is afvalwater (bijna) zonder fecale besmetting, dus water uit gootstenen, douches en baden, wasmachines en vaatwassers. Grijs water kan zeep, microverontreinigingen en enkele pathogenen bevatten. Atmosferische depositie in deze context verwijst naar de neerslag die op het huis en de tuin valt. Momenteel wordt het meeste afvalwater nog gemengd behandeld in RWZIs. Regenwater wordt steeds vaker afgekoppeld van het riool en afgevoerd naar oppervlaktewater of geïnfiltrerd in de bodem, maar wordt deels nog als zodanig in RWZIs terecht komen bij regenval. Micronutriënten kunnen op verschillende wijzen in het afvalwater terecht komen. Vaatwastabletten zijn bijvoorbeeld een belangrijke bron van zink in afvalwater, evenals corrosie van zinken daken en goten. Op dezelfde manier is corrosie van koperen drinkwaterleidingen een bron voor koper in het rioolsysteem en is corrosie van lood gebruikt in en aan gebouwen een bron voor lood in afvalwater. Deze elementen komen in het rioolsysteem terecht via neerslagafvoer (Compendium voor de Leefomgeving, 2022a, 2022b).

Afvalwaterzuiveringsinstallaties filteren bijna alle organische stof uit het inkomende afvalwater. Deze organische stof zit voor ongeveer 50% in het slib dat wordt gevormd. Ongeveer 85% van fosfor en stikstof worden ook verwijderd (Centraal Bureau voor de Statistiek, 2019). P wordt via het slib of na precipitatie als struviet uit het afvalwater verwijderd en dan gedeeltelijk teruggewonnen. Stikstof wordt nog niet teruggewonnen maar terug omgezet naar stikstofgas via nitrificatie/denitrificatie in de hoofdzuivering en/of anammox processen in een deelstroomzuivering voor rejectiewater van de slibgisting (wat niet alleen veel energie kost maar ook een energiedrager in de vorm van ammonium vernietigd). De zware metalen in rioolwater worden voor gemiddeld ongeveer 80% gefilterd in het rioolslib; de overige 20% komt in het effluent terecht dat in oppervlaktewater wordt geloosd (Roest, De Buijzer, & Palmen, 2018).

1.3 Leeswijzer

In dit rapport staan de resultaten weergegeven van de studie naar de stofstromen van geselecteerde micronutriënten binnen het Nederlandse agrofoodstelsel. De volgende elementen zijn meegenomen in de studie: borium (B), koper (Cu), ijzer (Fe), magnesium (Mg), mangaan (Mn), molybdeen (Mo) en zink (Zn), en de zware metalen cadmium (Cd), lood (Pb) en kwik (Hg). Hierbij zijn inbegrepen: organische afstromen zoals GFT en GFTe, groen afval maar ook huishoudelijk afvalwater en de daaruit gevormde stromen na behandeling (slib en effluent). Het rapport bevat een beschrijving van de aanpak (Hoofdstuk 2), waarna eerst de materiaalstromen in de in de studie opgenomen subsystemen (organisch afval en afvalwater)

worden beschreven (Hoofdstuk 3) en daarna in Hoofdstuk 4 per micronutriënt de stofstromen in het systeem. In hoofdstuk 5 volgt een kort overzicht van mogelijke technologieën die gebruikt kunnen worden om de micronutriënten terug te winnen en te hergebruiken. Er zijn 3 scenario's geïdentificeerd die mogelijk interessant zijn voor terugwinning van metalen uit GF(T)e, slib en urine. Een samenvatting van deze scenariostudie is weergegeven in hoofdstuk 6. De volledige uitwerking van de scenariostudies is te vinden in het achter in deze rapportage bijgevoegde deelrapport. Hoofdstuk 7 bevat tenslotte de conclusies en aanbevelingen van het onderzoek.

2 Aanpak van onderzoek

2.1 Algemene aanpak

De resultaten van het onderzoek komen primair voort uit gegevens uit online databases (Bijlage 1), literatuuronderzoek (Bijlage 2) en gegevens aangeleverd door deskundigen op het gebied (Bijlage 3). Deskundigen werden rechtstreeks benaderd via persoonlijke communicatie voor relevante gegevens en aanvullende input zoals vergelijkingen van cijfers. De resultaten zijn ook beschreven in 2 MSc theses (Martina, 2022; Schadenberg, 2022).

Dit leidde tot een conceptueel model van de stroom van micronutriënten en zware metalen die in de inleiding zijn gespecificeerd.

Alle gevonden gegevens zijn met STAN software (Wien., 2012) gevisualiseerd tot een schematisch overzicht van de onderzochte micronutriënten en zware metaalstromen binnen het huishoudelijk (organisch) afvalstelsel in Nederland, inclusief de afvoer en lekkages. Daarnaast zijn, indien mogelijk, vrachten van de elementen berekend.

2.2 Bronnen

2.2.1 Expert raadpleging

Vertegenwoordigers van onderstaande organisaties hebben bijgedragen aan deze rapportage¹.

- Branche Vereniging Organische Reststoffen (BVOR)
- Vereniging Afvalbedrijven, Attero
- Informatiepunt Water, Verkeer en Leefomgeving (Rijkswaterstaat)
- Deltares
- Compendium voor de leefomgeving (CLO)

2.2.2 Databases

Voor de dataverzameling werden verschillende Nederlandse databases gebruikt. De beschikbare data werden vergeleken met andere datasets om de representativiteit ervan te valideren:

- CBS open data StatLine (CBS Statline)
Statline is gebruikt voor data op het gebied van afvalwaterzuivering (jaar 2018 of 2020). CBS data voor afvalverwerking zijn ook gebruikt via de SWING data base van Rijkswaterstaat.
- WATSON database (*Watson database*. <https://www.emissieregistratie.nl/>)
De WATSON database bevat data over alle microverontreinigingen in het in- en effluent van Nederlandse RWZIs afkomstig uit de Emissieregistratie. Voor deze rapportage is gebruik gemaakt van data uit 2018.
- Swing database (*Swing database*; <https://afvalmonitor.databank.nl/jive/>)
De Swing database bevat data voor de hoeveelheden huishoudelijk afval op gemeentelijk en nationaal niveau
- Compendium voor de Leefomgeving (CLO) (Compendium voor de Leefomgeving)
Database voor wetenschappelijk onderbouwde feiten en cijfers ter ondersteuning van maatschappelijke discussies over milieu en openbare ruimte. Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van de emissiegegevens. Op basis van metingen, schattingen met emissiefactoren en modellen wordt voor veel emissiebronnen, zoals huishoudens, de belasting van verschillende elementen op de riolering bepaald.

¹ Namen van betrokkenen zijn opvraagbaar bij auteurs rapport.

2.3 Dataselectie

2.3.1 Systeembegrenzing

2019 is gekozen als referentiejaar op basis van de beschikbaarheid en relevantie van de gevonden gegevens die het dichtst bij 2021 liggen (de startdatum voor dit project en onderzoek). In sommige gevallen zijn meerdere opeenvolgende jaren geanalyseerd om vast te stellen of 2019 representatief is, of dat er een verandering in trend is. In sommige gevallen waren er geen gegevens beschikbaar voor 2019. Als gegevens uit andere jaren representatief waren, werden ze als zodanig gebruikt. In de hoofdtekst en bijlagen wordt de basis voor elke gegevensbron vermeld. De ruimtelijke systeemgrenzen zijn vastgesteld voor stromen binnen Nederland. De afvalstromen die zijn geanalyseerd, zijn de volgende: afvalstromen die afkomstig zijn van Nederlandse huishoudens, de verwerking van deze afvalstromen en stromen die voortvloeien uit deze verwerking. Elementconcentratiegrenzen werden ingesteld op detecteerbare concentraties. Het totale afval van Nederlandse huishoudens bestaat uit veel afzonderlijke stromen. In dit onderzoek is alleen gekeken naar vast organisch afval, afvalwater en restafval. Dit betekent dat de volgende afvalstromen niet zijn opgenomen in deze analyse: grof algemeen afval, algemeen bouwafval, oud papier, textiel, glas, plastic/blikjes/blikjes/dranken/voedselverpakkingen (PMD-afval), huishoudelijk gevaarlijk afval, luiers, frituurvet/olie, afgedankte elektronische apparaten, bruikbare huishoudelijke goederen, tapijten, matrassen, puin, houtafval, metaalafval, gips, schone grond, vlakglas, bitumineuze dakbedekking, autobanden, piepschuim, gasflessen en brandblussers, dierlijke kadavers en ander afval.

2.3.2 Data validatie

Indien mogelijk werd de gebruikte data geverifieerd en als er een afwijking was tussen de data, werd de data gebaseerd op het hoogste aantal metingen gebruikt.

De data voor de influent en effluent in RWZIs van Cd, Cu, Hg, Pb en Zn zijn gebaseerd op de CBS Statline database. De effluentdata zijn gebaseerd op metingen door ongeveer 200 van de 320 RWZIs. De influentgegevens zijn metingen op ongeveer 100 RWZIs. De slibdata is gebaseerd op 250 RWZIs (Lapre, 2022).

De data voor het influent van RWZIs van B, Fe, Mg, Mn en Mo zijn gebaseerd op de Watson database. Elk jaar worden er beperkte monsters genomen van RWZIs in verschillende stroomgebieden. De data wordt als geldig beschouwd als er ten minste 3 monsters per jaar worden genomen over 7 RWZIs (van Duijnhoven, 2021). De in dit onderzoek gebruikte data bevat minimaal 112 monsters en wordt dus als geldig beschouwd, behalve voor borium. Voor de stroom van afvalwater van huishoudens naar het rioolstelsel is de data voor Mo en Hg afkomstig uit de Emissieregistratie factsheet "Huishoudelijk afvalwater", waaruit blijkt dat de data voor Mo een 2 op een schaal van nauwkeurigheid van 1 tot 8 is (waarbij 1 het meest nauwkeurig is), en de data voor Hg een 3 is (Deltares & TNO, 2020).

De data voor de samenstelling van vaste organische afval van groencomposteerders en organische afvalcomposteerders is gebaseerd op 2 tot 6 monsters voor elke 5000 ton (BVOR en Vereniging Afvalbedrijven, 2021). Vrachten zijn afkomstig uit de WAR rapportage (Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat, 2021). De rest van de data is afkomstig uit literatuuronderzoek.

2.4 Tools en berekeningen

STAN (subSTance flow Analysis) software versie 2.6.801 is freeware ontwikkeld voor de analyse en weergave van materiaal stromen (Wien., 2012).

2.4.1 Berekeningen afval

In de meeste gevallen was het niet mogelijk om de exacte hoeveelheid van de (micro)nutriënten in de afvalstroom te bepalen. Voor de organisch fractie in restafval is een schatting gemaakt op basis van

hoeveelheid afval, gemiddelde fractie ONF (31%, sorteeraanlyse), rendement van compost productie (40% of gewichtsbasis, (Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat, 2021)), droge-stofgehalte van de compost en gemiddelde micronutriënten samenstelling (MC) van compost (Tabel 2-1): volgens:

Minimale hoeveelheid micronutriënten/zware metalen in restafval = restafval * %ONF * compostefficiëntie * droge-stofgehalte * MC

Tabel 2-1 *Micronutriënten samenstelling (mg/kg DS) van compost gemaakt uit GFT of groenafval Data zijn gebaseerd op metingen in > 400 monsters (VA/BVOR) of analyses in Duitse compost (Duits) (zie Bijlage 3). Voor B, Fe en Mn in groencompost zijn geen analyseresultaten bekend. Deze waarden zijn gelijkgesteld aan de gevonden concentraties in GFT compost (T. Brethouwer, 2023).*

Element	GFT compost	Groenafval compost	Referentie
	2019	2019	
B	23	23	Duits
Cu	36	21	VA/BVOR analyses
Fe	7.286	7.286	Duits
Mg	3.437	1.930	VA/BVOR
Mn	298	298	Duits
Mo	2	2	Duits
Zn	169	102	VA/BVOR
Cd	0,37	0,36	VA/BVOR
Pb	44	29	VA/BVOR
Hg	0,07	0,07	VA/BVOR

De MFAs voor de verschillende micronutriënten zijn eveneens gebaseerd op de samenstelling van de compost (Tabel 2-1) en de hoeveelheden zoals gerapporteerd ((Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat, 2021)) (Tabel 2-2) en het droge-stofgehalte.

Tabel 2-2 *Compost productie uit GFT en groenafval in 2019 (Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat, 2021).*

	GFT compost ¹ (ton)	Groenafval compost ² (ton)
Land en (glas)tuinbouw	525.176	485.138
Potgrond en aanvulgronden	108.980	153.972
Hoveniers, particulieren, tuincentra	36.543	105.665
Civiele sector	3.369	16.908
Export/Veeteelt/Anders	18.250	32.951
Gemeenten (groenvoorziening)	8.180	80.722
Samengestelde grondproducten	0	98.141
Tuincompost	14.985	

¹ Droge stofgehalte compost 68%.

² Droge stofgehalte compost 63%.

2.4.2 Berekeningen afvalwater en slib

De totale hoeveelheid drinkwater die van drinkwaterinstallaties naar huishoudens stroomt, is 932.000.000 ton. 90% van dat water verlaat de huishoudens als afvalwater (de overige 10% verdampt bijvoorbeeld of wordt gebruikt voor tuinieren) (Deltares, 2020). De hoeveelheid van de verschillende micronutriënten/zware metalen (MH) in de afvalwaterstroom van huishoudens (HH) naar afvalwaterzuiveringsinstallaties (RWZI) is berekend:

Hoeveelheid afvalwater van HH naar RWZI = MC * 0,90

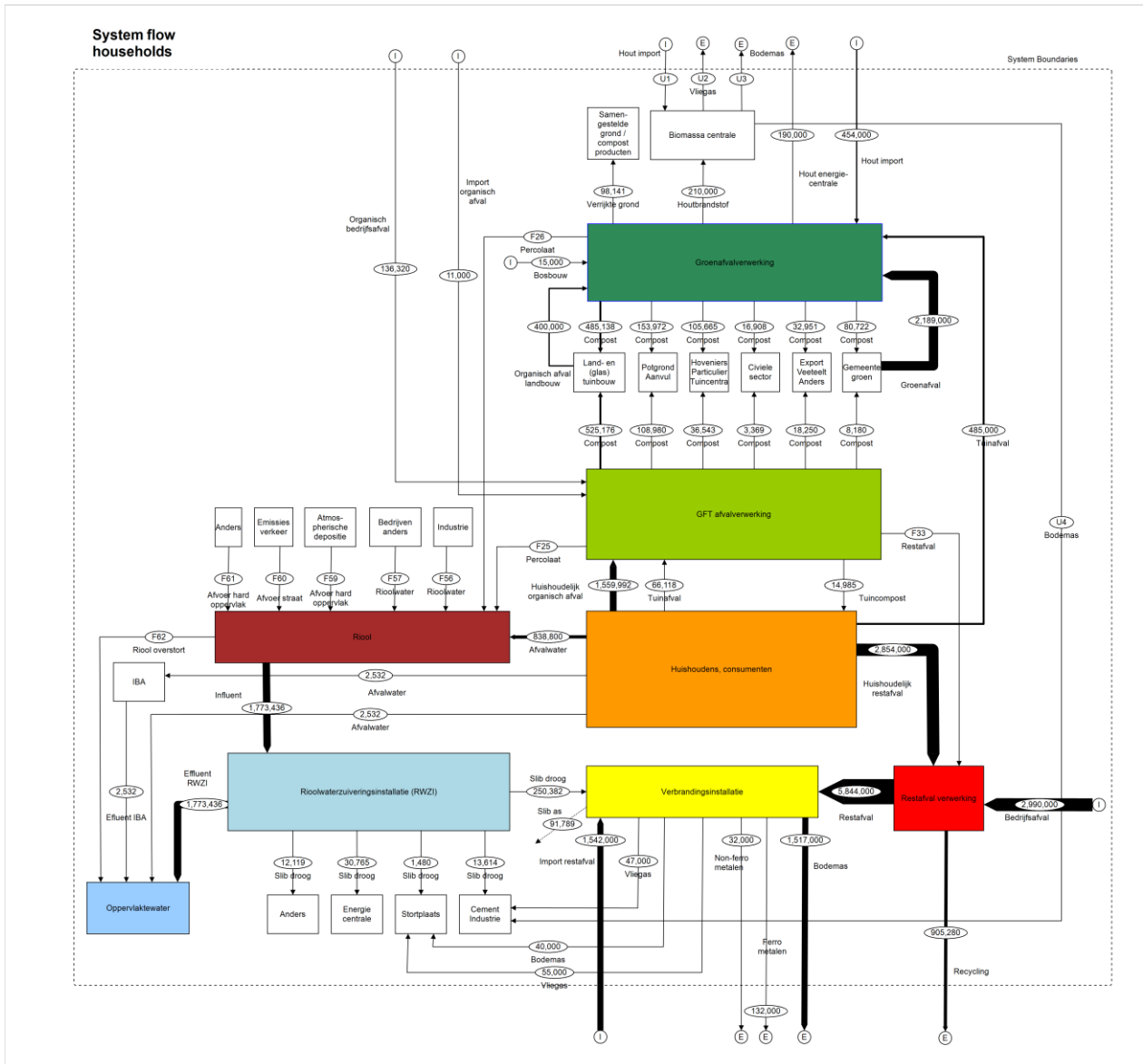
De totale vracht van elk element in kg/jaar in de verschillende (afval)waterstromen is berekend via de Watson Database en de gegevens over micronutriënten/zware metalen (MC) in het influent en effluent in een concentratie van µg/l, vermenigvuldigd met het totale volume (1.8 miljard m³) afvalwater in het influent.

Vrachten micronutriënten en zware metalen in afgevoerd slib en geproduceerd slibas zijn berekend via gegevens van KWR en Laan (2019) (Laan, 2019; Roest, de Buijzer, Muñoz Sierra, & Palmen, 2016; Roest et al., 2018). De waarden voor de verkregen concentraties in mg/kg DS zijn vervolgens omgerekend naar kg per jaar uitgaande van een jaargemiddelde van 308360 ton riooldroge stof (slibproductie 2020 (CBS Statline, 2020)) en op basis van 91.789 ton asproductie uit de slibverbranding van 250.832 ton slib droge stof (CBS Statline, 2020)).

3 Materiaalstromen binnen het systeem

3.1 Algemeen

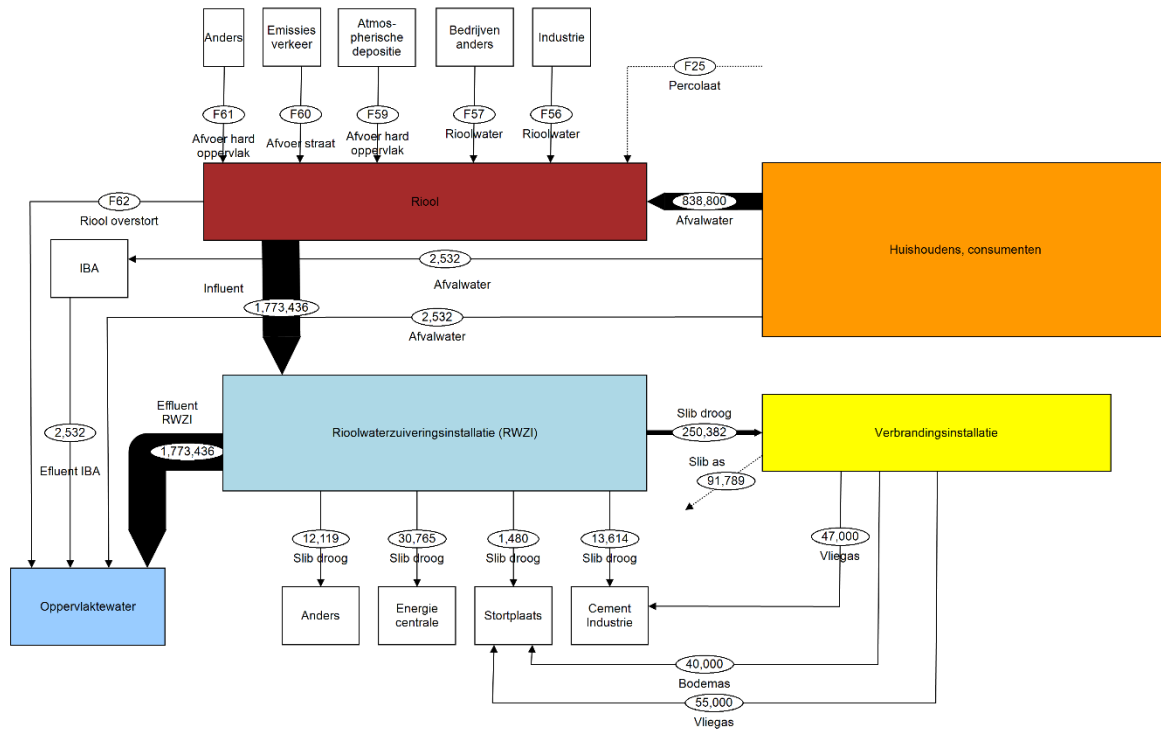
Voor deze studie zijn de belangrijkste afvalstromen van Nederlandse huishoudens als volgt gedefinieerd: afvalwater, vast organisch afval en restafval. Elk van deze stromen maakt deel uit van een complex systeem, dat hieronder zal worden besproken. Een algemeen overzicht dat is gemaakt op basis van de grootteorde van alle afvalstromen van huishoudens in Nederland, is weergegeven in Figuur 3-1.



Figuur 3-1 Vrachten van huishoudelijke afvalstromen in Nederland. De dikte van de pijlen vertegenwoordigt de grootte van de stroom of belasting. (Alle vrachten vast afval in ton/jaar en alle afvalwaterstromen (in en uit RWZI) in 10³ m³/jaar).

3.1.1 Afvalwater

In 2018 hebben RWZIs ongeveer 1,8 miljard kubieke meter afvalwater behandeld (CBS Statline, 2020, 2021b) (Figuur 3-2). Het influent in het rioolstelsel komt uit de volgende bronnen: afvalwater van huishoudens, industrie, bedrijven (overig), atmosferische depositie afloop, verkeersemissie afloop, afloop (overig) en onbekende bronnen (Compendium voor de Leefomgeving, 2022a, 2022b, 2022c).



Figuur 3-2 Substelsel afvalwater Alle waarden behalve die voor het slib, vlieg-as en bodemas zijn in m³/jaar. De waarden voor het slib, slib-as, vlieg-as en bodemas zijn gegeven in ton DS/jaar. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vlieg-as stromen.

De gegevens over huishoudelijk afvalwater zijn gebaseerd op de 99,4% van de huishoudens die zijn aangesloten op het rioleringsstelsel in Nederland. Naast de reguliere zuivering van afvalwater in RWZIs is er 5.064.000 m³ afvalwater van huishoudens dat niet in het rioolstelsel terecht komt, waarvan 50% (2.532.000 m³) wordt gereinigd in een individuele behandeling afvalwater, i.e. IBA installatie. De rest (2.532.000 m³) wordt rechtstreeks geloosd in oppervlaktewater zonder enige vorm van behandeling (Deltares, 2020). Er stroomt elk jaar 838.800.000 m³ afvalwater van huishoudens naar het rioolstelsel (gebaseerd op 10% verlies van gebruikt 932.000.000 m³ verbruikt drinkwater, bijvoorbeeld door tuinieren en verdamping (Compendium voor de Leefomgeving, 2021; Deltares, 2020).

Er zijn nog 7 andere stromen die naar het rioolstelsel aflopen: afvalwater van industrie en andere bedrijven, percolaat van compostering van huishoudelijk organisch afval en van groenafval, atmosferische depositie, afstroom in het rioolstelsel via harde oppervlakteafvoer en water uit het wegennet via bestratingsafvoer. Een deel van het afvalwater in het rioolstelsel stroomt rechtstreeks naar oppervlaktewater via overstorten bij zware neerslag. Van deze stromen zijn alleen de vrachten gerapporteerd en niet de volumes (Compendium voor de Leefomgeving, 2022c).

De jaarlijkse invoer vanuit riool naar RWZIs is daarom 1.773.436.000 m³. Uitgaande stromen vanuit de RWZI zijn effluent dat geloosd wordt op oppervlaktewater en (ontwaterd) slib (totaal 308.360 ton DS in 2020) waarvan 250.382 ton/jaar rechtstreeks naar de verbrandingsoven gaat (resultierend in 91.789 ton as).

Daarnaast zijn er kleinere slibstromen die worden afgevoerd naar de cementindustrie (13.614 ton), stort (1.480 ton), energiecentrales (30.765 ton) en andere routes (12.119 ton) (CBS Statline, 2021a).

3.1.2 Influent and effluent

De concentraties (en het aantal analyses in de tijd waarop deze gebaseerd zijn) van de micronutriënten en zware metalen in in- en effluent van Nederlandse RWZIs is weergegeven in Tabel 3-1. Voor borium zijn slechts een beperkt aantal metingen beschikbaar (4 in 2016 en 12 in 2017). Daarom zijn de waarden zoals weergegeven in Tabel 3-1 minder betrouwbaar.

Belangrijkste gegevens:

- Er zijn geen sluitende balansen voor de meeste micronutriënten.
- De concentraties magnesium en ijzer zijn substantieel hoger dan die van de andere in deze studie meegenomen elementen.
- Magnesium-, ijzer- en boorvrachten zijn relatief hoog in effluent van RWZI.
- De ratio's micronutriënten/ (zwaar metalen, i.e. de som van Cd, Pb, Hg) is voor het in- en effluent met name hoog (>10) voor B, Fe, Mg, Mn en Zn. In het slib worden hoge ratio's aangetroffen voor Fe en Mg (Tabel 3-1) (zie ook sectie 4.12). Dit maakt bijvoorbeeld de effluent stroom aantrekkelijk voor terugwinning van de micronutriënten.
- De balans voor Fe, Mg, Mn zijn goed ($100 \pm 10\%$), voor B, Cu, Mo, Zn, Cd, en Hg matig en voor Pb slecht.

Tabel 3-1 *Micronutriënten en zware metalen in in- en effluent en het slib van RWZIs Weergegeven zijn gemiddelde concentraties ([C] van beschikbare analyses) en vrachten per element.*

Element	Influent				Effluent				Slib			Balans ⁴ (%)
	[C] ug/L	Vracht kg/jaar	# ¹	Bron ²	[C] ug/L	Vracht kg/jaar	# ¹	Bron ²	[C] mg/kg DS	Vracht kg/jaar	Bron ³	
B	171	303.258	12	2016	232,8	412.856	15	2017	27	8.326	S	139
Cu	96,1	170.480	112	2018	5,3	9.346	112	2018	292	90.041	K	58
Fe	2.582	4.579.012	112	2018	370,6	657.235	112	2018	11.731	3.617.371	S	93
Mg	9.934	17.617.313	114	2018	7.965	14.125.418	139	2018	8.332	2.569.256	K	95
Mn	159	282.154	114	2018	124	219.551	139	2018	194	59.822	S	99
Mo	4,6	8.181	114	2018	1,8	3.208	139	2018	4,2	1.295	S	55
Zn	384	680.645	112	2018	49,9	88.530	112	2018	1.003	309.285	K	58
Cd	0,2	342	110	2018	0,034	60	112	2018	1,3	401	K	135
Pb	7,9	13.976	112	2018	1,4	2.556	112	2018	97,9	30.188	K	234
Hg	0,1	181	106	2018	0,012	22	112	2018	0,6	185	K	114

¹ # = aantal analysesresultaten.

² Bron: Watson database.

³ Bron: S = (Laan, 2019), K = (Roest et al., 2016). In principe is uitgegaan van waarden in K en bij niet gemeten is aangevuld met waarden uit S.

⁴ Balans = $100 \cdot (\text{Vracht-effluent} + \text{Vracht-slib}) / \text{Vracht influent}$.

3.1.3 Slib

De micronutriëntenbelasting en concentraties in het slib van Nederlandse RWZIs zijn weergegeven in Tabel 3-1. De vrachtberekeningen zijn gebaseerd op een beperkt aantal analyses en daarom kunnen de data alleen als indicatief worden beschouwd. Uit Er zijn hoge concentraties en grote vrachten Fe, Mg en Zn in de uitgaande slibstroom van Nederlandse RWZIs. Daarnaast zijn er ook nog aanzienlijke concentraties en vrachten van Pb in het ontwaterde slib van RWZIs. Op dit moment is er meer Pb aanwezig in het slib dan B en Mo, wat de potentiële haalbaarheid van het terugwinnen van deze micronutriënten belemmert. De verhouding van Pb:B is 1:0,27 (i.e. $\text{Pb}/\text{B}=3.7$) en Pb:Mo is 1:0,04 ($\text{Pb}/\text{Mo}=25$). De overige toxische zware metalen (Cd en Hg) zijn in het slib in lagere concentraties en vrachten aanwezig dan de micronutriënten. Ter vergelijking zijn in Tabel 3-2 de concentraties en vrachten van de macronutriënten in het slib van Nederlandse RWZIs weergegeven. Het grootste gedeelte van het slib (243.159 ton/jaar Figuur 3-2) wordt verbrand door HVC en SNB. De in de slibas aangetroffen micronutriënten zijn weergegeven in Tabel 3-3.

Tabel 3-2 Stikstof, fosfor en kalium gehalten in ontwaterd slib van Nederlands RWZIs (Laan, 2019).

Element	Slib (na ontwatering)	
	Gemiddelde concentratie. (mg/kg DS)	Vracht (kton/jaar)
TN	39.000	12,0
TP	39.857	12,3
K	12.053	3,7

Tabel 3-3 Micronutriënten (gemiddelde concentraties [C]) en vrachten in slibas na verbranding van 250.382 ton slib DS/jaar (2020, (CBS Statline, 2020)) en productie van 91.789 ton as.

Element	Gemiddelde concentratie mg/kg as	Vracht (gemiddeld) kg/jaar	Bron -
B	49	4.498	(Roest et al., 2018)
Cu	1.060	97.296	(Roest et al., 2016)
Fe	84.641	7.769.113	(Roest et al., 2016)
Mg	11.999	1.101.376	(Roest et al., 2016)
Mn	1.393	127.862	(Roest et al., 2018)
Mo	43	3.947	(Roest et al., 2018)
Zn	2.807	257.652	(Roest et al., 2016)
Cd	3,2	294	(Roest et al., 2016)
Pb	315,4	28.950	(Roest et al., 2016)
Hg	0,1	9	(Roest et al., 2016)

De concentraties en vrachten van Fe en Mg in de as van verbrandingsinstallaties zijn hoog in vergelijking met de andere elementen. De hoeveelheid zware metalen in de as lijkt relatief laag in vergelijking met het gehalte aan micronutriënten. Qua macronutriënten concentraties in het slib zijn alleen gegevens beschikbaar voor K (17799 mg/kg as en een vracht van 1634 ton /jaar (Roest et al., 2016)).

3.1.4 Afvalwatersysteem: conclusies en overzicht

Bij het vergelijken van de gegevens van de verschillende stromen die uit de RWZIs komen zijn er duidelijke verschillen tussen de elementen. De grootste vrachten in de slib droge stof zijn Fe, Mg, Zn en mindere mate Cu, Mn, en Pb en voor het effluent zijn dat B, Fe, Mg, en in mindere mate Mn en Zn. Als een balans wordt opgesteld voor effluent, slib (droge stof) en slib as (Tabel 3-4) is het duidelijk dat het grootste deel van de vracht en concentratie van een aantal elementen in de droge-stof van het slib eindigt (Cu, Fe, Zn, Cd, Pb en Hg), maar voor enkele elementen ook een aanzienlijke hoeveelheid in Nederlands oppervlaktewater stroomt, namelijk B, Mg, Mn en in mindere mate Mo. Aangezien de in de studie meegenomen zware metalen vooral in de slibfractie achterblijven zou het effluent van RWZIs een mogelijkheid voor terugwinning van deze elementen kunnen zijn. Het is niet duidelijk of de (lage) concentraties in de waterfase een belemmering vormen (zie ook sectie 4.12). Daarnaast dient ook rekening gehouden te worden met de aanwezigheid van andere (storende) verbindingen zoals organische microverontreinigingen. De as van de slibverbrandingsinstallaties lijkt een goed terugwinningspunt te zijn voor micronutriënten. Echter, gezien het feit dat er voor het merendeel van de elementen geen sluitende balans kan worden gemaakt (100±10%) kan dit overzicht slechts worden gebruikt als een indicatie voor terugwinningsmogelijkheden (Tabel 3-4). De balansen zijn voor een aantal elementen (met name voor B, Cu, Mo, Zn, Cd, Hg en Pb) niet sluitend voor effluent en slib ten opzichte van het influent, omdat verschillende bronnen zijn gebruikt om deze respectievelijke gegevenspunten te kwantificeren en er in algemene zin onvoldoende gegevens zijn (bijvoorbeeld voor samenstelling slibas). Dit wordt ook duidelijk als de hoeveelheden in slib en as worden vergeleken. Deze zouden dezelfde grootteorde moeten hebben maar dit is in enkele gevallen niet zo. Voor Hg is dit te verklaren door vervluchtiging tijdens verbranding. De dosering van ijzer voor slibontwatering zou een rol kunnen spelen bij het verschil in gehalten tussen slib droge stof en as. De gegevens voor de samenstelling van slibas zijn gedateerd en het verdient daarom aanbeveling om deze stroom meer frequent te analyseren. Hetzelfde geldt voor bijvoorbeeld B in het in- en effluent van de zuivering.

Tabel 3-4 Verdeling van de in het influent van RWZIs aanwezige micronutriëntvrachten over de uitgaande stromen van de RWZI.

	B	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Zn	Cd	Pb	Hg
Effluent	136%	5%	14%	80%	78%	39%	13%	18%	18%	12%
Slib (droge stof)	3%	53%	79%	15%	21%	16%	45%	117%*	216%*	102%*
As¹	2%	57%	170%*, ¹	6%	45%	48%	38%	86%	207%	5 ² %

* de waarden zoals verkregen voor het slib zijn hoger dan gevonden in het influent.

¹ wellicht hogere as waarden door Fe-dosering bij ontwateren?

² lage Hg waarde in as vanwege vervluchtiging.

Tabel 3-5 geeft een samenvattend overzicht van de gegevens over de aanwezigheid van micronutriënten, en zware metalen die zijn verzameld voor RWZIs en as van slibbehandelingsinstallaties in Nederland.

Tabel 3-5 Overzicht (samenvatting van Tabel 3-1 en Tabel 3-3) van de micronutriënten (gemiddelde concentratie [C] en vracht) in de in- en uitgaande stromen van RWZIs en in de slib as.

Element	Influent		Effluent		Slib		As	
	[C] ug/L	vracht ton/jaar	[C] ug/L	Vracht ton/jaar	[C] mg/kg DS	vracht ton/jaar	[C] mg/kg as	vracht ton/jaar
B	171	303	233	413	27	8,3	49	4,5
Cu	96	170	5	9,3	292	90	1.060	97
Fe	2.582	4.579	371	657	11.731	3.617	84.641	7.769
Mg	9.934	17.617	7.965	14.125	8.332	2.569	11.999	1.101
Mn	159	282	124	220	194	60	1.393	128
Mo	5	8,2	2	3,2	4	1,3	43	3,9
Zn	384	681	50	89	1.003	309	2.807	258
Cd	0,2	0,3	0,03	0,1	1	0,4	3	0,3
Pb	8	14	1	2,6	98	30	315	29
Hg	0,1	0,2	0,01	0,02	0,6	0,2	0,1	0,01

NA: niet beschikbaar.

3.2 Huishoudelijk afval

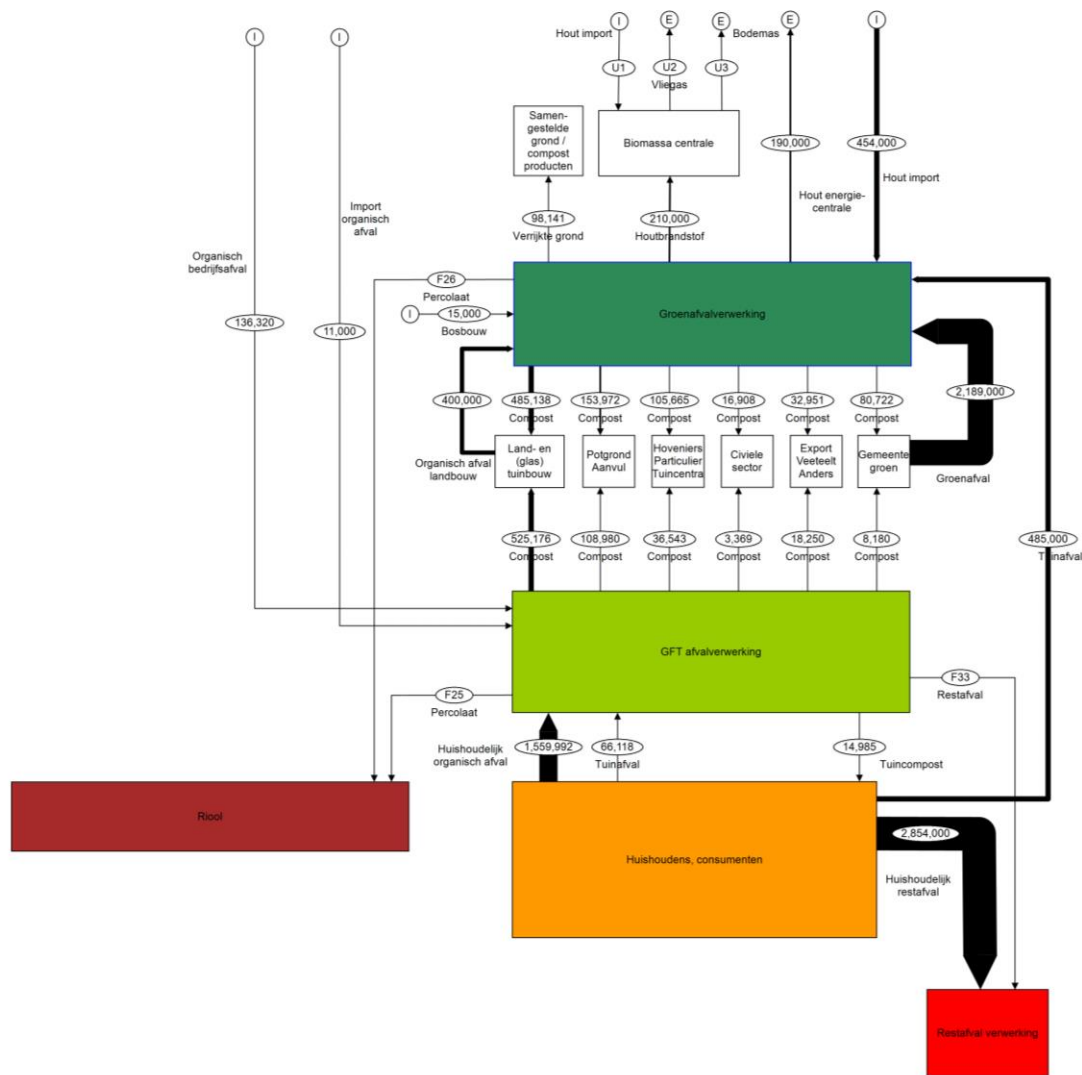
Het huishoudelijk afval in Nederland is voor deze studie onderverdeeld in organisch afval (zoals ingezameld als GFTe en groenafval) en restafval dat ook organische fracties kan bevatten.

Er zijn verschillende organisch afvalverwerkers in Nederland. Deze verwerken de organische stof in huishoudelijk afval in biogas, compost, biomassa (voor energieproductie of basis voor bio-based materialen) en/of energie.

3.2.1 GFT(e) en groenafval

Zoals te zien is in Figuur 3-3, kunnen Nederlandse verwerkers van organisch afval naar compost worden onderverdeeld in twee groepen: verwerkers van groen afval en verwerkers van huishoudelijk organisch afval. De Vereniging Afvalbedrijven (VA) dekt alle GFT verwerkende bedrijven en de BVOR bijna alle groencomposteringen. De meeste GFT bedrijven zijn ook lid van de BVOR. Gezamenlijk dekken de organisatie wel de hele georganiseerde compostmarkt. De stromen naar verwerkers van groen afval bestaan uit organisch materiaal afkomstig van landbouw, bosbouw, invoer van houtbrandstof en gemeentelijke landschapsinrichting, waarbij de laatste een stroom van huishoudelijk tuinafval omvat die door gemeenten wordt ingezameld en ook als groen afval wordt verwerkt. De belangrijkste stroom naar verwerkers van huishoudelijk organisch afval komt van huishoudens (Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat, 2021).

Figuur 3-3) (in 2019, Tabel 3-6). Al deze stromen worden verwerkt tot GFT en groencompost (Tabel 3-7).



Figuur 3-3 Verwerking van organisch afval in Nederland. De waarden voor de verschillende vrachten zijn weergegeven in ton/jaar (richtjaar 2019).

Tabel 3-6 Belangrijkste stromen GFT en groenafval (ton in 2019) die worden omgezet in compost (Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat, 2021).

	GFT afval		Groenafval (BVOR)
GFT-afval van huishoudens	1.559.992	Gemeentelijke	2.189.000
Tuin en plantsoenafval	66.118	landschapsarchitectuur	
Organisch Bedrijfsafval	136.320	Landbouw en kassen	400.000
		bosbouw	15.000
		houtimport	454.000
Totaal GFT afval en organisch	1762430		
Totaal verwerkt (in ton)	1.767.708		3.058.000

Tabel 3-7 Stromen van GFT- en groenafval- compost voor verschillende eindbestemmingen (Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat, 2021).

	Opmerking	GFT compost	groencompost	Totaal compost
Landbouw (akkerbouw, vollegrond tuinbouw & boomteelt)	Gecombineerd in Figuur 3-3	521.233	474.969	996.202
Glastuinbouw		3.943	10.169	14.112
Hoveniers, particulieren, tuincentra		36.543	105.665	142.208
Gemeenten (groenvoorziening)		8.180	80.722	88.902
Potgrondsubstraten en aanvulgronden		108.980	153.972	262.952
Samengestelde grondproducten		0	98.141	98.141
GWW sector (aannemerij/wegenbouw) – Civiel		3.369	16.908	20.277
Veehouderij	Gecombineerd in	0	7.656	7.656
Export	Figuur 3-3	18.250	0	18.250
Anders, namelijk...		0	25.295	25.295
		700.498	973.497	1.673.995
Droge stof		68%	63%	
droog gewicht		476.339	613.303	1.089.642

3.2.2 Restafval

In Nederland is in 2019 7.386.000 ton afval verbrand. Daarvan was 2.854.000 ton huishoudelijk afval (gemengd stedelijk en grof huishoudelijk afval). Daarnaast wordt er 1,5 miljoen ton geïmporteerd afval en 3,1 miljoen ton bedrijfsafval verbrand. Om de scheiding van organische en niet-organische stromen te verbeteren, wordt na het ophalen van afval vaak nog een extra scheidingstap toegepast. Dit betreft de organische fractie uit het restafval (ONF) dat na vergisting alsnog wordt verbrand. Ook residu, uit het GFT, dat eerst naar de huishoudelijke organische afvalverwerkers is gebracht, komt uiteindelijk bij het restafval terecht (T. Brethouwer, 2021). Ongeveer 68% van ons restafval wordt verbrand en 32% gerecycled (Centraal Bureau voor de Statistiek, 2022). Papier, plastic, ferro en non ferro wordt ter plekke uit het restafval gesorteerd en afgevoerd.

Tabel 3-8 (Rest)Afval hoeveelheden richting verbranding (Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat, 2021) in 2019.

Herkomst	Hoeveelheid (kton/jaar)	Omschrijving
Gemengd stedelijk afval	2.362	Huishoudelijk
Grof huishoudelijk afval	492	Huishoudelijk
Bedrijfsafval	1.311	Bedrijfsafval NL
Reststoffen na scheiding	2.850	Bedrijfsafval + import
Overig niet gespecificeerd	214	Bedrijfsafval
Gevaarlijk afval	146	Bedrijfsafval

Vanuit de verbrandingsoven is er afzet van bodemas (1.517.000 ton) naar de civiele sector en 40.000 ton gaat richting stortplaatsen. Daaruit zijn de non-ferrometalen (Al, Cu, Pb, Ni, Sn, Ti, Mg en Zn, 32.000 ton) en ferrometalen (132.000 ton) al verwijderd. Daarnaast wordt er vliegashouding vanuit de verbrandingsoven naar afgevoerd richting stortplaatsen (55.000 ton) of afgezet in de cementindustrie (47.000 ton) (Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat, 2021). De bron- of nagescheiden fracties van het afval (papier, plastic, ferro- en nonferro) worden in deze studie niet meegenomen voor de bepaling van de micronutriënten vrachten aangezien deze stromen vaak al worden recycled.

Met de beperkte analyses resultaten van bodem en vliegashouding in Kupfernagel et al., (Kupfernagel et al., 2017) zijn de concentraties en vrachten van Cu, Mo, Zn en K in de bodemas en vliegashouding van de verbrandingsovens berekend (Tabel 3-9). De gegevens weergegeven in Tabel 3-9 geven slechts een orde van grootte, maar er lijkt een hoge vracht K, Zn en Cu in de bodem- en vliegashouding aanwezig te zijn. Daarnaast bevat de vliegashouding relatief hoge concentraties Mo ten opzichte van de bodemas. Naast de geanalyseerde elementen zouden ook

andere micronutriënten in de vliegias aanwezig kunnen zijn. Deze waren echter geen onderdeel van de studie zoals beschreven in dit rapport.

Tabel 3-9 Concentraties ([C] in mg/kg as) en vrachten (V ton/jaar) (Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat, 2021) op jaarbasis van Cu, Mo, Zn en K in bodem en vliegias van restafval verbrandingsinstallaties (op basis van as-gehalten volgend (Kupfernagel et al., 2017)).

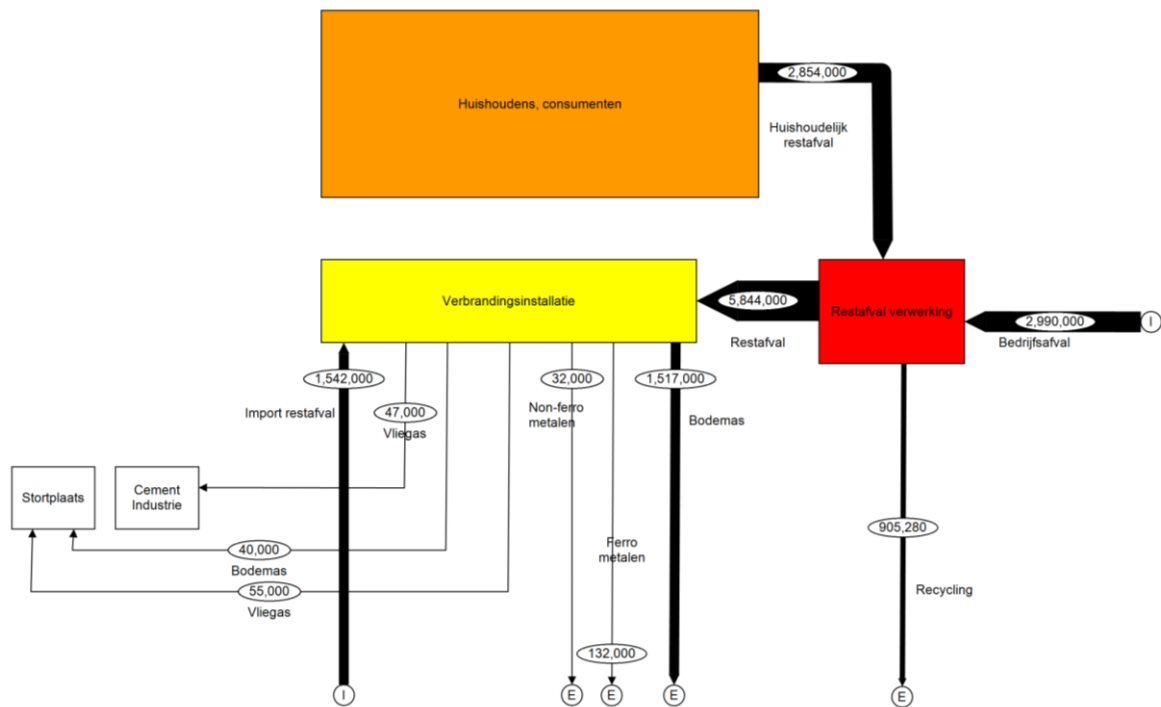
Stroom	Totale vracht (kton)	Cu		Mo		Zn		K		Co		Se	
		[C]	V	[C]	V	[C]	V	[C]	V	[C]	V	[C]	V
Bodemas → civiel	1.517	2.851	4.325	26	39	3.802	5.768	7.765	11.780	40	61	5	8
Bodemas → stort	40	2.851	114	26	1	3.802	152	7.765	311	40	2	5	0
Vliegias → stort	55	1.426	78	775	43	25.754	1.416	34.021	1.871	26	1	17	1
Vliegias → cement	47	1.426	67	775	36	25.754	1.210	34.021	1.599	26	1	17	1

De concentraties en vrachten van micronutriënten en zware metalen zijn in recente jaren niet gekwantificeerd. Echter een deel van het afval dat nu richting de verbranding gaat is organisch en hieruit zouden nog micronutriënten kunnen worden geëxtraheerd bij nascheiding van de organische natte fractie (ONF) uit het restafval. Deze hoeveelheden zijn weergegeven in Tabel 3-10.

Tabel 3-10 Berekende vrachten van micronutriënten in de organische fractie van niet bron gescheiden huishoudelijk (rest)afval in Nederland.

Element	Vracht ^a kg/jaar
B	5.535
Cu	8.663
Fe	1.753.371
Mg	827.112
Mn	71.713
Mo	481
Zn	40.670
Cd	89
Pb	10.589
Hg	17

^a Vrachten zijn berekend op basis van de aanname dat niet bron gescheiden restafval van Nederlandse huishoudens voor 31% uit organisch afval (Afvalmonitor - sorteeraanlyse, 2019) bestaat, wat betekent dat er 885 kton ONF potentieel is voor compost vorming. In het algemeen is de omzetting organisch afval naar compost 40% (op gewichtsbasis, (Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat, 2021) wat betekent dat er 354 kton compost zou kunnen worden gevormd met een droge stofgehalte van 68%). De micronutriënten gehalten zijn vervolgens terugerekend uit de gehalten van compost (Tabel 2-1).



Figuur 3-4 Sub schema voor restafval (anders dan GFT en groenafval) afkomstig uit huishoudens (in ton/jaar).

3.2.3 Huishoudelijk organisch afvalstelsel: conclusies en overzicht

Het is niet mogelijk om een balans te maken voor de micronutriënten in het huishoudelijk organisch afval systeem. Vooral nog wordt alleen de uit GFTe en groenafval gevormde compost regelmatig geanalyseerd op micronutriënten. Slechts een klein deel van het bron gescheiden organisch afval eindigt na bewerking in de civiele sector, onbekende sectoren of wordt verbrand. De compost en andere producten (bijvoorbeeld potgrond en bodemverrijkers) komen uiteindelijk weer terecht in de voedselketen of in groenvoorzieningen. De micronutriënten blijven in dat geval dus in de keten.

Een deel van het organisch huishoudelijk organisch afval eindigt in rest afval en wordt verbrand. Door een gebrek aan analyse gegevens kan slechts beperkt inzicht worden verkregen in de concentraties en vrachten micronutriënten die hiermee (al dan niet) verloren gaan. Voor zover bekend worden de assen uit de verbranding momenteel vooral gebruikt in de bouw (Kupfernagel et al., 2017). Recentelijk zijn er studies geweest naar de mogelijke terugwinning van Fe, Zn, Pb and Cu uit bodem- en vliegassen van restafvalverbranding (bijvoorbeeld (Kupfernagel et al., 2017; Pienkoß et al., 2022)). De beste terugwinning van micronutriënten zal waarschijnlijk kunnen plaatsvinden uit bron gescheiden materialen.

4 Micronutriënten – stofstromen in systeem

4.1 Algemeen

In dit hoofdstuk worden de vrachten van de geselecteerde micronutriënten in het agrofood system gerapporteerd. De vrachten zijn voor elk micronutriënt weergegeven in de verschillende Sankey diagrammen waarbij de dikte van de pijl proportioneel is aan de orde van grootte van de vracht. Voor sommige stromen zijn data voor gehalten micronutriënten niet beschikbaar. De vrachten aan micronutriënten zijn ook weergegeven in Tabel 4-1 (in- en effluent RWZI, slib en slib as), Tabel 4-2 (riool overstorten) en Tabel 4-3 (compost en andere producten uit huishoudelijk organisch afval). Voor het aandeel van micronutriënten in restafval zijn op moment van schrijven van deze rapportage alleen enkele gegevens voor koper, molybdeen en zink bekend. De daarbij behorende vrachten richting civiele sector zijn zo groot (Tabel 4-5) dat deze ten opzichte van de andere elementen in de studie een vertekend beeld geven. Daarom zijn de MFAs voor deze elementen weergegeven met en zonder aandeel van de bodemas die vanuit restafvalverbranding voor huishoudelijk restafval richting de civiele sector gaat. De hoeveelheden micronutriënten in het organisch deel van het huishoudelijk restafval zijn weergegeven in Tabel 4-4.

Tabel 4-1 Vrachten micronutriënten (kg/jaar) in RWZI stromen.

		Influent RWZI ^a	Effluent RWZI ^a	Cement industrie	Stort	Slib naar ^b Energiecentrale	Verbranding	Anders	Verbranding As
Micro-nutriënten	B	303.258	412.856	368	40	831	6.760	327	4.498
	Cu	170.480	9.346	3.975	432	8.983	73.112	3.539	97.296
	Fe	4.579.012	657.235	159.706	17.362	360.904	2.937.231	142.168	7.769.113
	Mg	17.617.313	14.125.418	113.432	12.331	256.334	2.086.183	100.976	1.101.376
	Mn	282.154	219.551	2.641	287	5.968	48.574	2.351	127.862
	Mo	8.181	3.208	57	6	129	1.052	51	3.947
	Zn	680.645	88.530	13.655	1.484	30.857	251.133	12.155	257.652
Zware metalen	Cd	342	60	18	2	40	325	16	294
	Pb	13.976	2.556	1.333	145	3.012	24.512	1.186	28.950
	Hg	181	22	8	1	18	150	7	9

^a zie Tabel 3-1 voor details gegevens.

^b Slib data op berekend op basis van vrachten en concentraties zoals weergegeven in sectie 3.1 en Tabel 3-1.

^c zie Tabel 3-3 voor details gegevens.

¹ - = geen gegevens beschikbaar.

² WD = Watson Database.

Tabel 4-2 Vrachten zware metalen in riool(overstorten).

		Influent riool Anders - hard oppervlak	Verkeer	Atmosferische depositie	Bedrijven (anders)	Industrie	Afvalwater huishoudens	Totaal	Bron ²	Riool overstort	Jaar
Micronutriënten	B	- ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cu	13.400	5.890	3.840	19.200	4.900	114.000	161.230	CLO	4.768	2019
	Fe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mo	-	-	-	-	-	10.334	10.334	WD	-	2018
	Zn	70.400	29.000	14.900	2.430	10.700	157.000	284.430	CLO	72.870	2019
Zware metalen	Cd	0	4	79	9	11	870	973	CLO	-	2019
	Pb	24.400	272	1.540	123	206	13.800	40.341	CLO	11.317	2019
	Hg	-	-	-	-	-	311	311	WD	-	2018

¹ - = geen gegevens beschikbaar.

² WD = Watson Database.

Tabel 4-3 Vrachten in compostproducten geproduceerd uit vast organisch afval (referentiejaar 2019).

	Element in compost van GFT kg/jaar									
	Micronutriënt					Zware metalen				
	B	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Zn	Cd	Pb	Hg
Land en (glas)tuinbouw	8.214	12.856	2.601.974	1.227.420	106.422	714	60.353	132	15.713	25
Potgrond en aanvulgronden	1.704	2.668	539.939	254.704	22.084	148	12.524	27	3.261	5
Hoveniers, particulieren, tuincentra	572	895	181.052	85.407	7.405	50	4.200	9	1.093	2
Civiele sector	53	82	16.692	7.874	683	5	387	1	101	0
Export/Veeteelt/Anders	285	447	90.419	42.653	3.698	25	2.097	5	546	1
Gemeenten (groenvoorziening)	128	200	40.528	19.118	1.658	11	940	2	245	0
Samengestelde grondproducten										
Tuincompost	234	367	74.243	35.022	3.037	20	1.722	4	448	1
	Element in compost van groen afval in kg/jaar									
	Micronutriënt					Zware metalen				
	B	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Zn	Cd	Pb	Hg
Land en (glas)tuinbouw	7.030	6.418	2.226.871	589.879	91.080	611	31.175	110	8.863	21
Potgrond en aanvulgronden	2.231	2.037	706.759	187.215	28.907	194	9.894	35	2.813	7
Hoveniers, particulieren, tuincentra	1.531	1.398	485.021	128.478	19.838	133	6.790	24	1.930	5
Civiele sector	245	224	77.611	20.558	3.174	21	1.087	4	309	1
Export/Veeteelt/Anders	477	436	151.251	40.065	6.186	42	2.117	7	602	1
Gemeenten (groenvoorziening)	1.170	1.068	370.529	98.150	15.155	102	5.187	18	1.475	4
Samengestelde grondproducten	1.422	1.298	450.485	119.330	18.425	124	6.307	22	1.793	4
Tuincompost										
Totaal in compost	25.296	30.394	8.013.373	2.855.873	327.750	2.200	144.780	401	39.193	77

¹ -= geen gegevens beschikbaar.

Tabel 4-4 Berekende vrachten van micronutriënten in de organische fractie van huishoudelijk restafval in Nederland (voor berekeningswijze zie Tabel 3-10).

Element	Vracht kg/jaar
B	5.535
Cu	8.663
Fe	1.753.371
Mg	827.112
Mn	71.713
Mo	481
Zn	40.670
Cd	89
Pb	10.589
Hg	17

Tabel 4-5 Concentraties ([C] in mg/kg as) en vrachten (V ton/jaar) (Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat, 2021) op jaarbasis van Cu, Mo, Zn en K in bodem en vlieg-as van restafval verbrandingsinstallaties (op basis van asgehalten volgend (Kupfernagel et al., 2017)).

Stroom	Totale vracht (kton)	Cu		Mo		Zn		K		Co		Se	
		[C]	V	[C]	V	[C]	V	[C]	V	[C]	V	[C]	V
Bodem-as → civiel	1.517	2.851	4.325	26	39	3.802	5.768	7.765	11.780	40	61	5	8
Bodem-as → stort	40	2.851	114	26	1	3.802	152	7.765	311	40	2	5	0
Vlieg-as → stort	55	1.426	78	775	43	25.754	1.416	34.021	1.871	26	1	17	1
Vlieg-as → cement	47	1.426	67	775	36	25.754	1.210	34.021	1.599	26	1	17	1

4.2 Boor

In Figuur 4-1 zijn de verschillende boor (B) stromen in afval/reststromen afkomstig van huishoudens weergegeven. Er zijn geen data beschikbaar voor de B gehalten van verbrandingsassen van restafval. Vanuit het huishoudelijk organisch vast afval komt een vracht van in totaal 25.296 kg B (Tabel 4-3) terecht in compost en gaat 5.535 kg B in de organische fractie van restafval (Tabel 4-4).

De grootste (bekende) vrachten boor in het afvalwatersysteem gaan via het influent dat de RWZI binnenkomt (303.258 kg) en effluent (412.856 kg). In veel mindere mate wordt B teruggevonden in het ontwaterde slib (6.760 kg) dat richting verbranding gaat (Tabel 4-1). Echter, er zijn slechts een gering aantal metingen voor B beschikbaar, en met de beschikbare metingen lijkt er meer B via effluent te worden geloosd dan via influent aangevoerd, dus uiteindelijke vrachten zijn slechts een indicatie van lot van B in de RWZI.

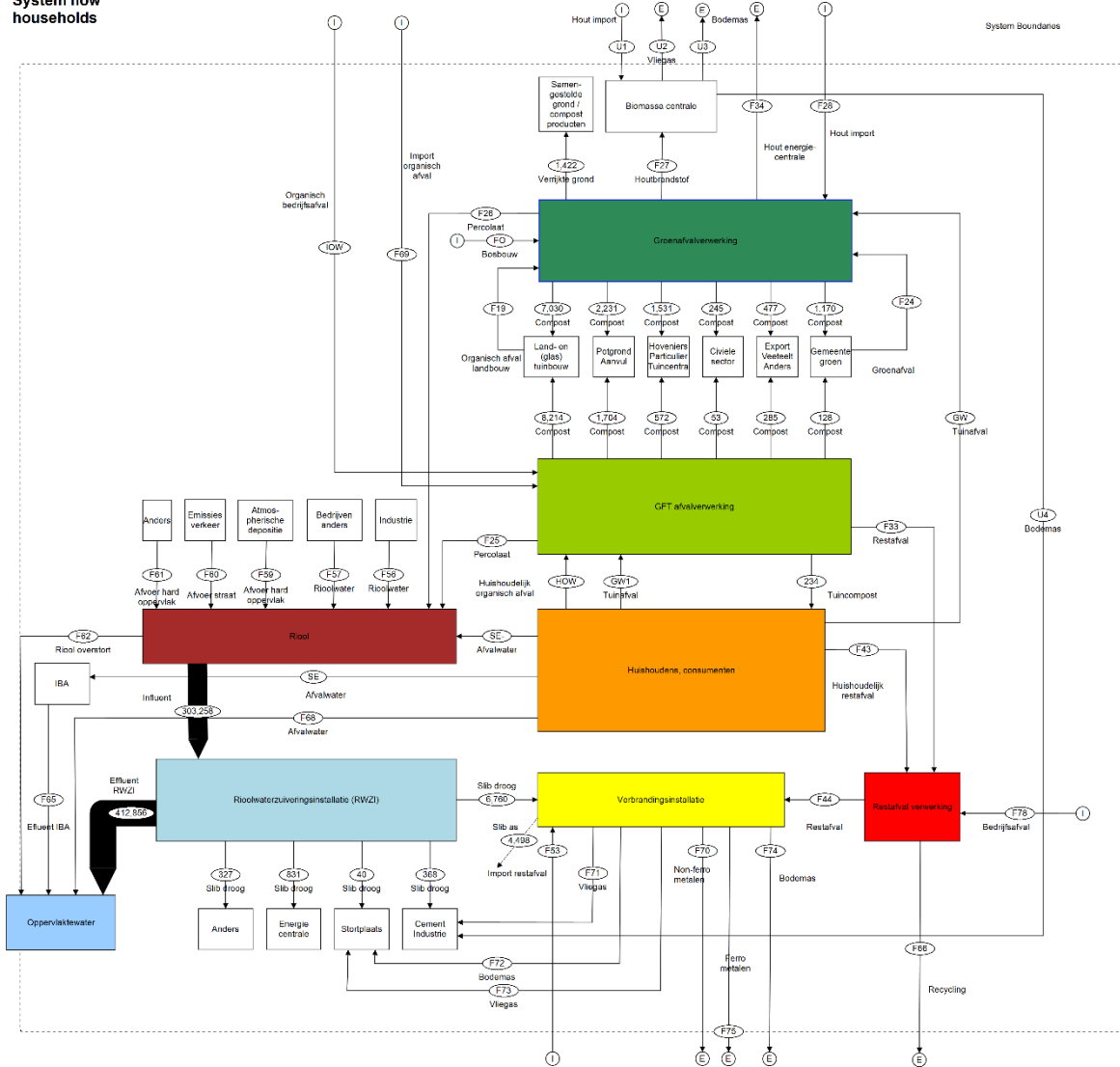
Samenvattend voor boor:

- Verreweg grootste deel van boor verlaat systeem via effluent RWZI

Qua meetgegevens voor boor:

- Zeer gering aantal metingen
- Balansen over RWZI niet kloppend, voornaamste gat in balans zit tussen in- en uitgaande stromen RWZI
- In- en uitgaande stromen huishoudens: onvoldoende data
- Organisch en groenafval inclusief biomassa-krachtcentrales: onvoldoende data; alleen data voor compost
- Restafval gegevens missen

System flow households



Figuur 4-1 Vrachten boor (kg/jaar) exclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Er zijn geen data beschikbaar voor de B gehalten van verbrandingsassen van restafval. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen boor in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vliegassstromen.

4.3 Koper

In Figuur 4-2 (inclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector) en Figuur 4-3 (exclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector) zijn de verschillende koper (Cu) stromen in afval/reststromen afkomstig van huishoudens weergegeven. Vanuit het huishoudelijk organisch vast afval komt een vracht van in totaal 30.394 kg Cu (Tabel 4-3) terecht in compost en gaat 8.863 kg Cu in de organische fractie van restafval (Tabel 4-4).

De grootste (bekende) vrachten koper in het afvalwatersysteem gaan via het influent dat de RWZI binnenkomt (170480 kg) (Tabel 4-1). Dit is hoger dan de (geïdentificeerde) hoeveelheid die vanuit de huishoudens en andere bronnen het riool instroomt (161.230 kg) (Tabel 4-2). De RWZI lost vervolgens 9.346 kg via het effluent en 73.112 kg is aanwezig in het ontwaterde slib dat richting verbranding gaat (Tabel 4-1), wat ook een "verlies op de balans" is. In de as van slibverbranding komt 97.296 kg Cu terecht. Er zijn beperkte data van de riooloverstort waarin 4.768 kg het systeem verlaat (Tabel 4-2).

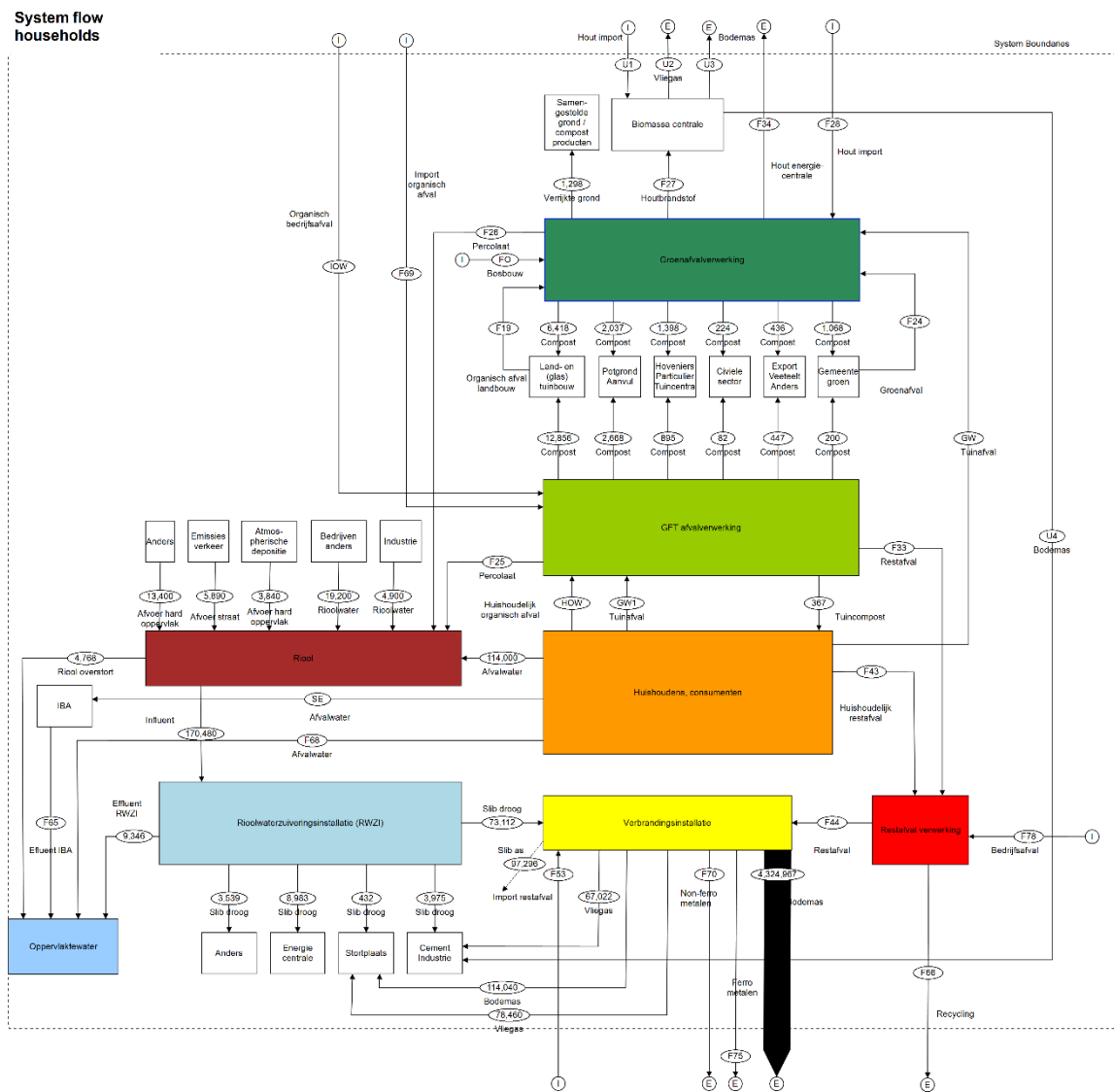
De grootste vracht koper is te vinden in de as van de restafvalverbranding (> 5 miljoen kg).

Samenvattend voor koper:

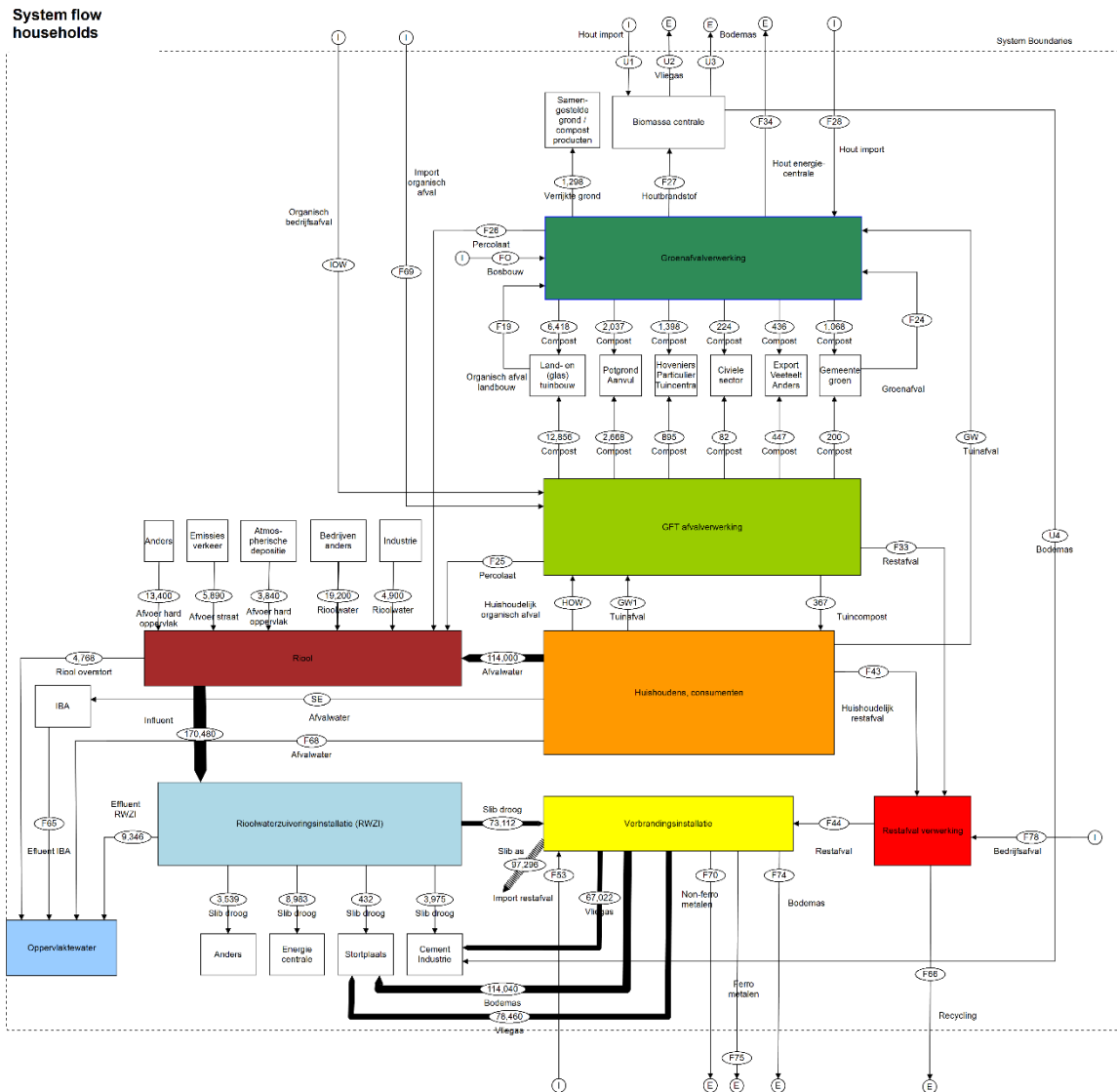
- Grootste vracht in bodemas uit restverbranding
- In het afvalwatersysteem is slib de voornaamste sink voor koper

Qua meetgegevens voor koper:

- Balansen over huishouden richting riool en RWZIs zijn niet kloppend (elke stap 20-40% verlies)
- In- en uitgaande stromen huishoudens: onvoldoende data
- Organisch en groenafval inclusief biomassa-krachtcentrales: onvoldoende data; alleen data voor compost



Figuur 4-2 Vrachten koper (kg/jaar) inclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen koper in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vliegas stromen.



Figuur 4-3 Vrachten koper (kg/jaar) exclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Het schema inclusief de Zn vrachten in de restafvalverbranding is weergegeven in Figuur 4-2. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen koper in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vliegas stromen.

4.4 IJzer

In Figuur 4-4 zijn de verschillende ijzer (Fe) stromen in afval/reststromen afkomstig van huishoudens weergegeven. Er zijn geen data beschikbaar voor de Fe gehalten van verbrandingsassen van restafval. Vanuit het huishoudelijk organisch vast afval komt een vracht van in totaal 8.013.373 kg Fe (Tabel 4-3) terecht in compost en gaat 1.753.371 kg Fe in de organische fractie van restafval (Tabel 4-4).

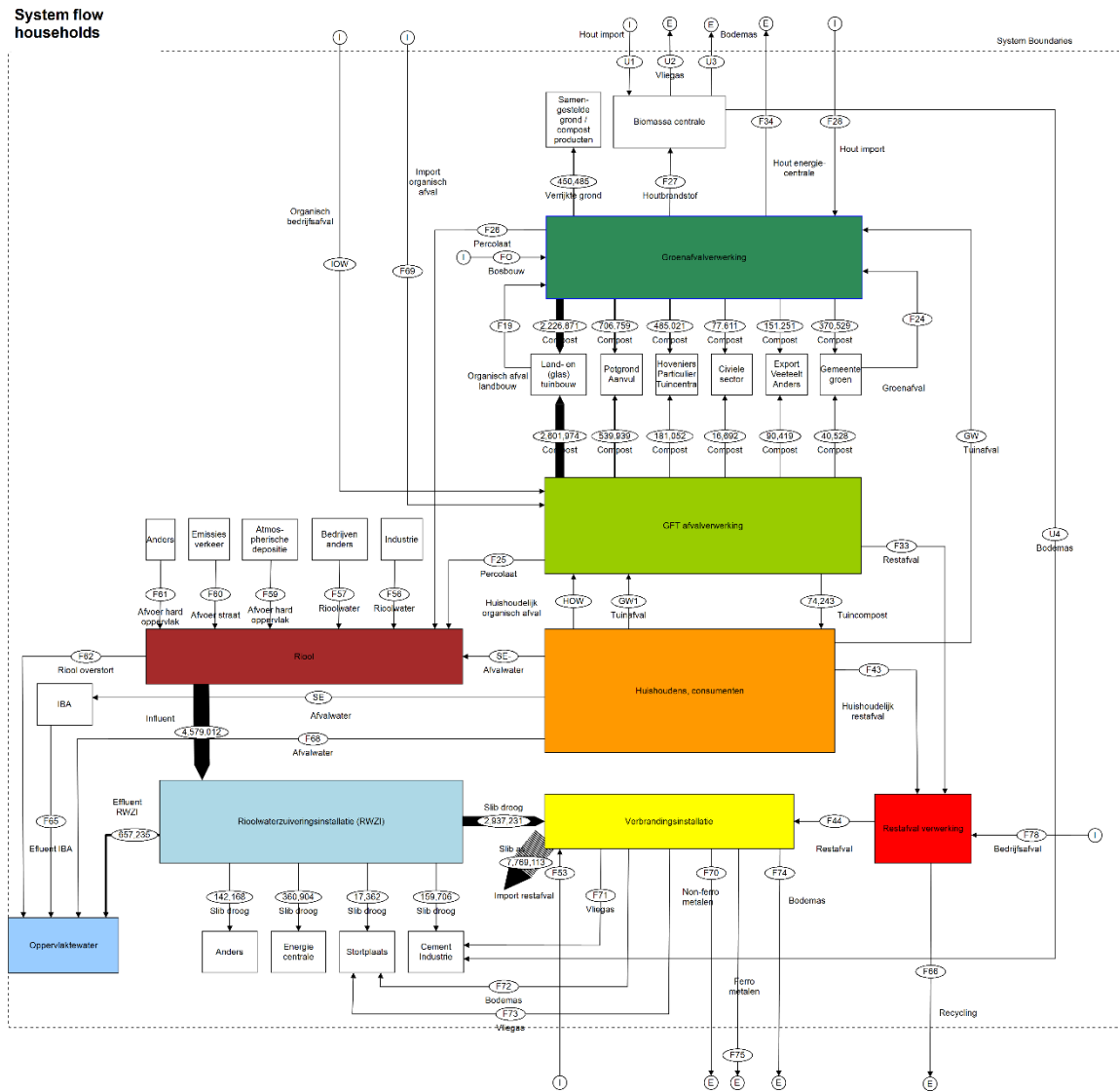
De grootste (bekende) vrachten ijzer in het afvalwatersysteem gaan via het influent dat de RWZI binnenkomt (4.579.012 kg) en effluent (657.234 kg). Het grootste gedeelte van de Fe wordt teruggevonden in het ontwaterde slib (2.937.231 kg) dat richting verbranding gaat (Tabel 4-1). Echter de hoeveelheid Fe die via as uit de slibverbranding komt is echter veel hoger (7.769.113 kg), en er is over de verbranding dus geen goede balans te maken. Er zijn geen data van de riooloverstort (Tabel 4-2).

Samenvattend voor ijzer:

- Grootste vracht in ontwaterd slib in RWZI
- Veel ijzer in compost van huishoudelijk GFT

Qua meetgegevens voor ijzer:

- Balansen RWZI is compleet, voornaamste disbalans zit in- en uitgaande stromen slibverbranding
- In- en uitgaande stromen huishoudens: onvoldoende data
- Restafval data missen
- Organisch en groenafval inclusief biomassa-krachtcentrales: onvoldoende data; alleen data voor compost



Figuur 4-4 Vrachten ijzer (kg/jaar) exclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Er zijn geen data beschikbaar voor de Fe gehaltes van verbrandingsassen van restafval. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen ijzer in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vliegias stromen.

4.5 Magnesium

In Figuur 4-5 zijn de verschillende magnesium (Mg) stromen in afval/reststromen afkomstig van huishoudens weergegeven. *Er zijn geen data beschikbaar voor de Mg gehalten van verbrandingsassen van restafval.* Vanuit het huishoudelijk organisch vast afval komt een vracht van in totaal 2.855.873 kg Mg (Tabel 4-3) terecht in compost en gaat 827.112 kg Mg in de organische fractie van restafval (Tabel 4-4).

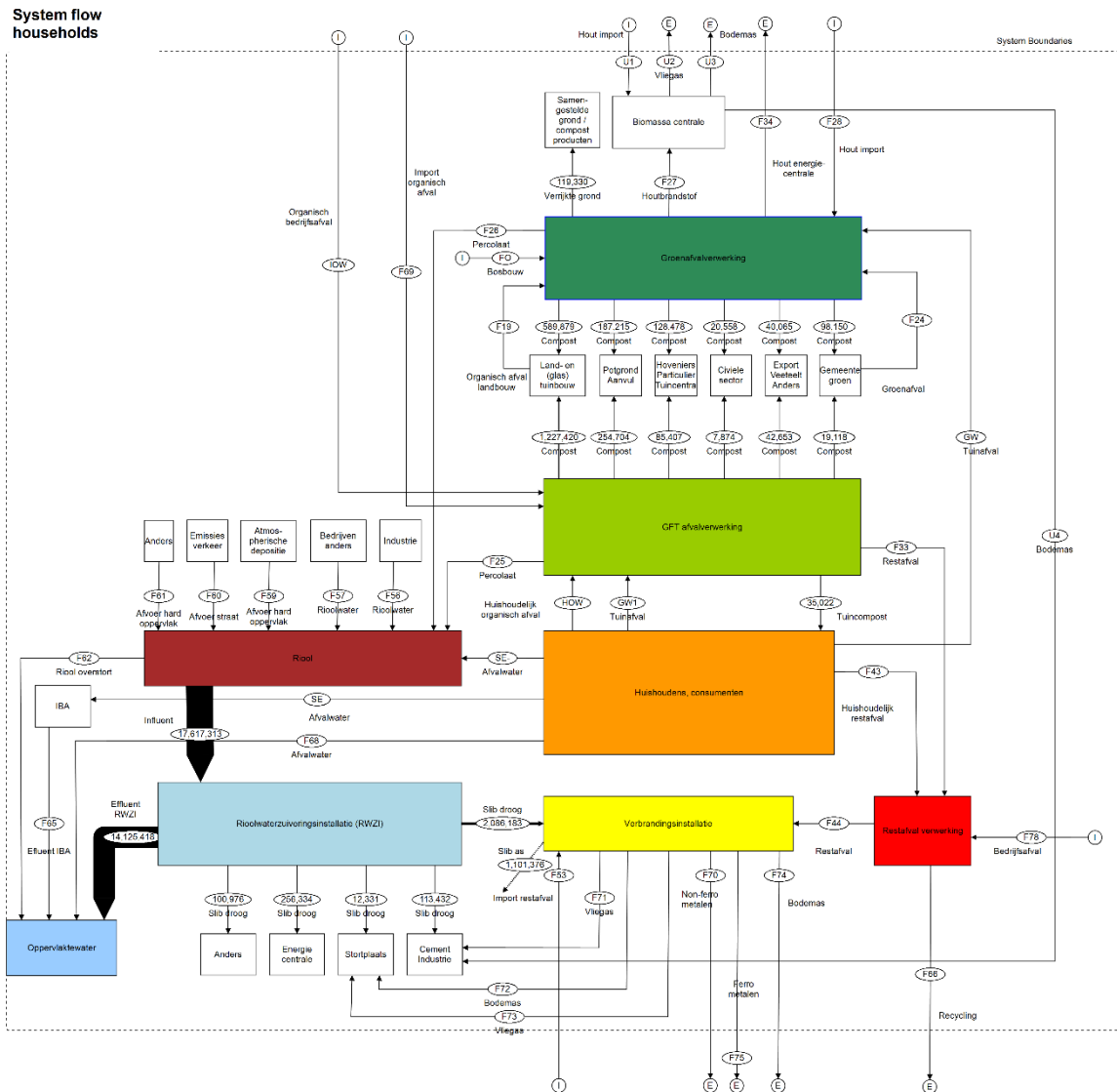
De grootste (bekende) vrachten magnesium in het afvalwatersysteem gaan via het influent dat de RWZI binnenkomt (17.617.313 kg) en effluent (14.125.418 kg). Een deel van de Mg wordt teruggevonden in het ontwaterde slib (2.086.183 kg) dat richting verbranding gaat (Tabel 4-1) In de as van slibverbranding komt slechts 1.101.376 kg Mg terecht. Er zijn geen data van de riooloverstort (Tabel 4-2).

Samenvattend voor magnesium:

- Grote vrachten in effluent van RWZI en in compost

Qua meetgegevens voor magnesium:

- Balans over RWZI is compleet, voornaamste gat in balans zit tussen in- en uitgaande stromen slibverbranding
- In- en uitgaande stromen huishoudens: onvoldoende data
- Restafval data missen
- Organisch en groenafval inclusief biomassa-krachtcentrales: onvoldoende data; alleen data voor compost



Figuur 4-5 Vrachten magnesium (kg/jaar) exclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Er zijn geen data beschikbaar voor de Mg gehalten van verbrandingsassen van restafval. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen magnesium in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vlieggas stromen.

4.6 Mangaan

In Figuur 4-6 zijn de verschillende mangaan (Mn) stromen in afval/reststromen afkomstig van huishoudens weergegeven. Er zijn geen data beschikbaar voor de Mn gehalten van verbrandingsassen van restafval. Vanuit het huishoudelijk organisch vast afval komt een vracht van in totaal 327.750 kg Mn (Tabel 4-3) terecht in compost en gaat 71.713 kg Mn in de organische fractie van restafval (Tabel 4-4).

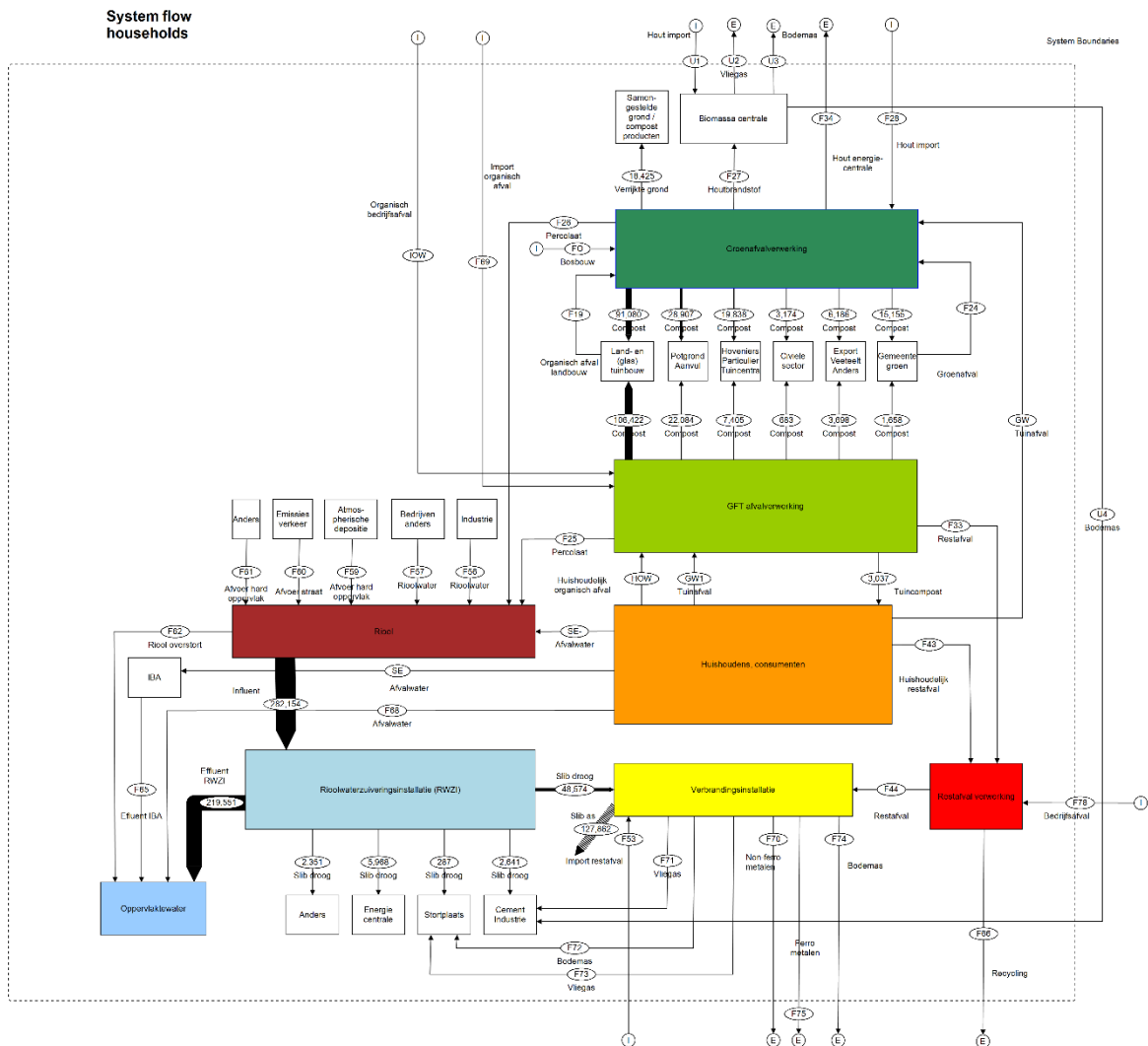
De grootste (bekende) vrachten mangaan in het afvalwatersysteem gaan via het influent dat de RWZI binnenkomt (282.154 kg) en effluent (219.551 kg). Een deel van de Mn wordt teruggevonden in het ontwaterde slib (48.574 kg) dat richting verbranding gaat (Tabel 4-1) In de as van slibverbranding komt slechts 127.862 kg Mn terecht. Er is een disbalans in de gegevens vanuit de verbrandingsovens aangezien er maar een beperkt aantal gegevens is. Er zijn geen data van de riooloverstort (Tabel 4-2).

Samenvattend voor mangaan:

- Grootste bekende vracht lozing effluent RWZI naar oppervlaktewater
- GFT Compost richting landbouw en potgrond belangrijk product/bron, evenals organische fractie restafval

Qua meetgegevens voor mangaan:

- Balans over RWZIs is kloppend (100%)
- In- en uitgaande stromen huishoudens: onvoldoende data
- Organisch en groenafval inclusief biomassa-krachtcentrales: onvoldoende data; alleen data voor compost
- Restafval, anders dan gft fractie in restafval, zowel voor als na verbranding: onvoldoende data. Er zouden grote hoeveelheden mangaan aanwezig kunnen zijn in de vlieg- en bodemas van verbrandingsinstallaties



Figuur 4-6 Vrachten mangaan (kg/jaar) exclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Er zijn geen data beschikbaar voor de Mn gehaltes van verbrandingsassen van restafval. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen mangaan in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vliegass stromen.

4.7 Molybdeen

In Figuur 4-7 (inclusief as uit restafvalverbranding) en Figuur 4-8 (exclusief as uit restafvalverbranding) zijn de verschillende molybdeen (Mo) stromen in afval/reststromen afkomstig van huishoudens weergegeven. Vanuit het huishoudelijk organisch vast afval komt een vracht van in totaal 2.200 kg Mo (Tabel 4-3) terecht in compost en gaat 481 kg Mo in de organische fractie van restafval (Tabel 4-4).

De grootste (bekende) vrachten molybdeen in het systeem gaan via het afvalwater waarbij de hoeveelheid die via het influent de RWZI binnenkomt (8.181 kg) (Tabel 4-1) kleiner is dan de hoeveelheid die vanuit de huishoudens en andere bronnen het riool instroomt (10.334 kg) (Tabel 4-2).

De RWZI lost vervolgens 3.208 kg via het effluent en 1.052 kg is aanwezig in het ontwaterde slib (Tabel 4-1) dat richting verbranding gaat ("verlies" op de balans). Er zit meer (3.947 kg) Mo in de as van de slibverbranding.

De grootste vracht molybdeen is echter te vinden in de bodem- en vliegashouding van de restafvalverbranding (> 100.000 kg).

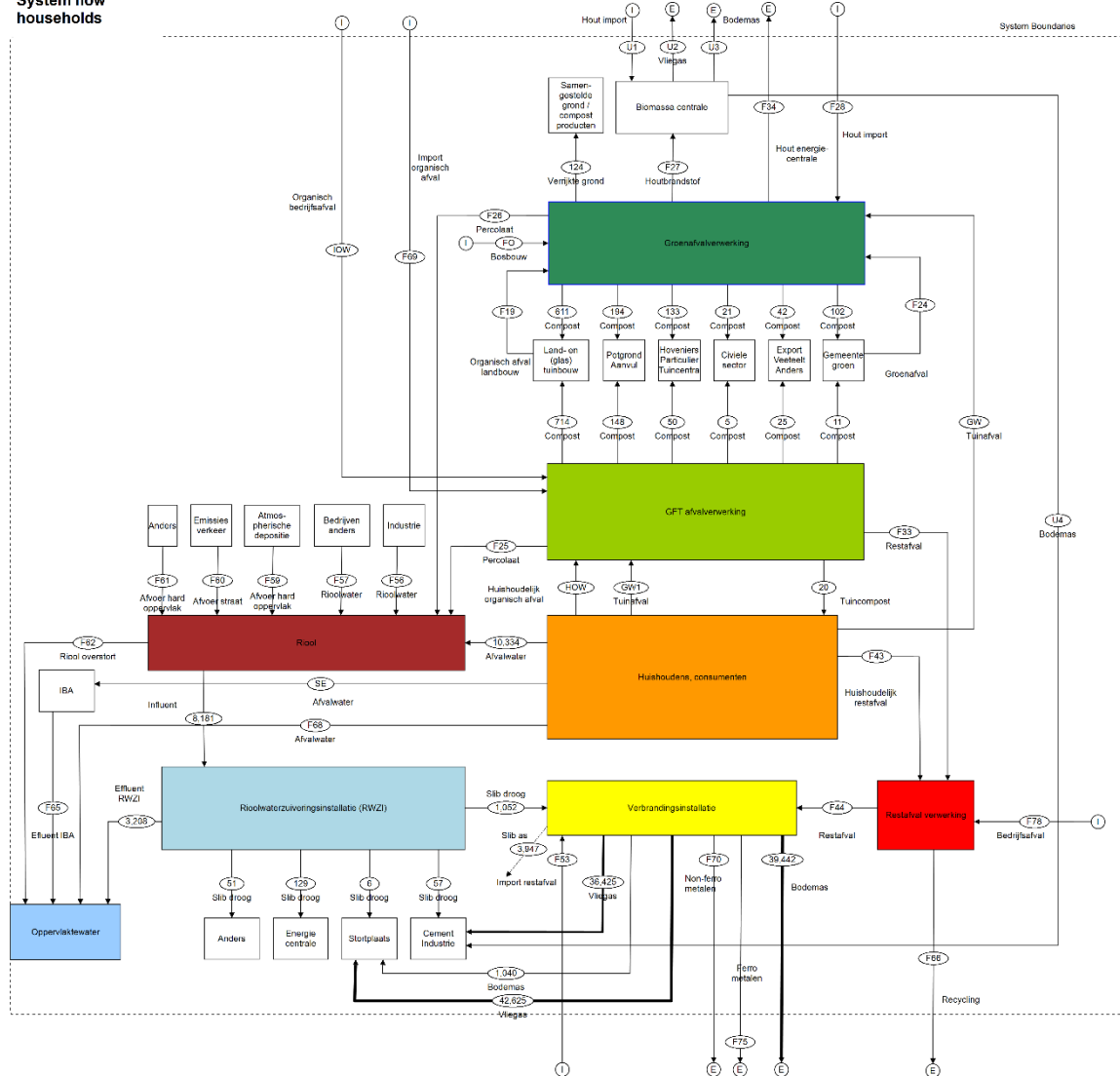
Samenvattend voor molybdeen:

- Grootste vracht in ketel- en vliegashouding uit restafvalverbranding
- In het afvalwatersysteem is effluent RWZI waarschijnlijk de voornaamste sink

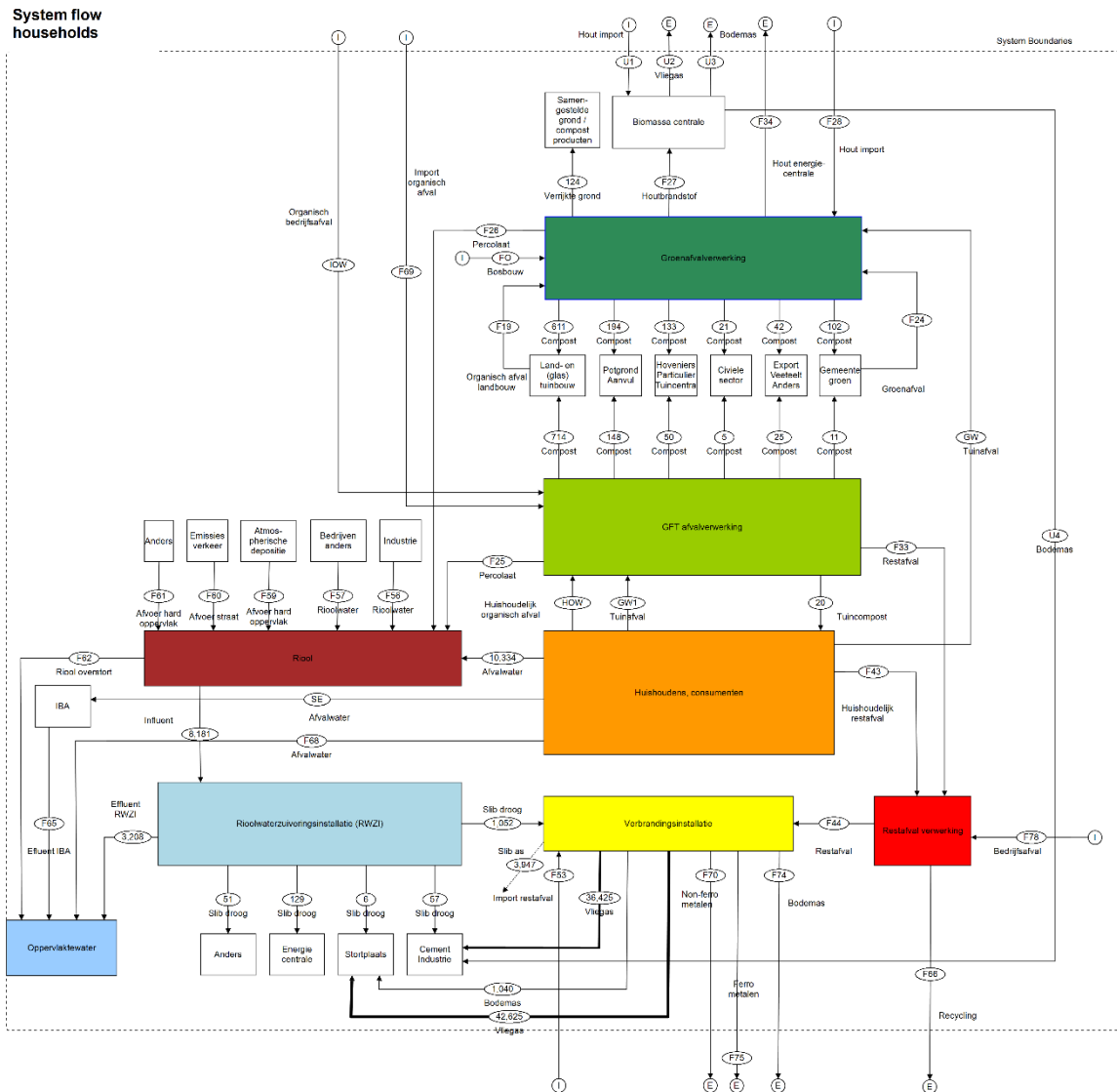
Qua meetgegevens voor molybdeen:

- Balansen over huishouden richting riool en RWZIs zijn niet kloppend, voornaamste gat in balans zit tussen in- en uitgaande stromen RWZI
- In- en uitgaande stromen huishoudens: onvoldoende data
- Organisch en groenafval inclusief biomassa-krachtcentrales: onvoldoende data; alleen data voor compost

System flow households



Figuur 4-7 Vrachten molybdeen (kg/jaar) inclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen molybdeen in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vliegias stromen.



Figuur 4-8 Vrachten molybdeen (kg/jaar) exclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Het schema inclusief de Mo vrachten in de restafvalverbranding is weergegeven in Figuur 4-7. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen molybdeen in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vliegas stromen.

4.8 Zink

In Figuur 4-9 (inclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector) en Figuur 4-10 (exclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector) zijn de verschillende zink (Zn) stromen in afval/reststromen afkomstig van huishoudens weergegeven. Vanuit het huishoudelijk organisch vast afval komt een vracht van in totaal 144.780 kg Zn (Tabel 4-3) terecht in compost en gaat 40.670 kg Zn in de organische fractie van restafval (Tabel 4-4).

De grootste (bekende) vrachten zink in het systeem gaan via het afvalwater waarbij de hoeveelheid die via het influent de RWZI binnenkomt (680.645 kg) (Tabel 4-1) veel groter is dan de hoeveelheid die vanuit de huishoudens en andere bronnen het riool instroomt (284.430 kg) (Tabel 4-2). Blijkbaar mist in deze studie een belangrijke Zn bron richting riool. De RWZI lost vervolgens 88.530 kg via het effluent en 251.133 kg is aanwezig in het ontwaterde slib (Tabel 4-1) dat richting verbranding gaat ("verlies" op de balans). In de as

van slibverbranding zit 257.652 kg Zn. Er zijn ook beperkte data van de riooloverstort waarin 72.870 kg het systeem verlaat (Tabel 4-2).

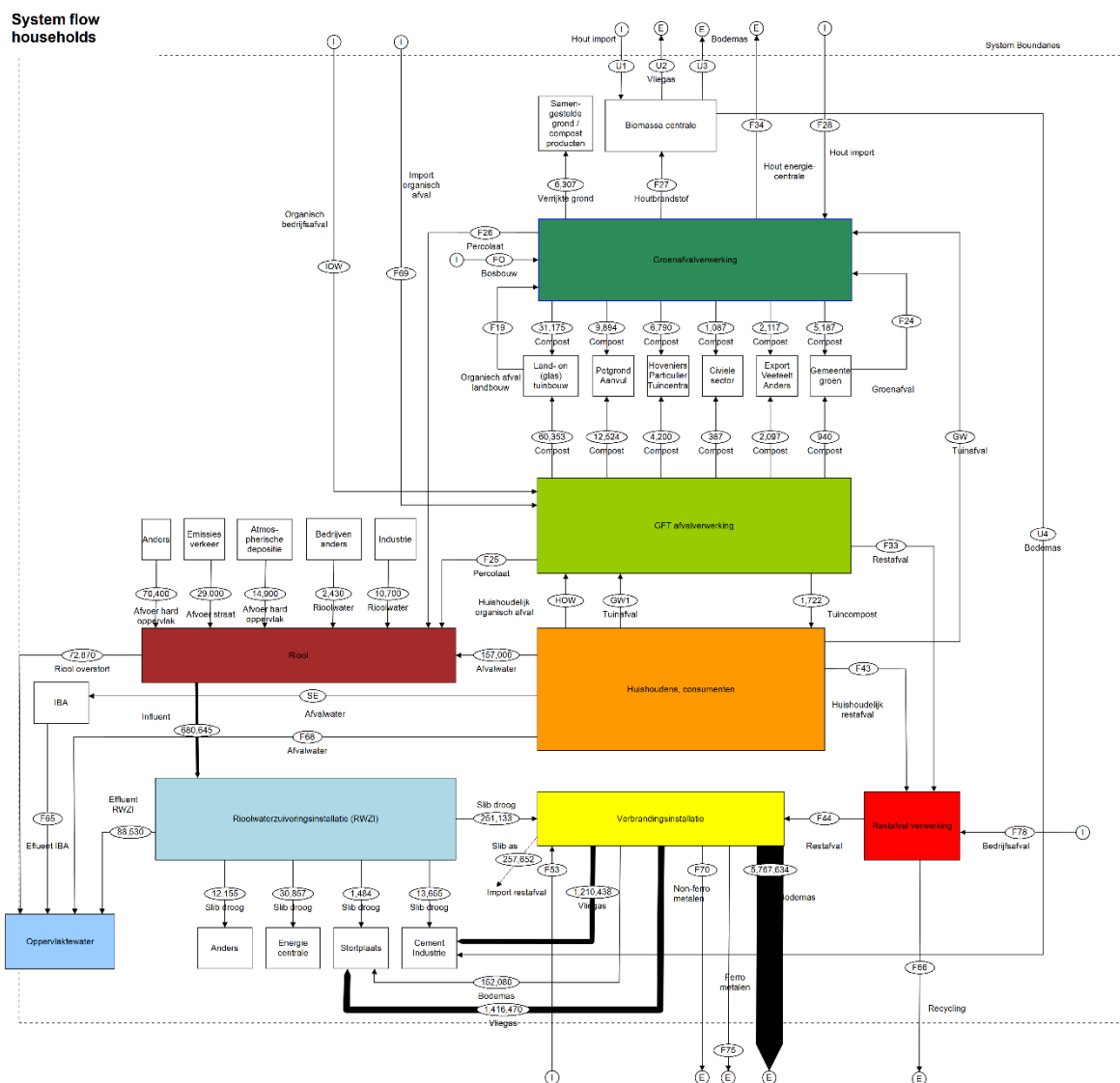
De grootste vracht koper is echter te vinden in de bodem- en vliegias van de restafvalverbranding (> 10 miljoen kg).

Samenvattend voor zink:

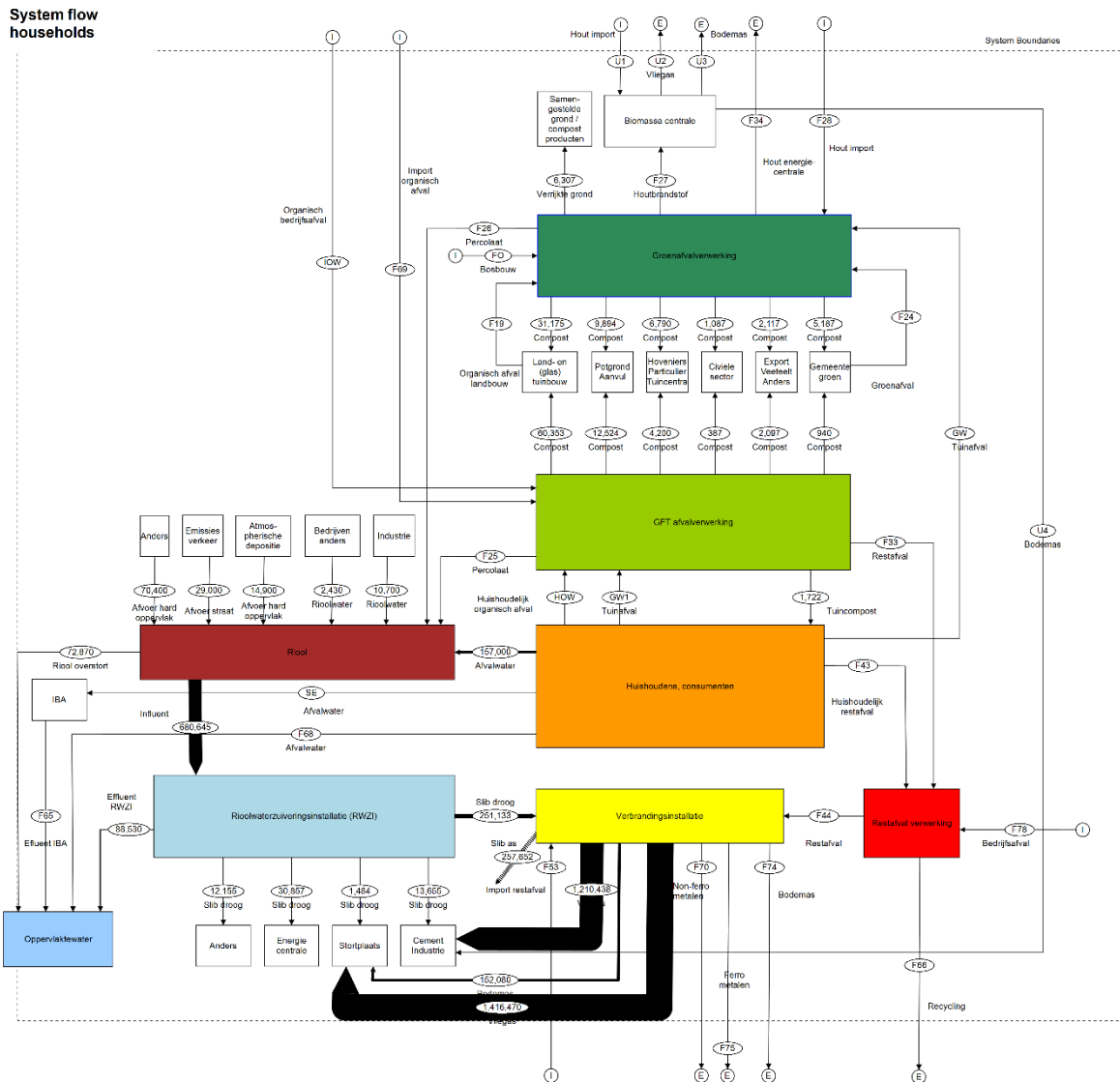
- Grootste vracht in ketel- en vliegias uit restverbranding
- In het afvalwatersysteem is slib de voornaamste sink voor zink

Qua meetgegevens voor zink:

- Balansen over huishouden richting riool en RWZIs zijn niet kloppend, er ontbreken bronnen richting riool
- In- en uitgaande stromen huishoudens: onvoldoende data
- Organisch en groenafval inclusief biomassa-krachtcentrales: onvoldoende data; alleen data voor compost



Figuur 4-9 Vrachten zink (kg/jaar) inclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen zink in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vliegias stromen.



Figuur 4-10 Vrachten zink (kg/jaar) exclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Het schema inclusief de Zn vrachten in de restafvalverbranding is weergegeven in Figuur 4-9. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen zink in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vliegias stromen.

4.9 Cadmium

In Figuur 4-11 zijn de verschillende cadmium (Cd) stromen in afval/reststromen afkomstig van huishoudens weergegeven. Er zijn geen data beschikbaar voor de Cd gehaltes van verbrandingsassen van restafval. Vanuit het huishoudelijk organisch vast afval komt een vracht van in totaal 401 kg Cd (Tabel 4-3) terecht in compost en gaat 89 kg Cd in de organische fractie van restafval (Tabel 4-4).

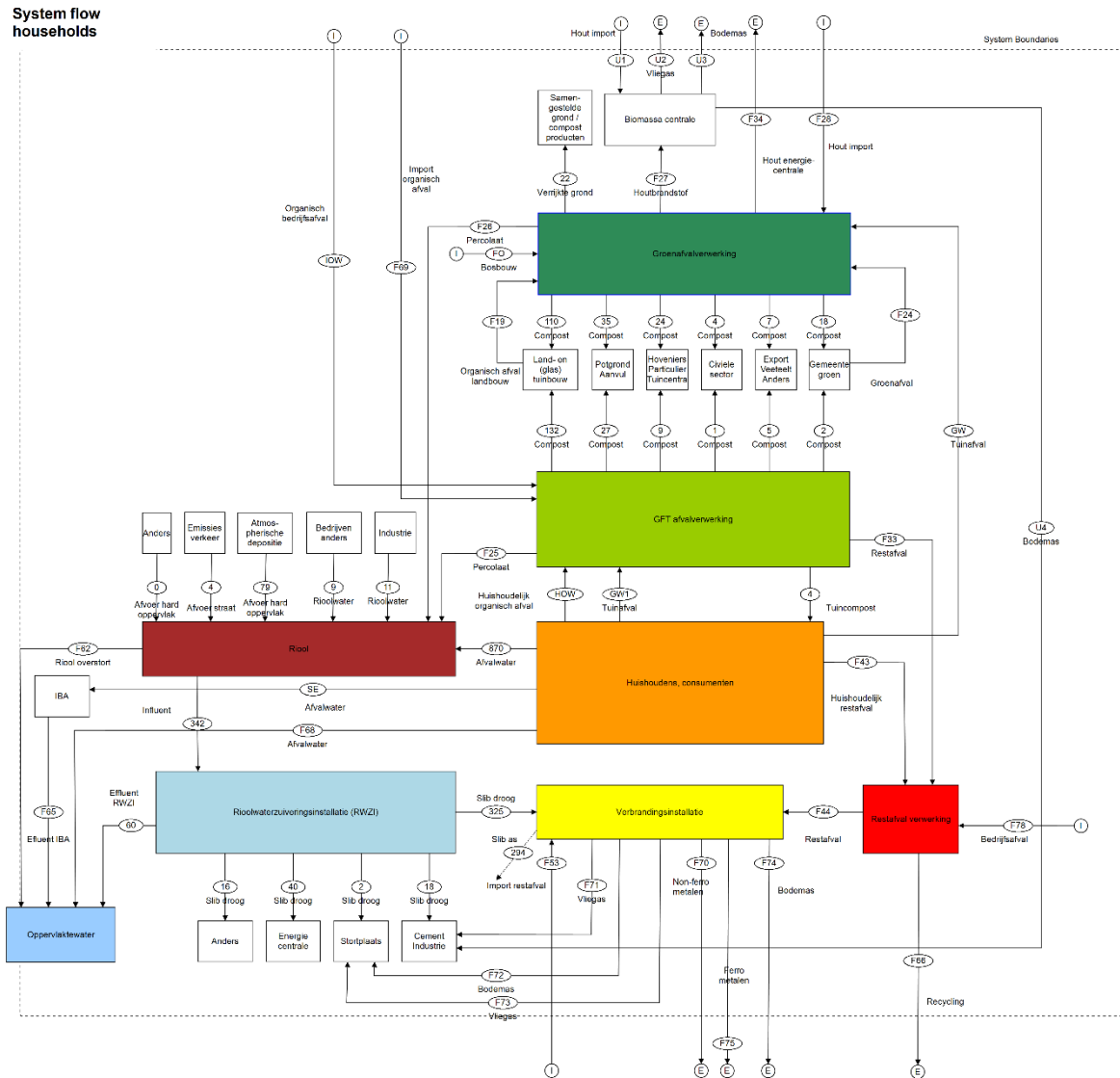
De (bekende) vrachten cadmium in het systeem gaan via het afvalwater waarbij de hoeveelheid die via riool (973 kg) (Tabel 4-2) en het influent de RWZI binnenkomt (342 kg) uiteindelijk geloosd wordt via effluent (60 kg) en het ontwaterde slib (325 kg) dat richting verbranding gaat en dan 294 kg Cd in de as opbrengt (Tabel 4-1).

Samenvattend voor cadmium:

- Grootste vracht in slib van RWZI

Qua meetgegevens voor cadmium:

- Disbalans over RWZI, voornaamste gat in balans zit tussen in- en uitgaande stromen en slibverbranding
- In- en uitgaande stromen huishoudens: onvoldoende data
- Restafval data missen
- Organisch en groenafval inclusief biomassa-krachtcentrales: onvoldoende data; alleen data voor compost



Figuur 4-11 Vrachten cadmium (kg/jaar) exclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Er zijn geen data beschikbaar voor de Cd gehalten van verbrandingsassen van restafval. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen cadmium in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vliegassstromen.

4.10 Lood

In Figuur 4-12 zijn de verschillende lood (Pb) stromen in afval/reststromen afkomstig van huishoudens weergegeven. *Er zijn geen data beschikbaar voor de Pb gehaltes van verbrandingsassen van restafval.* Vanuit het huishoudelijk organisch vast afval komt een vracht van in totaal 39.193 kg Pb (Tabel 4-3) terecht in compost en gaat 10.589 kg Pb in de organische fractie van restafval (Tabel 4-4).

Vergelijkbaar hoge (bekende) vrachten lood in het systeem gaan via het afvalwater waarbij de hoeveelheid die via riool (40.341 kg) (Tabel 4-2) en het influent de RWZI binnenkomt (13.976 kg) uiteindelijk geloosd wordt via effluent (2.556 kg) en het ontwaterde slib (24.512 kg) dat richting verbranding gaat en dan 28.950 kg Pb in de as opbrengt (ergo verlies op de balans) (Tabel 4-1). Er zijn ook beperkte data van de riooloverstort waarin 11.317 kg het systeem verlaat (Tabel 4-2).

Samenvattend voor lood:

- Grootste vracht in slib van RWZI

Qua meetgegevens voor mangaan:

- Disbalans over RWZI, voornaamste gat in balans zit in influent? en tussen in- en uitgaande stromen slibverbranding
- In- en uitgaande stromen huishoudens: onvoldoende data
- Restafval data missen
- Organisch en groenafval inclusief biomassa-krachtcentrales: onvoldoende data; alleen data voor compost

4.11 Kwik

In Figuur 4-13 zijn de verschillende kwik (Hg) stromen in afval/reststromen afkomstig van huishoudens weergegeven. *Er zijn geen data beschikbaar voor de Hg gehaltes van verbrandingsassen van restafval.* Vanuit het huishoudelijk organisch vast afval komt een vracht van in totaal 77 kg Hg (Tabel 4-3) terecht in compost en gaat 17 kg Hg in de organische fractie van restafval (Tabel 4-4).

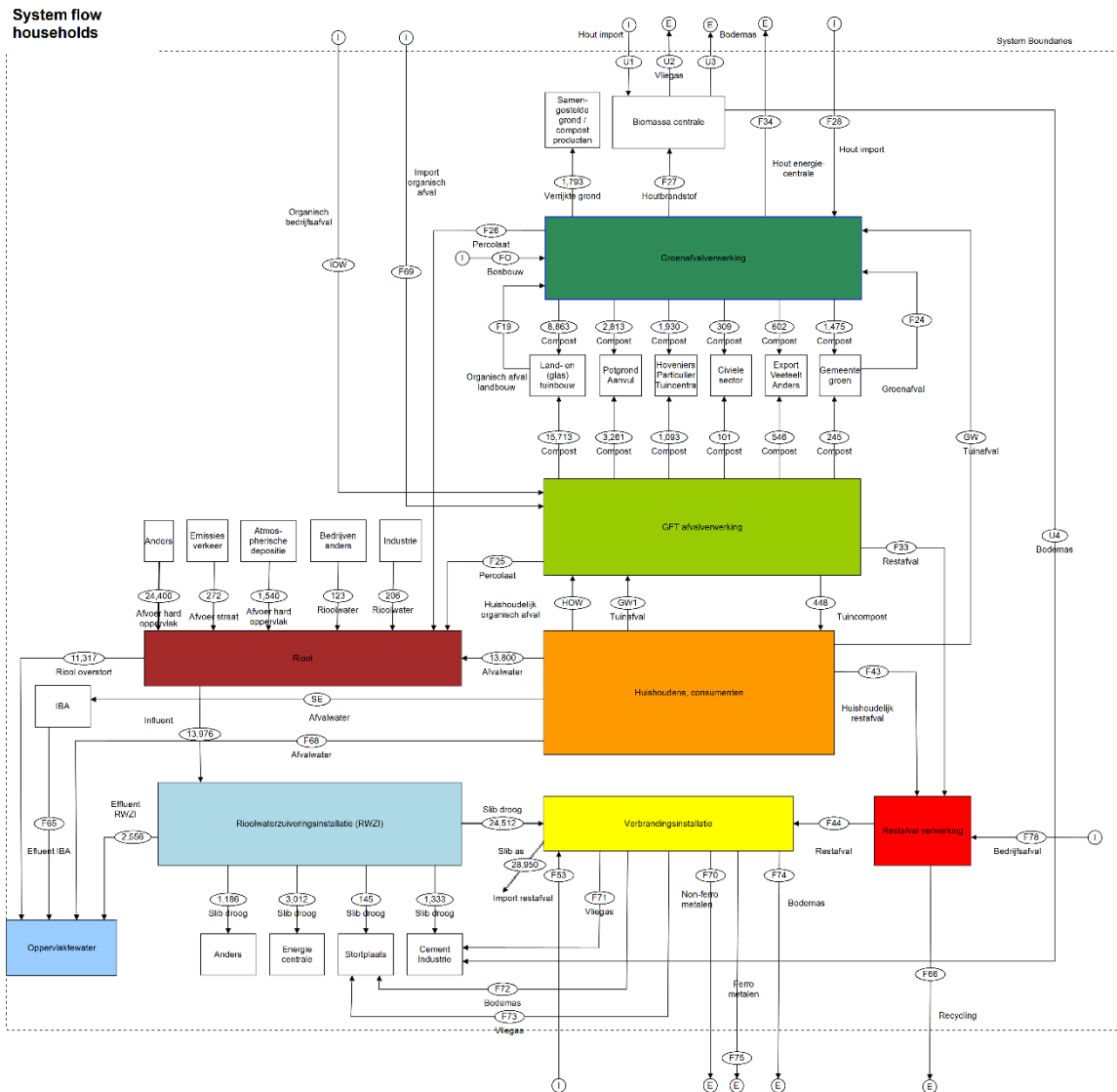
Vergelijkbaar lage (bekende) vrachten lood in het systeem gaan via de RWZI waar het influent van de RWZI (181 kg) uiteindelijk geloosd wordt via effluent (22 kg, 12% van influent) en het ontwaterde slib (150 kg) dat richting verbranding gaat en dan 9 kg Hg in de as opbrengt (Tabel 4-1).

Samenvattend voor kwik:

- Kleine vracht in slib van RWZI

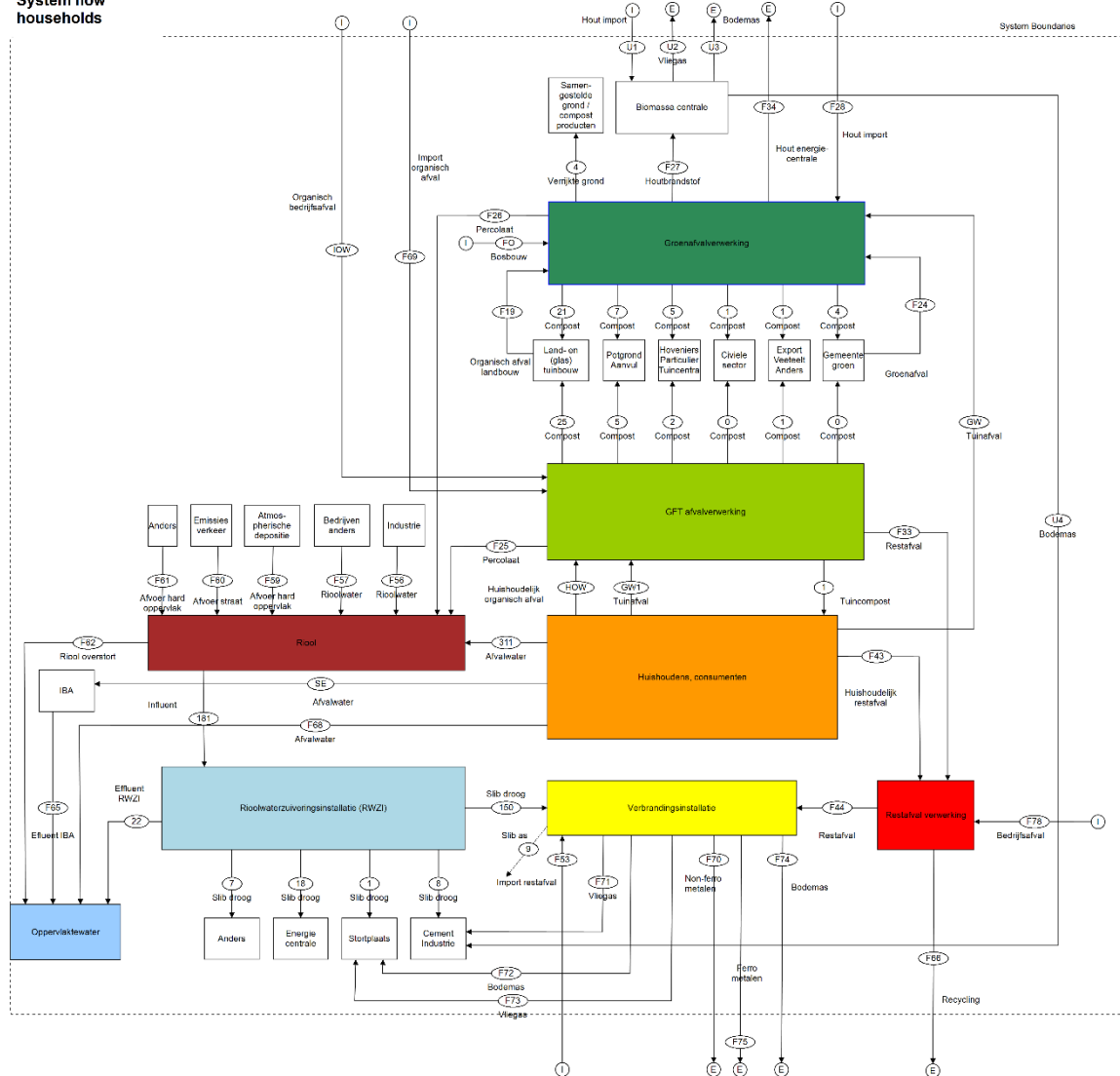
Qua meetgegevens voor kwik:

- Geringe disbalans over RWZI, as van slib verbranding onbekend
- In- en uitgaande stromen huishoudens: onvoldoende data
- Restafval data missen
- Organisch en groenafval inclusief biomassa-krachtcentrales: onvoldoende data; alleen data voor compost



Figuur 4-12 Vrachten lood (kg/jaar) exclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Er zijn geen data beschikbaar voor de Pb gehalten van verbrandingsassen van restafval. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen lood in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vliegas stromen.

System flow households



Figuur 4-13 Vrachten kwik (kg/jaar) exclusief as uit restafvalverbranding richting civiele sector. Er zijn geen data beschikbaar voor de Hg gehaltes van verbrandingsassen van restafval. Voor alle F-genummerde stromen zijn geen data beschikbaar. Dit wil niet zeggen dat er geen kwik in deze stromen aanwezig is. De "slibas" pijl vertegenwoordigt de hoeveelheid as die direct uit slib kan worden gevormd. Deze kan gedeeltelijk ook verdisconteerd zijn in de andere bodem- en vliegias stromen.

4.12 Concluderende opmerkingen ten aanzien van micronutriënten stromen in de keten

De grootteorde van de vrachten waarin de verschillende elementen in de in deze studie meegenomen stromen aanwezig zijn varieert van 0.1 tot 100000 ton per jaar. Hieronder (Tabel 4-6) zijn voor de elementen de grootte orde van de stromen weergegeven die in het huishoudelijk organisch afvalstelsel worden omgezet naar (GFT en groen)compost, effluent en slib. Ook is weergegeven welk aandeel deze stromen vertegenwoordigen in het totaal. De gegeven zijn gebaseerd op de beschikbare analyses en daarom kan niet worden uitgesloten dat er andere stromen in het systeem zijn die een hogere kans op terugwinning zouden geven. Bij het maken van de balansen waren er verschillende factoren die maken dat de balansen niet nauwkeurig kunnen worden opgesteld. Grote fracties van de micronutriënten worden momenteel al teruggevoerd via de compost. Voor B, Mg, Mn en Mo geldt dat ze voornamelijk in het effluent van de zuivering aanwezig zijn en behalve Mo ook in aanzienlijk hoeveelheden. Deze elementen worden in veel mindere mate teruggevonden in de slibfractie van de zuivering. Cu, (in mindere mate) Fe, Zn, Cd, Pb en Hg zijn vooral in de slibfractie aanwezig. Cu, Mo en Zn zouden (van de in deze studie meegenomen micronutriënten het gemakkelijkst uit restafval kunnen worden teruggewonnen (als alleen de hoeveelheid in aanmerking wordt genomen en aanwezigheid van andere elementen worden genegeerd).

Tabel 4-6 Overzicht van grootte orde van de micronutriëntstromen in productstromen (compost, effluent en slib) van het huishoudelijk organisch afvalstelsel, grootteorde van de gecombineerde stromen en fracties van het micronutriënt in totale productstroom. Daar waar cellen grijs zijn is het aandeel van de productstroom in totale vracht gelijk aan 25% of hoger). De donkergrijze vlakken geven aan welke elementen zijn geanalyseerd in as van restafvalverbranding. Deze vrachten zijn hoger dan de compost, effluent en slibstromen.

	Grootte orde stromen compost, effluent en slib totaal (kg/jaar)	Fracties (van totaal) uitgezonderd as restafval			Geanalyseerd in restafval	Opmerkingen
		Compost	Effluent	Slib		
		B	10 ⁵ -10 ⁶	0,1		
Cu	10 ⁵ -10 ⁶	0,2	0,1	0,7	A/B/D	
Fe	10 ⁷ -10 ⁸	0,7	0,1	0,3	B/C/D/E	
Mg	10 ⁷ -10 ⁸	0,1	0,7	0,1	B/C/D	
Mn	10 ⁵ -10 ⁶	0,5	0,4	0,1	B/C/D/E	
Mo	10 ³ -10 ⁴	0,3	0,5	0,2	A/B/E	
Zn	10 ⁵ -10 ⁶	0,3	0,2	0,6	A/B/D	
Cd	10 ² -10 ³	0,5	0,1	0,5	A/B/C/D/E	
Pb	10 ⁴ -10 ⁵	0,5	0,0	0,4	A/B/C/D	
Hg	10 ² -10 ³	0,3	0,1	0,7	A/B/C/D/E	

A = disbalans over RWZI.

B = onvoldoende data huishoudens.

C = geen restafval asgegevens.

D = geen gegevens biomassakrachtcentrales en andere mogelijk interessante stromen.

E = disbalans slibverbranding.

F = gering aantal metingen.

Naast de grootte orde van de stromen kan ook de ratio van de micronutriënten ten opzichte van de zware metalen (Cd, Hg, Pb) in de verschillende stromen een indicator voor de mogelijkheden voor terugwinning van de micronutriënten. Hierbij is een hogere ratio aantrekkelijker voor terugwinning (Tabel 4-7). Het is niet mogelijk om een grenswaarde voor de ratio vast te stellen waarbij terugwinning aantrekkelijk wordt. Uit de data blijkt wel dat ijzer en magnesium in alle stromen in substantiële hoeveelheden aanwezig zijn ten opzichte van de gerapporteerde zware metalen. Aangezien de GFT en groencompost al worden ingezet in de voedselketen lijken dus met de stromen gerelateerd aan de waterzuivering aantrekkelijk voor terugwinning van deze nutriënten (mits de aanwezigheid van organische microverontreinigingen de terugwinning niet belemmert). Aangezien de vracht zware metalen in het effluent het laagst is, liggen met name in deze stroom kansen voor hergebruik of terugwinning. Dit geldt ook, maar in mindere mate voor boor, mangaan en

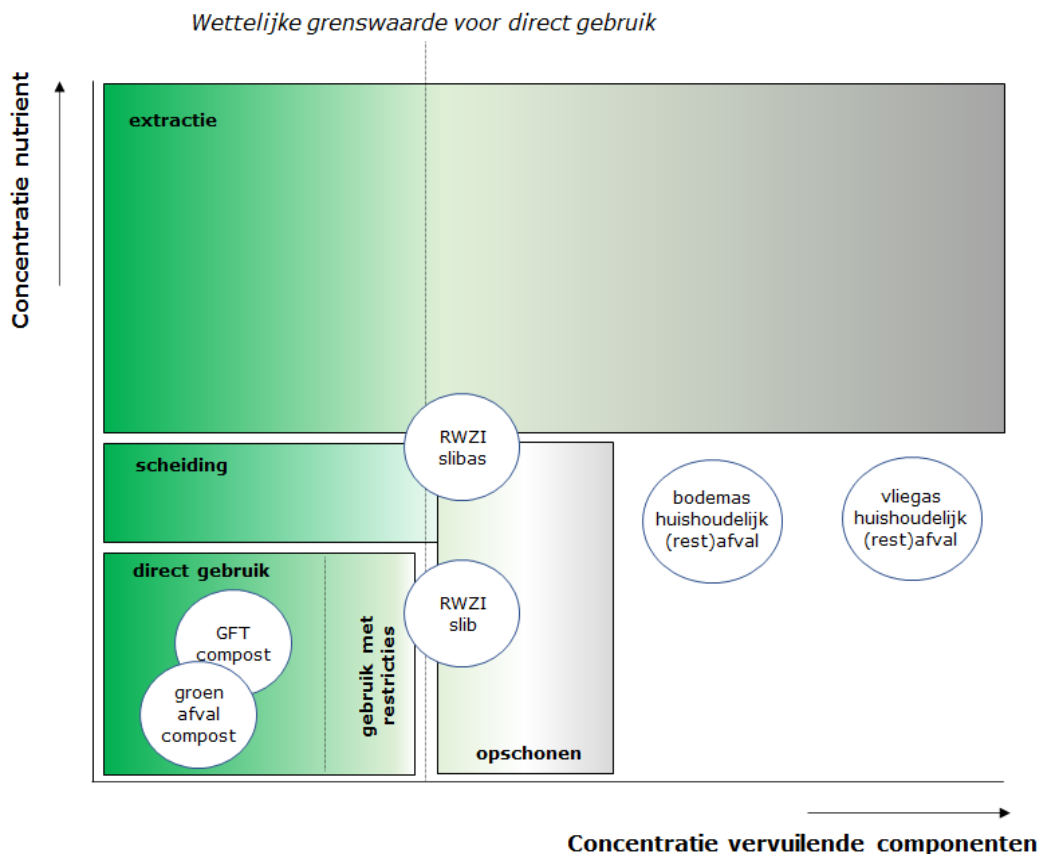
zink (Tabel 4-7). Daar komt bij dat er in de RWZI een scheiding plaatsvindt tussen B, Mn, en Mg die vooral in het effluent zitten en de rest van de elementen, waaronder de zware metalen die voornamelijk in de slib fractie zitten.

Tabel 4-7 Ratio's van micronutriënten in een stroom ten opzichte van de som van zware metalen (Cd, Hg en Pb). Voor de berekening is gebruik gemaakt van de gegevens in Tabel 4-1 (RWZI-influent, -effluent, slib, en as) en Tabel 4-3 (GFT en groencompost). Hierbij is de vracht van het micronutriënt gedeeld door de som van de Cd, Hg en Pb vracht in elke stroom). Ratio's > 10 zijn groen. Ook weergegeven is de totale vracht zware metalen (ZM) (Cd+Hg+Pb).

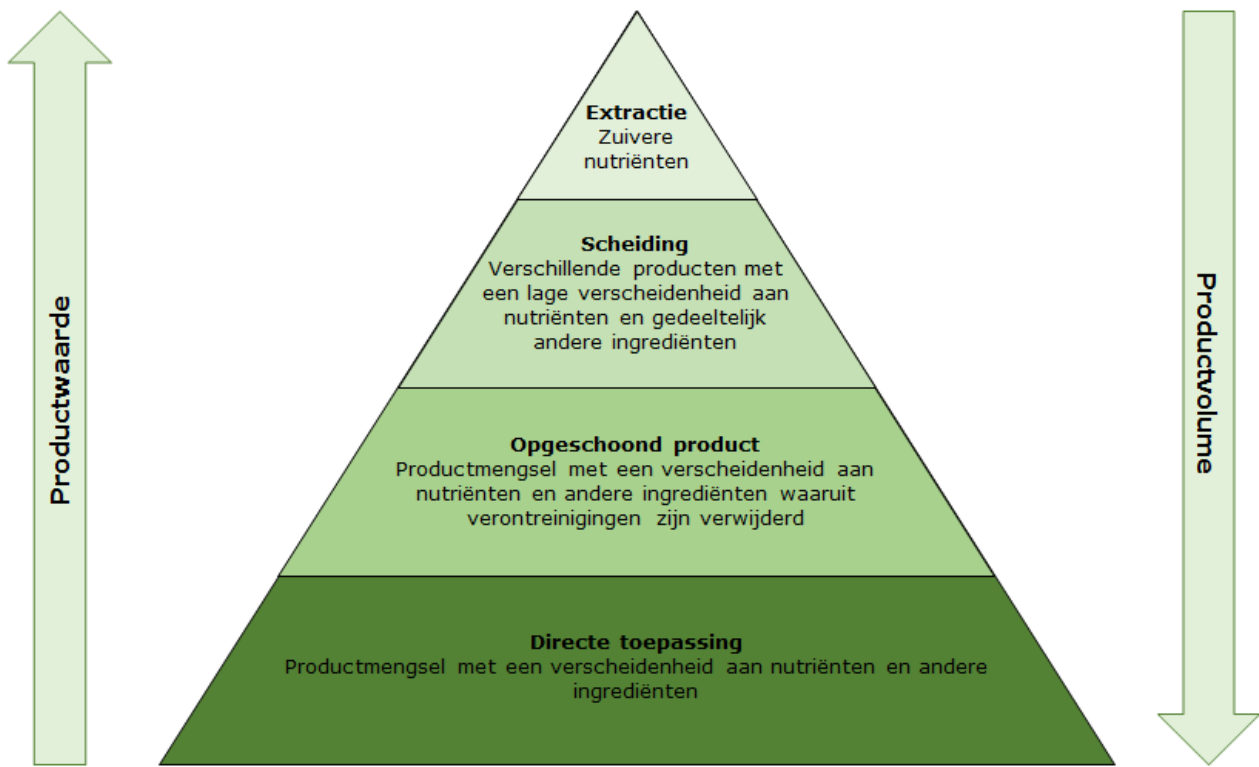
Stroom	B	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Zn	ZM (ton)
GFT compost	1	1	164	77	7	0	4	22
Groen compost	1	1	248	66	10	0	3	18
Influent	21	12	316	1215	19	1	47	15
Effluent	157	4	249	5355	83	1	34	2,6
Slib (droge stof)	0	3	118	84	2	0	10	31
As (slibverbranding)	0,2	3	265	38	4	0	9	19

5 Micronutriënten: technologieën voor terugwinning

In het algemeen zullen de micronutriënten niet als enige component in bijvoorbeeld waterstromen of slib aanwezig zijn en zal opzuivering van de stroom nodig zijn om daadwerkelijk hergebruik te bewerkstelligen. In die stromen kunnen vervuilende componenten zoals pathogenen, organische microverontreinigingen of zware metalen aanwezig zijn en afhankelijk van de concentratie zal een andere behandeling van de stroom nodig zijn om hergebruik van de nutriënten mogelijk te maken ((Kupfernagel et al., 2017) Figuur 5-1). Voor stromen met een lage concentratie vervuilende componenten (pathogenen, zware metalen of organische microverontreinigingen) is toepassing direct mogelijk, vooropgesteld dat de micronutriënten in voldoende concentratie aanwezig zijn. Naast de concentratie van de micronutriënten en de eventueel aanwezige contaminanten speelt ook de waarde en het volume van het product een rol (Figuur 5-2) bij het bepalen van de strategie om de micronutriënten in een vorm te krijgen die kan worden toegepast in de agrovoedselketen. De micronutriënten kunnen worden geëxtraheerd uit de (vervuilde stroom) om zo een product te krijgen dat een kleiner volume heeft met een hogere concentratie. Anderzijds kan de strategie ook zijn om vervuilende componenten te verwijderen (organische microverontreinigingen, zware metalen, pathogenen) en zo een product te leveren dat herbruikbaar is. Welke strategie uiteindelijk toepasbaar is, is onder andere afhankelijk van de aard van de stroom (vast, vloeibaar), speciatie van het element (bijvoorbeeld geadsorbeerd of vrij opgelost), aanwezigheid van vervuilende componenten (aard, concentratie).



Figuur 5-1 Relatie tussen concentratie van micronutriënten en concentratie contaminant en de terugwinningstrategie (aangepast van (Kupfernagel et al., 2017)).



Figuur 5-2 Terugwinningsstrategieën voor (micro)nutriënten (aangepast van (Kupfernagel et al., 2017)).

Roest et al (2016)(Roest et al., 2016) hebben voor verschillende speciaties (opgelost als kation of als oxide, gehecht aan een organisch materiaal, en gehecht aan een anorganisch materiaal) van de micronutriënten onderzocht wat de mogelijkheden zijn voor terugwinning uit water, slib of vliegashout (Tabel 5-1). De technologieën zijn zeer divers variërend van fysische technologieën zoals membraanfiltratie, elektrolyse, ionenuitwisseling, ionenflotatie en adsorptie, tot chemische methoden zoals precipitatie, coagulatie, elektrocoagulatie en biologische methoden. Fysisch-chemische behandelingstechnologieën kunnen worden toegepast op de verschillende stromen, en daarnaast bij belastingen en stromen, hebben vaak een kleine footprint en lage installatiekosten, maar operationele kosten zijn vaak hoger dan andere (biologisch gebaseerde) methoden. Biologische technologieën (bio leaching, biosorptie, bioremediatie, phytoextractie) vereisen in het algemeen meer tijd om hetzelfde resultaat te bereiken, maar kunnen milieuvriendelijker opleveren (Bhat et al., 2022). De voor- en nadelen van de in Tabel 5-1 besproken technologieën worden elders (Roest et al., 2016) uitgebreid toegelicht.

Niet alle genoemde technologieën zijn selectief of zijn al voldoende hoog qua TRL. Voor elke specifieke combinatie van micronutriënten en bron zal daarom een aparte afweging moeten worden gemaakt om een geschikte technologie te selecteren. Recentelijk komen ook andere technologieën in beeld zoals het gebruik van ionic liquids voor de verwijdering van zware metalen (Sarkar & Pandey, 2023) voornamelijk uit water en soms gecombineerd met andere technologieën, zoals chelating agents of ultrasoon om de efficiëntie te verhogen. Deze methoden zijn ook niet selectief. Ionic liquids kunnen wel worden gebruikt om juist de organische verontreinigingen te verwijderen.

Tabel 5-1 Technologieën of technieken voor nutriëntenterugwinning geselecteerd op bron en soortvorming. Aangepast uit (Guedes, Couto, Ottosen, & Ribeiro, 2014; Li et al., 2017; Roest et al., 2016).

Te verwijderen component	Water	Slib	Vliegas
Kation/Oxide	Chemische precipitatie	Ion wisseling	Ion wisseling
	Bio-elektrochemie	Phytoremediatie	Phytoremediatie
	Electrokinetiek		Electrodialyse
	Electrodialyse		Zure extractie
	Ion wisseling		
	Membraan filtratie		
	Adsorptie		
	Biosorptie		
	Phytoremediatie		
	Bioremediatie		
	Membraan elektrolyse		
	Photocatalyse		
Organisch	Electrokinetiek	Chemical coagulatie	Chemical coagulatie
	Phytoremediatie	Flotatie	Flotatie
		Electrokinetiek	Pyro-/hydrometallurgische extractie
		Bioleaching	Bioleaching
		Superkritische extractie	Superkritische extractie
		Phytoremediatie	Phytoremediatie
Anorganisch	Electrokinetiek	Electrokinetiek	Chemische coagulatie
	Phytoremediatie	Bioleaching	Flotatie
		Superkritische extractie	Pyro-/hydrometallurgische extractie
		Phytoremediatie	Bioleaching
			Superkritische extractie
		Phytoremediatie	

6 Scenario studies²

6.1 Inleiding

Het projectteam van WP4 heeft drie reststromen geselecteerd om nader te bekijken m.b.t. de potentie om micronutriënten in de kringloop te brengen, te weten de etensrestenfractie van bioafval (GFE van huishoudens en swill van bedrijven), zuiveringsslib en urine. Van deze stromen is zo goed mogelijk in beeld gebracht wat de vrachten zijn aan diverse micronutriënten die hierin omgaan, en wat nu de gangbare verwerkingsroute is (baseline scenario). Ook heeft het projectteam voor elk van de stromen een aantal alternatieve verwerkingsscenario's gekozen, die mogelijk kunnen bijdragen aan het terugbrengen van de diverse micronutriënten in de kringloop. Deze zijn in dit rapport uitgewerkt. De wettelijke kaders die bij deze stromen en verwerkingen spelen bepalen wat er juridisch wel en niet mogelijk is. Dit rapport bevat een beknopte toelichting bij deze wettelijke kaders, waarin gelinkt wordt naar de betreffende wetteksten.

6.2 Geselecteerde stromen en scenario's

De door het projectteam geselecteerde reststromen en scenario's zijn:

- GFE/swill (etensresten)
 - Vergisten, eventueel scheiden vast/vloeibaar en terugwinnen van nutriënten,
 - Cascadering met bijvoorbeeld terugwinning van vetzuren, de rest vergisten en eventueel drogen en pelletiseren.
- Zuiveringsslib, directe afzet in de landbouw van
 - (Behandeld) Slib,
 - Schone (industriële) slibstromen,
 - Restfracties: assen of slib na extractie van nutriënten,
 - Slib uit brongescheiden systemen.
- Urine
 - Verwerkingsmethode o.b.v. filtratie en verdamping (ontwikkeld door projectpartner Semilla),
 - Struvietprecipitatie met 'bijvangst' van micronutriënten.

6.3 Uitwerking van scenario's: uitgangspunten, opgenomen informatie en beperkingen

Voor de drie reststromen zijn de verwerkingsroutes (baseline en alternatieve scenario's) en de in- en uitgaande stromen beschreven. Voor sommige stromen geldt dat er in de huidige situatie meerdere verwerkingsroutes zijn. In dat geval is hierbij uitgegaan van de meest voorkomende verwerkingsroute; alternatieve verwerkingsroutes worden wel kort genoemd maar zijn niet verder uitgewerkt. Per reststroom wordt beschreven waar deze momenteel vrijkomt, en wat de eigenschappen zijn. Een deel van de micronutriënten valt ook onder de groep zware metalen. Daarnaast vormen zware metalen geregeld een juridisch obstakel voor het terugbrengen van stromen naar de landbouw. Om deze reden is er naar zowel micronutriënten als zware metalen gekeken. Concentraties en vrachten micronutriënten/zware metalen in de verschillende stromen zijn zo goed mogelijk berekend, voor zover er bruikbare gegevens beschikbaar waren. De praktische en juridische haalbaarheid worden benoemd, en een indruk van de toekomstbestendigheid.

² Dit hoofdstuk bevat slechts een samenvatting van de rapportage met de daarin de resultaten van de scenariostudies. Voor het volledige rapport wordt verwezen naar de bijlage.

6.4 Algemene beperkingen en kennishiaten

Beperkingen en relevante kennishiaten zijn geïdentificeerd. Een aantal hiervan zijn generiek voor alle bestudeerde stromen, andere zijn meer scenario-specifiek. Over het algemeen kan gesteld worden dat de hoeveelheid goed beschikbare data beperkt was, zeker m.b.t. de micronutriënten die niet ook onder de zware metalen vallen.

Er zijn uitsluitend eenvoudige berekeningen gedaan van bijvoorbeeld concentratie naar vracht en verdeling over verschillende stromen. Waar mogelijk is gebruik gemaakt van specifieke informatie over verwerkingstechnologieën. Waar deze niet beschikbaar was hebben de auteurs aannames gedaan op basis van de eigen ervaring en expertise. Tijdens de verwerking spelen complexe chemische en biologische processen, die invloed hebben op waar de micronutriënten uiteindelijk terechtkomen. In een eventueel meer gedetailleerde vervolgitwerking zou hier wel naar gekeken moeten worden.

Naast de beperkte databeschikbaarheid, is er het aspect van datakwaliteit. Veel van de gevonden informatie is indicatief, en de representativiteit voor de algemene Nederlandse situatie is vaak moeilijk in te schatten. De focus ligt bij reststromen in het kader van meststoffenproductie over het algemeen op de macronutriënten; het aantal bronnen dat gehalten voor zware metalen geeft is klein, en voor micronutriënten nog kleiner. Verder zijn de gebruikte detectielimieten voor een deel van de elementen te hoog. Daarnaast was er in verschillende publicaties sprake van onduidelijke eenheden, of gebrek aan informatie om eenheden om te kunnen rekenen naar een bruikbare eenheid voor vergelijking van bronnen onderling.

De uitwerkingen in dit rapport moeten gezien worden als een eerste verkenning van het potentieel voor micronutriëntenterugwinning uit de onderzochte reststromen. Een deel van de nu naar voren gekomen kennishiaten zou mogelijk aangevuld kunnen worden met grondigere en meer gedetailleerde literatuurstudies, deze lagen nu echter buiten de reikwijdte van het onderzoek. Gezien de nu geconstateerde beperkingen in de data, is de aanbeveling om bij het ontwikkelen van concepten voor de terugwinning van micronutriënten vooral ook in te zetten op representatieve metingen.

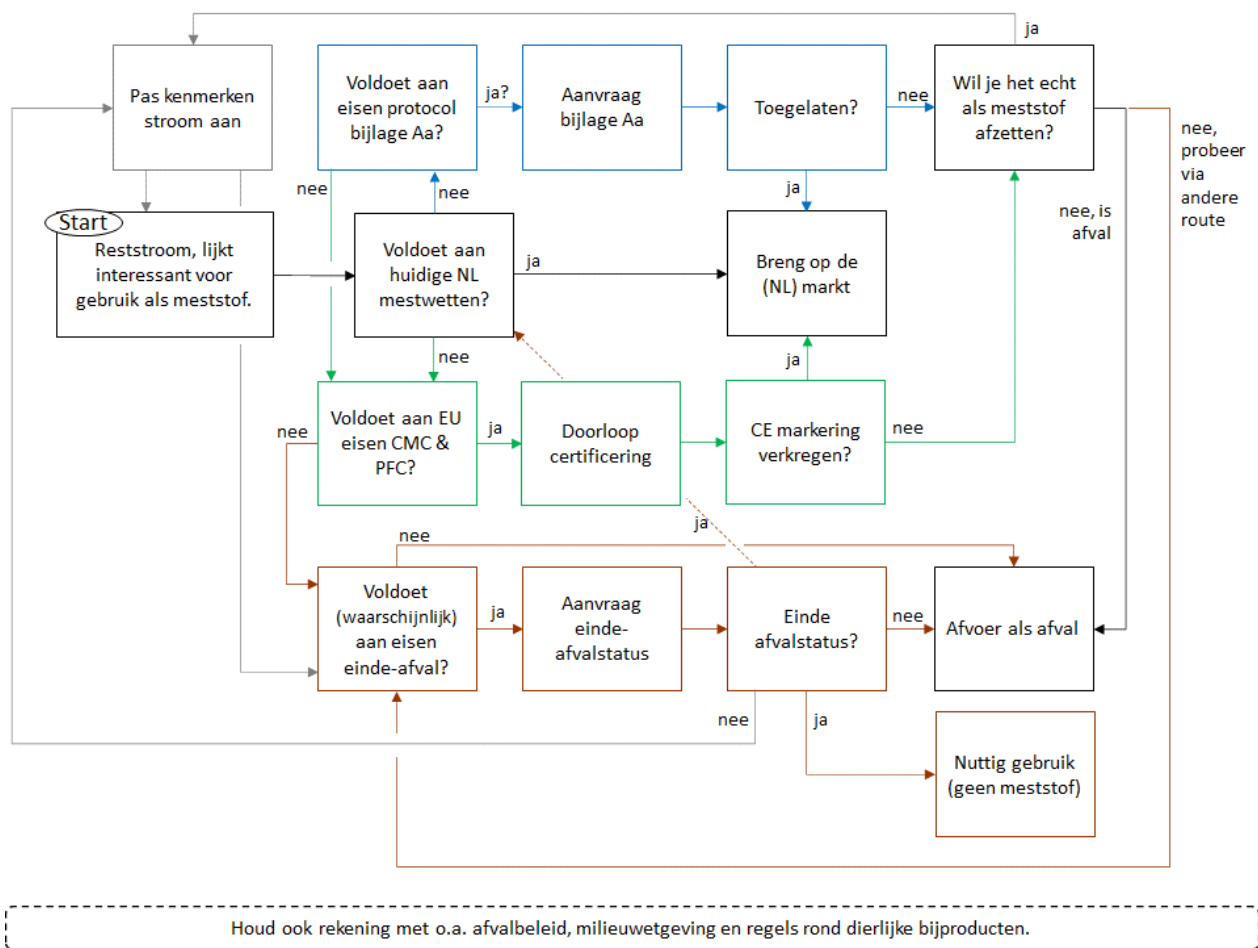
6.5 Juridische aspecten

Bij de verwerking van afvalstromen tot meststoffen heeft men te maken met wettelijke kaders rond afvalstoffen en meststoffen, en specifiek bij GFE/swill ook met regelgeving m.b.t. dierlijke bijproducten. In zowel Nederlandse als Europese meststoffenregelgeving staat gedefinieerd welke afvalstoffen gebruikt kunnen worden als (bestanddeel van) meststoffen. GFE/swill valt onder bioafval, dat als compost (NL en EU) of als digestaat (EU) gebruikt kan worden. Zuiveringsslib is opgenomen in de Nederlandse meststoffenwetgeving. Urine valt echter onder afvalwater en dit beperkt de mogelijkheden. Struviet is onder voorwaarden wel toegestaan als meststof.

Er zijn verschillende routes om van een afvalstof tot een goedgekeurde meststof te komen:

- Voldoen aan de eisen die binnen de Nederlandse wetgeving gesteld worden. Dit betekent dat voldaan wordt aan de algemene eisen in de verschillende besluiten en regelingen, of toelating krijgen op de zogenaamde 'Bijlage Aa', waarop reststromen staan die bij ministerieel besluit zijn toegelaten voor gebruik in de landbouw.
- Voldoen aan de eisen voor EU-meststoffen. Dit betekent voldoen aan de eisen voor meststoffenbestanddelen en voor meststoffenproducten. Hier zijn opties voor bioafval, struviet en producten uit slibas. Na een certificeringstraject kan het product als CE-meststof verhandeld worden.
- Het traject van de einde-afval status.

Figuur 6-1 geeft een schematische weergave van deze routes, op hoofdlijnen. In het wettelijk kader zijn naast de wetgeving m.b.t. meststoffen ook het afvalbeleid en de milieuwetgeving van belang.



Figuur 6-1 Schematisch beknopt overzicht op hoofdlijnen van de routes van afval- naar meststof.

6.6 Scenario's bioafval (GFE/swill)

Deze afvalstroom wordt momenteel deels gescheiden ingezameld via de huishoudelijke GFTe inzameling van voornamelijk laagbouw, en een klein deel via gescheiden inzameling van organisch bedrijfsafval. Met name voor bedrijfsafval is weinig inzicht in de hoeveelheden. Het is de verwachting dat er significante stromen vrij gaan komen met het beter inzamelen van GFE uit met name hoogbouw, en toenemende aandacht voor organisch bedrijfsafval. Deze stromen, bestaan voornamelijk uit etensresten en zouden apart van het GFTe verwerkt kunnen worden. De bekeken alternatieve scenario's hiervoor zijn via vergisting tot digestaat als CE-meststof, en cascadering tot verschillende producten.

De aparte verwerking van GFE/swill tot digestaat is praktisch en waarschijnlijk ook juridisch haalbaar, hierbij zijn betere data nodig om goed in te kunnen schatten of aan alle eisen voor CE-certificering wordt voldaan. Bij cascadering wordt uiteindelijk ook digestaat geproduceerd; de meer hoogwaardige stoffen die in eerdere stappen gemaakt kunnen worden hebben wel te maken met een afvalstatus, wat de toepassing beperkt. Voor de toekomst is dit wel een interessante route om GFE/swill meer hoogwaardig te verwerken.

Tabel 6-1 geeft de berekende vracht aan micronutriënten en zware metalen in potentieel extra ingezameld GFE/swill. Deze getallen zijn indicatief, er waren weinig bruikbare databronnen beschikbaar. Zie ook de eerder beschreven beperkingen. Daarnaast zijn de getallen gebaseerd op onzekere aannames m.b.t de hoeveelheden in de toekomst te verwachten apart ingezamelde GFE/swill.

De vrachten aan micronutriënten en zware metalen die met de etensresten worden ingezameld komen in theorie helemaal beschikbaar met het digestaat. Ook wanneer cascadering wordt toegepast met eerst winning van vetzuren en daarna verdere verwerking tot digestaat en eventuele andere

meststoffenproducten. Tijdens de verwerking kunnen er verschillende factoren een rol spelen waardoor er enerzijds metalen vrijkomen uit materialen zoals leidingen, (opslag)tanks en bijvoorbeeld coatings en anderzijds metalen neerslaan als gevolg van bepaalde procescondities. Hierover is binnen de uitgevoerde studie weinig concrete informatie gevonden, en deze effecten op de potentieel terug te winnen vrachten zijn dan ook buiten beschouwing gelaten.

Tabel 6-1 *Berekende vrachten in extra ingezameld GFE en swill.*

Element	Jaarlijkse vracht (kg)
As	52
B	2.768
Cd	68
Co	240
Cr	873
Cu	1.254
Fe	87.349
Hg	4,9
Mg	127.180
Mn	9.630
Mo	578
Ni	1.940
Pb	1.508
Se	84
Zn	4.304

6.7 Scenario's zuiveringsslib

Na uitwerken van de scenario's "saneren aan de bron", "thermofiele vergisting" en "brongescheiden systemen" blijkt dat geen van deze routes aantoonbaar leidt tot een slibsamenvatting die aan de wettelijke normen voor landbouwkundig gebruik voldoet. Mogelijke uitzonderingen hierop zijn zeer schone slibstromen uit bijvoorbeeld de levensmiddelenindustrie. Koper en zink zijn de probleemstoffen bij het voldoen aan de wettelijke eisen. Van de vrachten die hiervan op het riool worden geloosd is het merendeel afkomstig van consumenten. Het afkoppelen van industrieën is dus geen algemene oplossing, hoewel dit plaatselijk mogelijk wel kansen kan geven. Om dit te kunnen evalueren is informatie nodig over slib van individuele rwzi's en het type afvalwater dat daar wordt verwerkt.

Afkoppelen van al het toiletwater geeft een reductie van circa 15% voor beide stoffen, dit is niet voldoende. Ook het slib van de aparte verwerking van toiletafvalwater voldoet overigens niet aan de eisen (Tabel 6-2).

Extractie van mineralen via de slibas-route is op zich veelbelovend, in de EU-meststoffenverordening is er een bestanddelencategorie die hierbij past. Er zijn veel technieken mogelijk, en voor geen van allen is voldoende informatie beschikbaar om een kwantitatieve evaluatie te maken. Verder is het zo dat alle technieken niet selectief zijn, zoals ook toegelicht in het hoofdrapport van WP4, waardoor naast micronutriënten ook zware metalen worden gewonnen. Dit is ongunstig voor de samenstelling. Een mogelijke toepassing buiten de landbouw is het inzetten van metaalzoutoplossingen uit P-winning uit slibas op RWZIs ter vervanging van ijzerchloride dat gedoseerd wordt om P te verwijderen.

Tabel 6-2 Zware metaalgehalten in slib in relatie tot het uitvoeringsbesluit Meststoffenwet.

Element (mg/kg ds)	Gehalte in slib van vergisting van zwart water*	Gehalte in zuiveringslib (berekend o.b.v. gegevens 4.2)	Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet
As	5,7	11	15
Cd	0,8	1,0	1,25
Cr	12	39	75
Cu	234	391	75
Hg	0,4	0,5	0,75
Ni	12	26	30
Pb	25	84	100
Zn	848	1057	300

6.8 Urine

Voor urine is er gekeken naar de potentiële terugwinning via filtratie en verdamping, alleen verdamping, en 'bijvangst' van micronutriënten in struviet. Door (filtratie en) verdamping worden alle nutriënten uit urine geconcentreerd in een klein volume. De berekende vrachten zijn weergegeven in Tabel 6-3.

Struviet is een onder voorwaarden erkende meststof, waarmee de juridische hindernis van de afvalstatus van urine zou worden overkomen. Uit onderzoek aan struvietvorming uit urine is gebleken dat de hoeveelheid zware metalen in struviet laag is. Hoewel dit gunstig is voor het voldoen aan de normen voor gebruik als meststof, betekent dit ook dat het terugwinningspotentieel voor metalen laag is. De beschikbare data voor micronutriënten in struviet waren echter zo beperkt, dat de berekende jaarvrachten voor struviet onbetrouwbaar en daarom niet in de tabel hierboven gerapporteerd zijn.

De inzameling van urine is een logistieke uitdaging, maar er zijn kansen als de aparte verwerking van urine in de belangstelling blijft staan. Net als bij de andere reststromen ontbreekt het aan data specifiek voor Nederlandse urine, en in het algemeen aan goed bruikbare meetgegevens voor de verschillende micronutriënten in urine. In het geval van de methode van Semilla zullen gegevens beschikbaar gaan komen wanneer de technologie in pilots en later in de praktijk wordt toegepast. Voor de evaluatie van een eventuele opname op Bijlage Aa of een einde-afvalstatus is de beschikbaarheid van goede meetgegevens onmisbaar.

Tabel 6-3 Micronutriënten in twee stromen van Semilla technologie voor urinebehandeling.

Element (kg/jaar)	Semilla Concept 1: nanofiltratie, RO, verdamping	Semilla Concept 2: enkel verdamping (terugwinpotentieel gelijk aan totale vracht in urine)
As	1.337	1.379
Cd	17	17
Hg	3,7	3,8
Pb	65	67
Ni	39	39
Cr	35	35
Cu	248	253
Zn	2.100	2.100
B	6.210	9.554
Co	43	43
Fe	74	75
Mg	1.050.820	1.050.820
Mn	1,2	1,2
Se	147	147

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Deze rapportage bevat de resultaten van een analyse de micronutriënten aanwezig in het huishoudelijk organisch afval dat de huishoudens via afvalwater, GFT(e) en restafval verlaat. Voor deze studie zijn de volgende elementen onderzocht: B (boor), Cu (koper), Fe (ijzer), Mg, (magnesium), Mn (Mangaan), Mo (molybdeen), Zn (zink), Cd (cadmium), Pb (lood) en Hg (kwik). De grootteorde van de vrachten waarin de verschillende elementen in de in deze studie meegenomen stromen aanwezig zijn varieert van 0,1 tot 100000 ton per jaar (op basis van literatuur en gegevens uit databases).

In het algemeen geldt dat de hoeveelheid gegevens over de aanwezigheid van de micronutriënten vaak nog beperkt is voor sommige elementen (bijvoorbeeld B en Mo) maar ook voor hele stromen (bijvoorbeeld assen uit verbrandingsovens, huishoudens in het algemeen). Voor beide (afvalwater en vast organisch afval) systemen geldt dat het niet mogelijk is om een sluitende balans te maken. Hierdoor zijn er wellicht niet geïdentificeerde kansen voor kringloopsluiting.

- Bij het vergelijken van de gegevens van de verschillende stromen die uit de RWZIs komen zijn er duidelijke verschillen tussen de elementen.
- De grootste vrachten in de slib droge stof zijn Fe, Mg, Zn en mindere mate Cu, Mn, en Pb en voor het effluent zijn dat B, Fe, Mg, en in mindere mate Mn en Zn.
- Als een balans wordt opgesteld voor effluent, slib (droge stof) en slib as is het duidelijk dat het grootste deel van de vracht en concentratie van een aantal elementen in de droge-stof van het slib eindigt (Cu, Fe, Zn, Cd, Pb en Hg), maar voor enkele elementen ook een aanzienlijke hoeveelheid in Nederlands oppervlaktewater stroomt, namelijk B, Mg, Mn en in mindere mate Mo.
- Aangezien de in de studie meegenomen zware metalen vooral in de slibfractie achterblijven zou het effluent van RWZIs een mogelijkheid voor terugwinning van B, Mg en Mn kunnen zijn. Het is niet duidelijk of de (lage) concentraties in de waterfase een belemmering vormen. Daarnaast dient ook rekening gehouden te worden met de aanwezigheid van andere (storende) verbindingen zoals organische microverontreinigingen.
- De as van de slibverbrandingsinstallaties lijkt een goed terugwinningspunt te zijn voor micronutriënten in het slib. Echter, gezien het feit dat er voor het merendeel van de elementen geen sluitende balans kan worden gemaakt ($100\pm 10\%$) kunnen de resultaten van de studie slechts worden gebruikt als een indicatie voor terugwinningsmogelijkheden. De balansen zijn voor een aantal elementen (met name voor B, Cu, Mo, Zn, Cd, Hg en Pb) niet sluitend voor effluent en slib ten opzichte van het influent, omdat verschillende bronnen zijn gebruikt om deze respectievelijke gegevenspunten te kwantificeren en er in algemene zin onvoldoende gegevens zijn (bijvoorbeeld voor samenstelling slibas). De gegevens voor de samenstelling van slibas zijn gedateerd en het verdient daarom aanbeveling om deze stroom meer frequent te analyseren. Hetzelfde geldt voor bijvoorbeeld B in het in- en effluent van de zuivering.

Voor het huishoudelijk organisch afval geldt dat:

- Het is niet mogelijk om een balans te maken voor de micronutriënten in het huishoudelijk organisch afval systeem. Vooralsnog wordt alleen de uit GFTe en groenafval gevormde compost regelmatig geanalyseerd op micronutriënten.
- Slechts een klein deel van het bron gescheiden organisch afval eindigt na bewerking in de civiele sector, onbekende sectoren of wordt verbrand. Het grootste deel van het organische afval wordt naar compost en andere producten (bijvoorbeeld potgrond en bodemverrijkers) omgezet en komt dan uiteindelijk weer terecht in de voedselketen of in groenvoorzieningen. De micronutriënten blijven in dat geval dus in de keten.
- Een deel van het organisch huishoudelijk organisch afval eindigt in rest afval en wordt verbrand. Door een gebrek aan analyse gegevens kan slechts beperkt inzicht worden verkregen in de concentraties en vrachten micronutriënten die hiermee (al dan niet) verloren gaan. Voor zover bekend worden de assen uit

de verbranding momenteel vooral gebruikt in de bouw, maar gezien de hoeveelheden van de gemeten elementen zou dit restafval als een interessant punt voor terugwinning kunnen zijn.

Overall:

Grote fracties van de micronutriënten worden momenteel al teruggevoerd via de compost. Voor B, Mg, Mn en in mindere mate Mo geldt dat ze voornamelijk in het effluent van de zuivering aanwezig zijn. Deze elementen worden in veel mindere mate teruggevonden in de slibfractie van de zuivering. Cu, Fe, Zn, Cd, Pb en Hg zijn vooral in de slibfractie aanwezig, waarvan met name Fe in grote hoeveelheden. Cu, Mo en Zn zouden (van de in deze studie meegenomen micronutriënten het gemakkelijkst uit restafval kunnen worden teruggewonnen (als alleen de hoeveelheid in aanmerking wordt genomen en aanwezigheid van andere elementen worden genegeerd).

Naast de grootte orde van de stromen kan ook de concentratie van de micronutriënten ten opzichte van de zware metalen (Cd, Hg, Pb) in de verschillende stromen een indicator voor de mogelijkheden voor terugwinning van de micronutriënten. Uit de data blijkt dat ijzer (Fe) en magnesium (Mg) in alle stromen (compost, effluent, slib) in substantiële hoeveelheden aanwezig zijn ten opzichte van de gerapporteerde zware metalen. Aangezien de GFT en groencompost al worden ingezet in de voedselketen lijken dus met name ook de stromen gerelateerd aan de waterzuivering aantrekkelijk voor terugwinning van deze nutriënten mits de aanwezigheid van organische microverontreinigingen en andere storende verbindingen de terugwinning niet belemmert. Aangezien de vracht zware metalen in het effluent van RWZIs relatief laag is, liggen in deze stroom kansen voor hergebruik of terugwinning van bijvoorbeeld Fe en Mg. Dit geldt ook voor boor, mangaan en zink, maar de concentraties van die elementen is aanmerkelijk lager. In de RWZI een scheiding plaatsvindt tussen B, Mn, en Mg die vooral in het effluent zitten en de rest van de elementen, waaronder de zware metalen die voornamelijk in de slib fractie zitten. Dit zou een extra aanleiding kunnen zijn om terugwinning te onderzoeken.

Voor geselecteerde stromen zijn de volgende scenario's uitgewerkt om te onderzoeken of deze stromen verder kunnen worden opgewerkt om zo de terugwinning en hergebruik van micronutriënten in de keten te kunnen stimuleren ten opzichte van de huidige toegepaste praktijk zoals hierboven beschreven:

- GFE/swill (etensresten)
 - Vergisten, eventueel scheiden vast/vloeibaar en terugwinnen van nutriënten,
 - Cascadering met bijvoorbeeld terugwinning van vetzuren, de rest vergisten en eventueel drogen en pelletiseren.

De aparte verwerking van GFE/swill tot digestaat is praktisch en waarschijnlijk juridisch haalbaar, hierbij zijn betere data nodig om goed in te kunnen schatten of aan alle eisen voor CE-certificering wordt voldaan. Bij cascadering wordt uiteindelijk ook digestaat geproduceerd, de meer hoogwaardige stoffen die in eerdere stappen gemaakt kunnen worden hebben wel te maken met een afvalstatus, wat de toepassing beperkt. Voor de toekomst is dit wel een interessante route om GFE/swill meer hoogwaardig te verwerken.

- Zuiverings-slib, directe afzet in de landbouw van:
 - (Behandeld) Slib,
 - Schone (industriële) slibstromen,
 - Restfracties: assen of slib na extractie van nutriënten,
 - Slib uit brongescheiden systemen.

Na uitwerken van de scenario's "saneren aan de bron", "thermofiele vergisting" en "brongescheiden systemen" blijkt dat geen van deze routes aantoonbaar leidt tot een slibsamenstelling die aan de wettelijke normen voor landbouwkundig gebruik voldoet. Mogelijke uitzonderingen hierop zijn zeer schone slibstromen uit bijvoorbeeld de levensmiddelenindustrie. Koper en zink zijn de probleemstoffen bij het voldoen aan de wettelijke eisen. Van de vrachten die hiervan op het riool worden geloosd is het merendeel afkomstig van consumenten. Het afkoppelen van industrieën is dus geen algemene oplossing, hoewel dit plaatselijk mogelijk wel kansen kan geven. Om dit te kunnen evalueren is informatie nodig over slib van individuele RWZI's en het type afvalwater dat daar wordt verwerkt.

Afkoppelen van al het toiletwater geeft een reductie van circa 15% voor beide stoffen, dit is niet voldoende. Ook het slib van de aparte verwerking van toiletafvalwater voldoet niet aan de eisen. Extractie van mineralen via de slibas-route is op zich veelbelovend, in de EU-meststoffenverordening is er een bestanddelencategorie die hierbij past. Een mogelijke toepassing buiten de landbouw is het inzetten van

metaalzoutoplossingen uit P-winning uit slibas op RWZI's ter vervanging van ijzerchloride dat gedoseerd wordt om P te verwijderen.

- Urine
 - Verwerkingsmethode o.b.v. filtratie en verdamping (ontwikkeld door projectpartner Semilla),
 - Struvietprecipitatie met 'bijvangst' van micronutriënten., directe afzet in de landbouw van:

De inzameling van urine is een logistieke uitdaging, maar er zijn kansen als de aparte verwerking van urine in de belangstelling blijft staan. Net als bij de andere reststromen ontbreekt het aan data specifiek voor Nederlandse urine, en in het algemeen aan goed bruikbare meetgegevens voor de verschillende micronutriënten in urine. Voor de evaluatie van een eventuele opname op Bijlage Aa of een eindeafvalstatus is de beschikbaarheid van goede meetgegevens onmisbaar. Struviet is een onder voorwaarden erkende meststof, waarmee de juridische hindernis van de afvalstatus van urine zou worden overkomen. Uit onderzoek aan struvietvorming uit urine is gebleken dat de hoeveelheid zware metalen in struviet laag is. Hoewel dit gunstig is voor het voldoen aan de normen voor gebruik als meststof, betekent dit ook dat het terugwinningspotentieel voor metalen laag is. De beschikbare data voor micronutriënten in struviet is tot dusver beperkt.

7.2 Aanbevelingen

- De beschikbaarheid van gegevens over kwantiteit en kwaliteit van organische reststromen, zoals concentraties micronutriënten, maar ook zware metalen en andere (organische) microverontreinigingen, moet worden verbeterd. Dit is nodig voor zowel de ingaande stromen (water, GFT, restaval) als de uitgaande stromen (effluent, slib, slibas, compost, assen uit de restafvalverbranding). De analyses zouden gedurende langere tijd op een consistente manier moeten worden uitgevoerd en gerapporteerd. Met name voor de micronutriënten B, Fe, Mg, Mn en Mo zijn voor wat betreft de waterketen meer gegevens nodig. Aanbevolen wordt om vaker en op meer locaties nutriëntenmetingen te doen, bijvoorbeeld de afvoer naar het riool en de afvoer naar de vaste stof.
- Het beschikbaar maken van gegevens over op heden niet gebruikte stromen zoals swill moet worden gestimuleerd. Wellicht helpt hierbij om dit soort stromen niet per definitie als afval te oormerken maar eerder als reststromen en dat wat overblijft na extractie van de gewenste teruggewonnen materialen pas als "afval" wordt gezien.
- Een groot percentage van de micronutriënten Cu, Fe, en Zn komt in het RWZI-slib terecht. Er zijn echter ook relatief grote hoeveelheden van de zware metalen Cd, Hg en Pb die datzelfde slib verontreinigen. Daarom moeten de mogelijkheden worden onderzocht om deze zware metalen eruit te filteren om het slib te kunnen gebruiken in bijvoorbeeld de landbouw en zo deze micronutriënten in de kringloop te houden.
- Het hergebruik van effluent staat weer meer in de belangstelling. Gezien de aanwezigheid van B, Zn, Mg en Mo in het effluent van de RWZI is het interessant om de mogelijkheid van (her)gebruik van effluent in de landbouw te onderzoeken. Er zal echter nog wel meer onderzoek gedaan moeten worden naar de aanwezigheid van andere (storende) (an)organische (micro)verontreinigingen die (her)gebruik kunnen belemmeren
- Gescheiden inzamelen GFTe stromen zou zo veel mogelijk bevorderd kunnen worden. Een volgende stap zou kunnen zijn om groenafval en GFT verder te scheiden voordat het wordt gecomposteerd. Bepaalde organische bronnen bevatten veel hogere concentraties aan elementen dan andere (groenafval bevat bijvoorbeeld gemiddeld significant meer Cd dan bermafval (Ros, Termorshuizen, & Van Dijk, 2012). Evenzo kan de voorselectie van het organisch afval dat in de composteerdere wordt gevoerd
- Er is een heel scala aan methodes om micronutriënten terug te winnen uit stromen maar deze zijn in het algemeen weinig tot niet selectief. Het verdient aanbeveling om de mogelijkheden hiervoor verder te onderzoeken.
- Assen uit de restafvalverbranding zouden een bron van micronutriënten kunnen zijn. Er is slechts beperkt bekend welke elementen in de assen aanwezig zijn.

8 Referenties

- Afvalmonitor - sorteeranalyse. (2019). afvalmonitor.databank.nl.
- Bhat, S. A., Bashir, O., Ul Haq, S. A., Amin, T., Rafiq, A., Ali, M., . . . Sher, F. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere*, 303, 134788. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134788>
- Bindraban, P. S., Dimkpa, C., Nagarajan, L., Roy, A., & Rabbinge, R. (2015). Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biology and Fertility of Soils*, 51(8), 897-911. doi:10.1007/s00374-015-1039-7
- Brethouwer, T. (2021). [(2021, December 17). Meeting results composters. (T. Schadenberg, Interviewer)].
- Brethouwer, T. (2023). [Spoorelementen in compost TKI Micronutriënten, pers comm to Miriam van Eekert].
- BVOR en Vereniging Afvalbedrijven. (2021). Beoordelingsrichtlijn Keurcompost. Retrieved from <https://keurcompost.nl/wp-content/uploads/images/Beoordelingsrichtlijn-Keurcompost-7.1-per-1-april-2021-1-1.pdf>.
- CBS Statline. <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/>.
- CBS Statline. (2020). Zuivering van stedelijk afvalwater; afzet zuiveringslib, regio. Retrieved December 13, 2021, from CBS StatLine: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83434NED/table?ts=1644523295737>.
- CBS Statline. (2021a). Zuivering van stedelijk afvalwater, per provincie en stroomgebieddistrict. Retrieved December 7, 2021, from CBS: <https://opendata.cbs.nl/statline/portal.html? la=nl& catalog=CBS&tableId=7477& theme=30>.
- CBS Statline. (2021b). Zuivering van stedelijk afvalwater; procesgegevens afvalwaterbehandeling. Retrieved December 13, 2021, from CBS StatLine: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83399NED/table?ts=1643882281523>.
- Centraal Bureau voor de Statistiek. (2019). Waterschappen zuiveren 1,9 mld kuub rioolwater ni 2017. 8 december 2021: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2019/11/waterschappen-zuiveren-1-9-mld-kuub-rioolwater-in-2017>.
- Centraal Bureau voor de Statistiek. (2022). Retrieved from: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/>.
- Chardon, W. J., & Oenema, O. (2013). Verkenning mogelijke schaarste aan micronutriënten in het voedselsysteem (No. 2413). Alterra, Wageningen-UR.
- Compendium voor de Leefomgeving. <https://www.clo.nl/>.
- Compendium voor de Leefomgeving. (2021). Waterwinning en watergebruik in Nederland, 1976-2019. Retrieved 12 17, 2021, from Compendium voor de Leefomgeving: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0057-waterwinning-en-verbruik-nederland>.
- Compendium voor de Leefomgeving. (2022a). Belasting van het oppervlaktewater door consumenten, 1990-2019. <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0139-belasting-oppervlaktewater-en-emissies-naar-water-door-huishoudens>.
- Compendium voor de Leefomgeving. (2022b). Belasting van het oppervlaktewater naar herkomst, 2019. <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0085-belasting-van-het-oppervlaktewater-en-emissies-naar-water-per-doelgroep>.
- Compendium voor de Leefomgeving. (2022c). Belasting van het oppervlaktewater vanuit riolering en rioolwaterzuivering, 1990-2019. Retrieved from Compendium van de Leefomgeving: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0515-belasting-van-oppervlaktewater-door-riolering-en-waterzuivering>.
- de Haes, H. A. U., Voortman, R. L., Bastein, T., Bussink, D. W., Rougoor, C. W., & van der Weijden, W. J. (2012). Scarcity of micronutrients in soil, feed, food, and mineral reserves. Urgency and policy options https://www.clm.nl/uploads/pdf/scarcity_of_micronutrients.pdf.
- Deltares & TNO. (2020). Factsheet Huishoudelijk afvalwater.
- Deltares, P. U. W. (2020). Effluenten RWZI's, regenwaterriolen, niet aangesloten riolen, overstorten en IBA's. Rijkswaterstaat. Retrieved from [http://www.emissieregistratie.nl/ERPUBLIEK/documenten/Water/Factsheets/Nederlands/Effluenten%20RWZI%20\(berekend\).pdf](http://www.emissieregistratie.nl/ERPUBLIEK/documenten/Water/Factsheets/Nederlands/Effluenten%20RWZI%20(berekend).pdf).
- European Parliament. (2021). How the EU wants to achieve a circular economy by 2050. Retrieved from: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20210128STO96607/how-the-eu-wants-to-achieve-a-circular-economy-by-2050>.

- FAO. (2017). The future of food and agriculture – Trends and challenges. doi:<https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>
- Guedes, P., Couto, N., Ottosen, L. M., & Ribeiro, A. B. (2014). Phosphorous recovery from sewage sludge ash through an electro-dialytic process. *Waste Management*, 34, 886-892. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.021>
- Haynes, R., Belyaeva, O., & Zhou, Y.-F. (2015). Particle size fractionation as a method for characterizing the nutrient content of municipal green waste used for composting. *Waste Management*, 35, 48-54.
- Hees, E. (2013). Voedsel, grondstoffen en geopolitiek. Rapportage aan het Platform Landbouw, Innovatie & Samenleving. Culemborg: CLM Onderzoek en Advies.
- Henckens, M., Driessen, P., & Worrell, E. (2014). Metal scarcity and sustainability, analyzing the necessity to reduce the extraction of scarce metals. *Resources, conservation and recycling*, 1-8.
- Kupfernagel, J., Reitsma, B., Stekete, J., de Ruijter, F., & Blom, J. (2017). Possibilities and opportunities for recovery of nutrients other than phosphorus: An exploratory research. Tauw. Retrieved from: <https://edepot.wur.nl/459357>.
- Laan, P. (2019). STOWA rapport 2019-11 Verkenning verwaarding van zuiverings-slib met behulp van biologische methoden.
- Lapre, F. (2022). [Discrepancies in influent en effluent zink. Onduidelijkheid cijfers CLO vs CBS zinkgehalte influent. 14-2-2022 en 8-3-2022, pers comm.].
- Li, J.-S., Tsang, D. C. W., Wang, Q.-M., Fang, L., Xue, Q., & Poon, C. S. (2017). Fate of metals before and after chemical extraction of incinerated sewage sludge ash. *Chemosphere*, 186, 350-359. doi:dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.012
- Martina, S. (2022). *Master Thesis. The potential of micronutrients recovery in the Netherlands. Wageningen University.*
- Mehta, C. M., Khunjar, W. O., Nguyen, V., Tait, S., & Batstone, D. J. (2015). Technologies to recover nutrients from waste streams: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(4), 385-427.
- Pienkoß, F., Abis, M., Bruno, M., Grönholm, R., Hoppe, M., Kuchta, K., . . . Simon, F.-G. (2022). Heavy metal recovery from the fine fraction of solid waste incineration bottom ash by wet density separation. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(1), 364-377. doi:10.1007/s10163-021-01325-1
- Roest, K., de Buijzer, E., Muñoz Sierra, J., & Palmén, L. (2016). Terugwinnen zware metalen en zeldzame aardmetalen uit afvalwater en slib-eindverwerking (vooronderzoek). KWR Rapport.
- Roest, K., De Buijzer, E., & Palmén, L. (2018). Terugwinnen van metalen uit water, slib en vliegas: monitoringsresultaten en potentie. Presentatie HVC SVI 25 jaar 24 september 2018.
- Ros, G., Termorshuizen, A., & Van Dijk, T. (2012). Risico's van diffuse verspreiding van groenafvalstromen. Wageningen: Nutriënten Management Instituut B.V.
- Sarkar, A., & Pandey, S. (2023). Ionic liquids and deep eutectic solvents in wastewater treatment: recent endeavours. *International Journal of Environmental Science and Technology*. doi:10.1007/s13762-023-04865-1
- Schadenberg, T. (2022). *Master Thesis. Data (gap) analysis of the flows of micronutrients and heavy metals from dutch households. Wageningen University.*
- Smit, A. L., van Middelkoop, J. C., van Dijk, W., & van Reuler, H. (2015). A substance flow analysis of phosphorus in the food production, processing and consumption system of the Netherlands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 103(1), 1-13. doi:10.1007/s10705-015-9709-2
Swing database; <https://afvalmonitor.databank.nl/jive/>.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology (Vol. third edition). Sinauer Associates, Inc., Publishers.*
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Mishra, S., Chauhan, D. K., & Dubey, N. K. (2015). Micronutrients and their diverse role in agricultural crops: advances and future prospective. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37(7), 1-14.
- U.S. Geological Survey. (2017). Mineral commodity summaries.
- van Duijnoven, N. (2021). Informatie Watson Database . 20-12-2021 (T. Schadenberg, Interviewer).
- Voortman, R. L., Bastein, A. G. T. M., Bree, T. v., & Bussink, D. W. (2012). Schaarste van micronutriënten in bodem, voedsel en minerale voorraden: urgentie en opties voor beleid. Platform Landbouw, Innovatie & Samenleving. Retrieved from: <http://www.platformlis.nl/rapporten/Achtergrondrapport-compleet-web.pdf>
Watson database. <https://www.emissieregistratie.nl/>.
- Werkgroep Afvalregistratie - Rijkswaterstaat. (2021). Afvalverwerking in Nederland, gegevens 2019. https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_653042_31/1/.
- Wien., T. U. (2012). stan2web. Retrieved February 9, 2022, from stan2web: <https://stan2web.net>.

Bijlage 1 Database gebruik

Zoektermen en specificaties gebruikt voor de verschillende databases:

CBS StatLine

Afvalwaterzuivering

- Aanvoer afvalwater (influent)
 - Volume afvalwater in 1000 m³
 - Zink in kg
 - Koper in kg
 - Lood in kg
 - Cadmium in kg
 - Kwik in kg
- Afvoer afvalwater (effluent)
 - Volume afvalwater in 1000 m³
 - Zink in kg
 - Koper in kg
 - Lood in kg
 - Cadmium in kg
 - Kwik in kg
- Zuiveringslib
 - Totaal droge stof naar bestemming in kg
 - Zink in kg
 - Koper in kg
 - Lood in kg
 - Cadmium in kg
 - Kwik in kg

Watson Database

- Koper
- Zink
- Mangaan
- Boor
- IJzer
- Molybdeen
- Magnesium
- Lood
- Cadmium
- Kwik

Compendium voor de Leefomgeving

- Koper
- Zink
- Mangaan
- Boor
- IJzer
- Molybdeen
- Magnesium
- Lood
- Cadmium
- Kwik

Bijlage 2 Literatuuronderzoek

Zoektermen gebruikt, soms in combinatie met "Nederland" "Netherlands" and "flows of micronutrients".

- Netherlands / Nederland / Holland
- Nutrients
 - Micronutrients / micronutriënten
 - Copper (flow(s) of)
 - Zinc (flow(s) of)
 - Manganese (flow(s) of)
 - Boron (flow(s) of)
 - Iron (flow(s) of)
 - Molybdenum (flow(s) of)
 - Magnesium (flow(s) of)
 - Flows of micronutrients / micronutriënten flows
 - Micronutrients plants
 - Nutrient cycle
 - (Micro)nutrient scarcity / schaarste
 - micronutrients food
- Heavy metals / zware metalen
 - Lead (flow(s) of)
 - Cadmium (flow(s) of)
 - Mercury (flow(s) of)
 - Terugwinning / terugwinnen zware metalen
- Waste streams
 - Waste streams in the Netherlands / afvalstromen in Nederland
 - Household waste streams / huishoudelijke afvalstromen / afvalstromen huishoudens
 - Dutch food waste system
- Waste treatment / afvalverwerking
 - Wastewater treatment plant(s) / afvalwaterzuiveringsinstallatie(s)
 - Sewage (treatment)
 - Sewage sludge
 - Struvite / struviet
 - Waterzuivering
 - Wastewater / afvalwater / rioolwater
 - Rwzi influent
- Organic waste
 - Organic waste processors / composteerder
 - Compost
 - Keurcompost
- Agriculture
 - Food (production) system
 - Dutch agriculture / landbouw
 - Fertiliser(s)
- Circular economy
 - Sustainability
 - Resources / grondstoffen
 - Circularity
 - Kringloop

Bijlage 3 Micronutriënten in compost - analyse resultaten verschillende bronnen

Bron: (T. Brethouwer, 2023)

Resultaten BVOR en VA (n> 400)			
	GFT	Groen	
	2019	2019	
D.S.	681	626 g/kg	
O.S.	322	255 g/kg ds	
N	11.8	7.9 g/kg ds	
P ₂ O ₅	6.4	4.1 g/kg ds	
K ₂ O	10.2	7.5 g/kg ds	
MgO	5.7	3.2 g/kg ds	3.299785
S	1.9	1.4 g/kg ds	
Cl	2.8	1.3 g/kg ds	
EC	3.6	1.6 mS/cm	
CaCO ₃	2.5	1.6 %	
Cd	0.37	0.36 mg/kg ds	
Cr	22	17 mg/kg ds	
Cu	36	21 mg/kg ds	
Hg	0.07	0.07 mg/kg ds	
Ni	10	9 mg/kg ds	
Pb	44	29 mg/kg ds	
Zn	169	102 mg/kg ds	
As	3.7	4.1 mg/kg ds	
Resultaten Koch (n=1)			
Mineralen en sporen na destructie koningswater			
Parameter	GFT	Groen	Eenheid
	2022	2022	
droge stof	610	731	g/kg
organische stof	21.2	25.5	%
Zwavel	1197	1526	mg/kg ds
Koper	14.2	36	mg/kg ds
Zink	77.7	185	mg/kg ds
Lood	17.3	51.6	mg/kg ds
Arseen	3.6	3.7	mg/kg ds
Cadmium	0.25	0.36	mg/kg ds
Nickel	<10	<10	mg/kg ds
Kwik	<0.2	<0.2	mg/kg ds
Seleen	0.21	0.32	mg/kg ds
Ijzer	5310	5352	mg/kg ds
Aluminium	2790	3362	mg/kg ds
Magnesium	1816	2793	mg/kg ds
Mangaan	276	203	mg/kg ds
Fosfor	1432	2798	mg/kg ds
Kalium	4186	6967	mg/kg ds
Cobalt	1.5	1.9	mg/kg ds
Natrium	387	1640	mg/kg ds
CAT extractie (1 op 5) in product			
Parameter	GFT	Groen	Eenheid
	2022	2022	
Ijzer (Fe-Cat)	179	73	mg/l substraat
Mangaan (Mn-Cat)	62	44	mg/l substraat
Zink (Zn-Cat)	16	28	mg/l substraat
Borium (B-Cat)	1.5	1.5	mg/l substraat
Koper (Cu-Cat)	1.5	1.1	mg/l substraat
Molybdeen (Mo-Cat)	< 0.05	0.14	mg/l substraat
1 op 1.5 volume extract (water) in extract			
Ijzer (Fe)	2.5	6.3	mg/l
Mangaan (Mn)	0.14	0.61	mg/l
Zink (Zn)	0.09	0.46	mg/l
Borium (B)	0.87	1.1	mg/l
Elementen in ammoniumlactaat extractie			
Molybdeen (Mo)	0.06	0.27	mg/l
	0.12	0.27	mg/l
Elementen in ammoniumlactaat extractie			
Koper (Cu-AL)	0.63	0.57	mg/kg
Ijzer (Fe-AL)	382	165	mg/kg
Mangaan (Mn-AL)	179	88.7	mg/kg
Natrium (Na-AL)	326	1398	mg/kg
Zwavel (S-AL)	169	357	mg/kg
Silicium (Si-AL)	96.7	50.1	mg/kg
Zink (Zn-AL)	33	50.1	mg/kg
Kobalt (Co-AL)	0.09	0.09	mg/kg
Molybdeen (Mo-AL)	0.62	0.61	mg/kg

resultaten Duits onderzoek in compost						
Sporen element	gemiddeld	gehalte	gemiddeld	oplosbaar	gemiddeld	oplosbaar
Borium (B)	23	mg/kg ds	5.01	mg/kg ds	21.60%	%
Natrium (Na)	2884	mg/kg ds	1945.1	mg/kg ds	67.00%	%
Mangaan (Mn)	298	mg/kg ds	94.52	mg/kg ds	31.70%	%
Molybdeen (Mo)	2	mg/kg ds	<1	mg/kg ds	10.00%	% schatting
Ijzer (Fe)	7286	mg/kg ds	148.77	mg/kg ds	2.00%	%
Koper (Cu)	54	mg/kg ds	3.32	mg/kg ds	6.60%	%
Zink (Zn)	232	mg/kg ds	54.43	mg/kg ds	23.90%	%



Micronutriënten in de kringloop

WP4 Uitwerking scenario's afvalstromen

In opdracht van WU-ETE

Ref: LeAF21442
Wageningen
December 2023



Titel: Micronutriënten in de kringloop
WP4 Uitwerking scenario's afvalstromen

Status: Eindrapport
Datum: December 2023

Opdrachtgever: WU-ETE
Miriam van Eekert

Auteurs: Iemke Bisschops, Marlies Bos

LeAF projectnummer: 21442

Aantal pagina's: 75

LeAF B.V.
Postbus 500
6700 AM Wageningen
0317 484208
info@leaf-wageningen.nl
<http://www.leaf-wageningen.nl>

Samenvatting

Deze rapportage is onderdeel van WP4 van het TKI-project 'Micronutriënten in de kringloop', waarin de potentie voor terugwinning van micronutriënten uit afvalstromen wordt onderzocht. Zie het hoofdrapport van WP4 voor de achtergrond van het project en dit werkpakket.

Inleiding

Het projectteam van WP4 heeft drie reststromen geselecteerd om nader te bekijken m.b.t. de potentie om micronutriënten in de kringloop te brengen, te weten de etensrestenfractie van bioafval (GFE van huishoudens en swill van bedrijven), zuiveringsslib en urine. Van deze stromen is zo goed mogelijk in beeld gebracht wat de vrachten zijn aan diverse micronutriënten die hierin omgaan, en wat nu de gangbare verwerkingsroute is (baseline scenario). Ook heeft het projectteam voor elk van de stromen een aantal alternatieve verwerkingsscenario's gekozen, die mogelijk kunnen bijdragen aan het terugbrengen van de diverse micronutriënten in de kringloop. Deze zijn in dit rapport uitgewerkt. De wettelijke kaders die bij deze stromen en verwerkingen spelen bepalen wat er juridisch wel en niet mogelijk is. Dit rapport bevat een beknopte toelichting bij deze wettelijke kaders, waarin gelinkt wordt naar de betreffende wetteksten.

Geselecteerde stromen en scenario's

De door het projectteam geselecteerde reststromen en scenario's zijn:

GFE/swill (etensresten)

- Vergisten, eventueel scheiden vast/vloeibaar en terugwinnen van nutriënten.
- Cascadering met bijvoorbeeld terugwinning van vetzuren, de rest vergisten en eventueel drogen en pelletiseren.

Zuiveringsslib

Directe afzet in de landbouw van:

- (behandeld) slib,
- Schone (industriële) slibstromen,
- Restfracties: assen of slib na extractie van nutriënten,
- Slib uit brongescheiden systemen.

Urine

- Verwerkingsmethode o.b.v. filtratie en verdamping (ontwikkeld door projectpartner Semilla).
- Struvietprecipitatie met 'bijvangst' van micronutriënten.

Uitwerking van scenario's: uitgangspunten, opgenomen informatie en beperkingen

Voor de drie reststromen zijn de verwerkingsroutes (baseline en alternatieve scenario's) en de in- en uitgaande stromen beschreven. Voor sommige stromen geldt dat er in de huidige situatie meerdere verwerkingsroutes zijn. In dat geval is hierbij uitgegaan van de meest voorkomende verwerkingsroute; alternatieve verwerkingsroutes worden wel kort genoemd maar zijn niet verder uitgewerkt. Per reststroom wordt beschreven waar deze momenteel vrijkomt, en wat de eigenschappen zijn. Een deel van de micronutriënten valt ook onder de groep zware metalen. Daarnaast vormen zware metalen geregeld een juridisch obstakel voor het terugbrengen van stromen naar de landbouw. Om deze reden

is er naar zowel micronutriënten als zware metalen gekeken. Concentraties en vrachten micronutriënten/zware metalen in de verschillende stromen zijn zo goed mogelijk berekend, voor zover er bruikbare gegevens beschikbaar waren. De praktische en juridische haalbaarheid worden benoemd, en een indruk van de toekomstbestendigheid.

Algemene beperkingen en kennishiaten

Beperkingen en relevante kennishiaten zijn geïdentificeerd. Een aantal hiervan zijn generiek voor alle bestudeerde stromen, andere zijn meer scenario-specifiek. Over het algemeen kan gesteld worden dat de hoeveelheid goed beschikbare data beperkt was, zeker m.b.t. de micronutriënten die niet ook onder de zware metalen vallen.

Er zijn uitsluitend eenvoudige berekeningen gedaan van bijvoorbeeld concentratie naar vracht en verdeling over verschillende stromen. Waar mogelijk is gebruik gemaakt van specifieke informatie over verwerkingstechnologieën. Waar deze niet beschikbaar was hebben de auteurs aannames gedaan op basis van de eigen ervaring en expertise. Tijdens de verwerking spelen complexe chemische en biologische processen, die invloed hebben op waar de micronutriënten uiteindelijk terechtkomen. In een eventueel meer gedetailleerde vervolguiterwerking zou hier ook naar gekeken moeten worden.

Naast de beperkte databeschikbaarheid, is er het aspect van datakwaliteit. Veel van de gevonden informatie is indicatief, en de representativiteit voor de algemene Nederlandse situatie is vaak moeilijk in te schatten. De focus ligt bij reststromen in het kader van meststoffenproductie over het algemeen op de macronutriënten; het aantal bronnen dat gehalten voor zware metalen geeft is klein, en voor micronutriënten nog kleiner. Verder zijn de gebruikte detectielimieten voor een deel van de elementen te hoog. Daarnaast was er in verschillende publicaties sprake van onduidelijke eenheden, of gebrek aan informatie om eenheden om te kunnen rekenen naar een bruikbare eenheid voor vergelijking van bronnen onderling.

De uitwerkingen in dit rapport moeten gezien worden als een eerste verkenning van het potentieel voor micronutriëntenterugwinning uit de onderzochte reststromen. Een deel van de nu naar voren gekomen kennishiaten zou mogelijk aangevuld kunnen worden met grondigere en meer gedetailleerde literatuurstudies, deze lagen nu echter buiten de reikwijdte van het onderzoek. Gezien de nu geconstateerde beperkingen in de data, is de aanbeveling om bij het ontwikkelen van concepten voor de terugwinning van micronutriënten vooral ook in te zetten op representatieve metingen.

Juridische aspecten

Bij de verwerking van afvalstromen tot meststoffen heeft men te maken met wettelijke kaders rond afvalstoffen en meststoffen, en specifiek bij GFE/swill ook met regelgeving m.b.t. dierlijke bijproducten. In zowel Nederlandse als Europese meststoffenregelgeving staat gedefinieerd welke afvalstoffen gebruikt kunnen worden als (bestanddeel van) meststoffen. GFE/swill valt onder bioafval, dat als compost (NL en EU) of als digestaat (EU) gebruikt kan worden. Zuiveringsslib is opgenomen in de Nederlandse meststoffenwetgeving. Urine valt echter onder afvalwater en dit beperkt de mogelijkheden. Struviet is onder voorwaarden wel toegestaan als meststof.

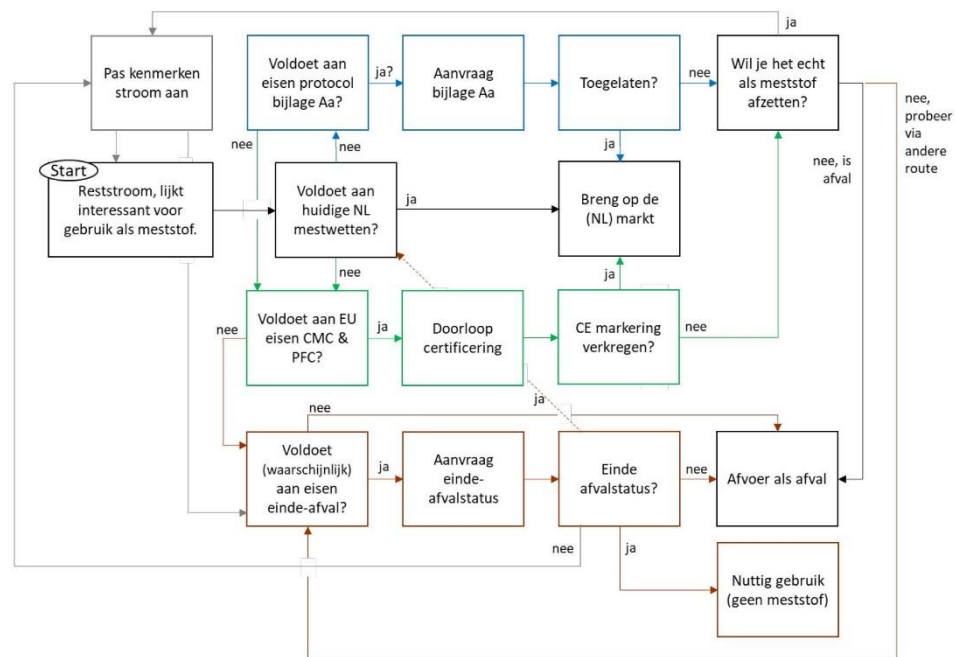
Er zijn verschillende routes om van een afvalstof tot een goedgekeurde meststof te komen:

- Voldoen aan de eisen die binnen de Nederlandse wetgeving gesteld worden. Dit betekent dat voldaan wordt aan de algemene eisen in de verschillende besluiten en regelingen, of toelating

krijgen op de zogenaamde 'Bijlage Aa', waarop reststromen staan die bij ministerieel besluit zijn toegelaten voor gebruik in de landbouw.

- Voldoen aan de eisen voor EU-meststoffen. Dit betekent voldoen aan de eisen voor meststoffenbestanddelen en voor meststoffenproducten. Hier zijn opties voor bioafval, struviet en producten uit slibas. Na een certificeringstraject kan het product als CE-meststof verhandeld worden.
- Het traject van de einde-afval status.

Onderstaand figuur geeft een schematische weergave van deze routes, op hoofdlijnen. In het wettelijk kader zijn naast de wetgeving m.b.t. meststoffen ook het afvalbeleid en de milieuwetgeving van belang.



Houd ook rekening met o.a. afvalbeleid, milieuwetgeving en regels rond dierlijke bijproducten.

Figuur 2-1. Schematisch beknopt overzicht op hoofdlijnen van de routes van afval- naar meststof.

Scenario's bioafval (GFE/swill)

Deze afvalstroom wordt momenteel deels gescheiden ingezameld via de huishoudelijke gfte inzameling van voornamelijk laagbouw, en een klein deel via gescheiden inzameling van organisch bedrijfsafval. Met name voor bedrijfsafval is weinig inzicht in de hoeveelheden. Het is de verwachting dat er significante stromen vrij gaan komen met het beter inzamelen van GFE uit met name hoogbouw, en toenemende aandacht voor organisch bedrijfsafval. Deze stromen, bestaan voornamelijk uit etenresten en zouden apart van het GFTe verwerkt kunnen worden. De bekeken alternatieve scenario's hiervoor zijn via vergisting tot digestaat als CE-meststof, en cascadering tot verschillende producten.

De aparte verwerking van GFE/swill tot digestaat is praktisch en waarschijnlijk ook juridisch haalbaar, hierbij zijn betere data nodig om goed in te kunnen schatten of aan alle eisen voor CE-certificering wordt voldaan. Bij cascadering wordt uiteindelijk ook digestaat geproduceerd; de meer hoogwaardige stoffen die in eerdere stappen gemaakt kunnen worden hebben wel te maken met een afvalstatus, wat de toepassing beperkt. Voor de toekomst is dit wel een interessante route om GFE/swill meer hoogwaardig te verwerken.

Onderstaande tabel geeft de berekende vracht aan micronutriënten en zware metalen in potentieel extra ingezameld GFE/swill. Deze getallen zijn indicatief, er waren weinig bruikbare databronnen beschikbaar. Zie ook de eerder beschreven beperkingen. Daarnaast zijn de getallen gebaseerd op onzekere aannames m.b.t de hoeveelheden in de toekomst te verwachten apart ingezamelde GFE/swill.

Stofnaam	Jaarlijkse vracht (kg)
As	52
B	2.768
Cd	68
Co	240
Cr	873
Cu	1.254
Fe	87.349
Hg	4,9
Mg	127.180
Mn	9.630
Mo	578
Ni	1.940
Pb	1.508
Se	84
Zn	4.304

De vrachten aan micronutriënten en zware metalen die met de etensresten worden ingezameld komen in theorie helemaal beschikbaar met het digestaat. Ook wanneer cascadering wordt toegepast met eerst winning van vetzuren en daarna verdere verwerking tot digestaat en eventuele andere meststoffenproducten. Tijdens de verwerking kunnen er verschillende factoren een rol spelen waardoor er enerzijds metalen vrijkomen uit materialen zoals leidingen, (opslag)tanks en bijvoorbeeld coatings en anderzijds metalen neerslaan als gevolg van bepaalde procescondities. Hierover is binnen de uitgevoerde studie weinig concrete informatie gevonden, en deze effecten op de potentieel terug te winnen vrachten zijn dan ook buiten beschouwing gelaten.

Scenario's zuiveringsslib

Na uitwerken van de scenario's "saneren aan de bron", "thermofiele vergisting" en "brongescheiden systemen" blijkt dat geen van deze routes aantoonbaar leidt tot een slibsamenvatting die aan de wettelijke normen voor landbouwkundig gebruik voldoet. Mogelijke uitzonderingen hierop zijn zeer schone slibstromen uit bijvoorbeeld de levensmiddelenindustrie. Koper en zink zijn probleemstoffen bij het voldoen aan de wettelijke eisen. Van de vrachten die hiervan op het riool worden geloosd is het merendeel afkomstig van consumenten. Het afkoppelen van industrieën is dus geen algemene oplossing, hoewel dit plaatselijk mogelijk wel kansen kan geven. Om dit te kunnen evalueren is informatie nodig over slib van individuele rwzi's en het type afvalwater dat daar wordt verwerkt.

Afkoppelen van al het toiletwater geeft een reductie van circa 15% voor beide stoffen, dit is niet voldoende. Ook het slib van de aparte verwerking van toiletafvalwater voldoet overigens niet aan de eisen, zie onderstaande tabel. De gehalten zijn weergegeven in mg/kg ds.

Stofnaam	Gehalte in slib van vergisting van zwart water	Gehalte in zuiverings-slib (berekend o.b.v. gegevens §4.2)	Norm Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet
Cd	0,8	1,0	1,25
Cr	12	39	75
Cu	234	391	75
Hg	0,4	0,5	0,75
Ni	12	26	30
Pb	25	84	100
Zn	848	1057	300
As	5,7	11	15

Extractie van mineralen via de slibas-route is op zich veelbelovend, in de EU-meststoffenverordening is er een bestanddelencategorie die hierbij past. Er zijn veel technieken mogelijk, maar voor geen van allen is voldoende informatie beschikbaar om een kwantitatieve evaluatie te maken. Verder is het zo dat alle technieken niet selectief zijn, zoals ook toegelicht in het hoofdrapport van WP4, waardoor naast micronutriënten ook zware metalen worden gewonnen. Dit is ongunstig voor de samenstelling. Een mogelijke toepassing buiten de landbouw is het inzetten van metaalzoutoplossingen uit P-winning uit slibas op rzwi's ter vervanging van ijzerchloride dat gedoseerd wordt om P te verwijderen.

Urine

Voor urine is er gekeken naar de potentiële terugwinning via filtratie en verdamping, alleen verdamping, en 'bijvangst' van micronutriënten in struviet. Door (filtratie en) verdamping worden alle nutriënten uit urine geconcentreerd in een klein volume. Voor de berekende jaarlijkse vrachten (kg) zie onderstaande tabel.

Stofnaam	Semilla Concept 1: nanofiltratie, RO, verdamping	Semilla Concept 2: enkel verdamping (terugwinpotentieel gelijk aan totale vracht in urine)
As	1.337	1.379
Cd	17	17
Hg	3,7	3,8
Pb	65	67
Ni	39	39
Cr	35	35
Cu	248	253
Zn	2.100	2.100
B	6.210	9.554
Co	43	43
Fe	74	75
Mg	1.050.820	1.050.820
Mn	1,2	1,2
Se	147	147

Struviet is een onder voorwaarden erkende meststof, waarmee de juridische hindernis van de afvalstatus van urine zou worden overkomen. Uit onderzoek aan struvietvorming uit urine is gebleken dat de hoeveelheid zware metalen in struviet laag is. Hoewel dit gunstig is voor het voldoen aan de normen voor gebruik als meststof, betekent dit ook dat het terugwinningspotentieel voor metalen laag is. De beschikbare data voor micronutriënten in struviet waren echter zo beperkt, dat de berekende jaarvrachten voor struviet onbetrouwbaar en daarom niet in de tabel hierboven gerapporteerd zijn.

De inzameling van urine is een logistieke uitdaging, maar er zijn kansen als de aparte verwerking van urine in de belangstelling blijft staan. Net als bij de andere reststromen ontbreekt het aan data specifiek voor Nederlandse urine, en in het algemeen aan goed bruikbare meetgegevens voor de verschillende micronutriënten in urine. In het geval van de methode van Semilla zullen gegevens beschikbaar gaan komen wanneer de technologie in pilots en later in de praktijk wordt toegepast. Voor de evaluatie van een eventuele opname op Bijlage Aa of een einde-afvalstatus is de beschikbaarheid van goede meetgegevens onmisbaar.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	4
1.1 TKI-MIK en specifiek WP4	4
1.2 Selectie van stromen en scenario's	4
1.3 Uitwerking van scenario's: uitgangspunten, opgenomen informatie en beperkingen	5
1.4 Algemene beperkingen en kennishiaten	6
2. Juridische aspecten	8
2.1 Nederlandse en Europese wetgeving	8
2.2 Afval	8
2.2.1 Afvalhiërarchie en minimumstandaard	8
2.2.2 Afvalstatus	9
2.2.3 Afvalscheiding en -inzameling	10
2.2.4 GFE (etensresten)	10
2.2.5 Dierlijke bijproducten	11
2.3 Meststoffen	12
2.3.1 Overzicht Nederlandse wetten, besluiten en regelingen	12
2.3.2 Europese meststoffenverordening	12
2.3.3 Specifieke regelgeving m.b.t. micronutriënten	13
2.3.4 Meststoffen uit afval	13
2.4 Milieuwetgeving	14
2.5 Bioafval	14
2.6 De afvalwaterketen en meststoffen	15
2.7 Zuiveringslib	17
3. Groente-, fruit- en etensresten (GFE)	19
3.1 Afbakening van deze afvalstroom	19
3.2 Huidige situatie (baseline scenario)	19
3.2.1 Verwerkingsmethode	19
3.2.2 Gescheiden ingezameld huishoudelijk GFE	20
3.2.3 Huishoudelijk GFE in het restafval	21
3.2.4 Hoogbouw	21
3.2.5 Bedrijfsmatig geproduceerd GFE	22
3.2.6 Micronutriënten in GFE/swill	23
3.3 Toekomstige ontwikkelingen	24
3.3.1 Afvalscheiding en -inzameling	24
3.3.2 Hoeveelheid en kwaliteit van gescheiden ingezameld bioafval	25
3.3.3 Verwerkingsmethoden	26
3.3.4 Niet-genormeerde risico's	27
3.4 Toekomstig scenario 1: Vergisten voor gebruik van het digestaat als meststof	28
3.4.1 Toegepaste technologie	28
3.4.2 Hoeveelheden micronutriënten die via digestaat worden teruggewonnen	28
3.4.3 Praktische haalbaarheid	29
3.4.4 Juridische haalbaarheid	30
3.4.5 Toekomstbestendigheid	30
3.5 Toekomstig scenario 2: Cascadering voor winning van meerdere producten	31
3.5.1 Toegepaste technologie	31
3.5.2 Hoeveelheden micronutriënten die via producten worden teruggewonnen	31
3.5.3 Praktische haalbaarheid	31
3.5.4 Juridische haalbaarheid	32
3.5.5 Toekomstbestendigheid	32
3.6 Beperkingen en kennishiaten	32
3.7 Recente projecten rond bioafvalverwerking	33

4.	Zuiveringsslib	35
4.1	Afbakening van deze afvalwaterstroom	35
4.1.1	Communaal zuiveringsslib	35
4.1.2	Industrieel zuiveringsslib	35
4.2	Huidige verwerking	36
4.2.1	Verwerkingsroutes zuiveringsslib	36
4.2.2	Hoeveelheden zware metalen en herkomst	38
	Tabel 4-3. Gemiddelde concentraties zware metalen in zuiveringsslib, 2020 (CBS Statline 2023)	38
4.2.3	Vrachten OS, N, P en micronutriënten in slib	42
4.2.4	Primair en secundair zuiveringsslib	44
4.3	Recente en toekomstige ontwikkelingen	45
4.3.1	Verder afkoppelen van hemelwater	45
4.3.2	Aangescherpte effluenteseisen / verwijdering van microverontreinigingen	45
4.3.3	Toepassing van andere/meer technologieën op rwzi's	45
4.3.4	Niet genormeerde risico's	46
4.4	Toekomstige verwerking: uitwerking gekozen scenario's	47
4.5	Toekomstig scenario 1: Saneren aan de bron	47
4.5.1	Toegepaste technologie	47
4.5.2	Haalbaarheid	47
4.6	Toekomstig scenario 2: Thermofiele vergisting	48
4.6.1	Toegepaste technologie	48
4.6.2	Hoeveelheden micronutriënten	48
4.6.3	Haalbaarheid en toekomstbestendigheid	48
4.7	Toekomstig scenario 3: Extractie van mineralen	49
4.7.1	Toegepaste technologie	49
4.7.2	Micronutriënten-terugwinning en haalbaarheid	50
4.8	Toekomstig scenario 4: Brongescheiden systemen (Nieuwe Sanitatie)	50
4.8.1	Toegepaste technologie	50
4.8.2	Hoeveelheden micronutriënten die via producten worden teruggewonnen	51
4.8.3	Haalbaarheid en toekomstbestendigheid	52
4.9	Kennishiaten	53
4.10	Recente projecten rond zuiveringsslib	53
5.	Urine	55
5.1	Afbakening van deze afvalstroom	55
5.2	Huidige verwerking	55
5.2.1	Verwerkingsroutes urine	55
5.2.2	Concentraties N, P en micronutriënten in urine	56
5.3	Recente en toekomstige ontwikkelingen	58
5.3.1	Gescheiden inzameling en verwerking van urine	58
5.3.2	Niet genormeerde risico's	59
5.4	Toekomstig scenario 1: Aparte urine-inzameling gevolgd door membraanfiltratie en toepassing van concentraat in de landbouw	59
5.4.1	Toegepaste technologie	59
5.4.2	Hoeveelheden micronutriënten die via producten worden teruggewonnen	60
5.4.3	Praktische haalbaarheid	60
5.4.4	Juridische haalbaarheid	61
5.4.5	Toekomstbestendigheid	61
5.5	Toekomstig scenario 2: Aparte inzameling en winning van struviet voor toepassing in de landbouw	61
5.5.1	Toegepaste technologie	61
5.5.2	Hoeveelheden micronutriënten die via producten worden teruggewonnen	61
5.5.3	Praktische haalbaarheid	63
5.5.4	Juridische haalbaarheid	63
5.5.5	Toekomstbestendigheid	63



5.6 Kennishiaten	63
5.7 Recente projecten rond urine	64
Literatuurlijst.....	65

1. Inleiding

1.1 TKI-MIK en specifiek WP4

Deze rapportage is onderdeel van het TKI-project 'Micronutriënten in de kringloop'. Micronutriënten zijn essentiële elementen die organismen in kleine hoeveelheden nodig hebben om cruciale fysiologische functies uit te voeren. Micronutriënten worden vaak gewonnen uit eindige bronnen, wat in de toekomst kan leiden tot schaarste. Reststromen bevatten relatief kleine hoeveelheden micronutriënten, die mogelijk teruggewonnen kunnen worden. Deze optie zal vanwege de aankomende schaarste steeds interessanter worden. In Werkpakket 4 (WP4) van het TKI-MIK project is de potentie voor micronutriëntenterugwinning voor een aantal afvalstromen onderzocht. De uitkomsten van WP4 worden in dit rapport beschreven.

Het projectteam heeft een aantal reststromen geselecteerd, te weten bioafval, zuiveringsslib en urine. Van deze stromen is in beeld gebracht wat de vrachten zijn aan diverse micronutriënten die hierin omgaan, wat nu de gangbare verwerkingsroute is (baseline scenario) en waar de diverse micronutriënten in dit scenario terechtkomen. Vervolgens is voor diverse alternatieve scenario's bekeken wat de potentie is van het terugbrengen van de diverse micronutriënten in de kringloop en wat mogelijke kansen, belemmeringen en risico's zijn.

Een deel van de micronutriënten valt ook onder de groep zware metalen. Vanwege de overlap tussen deze groepen is voor deze rapportage gekeken naar zowel micronutriënten als naar zware metalen. Een aanvullende reden om zware metalen mee te nemen, is dat (te) hoge concentraties hiervan een belemmering kunnen zijn voor bepaalde toepassingen, met name in de landbouw.

1.2 Selectie van stromen en scenario's

Om te komen tot een selectie van stromen en scenario's, hebben de bij WP4 betrokken consortiumpartners eerst samen een overzicht gemaakt van relevante reststromen met bijbehorende verwerkingsscenario's, specifiek hierbij in te zetten technologieën en de resulterende herwonnen grondstoffen. Hierbij is gewerkt vanuit het oogpunt dat zowel de reststroom als het scenario relevant zouden zijn om verder uit te werken in het project. Na het samenstellen van het overzicht hebben de deelnemers elk een aantal scenario's geïdentificeerd die mogelijk interessante routes voor terugwinning van micronutriënten kunnen opleveren, en hier relevante informatie voor aangeleverd. De voorgedragen opties zijn besproken waarna er 4 stromen zijn uitgekozen:

GFE en vergelijkbare organische reststromen:

GFE (keukenafval) bevat allerlei macro- en micronutriënten en het is de ambitie om de gescheiden inzameling van deze afvalstroom sterk te verbeteren. Momenteel bevindt zich nog een groot deel van de etensresten in het restafval. Als deze stroom inderdaad sterk gaat groeien, voorbij de huidige verwerkingscapaciteit, geeft dit kansen voor het opzetten van alternatieve verwerkingstechnieken. Genoemde scenario's om uit te werken zijn:

- Vergisten, eventueel scheiden vast/vloeibaar en terugwinnen van nutriënten.
- Cascadering met bijvoorbeeld terugwinning van vetzuren, de rest vergisten en eventueel drogen en pelletiseren.

Slib uit de afvalwaterzuivering:

Zuiveringsslib bevat allerlei macro- en micronutriënten en wordt in sommige landen als meststof gebruikt. In Nederland is afzet naar de landbouw voor veruit het meeste slib niet mogelijk omdat niet wordt voldaan aan normen voor met name koper- en zinkgehalten. Momenteel wordt bijna al het zuiveringsslib verbrand, waardoor de nutriënten verloren gaan. Ook is dit een grote kostenpost voor de waterschappen, waarmee er naast een circulaire ook een financiële drijfveer is om slib een landbouwbestemming te geven. Mogelijk kan de samenstelling van slib aangepast worden, of voldoen bepaalde deelstromen die nu niet in beeld zijn wel aan de normen. Genoemde scenario's zijn de afzet in de landbouw van:

- (behandeld) Slib,
- Schone (industriële) slibstromen,
- Restfracties: assen of slib na extractie van nutriënten,
- Slib uit brongescheiden systemen.

Urine:

Veel van de macro- en micronutriënten uit onze voeding komen terecht in de urine. Urine staat daarom de laatste jaren in de belangstelling voor gebruik in de landbouw en als bron van meststoffen. Vanwege de aanwezigheid van o.a. medicijnresten en andere ongewenste stoffen lijkt opwerking tot meststof een betere route dan direct gebruik van urine. Projectpartner Semilla is bezig met het ontwikkelen van een verwerkingsmethode voor urine, voor de productie van een concentraat dat als meststof moet kunnen worden toegepast. Struvietprecipitatie is een bekende methode voor het winnen van fosfaat uit urine. Op relatief grote schaal is dit in Nederland in het verleden gedaan in de SaNiPhos-installatie van GMB in Zutphen, en met urine van AFAS live in struvietreactor 'Fosvaatje' van Waternet op rwzi Amsterdam West. Struviet wordt toegepast als meststof, en eventuele micronutriënten die tijdens de precipitatie in het struviet worden opgenomen komen zo terug in de kringloop. Zowel de methode van Semilla als struvietprecipitatie zijn in deze studie opgenomen als scenario.

Afval uit tuinbouwkassen (vervallen):

De planten die geen vrucht meer dragen komen uit tuinbouwkassen vrij als reststromen (kassenloof). In de tuinbouw worden nutriëntenoplossingen gebruikt, waar onder andere ook micronutriënten aan worden toegevoegd. Er zijn ideeën om de nutriënten die door de planten zijn opgenomen, uit de sapstromen van deze planten terug te winnen en te concentreren.

(Na een controle op de beschikbaarheid van data bleek dit erg tegen te vallen en is besloten deze stroom niet uit te werken.)

In de volgende hoofdstukken wordt een overzicht op hoofdlijnen van de voor bovengenoemde reststromen relevante wet- en regelgeving gegeven. Daarna wordt per stroom de huidige stand van zaken en de alternatieve scenario's uitgewerkt, waarbij de potentie voor kringloopsluiting van de daarin aanwezige micronutriënten zo goed mogelijk in kaart wordt gebracht.

1.3 Uitwerking van scenario's: uitgangspunten, opgenomen informatie en beperkingen

Voor alle drie de stromen zijn de verwerkingsroutes (baseline en alternatieve scenario's) en de in- en uitgaande stromen beschreven. Voor sommige stromen geldt dat er in de huidige situatie meerdere verwerkingsroutes zijn. In dat geval is hierbij uitgegaan van de meest voorkomende verwerkingsroute; alternatieve verwerkingsroutes worden wel kort genoemd maar zijn niet verder uitgewerkt.

Per reststroom wordt beschreven waar deze momenteel vrijkomt, en wat de eigenschappen zijn. Concentraties en vrachten micronutriënten in de verschillende stromen zijn zo goed mogelijk ingeschat, voor zover er bruikbare gegevens beschikbaar waren. De praktische en juridische haalbaarheid worden benoemd, en een indruk van de toekomstbestendigheid.

De volgende bronnen zijn o.a. gebruikt, aangevuld met eigen kennis en expertise van de auteurs:

- CBS Statline
- Watson database
- Waves databank
- Stowa-rapporten
- Wetenschappelijke literatuur

De zware metalen waarvoor normen in het meststoffenbesluit zijn opgenomen, zijn in alle scenario's meegenomen. Voor micronutriënten was voor bioafval en urine relatief weinig informatie beschikbaar. Vanwege de wettelijke consequenties die eraan verbonden zijn, zijn er relatief veel meetgegevens beschikbaar voor zware metalen vergeleken met de micronutriënten die niet onder de zware metalen vallen.

1.4 Algemene beperkingen en kennishiaten

Beperkingen en relevante kennishiaten zijn geïdentificeerd. Een aantal hiervan zijn generiek voor alle bestudeerde stromen, deze worden hieronder beschreven. Scenario-specifieke beperkingen en kennishiaten worden in het betreffende hoofdstuk benoemd.

Pragmatische berekeningen gericht op deze studie

Er zijn geen complexe chemische berekeningen uitgevoerd, uitsluitend eenvoudige berekeningen van bijvoorbeeld concentratie naar vracht en verdeling over verschillende stromen. Hierbij is waar mogelijk gebruik gemaakt van specifieke informatie over verwerkingstechnologieën, en waar deze niet beschikbaar was hebben de auteurs aannames gedaan op basis van de eigen ervaring en expertise. De uitwerkingen in dit rapport moeten dan ook gezien worden als een eerste verkenning van het potentieel voor micronutriëntenterugwinning uit de onderzochte reststromen.

Beschikbaarheid van data

Voor alle reststromen geldt dat er weinig goed bruikbare data beschikbaar is over de aanwezigheid en het lot van micronutriënten. Dit geldt met name voor de micronutriënten die niet ook vallen onder de zware metalen. Voor meststoffen uit gft en etensresten (compost) en voor zuiveringsslib zijn er normen voor zware metalen, deze stoffen worden daarom wel gemeten. Zuiveringsslib en rwzi-effluent zijn de best gemonitorde stromen, de gehalten aan zware metalen zijn goed in kaart gebracht. Dit is wel veelal op nationaal niveau, variaties op lokaal niveau (potentieel relevant voor de uitgewerkte scenario's) zijn hier niet goed uit te halen. Voor etensresten als aparte fractie zijn relatief weinig data beschikbaar, en ditzelfde geldt voor aparte rioolwaterfracties zoals urine.

Beperking in tijd gezien de onderzoeksvraag

De uitgevoerde literatuurstudies zijn relatief oppervlakkig gebleven in de zin dat er gestopt werd zodra met de meest voor de hand liggende zoektermen de direct beschikbare informatie gevonden was. Binnen de reikwijdte van deze studie en gezien de aantallen scenario's die voor uitgewerkt gekozen waren was er geen tijd voor een gedetailleerde review van alle wetenschappelijke en vakliteratuur.

Kwaliteit en representativiteit van data

Naast de beperkte databeschikbaarheid, is er het aspect van datakwaliteit. Veel van de gevonden informatie is indicatief, bijvoorbeeld eenmalige analyses aan etensresten van één restaurant of aan één batch urine. Ook zijn er weinig bronnen specifiek voor Nederland. De representativiteit is daardoor moeilijk in te schatten. Daarnaast ligt de focus bij analyses van de reststromen in het kader van meststoffenproductie over algemeen op de macronutriënten. Het lijkt erop dat analyses op zware metalen en zeker de andere micronutriënten, uitgevoerd worden als iets dat interessant is voor erbij. De methodes lijken niet altijd aangepast aan de te verwachten concentraties. Detectielimieten voor meerdere van de metalen zijn vaak te hoog, dit lijkt soms te zijn vanwege beperkingen van de gekozen methode (als de opgegeven limiet hoger is dan in andere publicaties) en soms omdat de concentraties erg laag zijn.

Wijze van documenteren van gehalten

Vooraf voor de data m.b.t. nieuwe sanitatie was het soms vanwege verschillen in eenheden lastig om de beschikbare gegevens te gebruiken. Gehaltes zware metalen worden in verschillende eenheden gegeven en de benodigde informatie om deze betrouwbaar om te rekenen naar één zelfde eenheid is niet altijd beschikbaar. Variaties zijn bijvoorbeeld mg/l, mg/kg ds en mg/kgP. In sommige publicaties is onduidelijk hoe de analyses precies zijn uitgevoerd, welke eenheid vervolgens gerapporteerd wordt, of worden eenheden in de tekst besproken en niet bij tabellen genoemd. Al met al vergt het veel tijd om de juiste data te vinden, en te beoordelen op bruikbaarheid. Binnen een studie met beperkte tijd voor literatuuronderzoek is dat een beperking.

2. Juridische aspecten

Bij de verwerking van afvalstromen tot nutriëntenproducten zijn verschillende wettelijke kaders van belang: afval, milieu, meststoffen en dierlijke bijproducten. Binnen de reikwijdte van dit onderzoek was het niet mogelijk om een volledig overzicht van alle juridische aspecten te geven. De meest in het oog springende onderdelen van wet- en regelgeving worden hieronder kort benoemd, met daarbij een focus op de productie en kwaliteit van materiaalstromen (bijv. meststoffen) die binnen de geanalyseerde scenario's voorkomen. In de uitwerking van de scenario's met bijbehorende interpretatie van juridische aspecten wordt verwezen naar dit hoofdstuk.

2.1 Nederlandse en Europese wetgeving

In Nederland hebben we te maken met zowel het Nederlandse als het Europese wettelijke kader. Op hoofdniveau zijn er de *kaderrichtlijnen* (EU Framework Directives) en *richtlijnen* (EU Directives) waarin de doelen zijn vastgelegd die men als EU wil bereiken. De richtlijnen worden door de verantwoordelijke overheden zelf "vertaald" naar concrete regels in nationale wetgeving, zodat de doelen op tijd worden bereikt. *Verordeningen* (EU Regulations) zijn daarentegen rechtstreeks toepasbaar en bindend in alle lidstaten. Lidstaten nemen in de nationale wetgeving op hoe de verordening in de praktijk wordt geïmplementeerd.

2.2 Afval

Het Nederlandse afvalbeleid wordt beschreven in het [Landelijk afvalbeheerplan \(LAP3\)](#)¹ dat bestaat uit het beleidskader (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat 2021) en zogenaamde Sectorplannen. Hierin zijn de doelstellingen en uitgangspunten van de [EU Kaderrichtlijn Afvalstoffen \(2008/98/EG\)](#) verwerkt. De sectorplannen zijn het toetsingskader bij de vergunningverlening, hierin wordt o.a. de *minimumstandaard voor verwerking* beschreven, de minimale hoogwaardigheid van verwerking die voor de betreffende afvalstroom vereist is.

2.2.1 Afvalhiërarchie en minimumstandaard

Een van de algemene uitgangspunten voor het LAP3 is de afvalhiërarchie. Hierbij geldt dat hoogwaardigere verwerking in beginsel de voorkeur heeft boven een minder hoogwaardige verwerking. Het oordeel m.b.t. hoogwaardigheid heeft een directe relatie met de mogelijkheden voor hergebruik van grondstoffen en de beleidsuitgangspunten voor circulariteit. De afvalhiërarchie ligt aan de basis van de minimumstandaard. In Figuur 2-1 is de afvalhiërarchie schematisch weergegeven.

In de [sectorplannen van het LAP](#) wordt per afvalstof of categorie van afvalstoffen aangegeven wat binnen het Nederlands beleid de zogeheten minimumstandaard is voor de verwerking ervan (citatie): *"De minimumstandaard geeft de minimale hoogwaardigheid aan van de verwerking van een bepaalde afvalstof of categorie van afvalstoffen. Het vaststellen van een minimumstandaard voorkomt dat afvalstoffen laagwaardiger worden verwerkt dan wenselijk is"*. Bij het verlenen van vergunningen voor het verwerken van afvalstoffen wordt de verwerking o.a. getoetst aan de vastgestelde minimumstandaard.

¹ Het LAP3 zal worden opgevolgd door het Circulair Materialenplan (CMP), dat momenteel wordt opgezet. Zoals de namen aangeven is het LAP gericht op het beheer/verwerken van afvalstoffen en zal het CMP vooral ook aandacht geven aan (her)gebruik van grondstoffen – dus het voorkomen van afval.



Figuur 2-1 Een schematisch overzicht van de afvalhiërarchie zoals beschreven in [hoofdstuk A4 van het LAP](#). Zie ook [hoofdstuk B9](#) van het LAP, 'Recycling binnen de circulaire economie'.

2.2.2 Afvalstatus

De afvalstatus van een materiaal is een belangrijk aspect bij de verwerking tot meststof. In het algemeen mogen meststoffen namelijk niet gemaakt worden uit afvalstoffen of er mee vermengd worden, op enkele uitzonderingen na. Artikel 5 van het [Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet](#) (UBMW) stelt dat (citaat):

1. *Meststoffen, met uitzondering van zuiveringsslib, compost en herwonnen fosfaten, zijn niet geheel of gedeeltelijk geproduceerd uit afvalstoffen of uit reststoffen, tenzij het betreft de krachtens het tweede lid aangewezen stoffen.*
2. *Bij ministeriële regeling kunnen afvalstoffen of reststoffen, categorieën afvalstoffen of reststoffen of eindproducten van bij die regeling omschreven bewerkingsprocédés worden aangewezen, indien er naar het oordeel van Onze Minister geen landbouwkundige en milieukundige bezwaren bestaan dat deze stoffen als meststof worden verhandeld of bij de productie van meststoffen worden gebruikt.*
3. *Meststoffen zijn niet met afvalstoffen of reststoffen gemengd, tenzij het betreft de krachtens het tweede lid, aangewezen stoffen.*

In dit rapport worden verschillende scenario's beschreven die als doel hebben om afvalstromen te verwerken tot meststoffen, om zo de kringloop voor micronutriënten te sluiten. Om als meststof gebruikt te kunnen worden, moeten de verwerkingsproducten wel in overeenstemming met de meststoffenregelgeving kunnen worden toegepast op de bodem.

Zuiveringsslib, compost en herwonnen fosfaten zijn afvalstoffen die wel gebruikt mogen worden als meststoffen. Daarnaast zijn er een aantal reststoffen bij ministeriële regeling aangewezen, deze stoffen zijn opgenomen in [Bijlage Aa](#) van de Uitvoeringsregeling Meststoffenwet.

2.2.3 Afvalscheiding en -inzameling

Gescheiden inzameling van huishoudelijke en bedrijfsafvalstromen is het uitgangspunt van het afvalbeleid. Zie [hoofdstuk 3 van deel B van het LAP3](#) voor de regels m.b.t. afvalscheiding voor zowel huishoudelijk als bedrijfsafval.

Volgens het [Besluit gescheiden inzameling huishoudelijke afvalstoffen](#) zijn gemeenten verplicht om zich in te spannen voor de gescheiden inzameling van al het huishoudelijke gft/GFE. Alleen als er sprake is van onredelijk hoge kosten, of onoverkomelijke technische problemen kan van gescheiden inzameling worden afgeweken. De gemeente sluit een contract af voor inzameling en verwerking, en voorziet de huishoudens van afvalcontainers waarin zij hun (gescheiden) afval kunnen aanbieden voor inzameling. De kosten worden doorberekend aan de huishoudens via de afvalstoffenheffing.

De nationale ambities voor de scheiding en recycling van huishoudelijk afval zijn hoog. Om gemeenten hierbij te ondersteunen is er het Uitvoeringsprogramma 'Van Afval naar Grondstof - Huishoudelijk Afval (VANG-HHA)' van het Ministerie van I&W. De oorspronkelijke ambitie van het programma was om in 2020 te komen tot gemiddeld 75% afvalscheiding en maximaal 100 kilo restafval per inwoner. Daarnaast eist de Europese Kaderrichtlijn Afvalstoffen dat in 2025 minimaal 55% van het stedelijk afval wordt gerecycled. Deze doelstellingen werden in 2020 slechts door een minderheid van de gemeenten behaald (VANG-HHA 2022). Voor de periode 2021-2025 heeft een herijking van het Uitvoeringsprogramma plaatsgevonden. De nadruk ligt momenteel op preventie en op het verbeteren van de kwaliteit van de ingezamelde stromen (VANG-HHA 2022). Bioafval (zie volgende paragrafen uitwerking scenario's in hoofdstuk 3) is een van de sleutelstromen om te kunnen voldoen aan de beleidsdoelstellingen voor afvalscheiding en vermindering van de hoeveelheid restafval, aangezien gemiddeld nog één derde deel van het huishoudelijke restafval uit gft en etensresten bestaat (Rijkswaterstaat 2023).

Bedrijven sluiten zelf een contract af met een afvalinzamelingsbedrijf, of met de gemeentelijke afvalinzameling. Deze tweede optie is niet in alle gemeenten mogelijk. Ook kunnen er restricties zijn, zoals de hoeveelheden bedrijfsafval die mogen worden aangeboden. Vergelijkbaar met de afvalstoffenheffing voor huishoudens betalen bedrijven dan reinigingsrecht. Er zijn specifieke regels voor de gescheiden inzameling van organisch bedrijfsafval (swill, zie scenario uitwerking in hoofdstuk 3). Swill moet altijd apart ingezameld worden als dit dagelijks vrijkomt uit professionele keukens, handel en verkoop. Hierbij gelden uitzonderingen voor relatief kleine hoeveelheden en/of bedrijven met erg weinig ruimte. Organisch bedrijfsafval is een deelstroom van wat Kantoor- Winkel en Dienstenafval (KWD-afval) of Handel, Diensten en Overheids-afval (HDO-afval) wordt genoemd.

2.2.4 GFE (etensresten)

GFE is een deelstroom van 'bioafval', een begrip uit de Kaderrichtlijn afvalstoffen, dat relatief recent in de [Wet milieubeheer](#) is opgenomen. Ook in de EU Meststoffenverordening wordt het begrip bioafval gebruikt. De wettelijke definitie luidt:

Biologisch afbreekbaar tuin- en plantsoenafval, levensmiddelen- en keukenafval van huishoudens, kantoren, restaurants, groothandel, kantines, cateringfaciliteiten en winkels en vergelijkbare afvalstoffen van de levensmiddelenindustrie.

In het LAP3 (deel F, bijlage 3) wordt een toelichting gegeven bij het begrip bioafval:

De volgende afvalstoffen vallen geheel of gedeeltelijk onder het begrip 'bioafval' en worden in het LAP gebruikt om specifieke vormen van bioafval aan te duiden: gft-afval, levensmiddelenafval, groenafval, swill, grof tuinafval, plantsoenafval, organisch bedrijfsafval, etc.

Organisch afval van huishoudens en bedrijven valt beide onder bioafval, en bij de interpretatie van gegevens was dit soms wel een aandachtspunt.

Zoals eerder toegelicht is de ambitie om afval zo veel mogelijk gescheiden in te zamelen en zo hoogwaardig mogelijk te verwerken. Hoogwaardige verwerking is via de minimumstandaard ingebed in het afvalbeleid. Voor verwerking van GFE (etensresten) zijn zowel [sectorplan 6](#) als [sectorplan 7](#) uit het LAP3 van belang, respectievelijk "Gescheiden ingezameld/afgegeven groente-, fruit- en tuinafval van huishoudens (gft)" en "Gescheiden ingezameld/afgegeven organisch bedrijfsafval". Binnen sectorplan 7 gaat het dan om bioafval van bedrijven dat qua samenstelling vergelijkbaar is met huishoudelijk bioafval, ofwel de stroom die bekend staat onder de naam "swill". Tabel 2-1 geeft de minimumstandaard voor verwerking uit sectorplannen 6 en 7.

Tabel 2-1 De minimumstandaard voor verwerking van afvalstoffen en deelstromen zoals beschreven staat in [sectorplannen 6 en 7 van het LAP3](#), inclusief de toevoeging over digestaat n.a.v. het in werking treden van de EU Meststoffenverordening.

Afvalstoffen / deelstroom	Minimumstandaard voor verwerking (en eventuele voorwaarden)
Organisch bedrijfsafval en gft-afval	<ul style="list-style-type: none"> - Composteren met het oog op recycling of; - Vergisten met gebruik van het gevormde biogas als brandstof gevolgd door narijping (nacompostering of een andere vorm van aerobe droging) met het oog op recycling van het digestaat, - Vergisten met het oog op recycling van het digestaat als (bestanddeel in) een CE-meststof, onder voorwaarden van de EU Meststoffenverordening.
Residuen die ontstaan bij het verwerken van organisch bedrijfsafval of bij het verwerken van gft-afval	Verwijderen door verbranden.

Uit de tabel blijkt dat voor bioafval (gfte & swill) de minimumstandaard voor verwerking alleen wordt behaald door middel van composteren, door vergisten als het digestaat wordt nabehandeld en gerecycled, of via de CE-meststoffenroute. Dit betekent dat er geen vergunning mag worden gegeven voor een verwerking die qua hoogwaardigheid niet minimaal een toegestane meststof oplevert (zie §2.2.1).

2.2.5 Dierlijke bijproducten

Dit onderdeel van wetgeving is alleen van toepassing op de scenario's met bioafval (gft, gfe en swill). Etensresten bevatten vrijwel altijd afval van dierlijke oorsprong en daarom valt deze stroom onder de regelgeving voor 'dierlijke bijproducten'. Voorbeelden zijn vlees, vis, kaas, andere zuivelproducten en eierschalen. Er worden strenge eisen gesteld aan de omgang met en de verwerking van dierlijke bijproducten, omdat zij ziekteverwekkers kunnen bevatten. Denk aan o.a. salmonella en varkenspest.

Afval met daarin dierlijke resten wordt ingedeeld in drie categorieën. Categorie 1 materiaal geeft het grootste risico voor menselijke en dierlijke gezondheid, categorie 3 het minste. Keukenafval valt onder categorie 3, met een belangrijke uitzondering: keukenafval en etensresten zijn categorie 1-materiaal wanneer zij afkomstig zijn van internationale middelen van vervoer (bijvoorbeeld vliegtuigen en schepen die vanuit een derde land zijn vertrokken).

De Europese Verordening Dierlijke Bijproducten ([Verordening \(EG\) nr. 1069/2009](#)) en de bijbehorende Uitvoeringsverordening ([Verordening nr. 142/2011](#)) vormen de basis voor de wet- en regelgeving m.b.t. het omgaan met dierlijke bijproducten. Er wordt in detail beschreven waar de verwerking tot compost, digestaat, andere organische meststof of bodemverbeteraar aan moet voldoen. De verordening schrijft een standaard verwerkingsmethode voor, en een manier om op basis van onderzoek (“validatie”) een alternatief proces goed te laten keuren door de bevoegde autoriteit. In Nederland zijn de voorwaarden uit de Europese verordening opgenomen in het [Besluit dierlijke producten](#) en de [Regeling dierlijke producten](#). Verder is in de Nederlandse BDP en RDP uitgewerkt hoe de EU verordening in de praktijk wordt toegepast.

Samenvattend komt het erop neer dat voor de verwerking van bioafval een erkenning van de [NVWA](#) vereist is, die wordt verstrekt als aan de regels rond dierlijke bijproducten wordt voldaan. Voor de verwerking is het van belang dat aan de in de wet voorgeschreven procesparameters wordt voldaan, of dat er op een andere, aantoonbaar werkende, manier wordt gehygiëniseerd. Een gegarandeerde hygiënisering is een zeer voorname factor in het verkrijgen van een erkenning, maar er worden ook allerlei andere wettelijke eisen gesteld aan de omgang met de gehele installatie en de in- en uitgaande stromen. Hoe het proces wordt bedreven en hoe het wordt beheerst is hierbij de belangrijkste factor. Denk hierbij aan de mate van verkleining van deeltjes, of de opwarming natuurlijk of geforceerd is, de tijdsduur van de processtappen, en het meten, registreren en bewaken van temperatuur en tijd. Daarnaast wordt gekeken naar andere aspecten zoals de registratie van ingaand en uitgaand materiaal, de opslag van de in- en uitvoer, maatregelen tegen ongedierte, etc.

2.3 Meststoffen

2.3.1 Overzicht Nederlandse wetten, besluiten en regelingen

Wet- en regelgeving rond meststoffen is in Nederland vastgelegd in de [Meststoffenwet](#), die in meer detail is uitgewerkt in het [Uitvoeringsbesluit meststoffenwet](#), de [Uitvoeringsregeling meststoffenwet](#), het [Besluit gebruik meststoffen](#) (Bgm) en de [Uitvoeringsregeling gebruik meststoffen](#) (Ugm). Parallel aan de Nederlandse mestwetgeving is er de [Europese meststoffenverordening \(EU\) 2019/1009](#). In al deze wetteksten zijn generieke en specifieke regels vastgelegd voor alles wat met meststoffen te maken heeft. Denk aan de herkomst en de kwaliteit van meststoffen, maar ook de productie, de handel, het transport en het gebruik. Zie ook de [RVO website over mest](#). RVO is de uitvoeringsorganisatie van de overheid m.b.t. het mestbeleid.

Per 1 januari 2024, met de inwerkingtreding van de Omgevingswet, vervallen het Besluit gebruik meststoffen en de Uitvoeringsregeling gebruik meststoffen. Onder de Omgevingswet is het op of in de bodem brengen van meststoffen aangewezen als milieubelastende activiteit, zie artikel 3.48a van het [Besluit activiteiten leefomgeving \(Bal\)](#). De regels voor het gebruik van meststoffen zijn geïntegreerd in het Bal.

2.3.2 Europese meststoffenverordening

De [Europese meststoffenverordening \(EU\) 2019/1009](#), beter bekend onder de Engelse afkorting FPR (*Fertilising products regulation*), bevat voorschriften voor o.a. de herkomst en samenstelling van EU-bemestingsproducten, die met een CE-markering op de markt gebracht mogen worden. Er worden bestanddelen categorieën en productfunctie categorieën beschreven: CMC's (component material

categories) en PFC's (product function categories). Voor elke CMC en PFC worden verschillende eisen gesteld. Naast 'technische' eisen aan processen zoals compostering of vergisting en aan gehalten aan verontreinigingen of nutriënten betreft dit ook bijvoorbeeld het gebruik van partijnummers of andere productidentificatie, en de juiste etikettering.

Zuiveringsslib wordt in deze verordening alleen bij een aantal CMC's genoemd, niet in de algemene tekst. Bij CMC 3 (compost) en CMC 5 (ander digestaat dan digestaat van verse gewassen) wordt zuiveringsslib expliciet uitgesloten als ingrediënt of bronmateriaal. Als bronmateriaal is slib wel toegestaan in CMC 12, 13 en 15 maar dan gaat het over materialen zoals neergeslagen fosfaat-zouten, verbrandingsassen en door strippen verkregen ammoniumsulfaat. Compost en digestaat uit bioafval zijn via respectievelijk CMC 3 en CMC 5 wel toegelaten als bestanddeel in CE-meststoffen.

Het is niet voldoende om aan de eisen m.b.t. een CMC te voldoen, alleen als aan alle eisen voor een PFC wordt voldaan kan een CE-markering worden aangevraagd. Hierbij zijn niet alleen maximale gehalten voor verontreinigingen van belang, maar ook de nutriëntengehalten. Op dit moment is het nog niet mogelijk om het certificeringstraject voor CMC 3 en CMC 5 in Nederland te doorlopen, zie de [Europese lijst met organisaties die de certificering voor CE meststoffen verzorgen](#).

Op dit moment is nog niet duidelijk hoe de nieuwste EU meststoffenverordening precies in de Nederlandse meststoffenwetgeving geïntegreerd gaat worden. Vooralsnog blijven beiden naast elkaar bestaan; de producent kan kiezen onder welke wetgeving het product op de Nederlandse markt wordt gebracht.

2.3.3 Specifieke regelgeving m.b.t. micronutriënten

In het Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet en de Uitvoeringsregeling Meststoffenwet worden micronutriënten alleen beschreven vanuit de context van anorganische meststoffen. Er zijn minimale hoeveelheden nutriënten en maximale hoeveelheden verontreinigingen. Hierbij staan ook verwijzingen naar 'de meststoffenverordening', hiermee wordt nu nog de voorganger van de EU Meststoffenverordening 2019/1009 bedoeld, [EU verordening 2003/2003](#).

Ook in Verordening 2019/1009 komen micronutriënten met name voor in de teksten die betrekking hebben op anorganische meststoffen, en daarnaast worden zij ook genoemd bij de productgroep organo-minerale meststoffen. Hierbij wordt in de opgegeven regels onderscheid gemaakt tussen koper en zink, en andere micronutriënten.

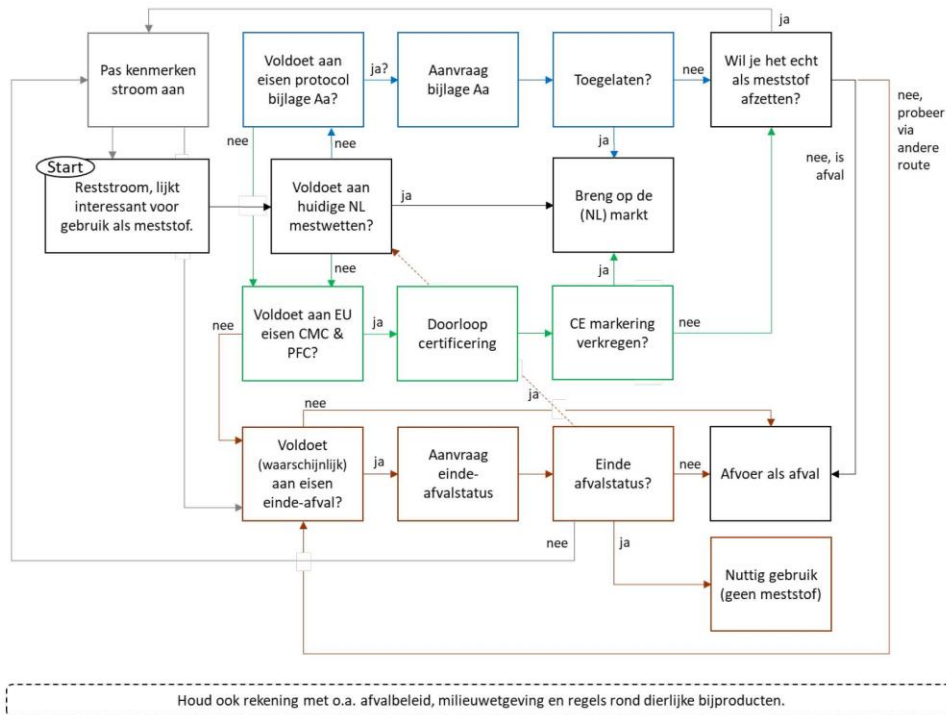
2.3.4 Meststoffen uit afval

Het uitgangspunt van het mestbeleid is dat afvalstoffen niet worden gebruikt als (component in) meststoffen, zie artikel 5 van het Uitvoeringsbesluit meststoffenwet (*citaat*):

1. *Meststoffen, met uitzondering van zuiveringsslib, compost en herwonnen fosfaten, zijn niet geheel of gedeeltelijk geproduceerd uit afvalstoffen of uit reststoffen, tenzij het betreft de krachtens het tweede lid aangewezen stoffen.*
2. *Bij ministeriële regeling kunnen afvalstoffen of reststoffen, categorieën afvalstoffen of reststoffen of eindproducten van bij die regeling omschreven bewerkingsprocédés worden aangewezen, indien er naar het oordeel van Onze Minister geen landbouwkundige en milieukundige bezwaren bestaan dat deze stoffen als meststof worden verhandeld of bij de productie van meststoffen worden gebruikt.*

3. Meststoffen zijn niet met afvalstoffen of reststoffen gemengd, tenzij het betreft de krachtens het tweede lid, aangewezen stoffen.

Onderstaand overzicht (Figuur 2-2) is een beknopte schematische weergave op hoofdlijnen, van de wettelijke routes van afval naar meststof.



Figuur 2-2. Schematisch beknopt overzicht op hoofdlijnen van de wettelijke mogelijkheden van afval- naar meststof.

2.4 Milieuwetgeving

Naast wet- en regelgeving rond afval- en meststoffen moet ook rekening gehouden worden met de milieuwetgeving. Deze is zeer uitgebreid, en een uitwerking hiervan valt buiten de scope van dit onderzoek. In het algemeen geldt dat nadelige gevolgen voor het milieu voorkomen moeten worden. Voor de verwerking van afvalstromen is vrijwel altijd een Omgevingsvergunning vereist. Per 1 januari 2024 is de [Omgevingswet](#) van kracht, en daarmee het [Besluit activiteiten leefomgeving](#) (Bal). Hierin staan de regels m.b.t. milieubelastende activiteiten en lozingsactiviteiten.

2.5 Bioafval

Binnen de Nederlandse wet- en regelgeving zijn de mogelijkheden voor de productie van meststoffen uit bioafval dus sterk afgebakend: compost is de enige meststof die eruit gemaakt mag worden. Hierbij is compost in detail gedefinieerd in het Uitvoeringsbesluit meststoffenwet: *product afkomstig uit een*

aerob proces, dat bestaat uit één of meer organische afvalstoffen die al dan niet met bodembestanddelen zijn gemengd en die met behulp van micro-organismen zijn afgebroken en omgezet tot een homogeen en zodanig stabiel eindproduct dat daarin alleen nog een langzame afbraak van humeuze verbindingen plaatsvindt en dat niet mede bestaat uit dierlijke meststoffen en niet verpompbaar is.

In het besluit worden ook eisen gesteld aan compost, waaronder maximale gehalten aan zware metalen. Deze gehalten zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 2-2. Maximale waarden voor zware metalen in compost volgens het Uitvoeringsbesluit meststoffenwet, in mg/kg ds .

Stofnaam	Maximale gehalten in compost, Uitvoeringsbesluit meststoffenwet	Maximale gehalten in organische meststof, PFC 1A van EU 2019/1009
Cd	1	1,5
Cr	50	2 (CrVI)
Cu	90	300
Hg	0,3	1
Ni	20	50
Pb	100	120
Zn	290	800
As	15	40

Zoals toegelicht in §2.3.2 zijn vanuit de Europese meststoffenverordening zowel compost als digestaat uit bioafval toegestaan als bronmateriaal voor meststoffen. Mits aan alle eisen wordt voldaan en een CE-markering wordt verkregen, kunnen CE-compost en CE-digestaat in Nederland als meststof worden verhandeld. Zoals in de tabel te zien is, zijn de EU eisen m.b.t. zware metalen voor organische meststoffen lichter dan de Nederlandse voor compost. Het doorlopen van het certificeringsproces is echter niet eenvoudig, en daarnaast is er de vraag van marktacceptatie van meststoffen met een mindere kwaliteit (m.b.t. verontreinigingen) dan nu in Nederland gangbaar is.

Verder vallen bioafval (gft/swill/etensresten) onder de dierlijke bijproducten, met de bijbehorende regelgeving. Dit betreft de omgang met en verwerking van het afval, hierbij gaat het niet om meststoffen. Rijkswaterstaat is momenteel bezig met het opstellen van een overzicht van de wettelijke kaders rond de verwerking van bioafval en meststoffen die eruit geproduceerd zijn. Deze worden eind 2023 of begin 2024 gepubliceerd.

2.6 De afvalwaterketen en meststoffen

Afvalwater en componenten/stoffen daaruit hebben een afvalstatus en mogen daarom niet als meststof worden gebruikt. Zuiveringsslib en herwonnen fosfaten zijn uitzonderingen hierop. Vanwege de afvalstatus van urine heeft mag het niet als meststof gebruikt worden, en hebben stoffen die uit urine worden gewonnen ook de status van afval.

Zuiveringsslib

Wet- en regelgeving m.b.t. zuiveringsslib worden beschreven in §2.2.2.

Herwonnen fosfaten

Artikel 1, lid Aa van het Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet definieert herwonnen fosfaten als volgt (*citaat*):

1. struviet, hoofdzakelijk bestaand uit magnesiumammoniumfosfaat, dat is vrijgekomen bij de zuivering van industrieel proceswater of huishoudelijk, stedelijk of industrieel afvalwater dan wel ander afvalwater door precipitatie met opgelost magnesium, ammonium of kalium;
2. magnesiumfosfaat, dat is vrijgekomen bij pasteurisatie of bij het drogen van struviet, of
3. dicalciumfosfaat, hoofdzakelijk bestaand uit dicalciumfosfaat, dat is vrijgekomen bij de zuivering van huishoudelijk, stedelijk of industrieel afvalwater dan wel ander afvalwater door precipitatie met opgelost calcium.

Herwonnen fosfaten mogen als meststof worden verhandeld, mits wordt voldaan aan de voorwaarden gesteld in artikel 17a van het besluit (*citaat*):

1. Herwonnen fosfaten overschrijden niet de in bijlage II, in tabel 1, opgenomen maximale waarden voor zware metalen, uitgedrukt in milligrammen per kilogram van het desbetreffende waardegevende bestanddeel.
2. Herwonnen fosfaten overschrijden niet de in bijlage II, in tabel 4, opgenomen maximale waarden voor organische microverontreinigingen, uitgedrukt in milligrammen per kilogram van het desbetreffende waardegevende bestanddeel.
3. Bij ministeriële regeling kan worden bepaald dat herwonnen fosfaten uit rioolzuiveringsslib behandeld worden volgens een procedé dat tot gevolg heeft dat het grootste deel van de in het rioolzuiveringsslib aanwezige pathogene organismen afsterft, met het oog op het minimaliseren van de risico's voor de volksgezondheid en het milieu.

In §5.5 wordt verder ingegaan op bovenstaande voorwaarden en de verwachting op struviet gewonnen uit urine hieraan kan voldoen. De waarden uit bovengenoemde bijlage II, tabel 1 van het Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet zijn weergegeven in Tabel 5-4.

In de EU meststoffenverordening vallen herwonnen fosfaten in materiaalcategorie CMC 12, "neergeslagen fosfaat-zouten en derivaten daarvan". Zie [Bijlage II van EU 2019/1009](#) voor de gestelde eisen. Zoals eerder toegelicht (§2.3.2) is het voldoen aan een CMC niet voldoende om als meststof te mogen worden toegepast. Hiervoor moet ook worden voldaan de eisen die aan de uiteindelijk geproduceerde meststof gesteld worden (PFC).

Einde-afvalstatus struviet

Zoals aan het begin van deze paragraaf te lezen is heeft urine een afvalstatus, en dus ook struviet gewonnen uit urine. Door de toelating van struviet als meststof (herwonnen fosfaat) in de meststoffenwetgeving mag het wel als zodanig gebruikt worden, ook al is het formeel een afvalstof. Het is mogelijk om voor struviet een einde-afvalstatus te krijgen. In 2015 is een aanvraag gedaan door Aquaminerals om struviet van verschillende rwzi's (Amsterdam-West, Apeldoorn, Cuijk en Amersfoort) te kunnen inzetten voor de productie van kunstmest. Na een traject van ongeveer 7 jaar werd de einde-afvalstatus toegekend voor de struviet van de 4 rwzi's. In de hierover [afgegeven rechtsoordelen](#) is te lezen dat elk oordeel van toepassing is op de specifieke beoordeelde situatie. Wel staat er in dat het besluit als handvat kan dienen bij toekomstige vergelijkbare aanvragen. Struviet uit enkel urine zal waarschijnlijk niet beschouwd worden als een vergelijkbare aanvraag.

Struviet in de biologische landbouw

Sinds 2023 mag struviet volgens [EU-uitvoeringsverordening 2023/121](#) worden gebruikt in de biologische productie, op voorwaarde dat wordt voldaan aan de voorschriften van EU Meststoffenverordening 2019/1009 en dat dierlijke mest als uitgangsmateriaal niet afkomstig is van de intensieve veehouderij.

2.7 Zuiveringsslib

Zuiveringsslib is zowel een afvalstof als een potentiële meststof: slib wordt expliciet genoemd in de meststoffenwetgeving, en zijn er normen voor in opgenomen. Hieronder volgen de belangrijkste aandachtspunten van de wettelijk aspecten rond het gebruik van zuiveringsslib als meststof. Voor een compleet overzicht wordt verwezen naar de relevante Nederlandse en Europese wetgeving.

Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet

In het [Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet](#) wordt zuiveringsslib gedefinieerd en worden toepassingsregels gegeven. Onder zuiveringsslib vallen zowel communaal als industrieel zuiveringsslib (artikel 1, lid 1^e) waarvoor dan ook dezelfde toepassingsregels gelden. De voorwaarden voor toepassing van zuiveringsslib in de landbouw zijn te vinden in artikel 16 van het uitvoeringsbesluit:

- *Zuiveringsslib is behandeld langs biologische, chemische of thermische weg, door langdurige opslag of volgens enig ander geschikt procédé, dat tot gevolg heeft dat het grootste deel van de in het zuiveringsslib aanwezige pathogene organismen afsterft.*
- *Zuiveringsslib bevat ten minste vijftig gewichtsprocenten organische stof van de droge stof of heeft een neutraliserende waarde van 25 op basis van de droge stof.*
- *Zuiveringsslib overschrijdt niet de in bijlage II, onder tabel 2, bij dit besluit opgenomen maximale waarden voor zware metalen, uitgedrukt in milligrammen per kilogram droge stof.*

De in het laatste punt genoemde normen voor zware metalen worden in Tabel 2-3 weergegeven, samen met de eerder in deze paragraaf genoemde toetsingswaarden voor de bodem waarop zuiveringsslib wordt toegepast. Naast bovenstaand bevat het Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet bepalingen voor de registratie.

Besluit gebruik meststoffen

In het [Besluit gebruik meststoffen](#) staan voorwaarden waaronder zuiveringsslib toegepast mag worden als meststof. In beginsel is het verboden om zuiveringsslib te gebruiken als meststof (artikel 1b, lid 1), echter onder voorwaarden is dit wel toegestaan (artikel 1b, lid 3). Eén van deze voorwaarden is dat de bodem waarop zuiveringsslib wordt toegepast, voldoet aan maximale waarden voor zware metalen; deze staan weergegeven in Tabel 2-3 en hangen mede af van de hoeveelheid organische stof en lutum in de bodem. Daarnaast bevat dit besluit diverse andere voorwaarden, zoals maximale hoeveelheden per ha., periodes waarin het wel/niet mag worden toegepast, etc.

Uitvoeringsregeling Meststoffenwet

De [Uitvoeringsregeling meststoffenwet](#) bevat onder andere regels rondom de administratie bij gebruik van zuiveringsslib, en regels voor bemonstering en analyses. Daarnaast is Bijlage Aa van belang. In deze bijlage staan specifieke aangewezen reststoffen en bijbehorende productieprocessen omschreven van stoffen die als meststof kunnen worden verhandeld. Van stoffen genoemd in deze bijlage is beoordeeld dat er geen landbouwkundige of milieukundige bezwaren tegen bestaan dat deze stoffen als meststof of bij de productie van meststoffen worden gebruikt. In het '[Protocol beoordeling stoffen Meststoffenwet](#)' staat beschreven "hoe rest- of afvalstoffen beoordeeld moeten worden om te kunnen worden aangewezen als meststof of als stof die bij de productie van meststoffen mag worden gebruikt" (Commissie Deskundigen Meststoffenwet 2016).

Richtlijn Zuiveringsslib 86/278/EEC

De Europese [Richtlijn 86/278/EEC](#) bevat regelgeving op Europees niveau op het gebied van gebruik van zuiveringsslib in de landbouw, vergelijkbaar met de Nederlandse meststoffenwetgeving. De

Europese toetsingswaarden voor zware metalen voor het gebruik van zuiveringsslib zijn opgenomen in Tabel 2-3 ter vergelijking met de Nederlandse normen. De Richtlijn Zuiveringsslib is recent geëvalueerd, met de conclusie dat deze nog zeker relevant is. Wel wordt aangegeven dat de inhoud op verschillende punten niet meer actueel is en opnieuw bekeken zou moeten worden. Bijvoorbeeld m.b.t. de in de richtlijn wel en niet opgenomen verontreinigingen en daaraan gerelateerde normen (Europese Commissie 2023).

Meststoffenverordening (EU) 2019/1009

Zoals toegelicht in §2.3.2 specificereert de [Europese meststoffenverordening](#) uit welke materialen meststoffenproducten mogen worden gemaakt om een CE markering te kunnen verkrijgen. Zuiveringsslib wordt bij alle CMC categorieën uitgesloten als bronmateriaal, behalve bij neergeslagen fosfaat-zouten (CM 12) en thermische-oxidatiematerialen (CMC 13).

Toetsingswaarden voor zware metalen

In bovenstaande paragrafen staan verwijzingen naar de toetsingswaarden voor zuiveringsslib en de bodem waarop het wordt toegepast. In onderstaande tabel staan deze samengevat, waarbij duidelijk te zien is dat de Nederlandse normen strenger zijn dan de Europese.

Tabel 2-3. Toetsingswaarden voor gebruik zuiveringsslib, maximale waarden in mg/kg ds

Stofnaam	Normwaarden gehalten in zuiveringsslib		Toetsingswaarden voor de bodem	
	Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet	Europese richtlijn 86/278/EEC	Besluit gebruik meststoffen*	Europese richtlijn 86/278/EEC
Cd	1,25	20 à 40	0,4 + 0,007 (L + 3H)	1 à 3
Cr	75	-	50 + 2 L	-
Cu	75	1 000 à 1 750	15 + 0,6 (L + H)	50 à 140
Hg	0,75	16 à 25	0,2 + 0,0017 (2 L + H)	1 à 1,5
Ni	30	300 à 400	10 + L	30 à 75
Pb	100	750 à 1 200	50 + L + H	50 à 300
Zn	300	2 500 à 4 000	50 + 1,5 (2 L + H)	150 à 300
As	15	-	15 + 0,4 (L + H)	-

*L=% Lutum, H=% organische stof

3. Groente-, fruit- en etensresten (GFE)

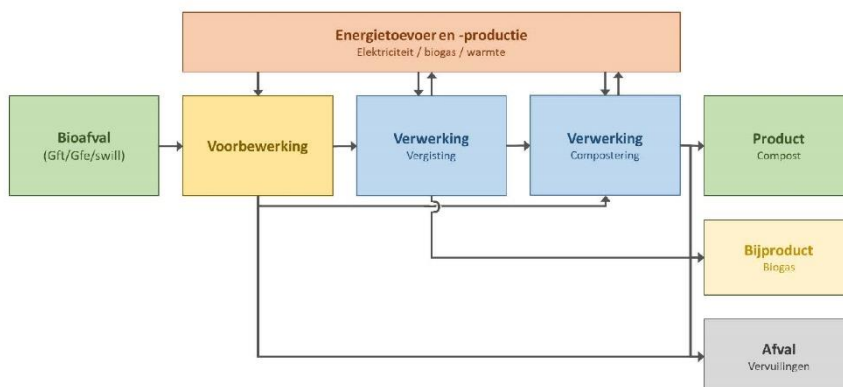
3.1 Afbakening van deze afvalstroom

Dit scenario betreft de verwerking van GFE, ook bekend als ‘keukenafval’: huishoudelijke en bedrijfsmatige groente- fruit- en etensresten. Deze stroom valt onder het begrip “bioafval”, dat met de implementatie van de in 2018 herziene [Europese Kaderrichtlijn Afvalstoffen \(2008/98/EG\)](#) in de Nederlandse Wet milieubeheer is opgenomen. De wettelijke definitie van bioafval luidt: “*biologisch afbreekbaar tuin- en plantsoenafval, levensmiddelenafval en keukenafval afkomstig van huishoudens, kantoren, restaurants, groothandels, kantines, cateringfaciliteiten en winkels en vergelijkbare afvalstoffen van de levensmiddelenindustrie*”. Het begrip bioafval is pas sinds 2020 in de nationale wetgeving opgenomen, en wordt nog niet veel gebruikt m.b.t. de staat van de afvalinzameling en -verwerking in Nederland.

3.2 Huidige situatie (baseline scenario)

3.2.1 Verwerkingsmethode

Gescheiden ingezameld gft/GFE en swill worden momenteel verwerkt door middel van vergisten en/of composteren. Dit gebeurt met name door de verschillende grote composteerbedrijven, die in grote lijnen hetzelfde proces toepassen: een deel van het afval wordt eerst vergist om biogas te produceren, waarna het digestaat met de rest van het afval wordt gecomposteerd (zie Figuur 3-1). De compost wordt afgezet als meststof. In 2021 werd een kwart van het materiaal bij deze bedrijven eerst vergist voor het gecomposteerd werd (Werkgroep Afvalregistratie 2023).



Figuur 3-1. Versimpelde schematische weergave van de huidige verwerking van bioafval.

De verwerking is zo ingericht dat wordt voldaan aan alle wettelijk eisen om een in de landbouw toepasbare compost te produceren. De (micro)nutriënten uit het apart of met gft ingezamelde GFE worden momenteel dus al gerecycled naar de landbouw, als deel van de compost. Een grote uitdaging voor de verwerkers is de kwaliteit van het ingezamelde bioafval, er zijn veel ongewenste materialen in aanwezig. Om de gewenste compostkwaliteit te kunnen behalen worden de partijen ingezameld afval beoordeeld en een deel wordt afgekeurd. Het afgekeurde materiaal wordt met het restafval verbrand.

Naast de grote composteerbedrijven zijn er ook andere afvalverwerkers die GFE verwerken, hierbij gaat het dan om swill van bedrijven, maar ook om bijvoorbeeld over-de-datumproducten. Vergisting is hier de meest toegepaste methode. Afhankelijk van de eigenschappen van het verwerkte materiaal wordt het digestaat verwerkt tot toegestane meststof (evt. voor export naar het buitenland) of verder verwerkt als afvalstroom.

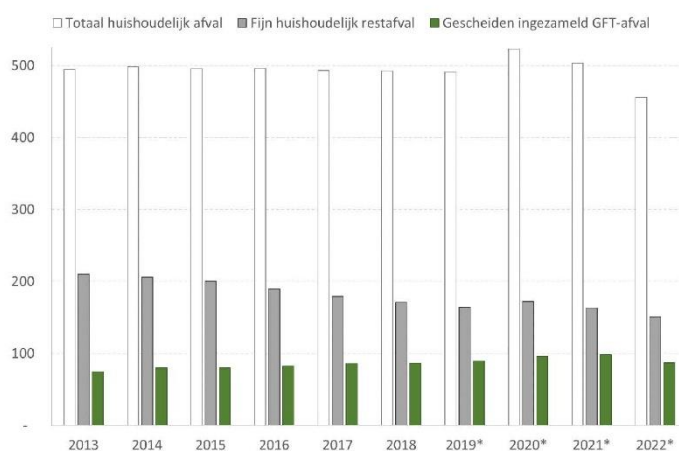
Kleinschalige/lokale initiatieven

De laatste jaren is de verwerking van GFE op kleinere schaal in opkomst, dit heeft de interesse van zowel bedrijven en organisaties als van lokale overheden. Argumenten voor deze kleinschalige/lokale verwerking van bioafval zijn o.a. betrokkenheid creëren waardoor afvalscheiding verbetert, lokaal kringlopen sluiten en het verminderen van transportbewegingen voor afvalinzameling. Voorbeelden van toegepaste processen zijn wormencompostering en anaerobe vergisting. Zie verder ook §3.3.3.

3.2.2 Gescheiden ingezameld huishoudelijk GFE

Huishoudelijk GFE is momenteel onderdeel van het gft-afval. Gft bevat fijn tuinafval en GFE, waarbij het aandeel tuinafval² varieert per plaats en per moment als gevolg van verschillen tussen wijken (o.a. veel of weinig woningen met tuin) en seizoenverschillen (o.a. herfstbladeren). Het aandeel etensresten in gft wordt niet apart gemonitord.

In 2022, het meest recente jaar waar cijfers voor beschikbaar zijn, werd er in Nederland in totaal circa 1500 kiloton (kton) gft-afval gescheiden ingezameld. Dit is omgerekend bijna 90 kg per inwoner³. Wanneer gekeken wordt naar de laatste 10 jaar, 2013-2022, is te zien dat de totale hoeveelheid huishoudelijk afval lang constant bleef en dat de hoeveelheid fijn huishoudelijk restafval afneemt, met uitzondering van 2020 en 2021 (zie Figuur 3-2).



Figuur 3-2. Afvalhoeveelheden in kg per inwoner per jaar.

² Niet al het tuinafval wordt met het gft opgehaald, met name het grove tuinafval wordt ook bij de milieustraten ingezameld. Deze fractie blijft in dit onderzoek buiten beschouwing.

³ CBS cijfers over huishoudelijk afval, <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83558NED/table?dl=99154>. Voor getallen over 2019 t/m 2022 wordt aangegeven dat deze 'nader voorlopig' zijn.

In 2022 werd duidelijk minder huishoudelijk afval ingezameld, ook minder gft-afval. Het CBS geeft als verklaring de toename in verbouwingswerkzaamheden tijdens de coronajaren 2020 en 2021, en de droogte van 2022 die zorgde voor minder tuinafval⁴.

Voor de meeste Nederlandse gemeenten wordt het een grote opgave om de hoeveelheid restafval te verminderen en het percentage afvalscheiding te verhogen. Er zijn grote verschillen tussen gemeenten: in 2021 lagen de minimum- en maximumwaarden voor jaarlijks ingezameld restafval en het afvalscheidingspercentage op respectievelijk 7 en 616 kg per inwoner, met een gemiddelde van 137 kg restafval per persoon. Ook voor de hoeveelheden gescheiden ingezameld gft-afval per inwoner zijn er grote verschillen tussen gemeenten: 1 tot 283 kg, gemiddeld 126 kg (Rijkswaterstaat 2023).

In het kader van onderzoek naar voedselverspilling werden in 2022 in 17 steden sorteertanalyses uitgevoerd, waarbij van 14 steden monsters van zowel restafval als gescheiden ingezameld gft-afval zijn onderzocht. Het gewichtpercentage voedselresten in gft-afval was dit 5-18% met een gemiddelde van 15% (Steenhuizen 2022). Wanneer gerekend wordt met 15% voedselresten in het gft-afval en de totale hoeveelheid gescheiden ingezameld gft van 1500 kton in 2022, komt dit op 225 kton aan GFE dat via het gft wordt ingezameld.

3.2.3 Huishoudelijk GFE in het restafval

In 2021 werd er circa 2860 kton huishoudelijk restafval ingezameld, uitgaande van gemiddeld circa 17,5 miljoen inwoners komt dat op circa 165 kg per persoon (Rijkswaterstaat 2023). Op basis van de jaarlijkse sorteertanalyses van Rijkswaterstaat voor 2021, blijkt dat circa 26% van het restafval uit keukenafval bestaat. Dat betekent dat er in 2021 naar schatting dus ongeveer 750 kton GFE met het restafval werd afgevoerd, zo'n 43 kg per persoon. Deze sorteertanalyses worden jaarlijks in 13 gemeentes uitgevoerd, waarna de uitkomsten met verschillende weegfactoren omgerekend naar een landelijk representatief driejaarlijks gemiddelde (Rijkswaterstaat 2023).

3.2.4 Hoogbouw

Met name in de grote steden wordt weinig gft gescheiden ingezameld⁵, in de meeste wijken bestaat de mogelijkheid nog niet of pas sinds kort. Verder is er een directe relatie tussen het aandeel hoogbouw in een gemeente en de hoeveelheid restafval per persoon: hoe meer hoogbouw, hoe minder afval gescheiden wordt ingezameld (VANG-HHA 2020). De drie grootste steden – Amsterdam, Rotterdam en Den Haag – hadden met 15% in 2020 het laagste afvalscheidingspercentage van alle gemeenten (Rijkswaterstaat 2023). Verschillende gemeenten bieden wel gescheiden gft-inzameling aan voor hoogbouw. Dit gebeurt dan via collectieve inzamelcontainers in of buiten het gebouw. De uitvoering varieert, bijvoorbeeld d.m.v. minicontainers (kliko's), andere bovengrondse containers, of ondergrondse containers. Het aandeel tuinafval uit hoogbouw is zeer klein, gft uit hoogbouw bestaat in de praktijk daardoor vrijwel volledig uit GFE. In de praktijk blijkt het moeilijk om bewoners te motiveren hun GFE gescheiden aan te bieden, dus ook bij hoogbouw waar wel een inzamelingsvoorziening is zijn de opgehaalde hoeveelheden vaak klein.

⁴ <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2023/27/huishoudelijk-afval-per-inwoner-op-laagste-niveau-in-bijna-30-jaar>

⁵ In 2021 werd in Amsterdam, Rotterdam en Den Haag respectievelijk 1, 17 en 13 kg gft per persoon gescheiden opgehaald.

Binnen het Uitvoeringsprogramma 'Van Afval naar Grondstof - Huishoudelijk Afval (VANG-HHA)' is daarom speciale aandacht voor het verbeteren van afvalscheiding bij hoogbouw, vooral ook m.b.t. gft. Het realistisch geachte scheidingspotentieel voor hoogbouw werd in 2020 berekend op 27 kg GFE per inwoner per jaar, mits er een voldoende goede interventie plaatsvindt om bewoners te motiveren tot afvalscheiding (VANG-HHA 2020). Op een gemiddelde hoeveelheid van 43 kg GFE per persoon in restafval is dit zo'n 60%.

3.2.5 Bedrijfsmatig geproduceerd GFE

Er zijn veel bronnen van niet-huishoudelijk GFE, en voor zover kon worden nagegaan is deze stroom (nog) niet goed in beeld. Vergeleken met huishoudelijk afval is er van bedrijfsafval veel minder bekend over de geproduceerde hoeveelheden en de samenstelling. De organische fractie van Kantoor-Winkel- en Dienstenafval (KWD-afval), ook Handel- Diensten- en Overheidsafval (HDO-afval) genoemd is qua aard vergelijkbaar met huishoudelijk GFE. Onder KWD-afval vallen o.a. kantoren, scholen, ziekenhuizen en zorginstellingen, winkels en horeca. GFE uit de horeca en bedrijfsrestaurants wordt meestal swill genoemd. Organisch afval van de groot- en detailhandel heeft vergeleken met de andere KWD-subsectoren een groter aandeel "over de datum" producten, met of zonder verpakking. Daarnaast omvat deze stroom ook bijvoorbeeld niet-verkochte planten en bloemen.

Bedrijven zijn zelf verantwoordelijk voor het laten ophalen van hun afval, en sluiten hier contracten voor af met afvalbedrijven of met de gemeentelijke reinigingsdienst. Zie ook §2.2.3. Bedrijfsafval gaat dus via twee verschillende routes, en hier komt bij dat niet alle inzamelbedrijven zelf de verwerking verzorgen. Er kunnen dus meerdere afvalbedrijven betrokken zijn. Bruikbare gegevens over bedrijfsafval waren moeilijk te vinden, en in gesprekken met Rijkswaterstaat en afvalverwerkers werd bevestigd dat er inderdaad geen goede data zijn m.b.t. bedrijfsafvalstromen. Er is geen landelijk registratiesysteem voor ingezameld en verwerkt afval, zoals bij het gemeentelijk restafval en gft, waarover jaarlijks door RWS wordt gerapporteerd (Werkgroep Afvalregistratie 2023). Voor swill werd tijdens de gesprekken aangegeven dat er naar schatting maar een klein percentage gescheiden wordt ingezameld. Een afvalinzamelaar gaf aan dat minder dan 15% van de aangesloten bedrijven swill als aparte stroom liet ophalen, ondanks dat dit door de inzamelaar werd gestimuleerd.

KWD-afval als onderdeel van gemeentelijk afval

Het CBS heeft gegevens voor gemeentelijk afval, waarbij ook een subcategorie Kantoor-, winkel- en dienstenafval (KWD-afval) is opgenomen onder de categorie Reinigingsdiensten- en overig afval. Voor 2022 komt dit uit op 77 kton, waarvan ongeveer 50% 'composterend' als verwerking had (CBS 2023). Dat zou betekenen dat er 35-40 kton organisch bedrijfsafval gescheiden was ingezameld door/in opdracht van gemeenten.

Vanwege gebrek aan recente informatie is op basis van oudere gegevens een inschatting van de hoeveelheid organisch bedrijfsafval uit de KWD sector gemaakt. Tot en met 2005 werd jaarlijks in het kader van de monitoring van het Convenant Verpakkingen het KWD-afval in kaart gebracht (Agentschap NL Uitvoering Afvalbeheer 2011). Uit deze onderzoeken zijn kentallen naar voren gekomen voor de hoeveelheid organisch afval die per werknemer in de verschillende subsectoren van de KWD-sector geproduceerd worden (Partners for Innovation 2011). Deze kentallen zijn gecombineerd met recente CBS gegevens over het aantal werknemers in de verschillende sectoren. Op basis van deze berekening wordt er in de Nederlandse KWD-sector jaarlijks zo'n 275 kton bioafval geproduceerd (Tabel 3-1).

Tabel 3-1. Inschatting van geproduceerd organisch KWD afval op basis van historische kentallen (Partners for Innovation 2011) en aantallen werknemers in 2022 (CBS 2023). Dit is het totaal voor niet gescheiden en gescheiden afval.

KWD subsectoren	Werknemers in NL (x1000)	Bioafvalproductie, kentallen uit 2005 (kg/werknemer)	Bioafval (ton/jaar)
Zakelijke dienstverlening	2.479	9	22.311
Zorg	1.822	25	45.550
Handel	1.690	50	84.500
Onderwijs	691	25	17.275
Openbaar bestuur	568	25	14.200
Horeca	567	114	64.638
Cultuur, recreatie, overige diensten	555	25	13.875
Vervoer en opslag	464	10	4.640
Informatie en communicatie	402	10	4.020
Financiële dienstverlening	227	9	2.043
Verhuur en handel van onroerend goed	89	9	801
TOTAAL BIOAFVAL			273.853

Het in de tabel berekende getal is nadrukkelijk een indicatieve hoeveelheid, de kentallen voor de bioafvalproductie per werknemer zijn gebaseerd op data uit 2005. Er zijn geen gegevens beschikbaar om onderbouwde uitspraken te kunnen doen over factoren die invloed hebben op deze getallen, waardoor zij niet naar boven of beneden konden worden bijgesteld om de huidige situatie beter weer te geven.

Een groot deel van het organisch afval uit de subsector “handel” betreft producten die bij winkels vrijkomen, waaronder over-de-datumproducten. De samenstelling is vergelijkbaar is met GFE/swill, en deze stroom wordt daarom meegenomen in de inschatting van het potentieel aan micronutriënten. Deze afvalstroom wordt in tegenstelling tot de GFE/swill van andere subsectoren al wel voor een groot deel gescheiden ingezameld.

Swill in restafval van de KWD-sector

Het gemengde afval van de KWD-sector bevat ook GFE/swill. Volgens een recent sorteeronderzoek van bedrijfsafvalmonsters van 29 inzamelroutes, ligt het aandeel identificeerbaar keukenafval tussen de 5% en 42%, met een gemiddelde van 19% (De Afvalspiegel and Witteveen+Bos 2023). Hierbij kon geen onderscheid gemaakt worden tussen subsectoren, en ook niet tussen bedrijven die wel of niet verschillende afvalfracties gescheiden aanbieden.

3.2.6 Micronutriënten in GFE/swill

Wanneer de informatie uit de voorgaande stukken wordt samengevat, komt de totale hoeveelheid GFE uit op 1250 kton per jaar:

- 225 kton aan GFE dat via het gft wordt ingezameld.
- 750 kton aan GFE dat met het restafval werd afgevoerd
- 275 kton GFE/swill uit de KWD sector, onbekend hoeveel hiervan gescheiden wordt ingezameld

Het GFE dat met het gft wordt ingezameld wordt omgezet in compost en zo al nuttig gebruikt als meststof. Om het extra potentieel te berekenen worden daarom alleen de GFE die nu in restafval zit en het bedrijfsafval meegenomen. Voor de berekening is de aanname dat het potentieel voor GFE uit restafval voornamelijk bij hoogbouw ligt, eerder is berekend dat een scheiding van 60% realistisch zou zijn. Bedrijfsafval wordt momenteel vrijwel niet gescheiden ingezameld, en er zijn geen aanwijzingen hoeveel % uiteindelijk als realistisch voorzien wordt. Als hiervoor ook 60% wordt aangehouden komt het potentieel aan apart te verwerken GFE op 615 kton per jaar. In Tabel 3-2 staat een overzicht van de gevonden gehalten aan micronutriënten en zware metalen, en de totale vracht in 615 kton afval.

Tabel 3-2. Gemiddelde van gevonden waarden voor zware metalen en micronutriënten in etensresten* (El-Mashad and Zhang 2010, Zhang and Walker 2010, Tampio, Salo et al. 2016, Banks, Heaven et al. 2018, Carmona-Cabello, García et al. 2020) (data voor etensresten uit Europa en de VS), en de berekende potentiële vracht. Hierbij is rekening gehouden met de in de tekst hierboven benoemde aannames en een gemiddeld DS-gehalte van 20-25% (Banks, Heaven et al. 2018).

Soort parameter	Stofnaam	Etensresten (mg/kg DS)	Jaarlijkse vracht in 615 kton afval (kg)	
ZM	As	0,4	52	
ZM	Cd	0,5	68	
ZM	Hg	0,04	4,9	
ZM	Ni	14	1.940	
ZM	Pb	11	1.508	
ZM, MN	Cr	6,3	873	
ZM, MN	Cu	9,1	1.254	
ZM, MN	Zn	31	4.304	
MN	B	20	2.768	
MN	Co	1,7	240	
MN	Fe	631	87.349	
MN	Mg	919	127.180	
MN	Mn	70	9.630	
MN	Mo	4,2	578	
MN	Se	0,6	84	

* Data voor etensresten uit Europa en de VS

3.3 Toekomstige ontwikkelingen

3.3.1 Afvalscheiding en -inzameling

De gemeenten staan met de afvalscheidingseisen uit de Kaderrichtlijn Afval voor een grote opgave. Vooral het behalen van de doelen voor gescheiden inzameling van huishoudelijk en bedrijfsmatig bioafval (gft, GFE, swill) zijn niet eenvoudig te bereiken. Vooral in grote(re) steden, met veel hoogbouw, zijn nog grote stappen te zetten. Waarschijnlijk zijn verbeterde informatiecampagnes niet voldoende om de volledige benodigde gedragsverandering te bewerkstelligen. Daarom kijken gemeenten ook naar het gebruik van andere inzamelmethoden, waaronder het gebruik van voedselrestvermalers. Ook op het gebied van bedrijfsafval is nog veel te winnen. De afvalbedrijven spelen daarin ook een actieve rol. Recent werd bijvoorbeeld bekend (ACM 2023) dat er initiatieven zijn om bedrijven altijd minimaal één gescheiden stroom aan te laten bieden naast het restafval. Welke maatregelen allemaal genomen gaan worden is niet bekend, maar het is zeker dat er meer GFE van huishoudens en bedrijven gescheiden zal worden ingezameld.

Wat betreft de gescheiden inzameling van GFE als aparte stroom, dus niet samen met tuinafval, ligt de potentie vooral bij hoogbouw en bij bedrijfsafval. Bij laagbouw ligt het niet voor de hand om aparte containers aan te bieden voor GFE en tuinafval.

3.3.2 Hoeveelheid en kwaliteit van gescheiden ingezameld bioafval

In de nabije en verdere toekomst is in elk geval een toename van gescheiden ingezameld bioafval te verwachten. Gemeenten en afvalbedrijven zetten in op het stimuleren van een betere afvalscheiding, om te voldoen aan scheidingsdoelstellingen en ambities m.b.t. circulariteit. Ook voor de andere afvalstromen is het scheiden van GFE gunstig, omdat deze dan schoner blijven en beter verwerkt kunnen worden.

Indicatie van toekomstige hoeveelheden huishoudelijk GFE

Zoals berekend in §3.2 zit er momenteel jaarlijks gemiddeld 19 kg/inwoner aan voedselresten in het gft-afval en 43 kg in het restafval. Als GFE-inzameling uit hoogbouw goed van de grond komt ligt daar een potentiële realistische hoeveelheid van 27 kg/inwoner per jaar (VANG-HHA 2020). Het CBS heeft geen cijfers voor aantallen Nederlanders die in hoogbouw wonen, maar wel op basis van stedelijkheid (adressendichtheid). In 2022 woonden er 4,56 miljoen mensen in zeer sterk stedelijke gebieden⁶. Aangenomen dat dit met name hoogbouw is, geeft dit een totale toekomstige extra GFE-hoeveelheid van 123 kton GFE uit huishoudens.

Indicatie van toekomstige hoeveelheden organisch bedrijfsafval (swill)

Hier zijn geen gegevens voor gevonden. Wel is het zo dat er net als voor GFE uit hoogbouw aandacht is voor het meer verzamelen van bedrijfsafval, zowel vanuit de overheid als vanuit de afvalbedrijven. De hoeveelheid zal dus toenemen.

Eigenschappen toekomstig ingezameld materiaal en producten

Het stimuleren c.q. verplichten van scheiding brengt ook een risico met zich mee. Hoewel nu vooral bioafval van (relatief) gemotiveerde burgers en bedrijven wordt ingezameld, is het aandeel vervuiling van deze stroom al vrij hoog. Als meer gft en etensresten van minder gemotiveerde groepen worden ingezameld, wordt het risico op vervuilde stromen groter. Hier ligt een conflict tussen de doelen voor meer gescheiden inzameling, en een verbetering van de kwaliteit van het ingezamelde materiaal. Tegelijk met campagnes voor de inzameling van meer gescheiden bioafval, zal ingezet worden op bewustwording m.b.t. wat er wel en niet in deze stroom aanwezig mag zijn. In hoeverre beide effecten elkaar wel of niet zullen opheffen is onvoorspelbaar.

Een ander effect van een toename in de hoeveelheden ingezameld bioafval is dat de samenstelling van het ingezamelde gft gaat veranderen als GFE en tuinafval samen ingezameld en verwerkt blijven worden. De grootste hoeveelheden nu niet ingezameld materiaal zijn etensresten. Vergeleken met de huidige situatie zal de fractie tuinafval in gft dalen en de fractie etensresten toenemen. Dit heeft effect op de composteerbaarheid van het mengsel, en de samenstelling van de uiteindelijke compost. Het nutriëntengehalte van de compost zal toenemen, wat invloed kan hebben op de afzetbaarheid. Daarnaast is er zoals gezegd een risico dat de vervuilingsgraad toeneemt. Ook dit heeft effect op de kwaliteit van de compost, en daarmee op de benodigde verwerkingsstappen en de afzetbaarheid.

⁶ CBS Statline: Gemeentelijke afvalstoffen; hoeveelheden

3.3.3 Verwerkingsmethoden

De in de toekomst verwachte grotere hoeveelheden ingezameld gft/GFE en swill zullen naar verwachting vooral via de nu toegepaste methode van grootschalige vergisting en compostering worden verwerkt. Er zijn andere methodes beschikbaar, het is echter niet te voorspellen welk aandeel deze zullen verkrijgen. De verwachting is dat er vooral meer GFE en swill wordt ingezameld, dat er een minder groot effect is voor tuinafval. Er kan voor gekozen worden om in de verwerking gescheiden methodes toe te gaan passen voor gft (vooral uit laagbouw) en voor GFE/swill (vooral uit hoogbouw en bedrijven/organisaties).

Conventionele verwerking (gft)

Het is de verwachting dat de grote verwerkers hun capaciteit zullen gaan uitbreiden, bijvoorbeeld door bestaande niet-gebruikte hallen opnieuw in gebruik te nemen en/of meer capaciteit bij te bouwen. Voordat deze stappen genomen gaan worden moet er wel concreet uitzicht zijn op grotere verwerkingscontracten. Het is afwachten wanneer alle maatschappelijke inspanningen voor betere gescheiden inzameling gaan resulteren in een grotere hoeveelheid gft/GFE. Als in de toekomst de kwaliteit van het afval erg gaat veranderen (nutriëntgehaltenes, vervuiling, etc.) kan het zijn dat de grote verwerkers hun processen daarop moeten gaan aanpassen.

Vergisting voor gebruik van het digestaat als meststof (GFE/swill)

Digestaat uit bioafval is binnen de Nederlandse meststoffenwetgeving niet toegestaan als meststof. Het wordt nu nagecomposteerd, verwerkt als afvalstroom of tot exportproduct. Met het in werking treden van de Europese Meststoffenverordening is directe toepassing van het digestaat mogelijk geworden. Om uit digestaat van bioafval een CE-meststof te maken moet het voldoen aan alle eisen van bestanddelen categorie 5, en de uiteindelijk geproduceerde meststof aan de eisen van de gekozen productcategorie (zie §2.3.2). Hierbij zijn bijvoorbeeld hygiënisering en zware metalenconcentraties van belang, maar ook minimale nutriëntgehaltenes. Deze verwerkingsmethode is gekozen als een van de scenario's voor verdere uitwerking. Zie hoofdstuk 3.4.

Cascadering voor winning van hoogwaardigere producten (GFE/swill)

Voor een zo hoogwaardig mogelijke verwerking staat cascadering van reststoffen in de belangstelling. Hierbij worden in opeenvolgende processen verschillende producten gewonnen. Een voorbeeld is het eerst fermenteren voor de winning van vetzuren, het daarna verder vergisten tot biogas en uiteindelijk composteren van het digestaat voor gebruik als meststof. Deze verwerkingsmethode is gekozen als een van de scenario's voor verdere uitwerking. Zie hoofdstuk 3.5.

Kleinschalige/lokale verwerking tot meststof (gft/GFE/swill)

Zoals eerder genoemd zijn de laatste jaren ook lokale verwerkingsinitiatieven voor gft en GFE opgekomen, die allerlei verschillende verwerkingsmethoden toepassen. Vanuit de wens om lokaal kringlopen te sluiten, en (voor bedrijfsafval) ook om een meer aantrekkelijke optie te zoeken dan de huidige inzamelmethode via swillcontainers. Dit soort initiatieven moeten aan dezelfde wettelijke eisen voldoen als de grotere verwerkers, en op kleinere schaal is dit moeilijker. Er zijn vooralsnog geen uitzonderingen voor kleinschalige/lokale verwerking, en het is niet zeker of deze er gaan komen. De hoeveelheid gft/GFE/swill die nu via kleinschalige/lokale initiatieven verwerkt wordt is onbekend, en er zijn voorspellingen over wat deze route in de toekomst zal gaan betekenen.

Gebruik als voedermateriaal voor ongewervelden (GFE/swill)

Wormencompostering van GFE bestaat al heel lang, en wordt in sommige gemeenten toegepast in de vorm van zogenaamde wormenhotels. Dit jaar is wormencompostering officieel toegestaan, mits het afval eerst gehygiëniseerd wordt (Ministerie van Landbouw 2023). De tijdelijk gestopte Stadswormerij in Amersfoort gaat volgend jaar opnieuw opstarten, op basis van dit goedgekeurde proces. Insectenkweek is ook in opkomst, waarbij momenteel alleen 'schone' organische afvalstromen gebruikt mogen worden (zoals veilingafval). GFE zou ook een goede voedingsbron kunnen zijn, hier wordt onderzoek naar gedaan. De situatie ligt echter anders dan bij wormencompostering omdat de gekweekte insecten bedoeld zijn als voedingsmiddel voor dieren en mogelijk ook mensen. Het is onvoorspelbaar hoeveel GFE in de toekomst via wormen en insecten verwerkt zal gaan worden.

Terugwinning van metalen

De verwijdering van metalen uit o.a. afvalwater en drinkwaterbronnen blijft een thema van onderzoek vanuit het oogpunt van milieubescherming en gezondheid. De focus ligt hierbij op zware metalen, en een mogelijk gebruik van de verwijderde metalen is geen vanzelfsprekend uitgangspunt. Er zijn voor zover bekend momenteel geen technieken beschikbaar die zo specifiek werken dat zij alleen metalen verwijderen. Technieken die speciaal gericht zijn op het verwijderen van metalen, doen dit met alle metalen tegelijk. Specifieke terugwinning van één of meerdere individuele metalen is (nog) niet mogelijk. Zie verder hoofdstuk 5 van het hoofdrapport van WP4 van TKI-MIK, "Micronutriënten in de Kringloop - Afval en afvalwaterketen. Herkomst, bestemming en stofstroomanalyse".

3.3.4 Niet-genormeerde risico's

De Nederlandse en EU-normen voor meststoffen uit bioafval zijn gericht op fysieke verontreinigingen zoals glas en plastic, zware metalen, pathogenen en een aantal organische microverontreinigingen. Verder zijn er in Nederland aanvullende normen die inzetten op een hogere kwaliteit dan de wettelijke eisen, zoals bijvoorbeeld Keurcompost.

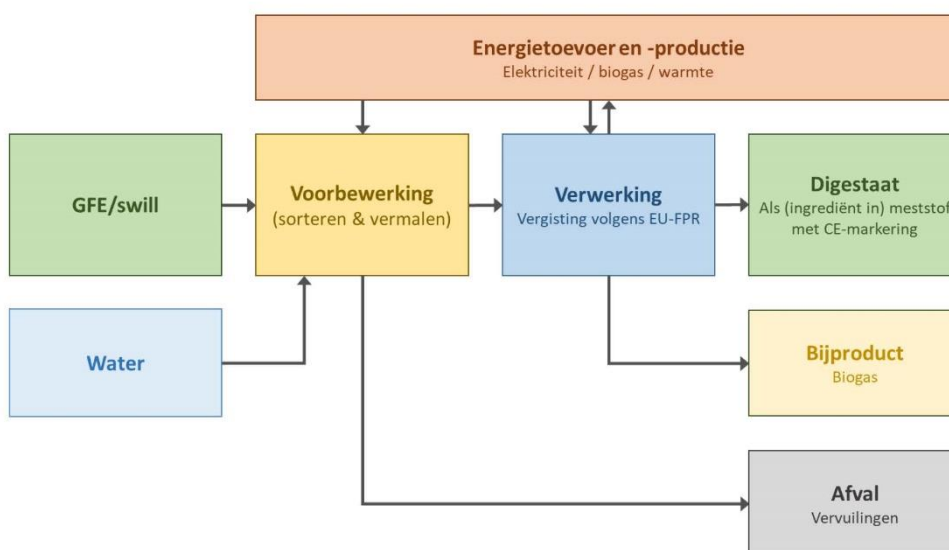
Aangezien PFAS ook in allerlei materialen voor voedselverpakking gebruik wordt, is het zeker dat deze in GFE/swill aanwezig zullen zijn. PFAS staan momenteel in de belangstelling als verontreiniging in allerlei stromen, en daar zijn - net als voor andere stromen - nog geen normen voor m.b.t. compost of digestaat. Naar de aanwezigheid en afbraak/omzetting van PFAS wordt momenteel veel onderzoek gedaan.

In het Uitvoeringsbesluit meststoffenwet (Bijlage 2, tabel 4) zijn normen voor een aantal organische microverontreinigingen opgenomen. Deze gelden voor o.a. overige organische meststoffen en stoffen opgenomen op de Bijlage Aa, voor compost is deze tabel niet van toepassing. In de productie van levensmiddelen worden o.a. bestrijdingsmiddelen en schimmelwerende middelen gebruikt, en allerlei andere stoffen. Deze komen in de stroom GFE/swill terecht, en worden afhankelijk van de toegepaste processen wel of niet (deels) afgebroken. De normen die gelden die bij de productie van levensmiddelen moeten ervoor zorgen dat de gebruikte hoeveelheden geen gevaar opleveren voor de gezondheid.

3.4 Toekomstig scenario 1: Vergisten voor gebruik van het digestaat als meststof

3.4.1 Toegepaste technologie

Vergisting vindt plaats in afgesloten reactoren, in afwezigheid van zuurstof. Tijdens de vergisting wordt de afbreekbare organische stof omgezet in biogas (methaan en CO₂), en worden nutriënten uit het materiaal vrijgemaakt en zo in oplossing gebracht. GFE/swill bevat relatief veel goed afbreekbare organische stof en is daardoor interessant voor de productie van biogas. Om het digestaat als meststof te mogen gebruiken moet worden voldaan aan de eisen die in de EU Meststoffenverordening gesteld worden aan CMC 5, en de gekozen PFC (zie §2.3.2). Figuur 3-3 geeft een schematische weergave van het proces. Na het verwijderen van ongewenste vervuilingen wordt het GFE/swill met water tot een slurry vermalen en vervolgens in een vergister omgezet tot biogas en digestaat.



Figuur 3-3. Versimpelde schematische weergave van vergisting van GFE/Swill tot digestaat als (ingrediënt in) meststof met CE-markering.

3.4.2 Hoeveelheden micronutriënten die via digestaat worden teruggewonnen

Digestaat van etensresten is een mengsel van organische en anorganische stoffen. Het droge stofgehalte is voornamelijk afhankelijk van de keuzes die gemaakt zijn voor de verwerking. Bij het vermalen van de etensresten tot vergistbare slurry wordt water toegevoegd, dit wordt afgestemd op de technische eigenschappen van de gebruikte vergistingstechnologie. Tijdens de vergisting worden nutriënten vrijgemaakt uit het omgezette organische materiaal, waarbij ammonium vooral in oplossing blijft en fosfaat voor een deel als vaste stof neerslaat (bijvoorbeeld als struviet of calciumfosfaat). Concentraties en pH zijn hierbij belangrijke factoren.

Voor de micronutriënten en zware metalen geldt ook dat deze tijdens de vergisting worden vrijgemaakt en dat de condities in de reactor bepalen of zij in oplossing blijven of neerslaan. Het samenspel van de procescondities en digestaateigenschappen is complex, en het is niet te voorspellen

welke elementen in welke mate in de vloeibare of juist de vaste fractie van het digestaat terecht zouden komen. Dit is wel een interessant aspect voor de praktische toepassing, aangezien de vaste fractie qua volume veel kleiner is dan de vloeibare fractie. Als alle metalen voornamelijk neerslaan, zijn zij door een vast/vloeibaar scheiding te concentreren in de vaste fractie. Vanwege het kleinere te transporteren volume is dit mogelijk een interessantere meststof voor wat betreft micronutriënten. Daar staat tegenover dat het gehalte zware metalen te hoog kan zijn, en dat de biobeschikbaarheid van de micronutriënten ook een rol speelt in de waarde van de meststof. Binnen deze studie konden deze factoren niet worden uitgezocht.

De in §3.2.6 berekende vrachten micronutriënten in GFE/swill worden in theorie volledig via het digestaat teruggewonnen, mits dit aan alle meststoffeneisen voldoet en als zodanig wordt gebruikt. In de literatuur is een beperkt aantal bruikbare samenstellingsgegevens gevonden voor digestaat van etensresten (Tabel 3-3). Vanwege de beperkte beschikbaarheid en kwaliteit van data voor etensresten en -digestaat, kunnen de gegeven getallen alleen als indicatief beschouwd worden.

Tabel 3-3. Gemiddelde van gevonden bruikbare gehalten in digestaat van etensresten (Tampio, Salo et al. 2016, Jensen, Møller et al. 2017, Skrzypczak, Trzaska et al. 2023), met ter vergelijking de gehalten in etensresten (uit Tabel 3-2). Waarden in mg/kg DS.

Stofnaam	Etenresresten	Digestaat van (vooral) etensresten*
Cd	0,5	0,2
Cr	6,3	11
Cu	9,1	25
Fe	631	1246
Hg	0,04	0,1
Mg	919	2400
Mn	70	14
Ni	14	20
Pb	11	8,3
Zn	31	114
As	0,4	1,1

* Eén van de bronnen geeft aan dat er een zeer beperkte hoeveelheid tuinafval in het bioafval aanwezig was

De gevonden digestaatgehalten liggen in dezelfde orde van grootte als de gevonden gehalten voor etensresten. Dit ondersteunt de aanname dat het terugwinningspotentieel via digestaat qua vrachten micronutriënten vergelijkbaar is met de ingezamelde vrachten.

3.4.3 Praktische haalbaarheid

Aangezien het materiaal erg goed afbreekbaar is, vergt het proces een goede beheersing m.b.t. de belasting van de vergister, zodat deze goed blijft functioneren. Dit is een aandachtspunt, maar staat de praktische haalbaarheid niet in de weg. Er is veel praktijkervaring met het vergisten van GFE/swill, op grote schaal bij de grote composteerbedrijven maar ook bij de industriële vergisters voor over-de-datumperducten. Ook wordt het op kleinere schaal vergist, in Nederland door o.a. Circ en Waste Transformers, en staat er bijvoorbeeld een GFE-vergister in Helsingborg bij het Recolab (REF).

Vanwege de lage concentraties wordt er bij vervoer van digestaat uit etensresten veel water vervoerd. Onderzoek naar de samenstelling van de vaste fractie is interessant, als hier de grootste vrachten micronutriënten in aanwezig zijn zou dit qua vervoer een efficiëntere meststof zijn. Ook de praktische

aspecten voor wat betreft de toepassing op het land en de agronomische kwaliteit van het digestaat als meststof zouden moeten worden onderzocht.

3.4.4 Juridische haalbaarheid

Vergisten is een bekend proces dat op veel plaatsen wordt toegepast, het is dus mogelijk om hier de benodigde erkenningen en vergunningen voor te krijgen. Bij de verwerking van GFE/swill is belangrijk dat aan de minimumstandaard uit sectorplannen 6 en 7 van het LAP3 wordt voldaan, door een meststof te maken of een hoogwaardiger product. Binnen de nu geldende Nederlandse wettelijke kaders is compost de enige toegestane meststof die uit bioafval gemaakt mag worden. Hierbij is de definitie van compost heel nauw, zoals in §2.3.4 is toegelicht. Een deel van het bioafval wordt al vergist, maar het digestaat mag zonder nabehandeling niet in Nederland als meststof gebruikt worden.

Met de Europese Meststoffenverordening komt digestaat uit bioafval wel in beeld als (grondstof) voor meststof, het is opgenomen als bestanddelencategorie CMC 5. Een belangrijke eis voor CMC 5 is dat het bioafval gehygiëniseerd wordt, zoals nu bij de grote composteerbedrijven gebeurt in de compostering. Om digestaat te kunnen gebruiken zonder composteringsstap, is dus een andere vorm van hygiënisering nodig zoals thermofiele vergisting of een aparte pasteurisatiestap. Verder is de stabiliteit van het digestaat van belang (het moet voldoende lang vergist zijn) en zijn er kwaliteitseisen m.b.t. verontreinigingen. Om als meststof toegelaten te worden moet het digestaat (of een mengsel waar het deel van uitmaakt) daarnaast ook voldoen aan de eisen voor een meststoffenproduct, een PFC. Hieraan worden eisen gesteld aan maximale toelaatbare gehalten aan verontreinigingen, maar ook aan minimale nutriëntengehaltes (§2.3.2). Het is mogelijk dat er in de toekomst ook binnen de Nederlandse meststoffenwetgeving ruimte komt voor gebruik van digestaat uit bioafval als (ingrediënt in) meststof. Hierover is momenteel nog niets bekend.

3.4.5 Toekomstbestendigheid

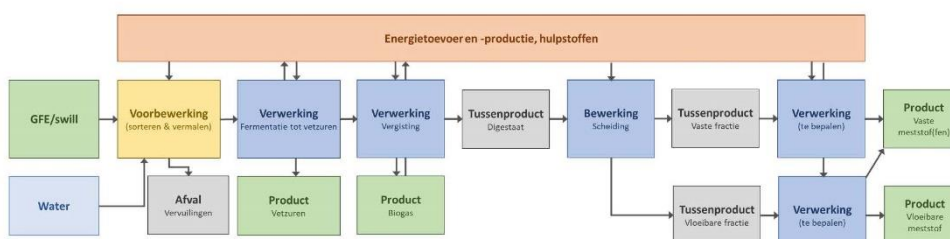
Het is zeker dat er in de toekomst meer gescheiden ingezameld GFE/swill zal zijn, en dat dit verwerkt zal moeten worden. Vergisting is technologisch in principe een goede oplossing voor deze relatief natte stroom, die niet gecomposteerd kan worden zonder hem te mengen met ander (droog, houtig) materiaal. Het biogas kan gebruikt worden als groene energie. Om digestaat in Nederland als goedgekeurde meststof af te mogen zetten is er nu potentieel een route via de CE-markering voor meststoffen. Bij het ontwerp van het vergistingssysteem (van invoer tot uitvoer) moet er rekening gehouden worden met de eisen die gelden voor CMC's en PFC's – zowel de eisen m.b.t. hygiënisering en aanwezigheid van verontreinigingen, als eisen voor o.a. minimale nutriëntengehaltes.

De in het digestaat aanwezige micronutriënten worden door de toepassing als meststof gerecycled naar de landbouw, net als die in compost. Door in te zetten op gescheiden verwerking van GFE/Swill kan ook in zekere mate voorgesorteerd worden op toekomstige implementatie van bestaande en nieuwe mogelijkheden voor terugwinning van andere grondstoffen. Bij het ontwerp van de installatie zou dan nagedacht moeten worden over welke uitvoering de meeste flexibiliteit naar de toekomst heeft.

3.5 Toekomstig scenario 2: Cascadering voor winning van meerdere producten

3.5.1 Toegepaste technologie

Bij cascadering wordt een uitgangsmateriaal verwerkt met het doel om zo hoogwaardig mogelijke producten eruit te winnen. Dit vergt een complexere verwerking, met een keten aan verschillende technologieën. GFE/swill is een mengsel van koolhydraten, vetten, eiwitten en water, en er kunnen ongewenste materialen zoals plastic inzitten. Een cascadering die op dit moment met bestaande technieken uitgevoerd kan worden is fermentatie voor de winning van organische zuren, gevolgd door biogasproductie en gebruik van het digestaat. Het digestaat zou voor verdere cascadering gescheiden kunnen worden in een vaste en vloeibare fractie, waarna deze d.m.v. verschillende processen verwerkt kunnen worden tot bijvoorbeeld vaste en/of vloeibare meststoffen (zie Figuur 3-4).



Figuur 3-4. Versimpelde schematische weergave van fermentatie van GFE/Swill tot vetzuren, verdere vergisting tot digestaat en verwerking van digestaat tot verschillende meststoffen.

3.5.2 Hoeveelheden micronutriënten die via producten worden teruggewonnen

De hoeveelheden micronutriënten die via cascadering kunnen worden teruggewonnen zijn hetzelfde als in het eerste scenario. Wel kan het zijn dat de verdeling van de micronutriënten over vaste en vloeibare fracties anders zal zijn. Het wel of niet neerslaan/oplossen van metalen hangt bij cascadering af van de procescondities in alle toegepaste stappen, die elk verschillende condities hebben. In het gegeven cascaderingsvoorbeeld zijn dit de fermentatie tot vetzuren, de afscheiding van de vetzuren en de verdere vergisting tot biogas en digestaat.

3.5.3 Praktische haalbaarheid

Winning van vetzuren uit organische reststromen wordt momenteel al toegepast door het bedrijf Chaincraft, maar er is nog geen grootschalige praktijkervaring in Nederland zoals bij vergisten en composteren. Biogasproductie en digestaatscheiding zijn ook bewezen technieken. Opwerking van digestaat tot een of meer meststoffen is technisch ook mogelijk, hoewel bijvoorbeeld het strippen van stikstof pas interessant wordt bij hogere N-concentraties (STOWA 2012, STOWA 2021).

Bij het verwerken van GFE/swill tot vetzuren is een belangrijke vraag in welke mate de gebruikelijke verontreinigingen zoals plastic hier invloed op hebben, en hoe deze materialen (en/of de toegepaste verwijderingsmethoden) doorwerken in alle opeenvolgende processen in de cascadering en de kwaliteit van de producten. In §3.3.1 is benoemd dat voedselrestvermalers als inzamelmiddel in de belangstelling staan.

3.5.4 Juridische haalbaarheid

Voor wat betreft de geproduceerde meststoffen is de juridische haalbaarheid vergelijkbaar met die van het eerste scenario. In Scenario 2 wordt echter ook een ander soort product gemaakt, namelijk vetzuren. Vanwege de afvalstatus van het bioafval zullen de vetzuren ook de status van afval hebben, waardoor toepassing in bijvoorbeeld dierlijke of menselijke voeding niet mogelijk is.

3.5.5 Toekomstbestendigheid

De toekomstbestendigheid van dit scenario is in eerste instantie vergelijkbaar met dat van scenario 1. Als er meer technische en juridische mogelijkheden komen om grondstoffen uit afvalstromen te winnen wordt de cascadering voor hoogwaardige grondstoffen steeds interessanter.

3.6 Beperkingen en kennishiaten

Weinig data over hoeveelheden GFE en swill als aparte stroom

De inzameling en verwerking van huishoudelijke afvalstoffen is een gemeentelijke taak, waardoor hier redelijk veel over bekend is. Huishoudelijk organisch afval wordt tot nu toe vooral aangeduid als gft-afval. GFE is onderdeel van het ingezamelde gft-afval, en wordt niet apart gemonitord. Voor afvalstoffen uit bedrijfsmatige activiteiten is de ontdoener zelf verplicht te zorgen voor inzameling, en deze stromen worden veel minder goed (openbaar) in kaart gebracht. Er is informatie over organisch bedrijfsafval, maar het is niet altijd makkelijk om hier gegevens over bedrijfsmatig keukenafval uit te destilleren.

Weinig data over samenstelling GFE/swill-digestaat

Er zijn binnen de reikwijdte van deze projecttaak weinig bruikbare data gevonden voor de samenstelling van GFE/swill en digestaat daarvan. Het aantal publicaties dat bruikbare waarden gaf was zeer beperkt, zie ook §1.4, met de detectielimieten als één van de belangrijke oorzaken. Ook andere auteurs maken hier melding van. Bijvoorbeeld een overzichtsartikel (Götze, Boldrin et al. 2016) over de samenstelling van huishoudelijke afvalstromen, waarin data uit veel artikelen verwerkt is, zegt over etensresten dat meer dan de helft (voor sommige parameters bijna alle) van de waarden de onder detectielimiet lagen. De auteurs hebben de detectielimiet als waarde genomen, waardoor de gerapporteerde uitkomsten voor WP4 niet bruikbaar waren. Verder zijn er beperkingen zoals vergelijkbaarheid met de Nederlandse situatie, en problemen met onduidelijke of ongebruikelijke eenheden, die ook niet altijd betrouwbaar zijn om te rekenen vanwege gebrek aan informatie.

Voor ontwikkelen van terugwinningsconcepten is meer inzicht nodig in gedrag micronutriënten

Naast de beperkingen qua hoeveelheid en representativiteit van gehalten is voor het ontwikkelen van terugwinningsconcepten meer inzicht nodig in het gedrag van de verschillende stoffen. De gevonden gehalten in digestaat zijn voor sommige elementen hoger dan in etensresten en voor anderen is dit andersom. Hoewel deze verschillen volledig kunnen liggen aan de beperkte databeschikbaarheid en -kwaliteit, zijn er verschillende andere mogelijke oorzaken te benoemen. Tijdens de vergisting wordt organische stof afgebroken, waardoor de concentraties die zijn uitgedrukt op basis van droge stof anders worden. Verder verzuren etensresten snel, wat invloed heeft op de oplosbaarheid van de stoffen. Zo kunnen op verschillende plekken in een inzamelings- en verwerkingssysteem metalen vrijkomen uit materialen (leidingen, vermalers, tanks, coatings, etc.) waardoor concentraties hoger worden. Het is ook mogelijk dat metaalzouten ergens in het proces neerslaan of juist in oplossing gaan en uiteindelijk niet in het digestaat terechtkomen.

3.7 Recente projecten rond bioafvalverwerking

Hieronder een aantal recente projecten/initiatieven waarin bioafvalverwerking aan bod komt.

Van afval naar grondstof: VANG HHA en VANG Buitenhuis

Het programma “Van afval naar grondstof” wordt uitgevoerd door Rijkswaterstaat in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Dit omvat zowel huishoudelijk afval (HHA) als afval van de kantoor-, winkel- en dienstensector.

<https://vang-hha.nl> en <https://vangbuitenhuis.nl>

Bioafvalalliantie

Een platform opgericht vanuit VANG-HHA, met allerlei partijen uit de bioafvalketen om te komen tot een betere inzameling en verwerking van bioafval.

<https://vang-hha.nl/aan-de-slag/2023/bioafval-alliantie>

PPS project “Circular Urban Food Production, safe by design”

Dit project onderzoekt de gezondheids- en milieurisico's van meststoffen uit bioafval om te komen tot veilige producten vanuit een ‘safe-by-design’ aanpak.

<https://projecten.landbouwwatervoedsel.nl/project/circular-urban-food-production-safe-by-design>

PPS project “Kringloopsluiting van Nutriënten uit Afvalwater en Proceswater (KNAP)”

Een van de cases binnen dit project gaat over digestaat uit etensresten.

<https://www.tkiwatertechnologie.nl/projecten/kringloopsluiting-van-nutriënten-uit-afvalwater-en-proceswater-knap>

EU H2020 - VOLATILE (2016-2020)

Biowaste derived volatile fatty acid platform for biopolymers, bioactive compounds and chemical building blocks

<https://www.volatile-h2020.eu>

EU H2020 – DECISIVE (2016-2021)

A decentralized management Scheme for Innovative Valorization of urban biowaste

<https://www.decisive2020.eu>

EU H2020 – RUN4LIFE (2017-2021)

Recovery and utilisation of nutrients for low impact fertiliser

<https://run4life-project.eu>

EU H2020 - VALUEWASTE (2018-2022)

Unlocking new VALUE from urban bioWASTE

<https://valuewaste.eu>

EU H2020 SCALIBUR (2018-2022)

Scalable technologies for bio-urban waste recovery

<https://scalibur.eu> en <https://thebiowastehub.com>

EU H2020 - WaysTUP (2019-2023)

Value chains for disruptive transformation of urban biowaste into biobased products in the city context

<https://waystup.eu>



EU H2020 - HOOP project (2020-2024)

Hub of circular cities boosting platform to foster investments for valorisation of urban biowaste and wastewater
<https://hoopproject.eu>

Interreg Sudoe – Ecoval (2020-2023)

Management coordination and recovery strategies for sludge and organic waste in the SUDOE region
<https://ecoval-sudoe.eu>

EU H2020 - Tech4Biowaste (2021-2023)

A dynamic database of relevant technologies of bio-waste utilisation
<https://tech4biowaste.eu>

Horizon Europe - FUELPHORIA (2023-2027)

Accelerating the sustainable production of advanced biofuels and RFNBOs - from feedstock to end-use.
<https://cordis.europa.eu/project/id/101118286>

4. Zuiveringsslib

4.1 Afbakening van deze afvalwaterstroom

In dit hoofdstuk wordt de verwerking van zuiveringsslib behandeld. Zuiveringsslib kan afkomstig zijn van communale rwzi's, welke voornamelijk huishoudelijk afvalwater behandelen, of van industriële waterzuiveringen waar bedrijfsafvalwater wordt behandeld (AWZI's). Vanwege de geringe beschikbaarheid van data van industrieel zuiveringsslib wordt hier slechts beperkt op ingegaan in de volgende paragraaf. Het in kaart brengen van de gehele verwerkingsroute en opstellen van mogelijke toekomstige verwerkingsscenario's is uitsluitend voor slib van communale rwzi's gedaan.

4.1.1 Communaal zuiveringsslib

Wat betreft communaal slib zijn er ook verschillende soorten slib, namelijk primair en secundair slib. Primair slib, afkomstig uit een voorbezinktank van de rwzi, bestaat uit bezinkbaar en gemakkelijk afbreekbaar organisch materiaal. Secundair slib, afkomstig van het actief slib proces, bestaat uit minder gemakkelijk afbreekbaar organisch materiaal.

In de beschikbare data wordt in de meeste gevallen geen onderscheid gemaakt tussen primair en secundair zuiveringsslib. De reden hiervoor is waarschijnlijk dat deze twee slibben vrijwel altijd gezamenlijk worden verwerkt (indikking en vergisting). Voor alternatieve scenario's is het wel relevant om te weten in hoeverre er verschil zit tussen de gehalten micronutriënten en andere parameters. In §4.2.2 wordt hierop ingegaan, voor zover er data over te vinden waren.

In onderstaande tabel staan voor heel Nederland de totaalhoeveelheden nat en droog slib, en hoeveelheden N en P. Dit betreft de hoeveelheden voor afvoer naar de eindbestemming en na eventuele vergisting en ontwatering (zie volgende paragraaf voor toelichting hierop).

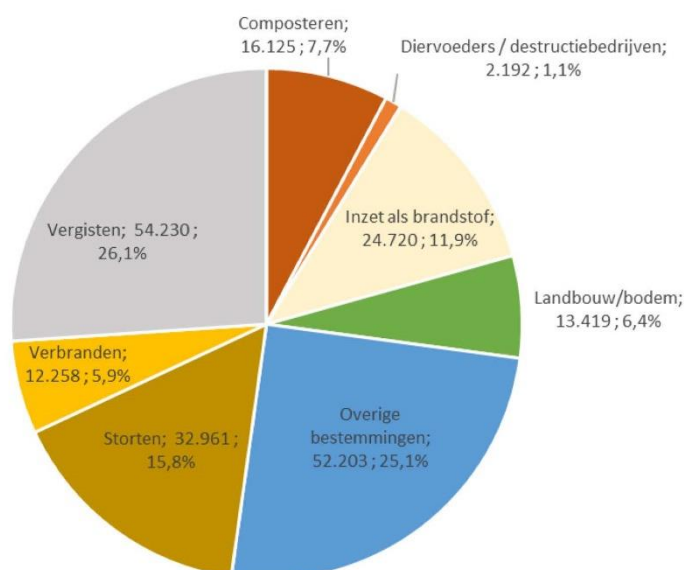
Tabel 4-1. Slibhoeveelheden en N en P aandeel Nederland 2020 (CBS Statline 2023)

Parameter	Hoeveelheid in ton
Nat slib	1.263.332
Droge stof	308.359
Organische fractie	216.570
As (gloeirest)	91.789
Fosforverbindingen als P	11.171
Stikstofverbindingen als N	19.110

4.1.2 Industrieel zuiveringsslib

In de Statline database van het CBS werden tot en met 2016 de gegevens van de bestemming van industrieel zuiveringsslib bij gehouden naar sector en naar soort bestemming. Na 2016 zijn hier geen gegevens meer van te vinden in de Statline database. De informatie hierover is dus gedateerd. Daarbij zaten in de Statline database ook geen gegevens van de metaalgehalten van industrieel zuiveringsslib.

In onderstaande figuren is de verdeling van de bestemming van industrieel slib weergegeven.



Figuur 4-1 Verdeling industrieel zuiveringsslib naar bestemming; in ton ds en percentage van totaal (CBS Statline 2023)

Bij deze verdeling kan worden opgemerkt dat vergisten hier apart staat genoemd als bestemming, in tegenstelling tot bij de data van het communale zuiveringsslib (zie §4.1.1). In feite is vergisten geen eindbestemming, aangezien slechts een deel van het slib daadwerkelijk wordt omgezet in biogas. Het is voor industrieel slib vanuit de gebruikte data niet bekend wat er in dit geval met uitgegist slib gebeurt. De bestemmingen 'verbranden' en 'inzet als brandstof' komen in feite allebei neer op verbranden. Echter bij inzet als brandstof is er hierbij sprake van verbranding met als doel energietेरugwinning, zoals het mee- of bijstoken in een cementoven of elektriciteitscentrale.

4.2 Huidige verwerking

4.2.1 Verwerkingsroutes zuiveringsslib

In veruit de meeste gevallen wordt zuiveringsslib afkomstig van communale rwzi's uiteindelijk verbrand. In Tabel 4-2 zijn de hoeveelheden slib per eindbestemming te zien. Deze gegevens wat betreft de verwerkingsroutes van zuiveringsslib komen uit de Statline database van het CBS. Hieronder worden de huidige verwerkingsmethodes toegelicht volgens de toelichting gegeven in de Statline database:

- Elektriciteitscentrale: zuiveringsslib dat gebruikt wordt om als secundaire brandstof mee te stoken in een elektriciteitscentrale.
- Cementindustrie: hierbij wordt zuiveringsslib als vulmiddel voor cement gebruikt door het in een cementoven mee te stoken.
- Verbranden: hierbij wordt zuiveringsslib, afhankelijk van de kwaliteit, samen met huishoudelijk afval verbrand of wordt het in speciale slibverbrandingsinstallaties verwerkt.

- Storten: Afhankelijk van de kwaliteit wordt zuiveringsslib op regionale stortplaatsen of op speciale slibdeponiën gestort.
- Overige bestemmingen: te noemen zijn: toepassing in bouwmaterialen en wegenverharding, afvoer naar installaties waar bepaalde componenten worden teruggewonnen of hergebruikt als entslib (zuiveringsslib voor de opstart van andere zuiveringsinstallaties).

Uit bovenstaande toelichting blijkt dat verwerking in de cementindustrie of in een elektriciteitscentrale in feite ook neerkomen op verbranding. Slibverbranding vindt in Nederland voor het grootste deel plaats bij Slibverwerking Noord-Brabant (SNB) en bij HVC. De hoeveelheden per verwerkingsmethode van zuiveringsslib verschillen significant per regio. In onderstaande tabel zijn de totaalhoeveelheden slib in ton droge stof per jaar weergegeven per verwerkingsmethode. Dit betreft gegevens van het jaar 2020, meer recente gegevens waren nog niet beschikbaar.

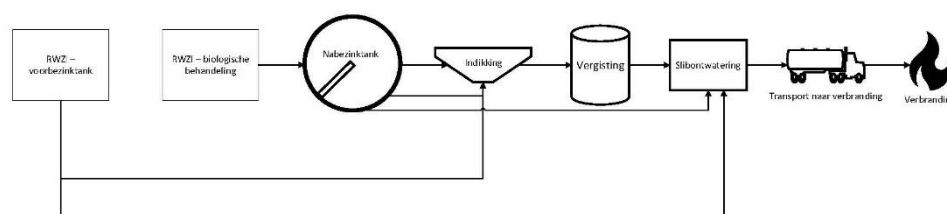
Tabel 4-2. Verwerkingsmethodes slib en hoeveelheden in 2020 (CBS Statline 2023)

Verwerkingsmethode	Hoeveelheid slib in ton ds per jaar
Elektriciteitscentrale	30.765
Cementindustrie	13.614
Verbranden	250.382
Storten	1.480
Overige bestemmingen	12.119

Bij elkaar opgeteld wordt volgens deze data 96% uiteindelijk verbrand. Voor het grootste deel vindt deze verbranding plaats bij slibverwerkers.

Steeds vaker wordt slib eerst vergist; in 2021 betrof dit 86% van het zuiveringsslib (Unie van Waterschappen 2022). Er zijn bij vergisting twee factoren van invloed op de concentraties van metalen en micronutriënten in uitgestigt slib: bij vergist slib is de totale hoeveelheid droge stof lager, waardoor concentraties micronutriënten hoger kunnen zijn. Daarnaast kunnen tijdens het vergistingsproces elementen vrijkomen of juist neerslaan. Vrijgekomen elementen zullen met het rejectiewater teruggevoerd worden naar de waterlijn. Verder wordt slib in verreweg de meeste gevallen ontwaterd voor het getransporteerd wordt naar de locatie waar het wordt verbrand. Dit scheelt aanzienlijk in volume en daarmee in de kosten voor de eindverwerking.

In onderstaand figuur wordt schematisch de verwerking van zuiveringsslib weergegeven, vanaf de rwzi tot en met de verbrandingsoven.



Figuur 4-2 Schematische weergave huidige slibverwerking

Bij de slibontwatering wordt polymeer gebruikt, waardoor het beter ontwaterd wordt. Dit heeft aan de ene kant het belangrijke voordeel dat slib hierdoor beter ontwaterd kan worden; het droge stof gehalte zal hoger zijn. Het te transporteren volume wordt daarmee aanzienlijk kleiner, wat zorgt voor minder energieverbruik voor het transport en de uiteindelijke verbranding. Het is wel een belangrijk aandachtspunt voor alternatieve verwerkingsroutes van slib, aangezien de gebruikte polymeren doorgaans slecht biologisch afbreekbaar zijn. De gehalten aan metalen in PE zijn verwaarloosbaar en dragen niet significant bij aan de concentraties in het slib (KWR 2018).

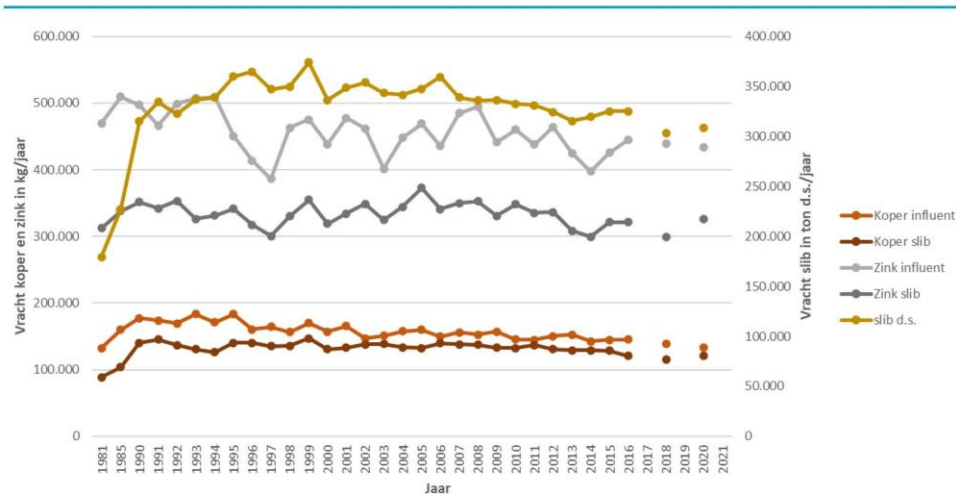
4.2.2 Hoeveelheden zware metalen en herkomst

In onderstaande tabel zijn de gemiddelde concentraties zware metalen weergegeven. Deze zijn berekend op basis van de totaalhoeveelheden slib en de totaalhoeveelheden zware metalen. De gebruikte gegevens hiervoor zijn afkomstig uit Statline. Deze database bevat (o.a.) de totaalgegevens van al het communale zuiveringsslib in Nederland. Om een eerste indruk te krijgen van de mogelijkheden voor toepassing zijn deze vergeleken met maximale waarden voor zuiveringsslib, besproken in §2.7. De concentraties zijn berekend vanuit de totale metaalvrachten in zuiveringsslib (gegeven in tabel hieronder), en een totaal droge stof hoeveelheid van 308.359 ton ds/jaar.

Tabel 4-3. Gemiddelde concentraties zware metalen in zuiveringsslib, 2020 (CBS Statline 2023)

Parameter	Totale vracht in zuiveringsslib (kg)	Concentratie mg/kg ds	Max. waarde Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet, in mg/kg ds
Cd	311	1,0	1,25
Cr	12.003	39	75
Cu	120.715	391	75
Hg	143	0,46	0,75
Ni	7.939	26	30
Pb	25.755	84	100
Zn	325.845	1057	300
As	3.247	11	15

Uit bovenstaande tabel blijkt dat op dit moment de metalen/micronutriënten koper en zink problemen geven voor toepassing van zuiveringsslib als meststof. Dit is de oorzaak dat er in de praktijk geen zuiveringsslib (meer) wordt toegepast in de landbouw. Voor de uitwerking van het scenario wordt daarom vooral gekeken naar koper en zink. In onderstaande grafiek is het verloop van koper en zink op rwzi's weergegeven in de tijd, om te kijken of hier een trend in zit en zodoende in te schatten of het voor de hand ligt dat dit in de toekomst anders zal zijn.



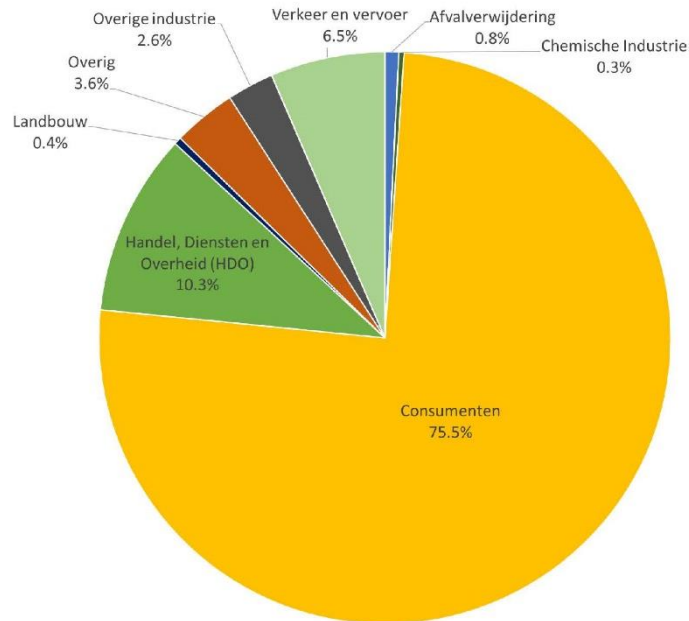
Figuur 4-3 Vrachten koper, zink en slib trends 1981-2021

In bovenstaande grafiek is de zien dat de vrachten koper en zink in influent en slib de afgelopen 30 jaar redelijk constant zijn. De hoeveelheid slib neemt in de tijd iets af (doordat meer vergist wordt, zie volgende paragraaf). Dit betekent dat ook de concentraties niet veel zullen verschillen door de tijd heen, en dat het ook niet in de lijn der verwachting ligt dat de concentraties in slib zullen dalen zonder hier actief op te sturen.

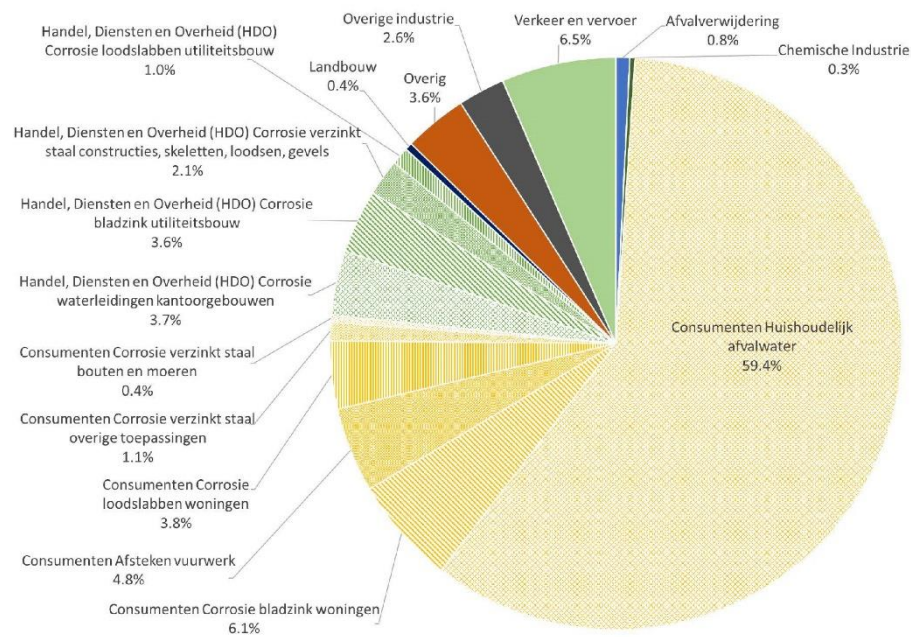
De Emissieregistratie database is gebruikt om na te gaan wat de belangrijkste herkomst is van zware metalen op het riool. Uit deze database kunnen de jaarlijkse emissievrachten per sector, subsector en emissieoorzaak worden gehaald. Het doel hiervan was met name om te onderzoeken wat het aandeel is van industrie. Als vanuit de industrie veel vracht aan zware metalen op het riool wordt geloosd ten opzichte van de hoeveelheid afvalwater, zou het effectief kunnen zijn om deze af te koppelen.

De herkomst van metalen welke geloosd wordt op het riool per sector is in eerste instantie bekeken voor de zware metalen totaal. Daarnaast is deze nog voor koper en zink apart bekeken. De percentages hiervan zijn weergegeven in onderstaande figuren. Uit Figuur 4-4 blijkt dat consumenten verreweg de grootste bron van emissie van zware metalen zijn. Handel, Diensten en Overheid zijn de op één na grootste bron, die al aanzienlijk kleiner is dan consumenten. Bij deze twee bronnen is daarom verder ingezoomd op de emissie-oorzaken. In Figuur 4-5 staan deze twee grootste bronnen uitgesplitst. Hieruit blijkt dat een groot aandeel van de metalen afkomstig van Consumenten en van Handel, Diensten en Overheid (HDO) corrosie van materialen en afsteken van vuurwerk als emissie-oorzaak heeft. Dit komt in feite neer op afstroming van verhardingen en is hetzelfde voor deze twee sectoren Consumenten en HDO.

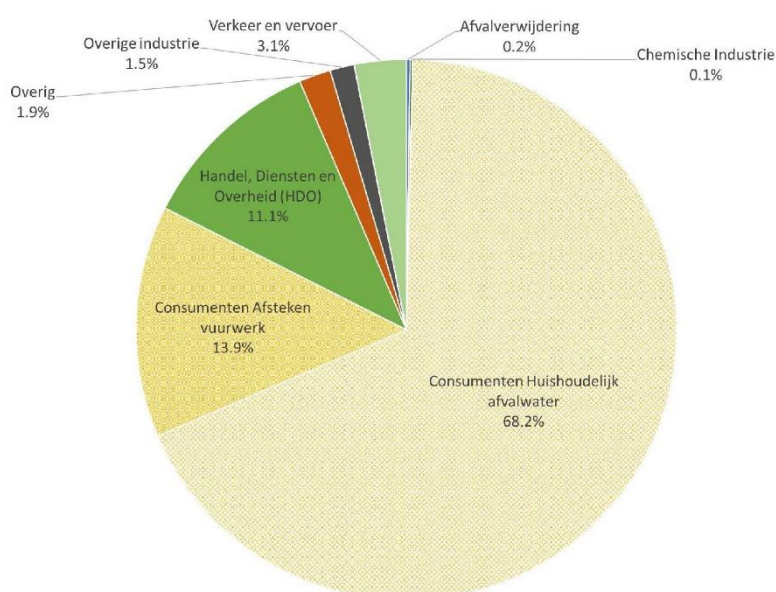
In Figuur 4-6 en Figuur 4-7 zijn deze twee sectoren worden uitgesplitst naar emissie-oorzaak voor de herkomst van koper en zink. Hieruit blijkt dat verreweg de het grootste deel dat geloosd wordt op het riool, afkomstig is van consumenten.



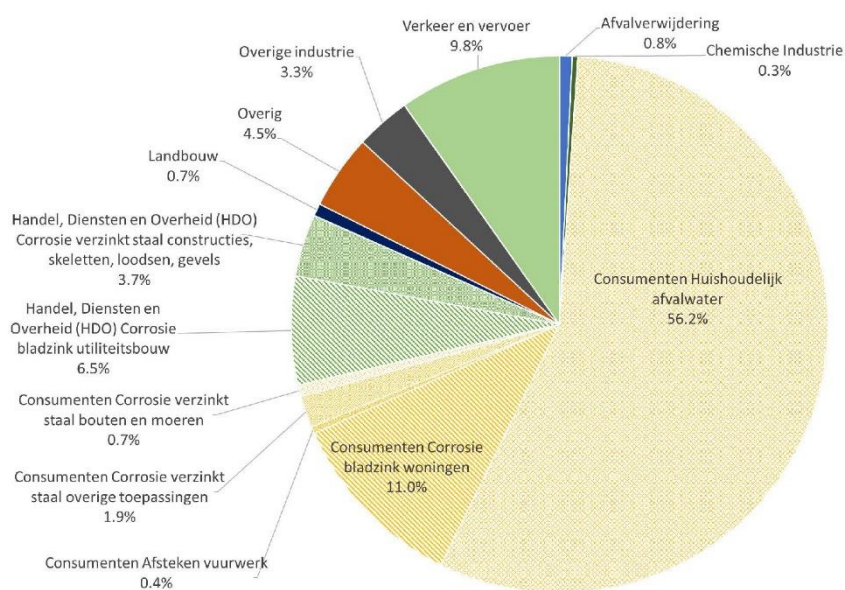
Figuur 4-4 Herkomst zware metalen op riool totaal, in % van totaal, per sector in 2020 (bron: Emissieregistratie 2023)



Figuur 4-5 Herkomst zware metalen op riool totaal, in % van totaal, per sector in 2020 – Consumenten en Handel, Diensten en Overheid opgesplitst in emissie-oorzaak (bron: Emissieregistratie 2023)



Figuur 4-6 Koper: herkomst op riool, in % van totaal per sector 2020 – consumenten opgesplitst in emissie-oorzaak (bron: Emissieregistratie 2023)



Figuur 4-7 Zink: herkomst op riool, in % van totaal per sector 2020 – consumenten opgesplitst in emissie-oorzaak (bron: Emissieregistratie 2023)

Voor zowel koper als zink geldt dat meer dan de helft direct vanuit het huishoudelijk afvalwater op het riool komt. Voor zink geldt dat een significant deel afkomstig is van corrosie van onder andere bladzink, dat veel toegepast wordt bij bladzink. De emissie-oorzaak is in dat geval hetzelfde voor consumenten en HDO.

Opvallend is het lage aandeel van industrie. Een kanttekening bij bovenstaande grafieken daarbij is dat van de emissies van metalen vanuit diverse sectoren een groot deel niet op het riool terecht komt, maar op het oppervlaktewater, eventueel via een industriële afvalwaterzuivering.

De herkomst van met name koper en zink kan relevant zijn voor wat betreft toekomstige scenario's. Van deze metalen wordt in slib namelijk het maximale gehalte overschreden. In sommige scenario's kan het dan interessant zijn om meer te scheiden bij de bron; bijvoorbeeld het afkoppelen van bepaalde industrieën. Uit bovenstaande figuren blijkt echter dat dit niet voldoende effect zal hebben; koper en zink zijn voor het overgrote deel afkomstig van consumenten, (~70-80%), terwijl de maximale gehalten maar liefst 5,2 keer (koper) en 3,5 keer (zink) worden overschreden.

4.2.3 Vrachten OS, N, P en micronutriënten in slib

In onderstaande tabel zijn de vrachten van de verschillende zware metalen en micronutriënten gegeven. Voor zover mogelijk zijn deze uit de CBS Statline database gehaald; deze data zijn gebaseerd op metingen van alle rwzi's in Nederland en is zodoende het meest compleet. Voor data van de micronutriënten die niet in de Statline database staan is de Watson database gebruikt. Deze is gebaseerd op slechts een deel van de rwzi's in Nederland. Het bevat geen slibconcentraties, maar enkel influent- en effluentconcentraties. Door de gemiddelde concentraties van influent en effluent te nemen en deze te vermenigvuldigen met het totale debiet van Nederlandse rwzi's wordt de vracht hiervan berekend. Door vervolgens de effluentvracht van de influentvracht af te trekken is de slibvracht berekend.

Voor de stoffen waarvan de concentraties en vrachten in de Statline database te vinden zijn, zijn de influent- en effluentvrachten gegeven, en de slibvracht. In theorie zou de slibvracht gelijk moeten zijn aan influentvracht – effluentvracht; echter doordat er altijd een meetonzekerheid zit bij analyses wijken deze getallen wat van elkaar af. De mate van afwijking is per stof gegeven. Ook is per nutriënt de ratio tussen de vrachten in effluent versus de vracht in slib gegeven.

De meeste data zijn afkomstig van het jaar 2020. De meest recente data uit de Watson database zijn afkomstig uit 2018. Voor de berekening van de vracht is telkens gerekend met het totale influentvolume van alle rwzi's in Nederland van 2020; dit was 1.938.476.000 m³/jaar in totaal.

Tabel 4-4. Gemiddelde vrachten (kg/jaar) aan zware metalen en micronutriënten in zuiveringsslib. Databron voor rijen DS t/m Zn is CBS Statline, voor 2020 (CBS Statline 2023), dit is inclusief de slibvrachten. Databron voor rijen Co t/m Se is de Watson database, voor 2018. De slibvrachten voor Co t/m Se zijn berekend zoals hierboven beschreven.

Soort stof	Stofnaam	Influent	Effluent	Slib	Ratio slib:effluent
-	Droge stof	n.v.t.*	n.v.t.*	308.359.000	-
-	Organische stof	n.v.t.*	n.v.t.*	216.570.000	-
Nutriënt	N	n.v.t.*	n.v.t.*	19.110.000	-
Nutriënt	P	13.297.000	1.644.000	11.171.000	6,79
ZM	As	6.449	2.603	3.247	1,25
ZM	Cd	435	82	311	3,79
ZM	Hg	194	26	143	5,50
ZM	Ni	17.391	7.143	7.939	1,11
ZM	Pb	28.269	1.244	25.755	20,70
ZM, MN	Cr	14.130	1.862	12.003	6,45
ZM, MN	Cu	133.000	9.156	120.715	13,18
ZM, MN	Zn	433.742	68.981	325.845	4,72
MN	B	273.810	253.899	19.911	0,08
MN	Co	2.392	1.601	792	0,49
MN	Fe***	5.046.456	774.102	4.272.354 - 13.626.333	n.v.t.
MN	Mg	19.257.898	15.244.563	4.013.335	0,26
MN	Mn	308.746	229.644	79.102	0,34
MN	Se	1.385	351	1.034	2,9

*Voor organische stof en N geldt dat deze grotendeels vanuit de waterfase naar de lucht verdwijnen. Het is daarom vanuit deze data niet mogelijk een massabalans te maken voor de influent-, effluent- en slibvracht.

**Voor ijzer geldt dat dit vaak in de waterlijn op de rwzi gedoseerd wordt voor de fosfaatverwijdering. Ook hiervoor is het daardoor op basis van deze data niet mogelijk een massabalans te maken. De influent- en effluentvrachten zijn wel gegeven ter indicatie om een min-max slibvracht te bepalen. De uitleg voor de range waarbinnen de slibvracht zal liggen wordt hieronder toegelicht.

In bovenstaande tabel is te zien dat voor het merendeel van de micronutriënten en voor fosfaat en metalen geldt dat deze voor het grootste deel in het slib terecht komen. Uitzonderingen zijn kobalt, magnesium en mangaan welke voor het grootste deel in het effluent terecht komen. Voor ijzer kan geen goede balans worden gemaakt: op veel rwzi's wordt metaalzoutdoserings toegepast voor fosfaatverwijdering. Als metaalzout worden hoofdzakelijk aluminium- en ijzerzouten gebruikt, maar met de gebruikte data kon niet worden achterhaald hoeveel aluminium en hoeveel ijzer wordt gebruikt; enkel een totaalhoeveelheid metaalzouten kon worden gevonden.

Wel kan op basis van de beschikbare data een range worden gegeven waartussen de totale slibvracht aan ijzer zich zou moeten bevinden. Als minimum in deze range zal dit de totale influentvracht minus de totale effluentvracht zijn. Uit de Waves database (WAVES 2023) blijkt dat op jaarbasis ongeveer 174 miljoen (mln) mol aan metaalzout wordt gedoseerd (gemiddelde 2018 en 2021, van tussenliggende jaren zijn geen gegevens). Indien dit uitsluitend ijzerzout betreft, zou dit omgerekend ruim 9,7 mln kg aan ijzer zijn per jaar. De minimale totale slibvracht zoals hierboven berekend, plus deze 9,7 mln kg, geldt als maximum van de range voor de slibvracht aan ijzer. De werkelijke

hoeveelheid zal tussen de waarden in Tabel 4-3 in zitten. Uit de getallen blijkt verder dat het grootste deel van de vracht in het slib terecht komt.

4.2.4 Primair en secundair zuiveringslib

Voor mogelijke alternatieve toepassingen van zuiveringslib kan het relevant zijn om te onderzoeken of de kwaliteit van primair en secundair slib verschilt, en zo ja op welke punten. Voor zover bekend wordt er door waterschappen weinig gemeten aan primair slib, of zijn de beschikbare gegevens niet openbaar toegankelijk. De verdeling van vrachten aan micronutriënten en zware metalen over primair en secundair slib is relevant voor de toepassing, zowel m.b.t. het voldoen aan normen voor zware metalen als de waarde m.b.t. vrachten micronutriënten. KWR heeft in 2018 een onderzoek uitgevoerd naar het terugwinnen van metalen uit water, slib en vlieggas (KWR 2018). Voor dit onderzoek is hoofdzakelijk gekeken naar de verdeling van metalen over primair en secundair slib om te kijken of dit veel van elkaar verschilt en zo ja, welk soort slib de hoogste gehalten micronutriënten bevat.

Dit onderzoek is gedaan op 4 rwzi's; namelijk Amersfoort, Kralingseveer, Nieuwgraaf en Venlo. Van Amersfoort, Kralingseveer en Nieuwgraaf zijn concentraties metalen in zowel primair als secundair slib gemeten, van Venlo zijn alleen concentraties metalen in secundair slib gemeten aangezien de rwzi Venlo geen voorbezinking heeft. Het al dan niet hebben van een voorbezinking zal ook van invloed zijn op het gehalte metalen en micronutriënten in het secundaire slib.

In de hieronder weergegeven tabellen zijn van de 3 rwzi's waarbij concentraties van zowel primair als secundair slib zijn gemeten, de concentraties van voor dit onderzoek relevante micronutriënten weergegeven evenals de verhouding van primair:secundair slib.

Tabel 4-5 Concentratie primair en secundair slib, in mg/kg ds (KWR 2018)

Soort stof	Stofnaam	Primair slib			Secundair slib			Venlo (geen voorbezinking)
		Amersfoort	Kralingseveer	Nieuwgraaf	Amersfoort	Kralingseveer	Nieuwgraaf	
ZM	As	0,70	7,30	2,90	3,50	2,50	4,10	4,8
ZM	Cd	0,37	0,80	0,51	0,93	0,33	1,00	1,2
ZM	Hg	0,19	0,36	0,39	-	-	-	-
ZM	Ni	5,1	21	6,5	10	7,1	17	92
ZM	Pb	32	109	55	66,0	45,0	83,0	125
ZM, MN	Cr	5,40	23,5	10,6	8,70	4,90	12,0	130
ZM, MN	Cu	78,0	400	84,0	225	165	285	340
ZM, MN	Zn	343	888	405	610	285	730	1180
MN	B	6	20	7	24	7,0	26	26
MN	Co	0,80	2,50	1,50	1,80	0,70	1,90	5,1
MN	Fe	3500	17450	3760	33495	6260	11780	21760
MN	Mg	690	2180	1135	8445	3985	7320	7235
MN	Mn	70,0	388	134	160	105	120	230
MN	Se	0,70	2,00	1,10	1,70	1,10	2,70	2,5

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de gehalten aan metalen en micronutriënten sterk verschillen, zowel tussen primair en secundair slib als tussen rwzi's. Verder blijkt dat in 2 van de 3 rwzi's waarbij zowel primair als secundair slib wordt geproduceerd, de micronutriënten en metalen zich voornamelijk in het secundaire slib bevinden. Een uitzondering hierop is de rwzi Kralingseveer, waarbij juist in het primaire slib hogere concentraties worden gevonden. Een oorzaak hiervoor is niet duidelijk. Op basis van deze data kan niet met zekerheid worden gezegd of micronutriënten het meest in het primaire of in het secundaire slib terechtkomen. Dit is daarmee een relevant kennishiaat indien er sprake is van scenario's waarin primair en secundair slib apart van elkaar worden verwerkt.

4.3 Recente en toekomstige ontwikkelingen

Er zijn diverse ontwikkelingen welke een invloed hebben op de samenstelling van het zuiveringslib. De belangrijkste hiervan worden in deze §genoemd. Het uitwerken van de mogelijke effecten van al dit soort ontwikkelingen valt buiten de reikwijdte van deze studie.

4.3.1 Verder afkoppelen van hemelwater

Hemelwater wordt momenteel nog voor een groot deel met vuilwaterriool afgevoerd naar de rwzi; in 2019 betrof dit 54% van de totaalhoeveelheid neerslag in Nederland (STOWA 2019). Het streven is echter om steeds meer aparte hemelwaterriolering in Nederland te hebben, waarbij hemelwater rechtstreeks wordt geloosd op oppervlaktewater, of wordt geïnfiltreerd in de bodem. Dit zal beperkt invloed hebben op de slibhoeveelheden. Naar verwachting heeft dit wel significant invloed op de hoeveelheden koper en zink, aangezien dit voor een belangrijk deel met het hemelwater mee het vuilwaterriool in gaat (zie §4.2.2). Echter het zal naar verwachting nog lang duren voor al het hemelwater apart wordt afgevoerd.

4.3.2 Aangescherpte effluenteisen / verwijdering van microverontreinigingen

De effluenteisen worden naar verwachting komende jaren aangescherpt, vanwege de verplichting voor Nederland om in 2027 te voldoen aan de Kaderrichtlijn Water (KRW). Aanpassingen op de rwzi's om aan deze eisen te kunnen voldoen, kunnen invloed hebben op het voorkomen van micronutriënten in (verwerkt) slib en effluent. Onderdeel van aangescherpte eisen is ook de aandacht voor organische microverontreinigingen. Volgens de revisie van de EU-richtlijn Stedelijk Afvalwater moet elke rwzi groter dan 100.000 i.e. worden voorzien van een aanvullende zuivering voor microverontreinigingen met een overall rwzi-rendement van 80% voor een groep gidsstoffen per 31 december 2035.

4.3.3 Toepassing van andere/meer technologieën op rwzi's

Verwijdering van organische microverontreinigingen

Afgelopen jaren is er vanuit STOWA een onderzoeksprogramma geweest naar diverse technologieën om microverontreinigingen zoals medicijnresten te verwijderen. De meeste van deze technologieën zijn nageschakelde behandelingsstappen, ofwel behandeling van het effluent na de nabezinktank. Bijvoorbeeld met actief kool of ozon. Deze nageschakelde technologieën hebben geen invloed op de slibsamenvorming. Eén van de onderzochte technologieën betreft dosering van poederkool op de actief slib tank; PACAS (STOWA 2018). De actief kool komt hierbij in de slibfractie terecht, en wordt met het slib verbrand. Bij toepassing van het slib als meststof zou de kool, met alles wat eraan geadsorbeerd

zit, op het land komen. Het zou interessant zijn om het effect van de aanwezigheid van poederkool op slibverwerkingsmethoden te onderzoeken, zeker als er meer rwzi's met PACAS komen.

Toepassing van fijnzeven

Momenteel zijn er niet vele rwzi's waar fijnzeven worden toegepast, deze techniek staat wel in de belangstelling. Fijnzeven hebben in elk geval invloed op de hoeveelheid slib, en omdat er een specifieke fractie wordt opgevangen ook op de samenstelling. Sommige stoffen zullen relatief meer of minder aanwezig zijn in de uitgezeefde fractie. In het eerder genoemde onderzoek van KWR (2018) is ook gekeken naar gehalten in een fractie na filtratie over 12-25 µm. Hieruit bleek dat een significant deel van de metalen aan kleine deeltjes was gebonden. Dit is een indicatie dat slib van een fijnzeef relatief hogere gehalten kan bevatten dan secundair en primair slib. Er zijn met de beschikbare gegevens geen voorspelling te doen over de kwaliteit van de verschillende slibfracties m.b.t. zware metalen en micronutriënten, dit zou wel interessant zijn om te onderzoeken.

4.3.4 Niet genormeerde risico's

Zuiveringsslib bevat een groot scala aan verschillende stoffen, ook stoffen waar risico's aan verbonden zijn. Zware metalen en organische microverontreinigingen zoals medicijnresten zijn eerder al benoemd. Hieronder worden een aantal andere kort besproken.

Persistente organische stoffen, waaronder PFAS

PFAS staan sterk in de belangstelling, hier zijn echter nog geen normen voor. In een recent Stowa-onderzoek is op 8 rwzi's gekeken naar het voorkomen van PFAS (STOWA 2021). Hieruit blijkt dat PFAS overal voorkomen, en dat daarnaast hotspots een duidelijke rol spelen. Naast PFAS die op de rwzi binnenkomen is er ook een rol voor precursors, die op de rwzi in PFAS worden omgezet.

Microplastics en nanodeeltjes

Er zijn geen normen voor microplastics en andere zeer kleine deeltjes (nano-deeltjes), maar er zijn wel zorgen over het wijdverspreide voorkomen van deze stoffen en de gevolgen daarvan. Uit Stowa-onderzoek bleek dat microplastics voor het grootste deel verwijderd worden in de voorbezinking, en ook ingevangen worden in het actief slib (STOWA 2021). Bij gebruik van slib op de bodem komen daar dus ook de microplastics terecht. Er is niet gezocht op informatie over het lot van microplastics tijdens de slibgisting, dit is in deze studie buiten beschouwing gelaten. Recent is er in Europese regelgeving een beperking gekomen voor het [toevoegen van microplastics](#) aan producten binnen de chemische regelgeving REACH. Hierdoor komt er waarschijnlijk een afname van de hoeveelheid microplastic uit deze bronnen. Het is niet uitgezocht welke fractie van de microplastics op de rwzi dit vertegenwoordigt.

Antibioticaresistentie

Het voorkomen van antibioticaresistente organismen en de verspreiding daarvan is ook een aspect dat speelt bij de afvalwaterbehandeling. Uit onderzoek (STOWA 2015, STOWA 2018) blijkt dat de verspreiding van antibioticaresistentie naar oppervlaktewater plaatsvindt vanuit foutaansluitingen, overstorten en effluent van rwzi's.

4.4 Toekomstige verwerking: uitwerking gekozen scenario's

In deze paragraaf worden de scenario's besproken die eerder zijn genoemd in §1.3. Het doel van deze scenario's is om de aanwezige micronutriënten terug te brengen in de kringloop. Terugbrengen in de kringloop betekent in de praktijk toepassen in de landbouw. Dit kunnen scenario's zijn met het doel al het zuiveringsslib in de landbouw toe te passen, of scenario's specifiek gericht op het terugbrengen in de kringloop van micronutriënten.

4.5 Toekomstig scenario 1: Saneren aan de bron

4.5.1 Toegepaste technologie

Saneren aan de bron houdt in dat verschillende afvalwaterstromen gescheiden worden ingezameld en behandeld, te weten huishoudelijk afvalwater, hemelwater en industrieel afvalwater. Door saneren aan de bron kan de kwaliteit van het zuiveringsslib mogelijk worden verbeterd. Door bepaalde stromen, die een aanzienlijke bijdrage leveren aan de vrachten van zware metalen in zuiveringsslib, af te koppelen van het communale rioolstelsel en gescheiden te behandelen zou mogelijk zuiveringsslib wel kunnen voldoen aan de normen voor toepassing in de landbouw.

Een ander scenario dat ook neerkomt op saneren aan de bron is het gescheiden behandelen van toiletafvalwater ofwel zwartwater. Dit staat beschreven in §4.8.

4.5.2 Haalbaarheid

Zoals toegelicht in §4.2.2 bevat zuiveringsslib op dit moment teveel koper en zink om toe te mogen passen in de landbouw. Deze hoeveelheden zouden aanzienlijk moeten worden teruggebracht om te voldoen aan de normen; te weten 81% voor koper en 72% voor zink. In Figuur 4-6 en Figuur 4-7 is de herkomst weergegeven van het koper en zink. Hieruit blijkt dat er in elk geval landelijk niet één specifieke bron is die zoveel koper en zink bevat dat afkoppelen hiervan de gehalten voldoende terugbrengt. Als huishoudelijk afvalwater volledig gescheiden wordt behandeld én regenwater wordt afgekoppeld, zal dit ongeveer voor zowel zink als koper ongeveer 25% van de op het riool komende vracht schelen. Afkoppelen van de industrie scheelt slechts enkele procenten.

Bij het afkoppelen van stromen komt ook minder aan andere componenten op de rwzi binnen, zoals organische stof en stikstof. Er zijn daarmee effecten op allerlei andere aspecten van de zuivering. Er zal o.a. minder zuiveringsslib ontstaan, en naast vrachten zullen ook concentraties veranderen.

Mogelijk zou dit scenario bij sommige specifieke rwzi's, waar de concentraties koper en zink en huishoudelijk afvalwater (veel) lager zijn dan gemiddeld, wel een mogelijkheid zijn om te voldoen aan de normen. Hiervoor zijn echter data nodig van specifieke rwzi's, gegevens hiervan waren niet beschikbaar.

Voor het terugbrengen van micronutriënten in de kringloop zou saneren aan de bron wel een mogelijkheid zijn als het uitgangspunt andersom is: in plaats van het opschonen van het huidige communale zuiveringsslib, wat niet mogelijk is zoals hierboven toegelicht, kan gekeken worden naar het afscheiden van stromen die schoon genoeg zijn, zodat deze niet worden gemengd en daarmee vervuild met het overige zuiveringsslib. Hierbij kan gedacht worden aan bepaalde industriële stromen, zoals de voedingsmiddelenindustrie. Een aantal van dit soort slibstromen uit industrie worden in WP

1 en WP3 van dit project behandeld: aardappelrestromen (Avebe en AVIKO) en suikerbietenstromen (COSUN). Zie verder de rapporten van deze WP's.

4.6 Toekomstig scenario 2: Thermofiele vergisting

4.6.1 Toegepaste technologie

Thermofiele vergisting vindt meestal plaats bij temperaturen van 55-65°C. In algemene zin spelen dezelfde aspecten als die genoemd zijn bij de vergisting van GFE/swill (zie §3.4). De processen zijn hetzelfde als bij mesofiele vergisting, het voordeel van thermofiele gisting is dat de afbraak sneller verloopt, en er meer organische stof wordt afgebroken waardoor de biogasproductie groter is en efficiënter verloopt. Ook worden door de hogere temperatuur pathogenen beter afgedood, en is gevonden dat medicijnresten beter verwijderd worden dan tijdens mesofiele vergisting (Moerland et al. 2022).

De hogere temperatuur heeft invloed op bijvoorbeeld precipitatieprocessen en oplosbaarheid in het algemeen. Echter, deze wordt alleen toegepast tijdens de vergisting, het thermofiele digestaat koelt daarna af. Dit heeft dan ook weer effect op o.a. de oplosbaarheid van stoffen en in welke fractie zij uiteindelijk terechtkomen.

4.6.2 Hoeveelheden micronutriënten

Er waren geen direct beschikbare data voor de vergelijking van concentraties zware metalen en micronutriënten voor mesofiele en thermofiele slibgisting. Het is de verwachting dat tijdens de thermofiele gisting door de hogere temperatuur metalen relatief meer in oplossing komen dan bij mesofiele gisting. Dit kan dus effect hebben op de verdeling van de metalen tussen de vaste en vloeibare fracties. Rejectiewater na ontwatering van thermofiel slib kan dus hogere concentraties metalen bevatten dan na vergisting bij mesofiele temperaturen.

Een hogere vracht metalen naar de waterfase leidt tot een lagere vracht in ontwaterd slib. Welke invloed dit heeft op de concentraties in het slib wordt daarnaast ook beïnvloed door de processen die zich voordoen tijdens het afkoelen van thermofiel slibdigestaat, de ontwaterbaarheid en door de hogere organische stofafbraak tijdens thermofiele gisting. Als de concentraties in het slib beduidend lager uitvallen, biedt dit mogelijk perspectieven voor gebruik van het slib als meststof. Er moet dan wel rekening gehouden worden met de hogere vracht naar het rejectiewater. Het zou interessant zijn om deze thema's verder uit te zoeken met een aanvullende literatuurstudie en/of metingen op rwzi's.

Op dit moment is niet te zeggen welke vracht aan micronutriënten naar de landbouw zou gaan als thermofiel slib aan de normen zou voldoen. De normen voor met name koper en zink worden nu echter in grote mate overschreden, en het lijkt onwaarschijnlijk dat de invloed van thermofiele gisting op de slibconcentraties zo groot is. Mogelijk liggen hier kansen voor specifieke slibstromen die een minder grote normoverschrijding hebben.

4.6.3 Haalbaarheid en toekomstbestendigheid

Thermofiele vergisting is praktisch haalbaar. Op dit moment zijn er in Nederland nog slechts 4 rwzi's met een thermofiele vergister (Unie van Waterschappen 2023). Daarnaast zijn er ruim 60 mesofiele

vergisters. Om dit scenario op grote schaal toe te passen, zullen deze vergisters omgebouwd moeten worden tot thermofiele vergisters. Dit vergt betere isolatie en/of een grotere warmtevraag. De haalbaarheid van thermofiele slibgisting is onderzocht en gerapporteerd in Stowa-verband (STOWA 2014, STOWA 2018).

Het rejectiewater van ontwaterd thermofiel slib bevat hogere stikstofgehaltenes dan dat van mesofiel slib. Dit betekent een hogere N-belasting van de rwzi, tenzij de stikstof uit het rejectiewater wordt teruggewonnen. Stikstofterugwinning is interessant, en is technisch wel maar economisch vooralsnog niet haalbaar (STOWA 2012, STOWA 2021). Zonder maatregelen moet de complete verwerking ingesteld zijn op de verhoogde N-concentratie in het rejectiewater na digestaatontwatering.

Slibgisting wordt veel toegepast in Nederland, er zijn geen juridische hindernissen voor toepassing van de technologie. Of thermofiel vergist slib beter of juist minder goed kan voldoen aan juridische eisen m.b.t. gebruik als meststof is vooralsnog onbekend.

Het is bekend dat thermofiele vergisting leidt tot een verslechterde ontwaterbaarheid van het slib (STOWA 2018). De eerder genoemde verbeterde organische stofafbraak zorgt niet voor een reductie van het af te voeren volume. Dat is in de huidige situatie een ongewenste situatie, er moet dan een groter volume naar de verbranding worden afgevoerd waardoor kosten voor transport en verbranding toenemen. Hierdoor wordt het lastig om met het oog op eventuele toekomstige voordelen m.b.t. grondstoffenterugwinning nu al voor te sorteren door thermofiel te gaan vergisten. Slibvergisters zouden wel bij de bouw voorbereid kunnen worden op de mogelijkheid van thermofiele verwerking, zodat omgeschakeld kan worden als er bijvoorbeeld betere methoden beschikbaar komen voor ontwatering en voor N-verwijdering uit rejectiewater.

4.7 Toekomstig scenario 3: Extractie van mineralen

In plaats van toepassing van een gehele slibstroom, zijn er ook technische mogelijkheden om specifieke stoffen te extraheren en toe te passen in de landbouw.

4.7.1 Toegepaste technologie

Er zijn veel verschillende methoden beschikbaar voor de extractie van mineralen. Hierbij zijn opties voor de behandeling van slibas na verbranding, maar ook winning van mineralen uit de vloeistoffase zoals struviet. Een inventarisatie door KWR (KWR 2016) van methoden om mineralen te extraheren, waaronder voor zuiveringsslib en slibas, noemt de volgende technologieën:

- Ionenwisseling
- Chemische coagulatie
- Flotatie
- Electrokinetische technologie
- Bioleaching
- Superkritische extractie
- Pyro- of hydrometallurgical

Struvietprecipitatie en de hoeveelheden metalen/micronutriënten die in struviet worden gevonden, worden beschreven in §5.5, in scenario 2 voor urineverwerking.

4.7.2 Micronutriënten-terugwinning en haalbaarheid

Tabel 3-3 van het hoofdrapport voor WP4 geeft een overzicht van de Nederlandse vrachten aan verschillende micronutriënten in slibas na verbranding. Dit zijn de maximale hoeveelheden micronutriënten die uit de as zouden kunnen worden teruggewonnen. Er binnen de reikwijdte van deze studie geen direct beschikbare informatie gevonden over welke elementen met welke methode in welke hoeveelheden realistisch gezien terug te winnen zouden zijn, en of dit qua vorm/samenstelling dan potentieel bruikbare producten zouden zijn.

De meeste informatie die over dit thema beschikbaar is gaat over het terugwinnen van fosfor uit slibas. Bij het TetraPhos proces wordt dit gedaan via het oplossen van de P in fosforzuur. Hierbij gaan ook andere metalen in oplossing, die dan via ionenwisseling uit de oplossing worden verwijderd. De stroom opgeloste metaalzouten kan gebruikt worden op een rwzi om ijzerchloride te vervangen dat gebruikt wordt voor het neerslaan van fosfaat (STOWA 2023). Via deze route worden metalen dus teruggewonnen voor gebruik in de afvalwaterzuivering, het is niet bekend of de metaalzoutoplossing ook geschikt is voor toepassing als, of voor de productie van, een meststof voor micronutriënten.

Fosfaat uit slibas is via CMC 13 van de EU Meststoffenverordening toegelaten als bestanddeel in meststoffen. Mogelijk dat metaalzouten uit slibas via deze zelfde route als bestanddeel zijn toegelaten. Zoals toegelicht in §2.3.2 is het voor de certificering als CE-meststof niet voldoende om te voldoen aan de eisen voor een materiaalcategorie (CMC), de uiteindelijke meststof moet ook voldoen aan de gestelde producteisen (PFC). Fosforwinning uit slibas zal zeker verder doorontwikkeld worden, zie ook de ontwikkelingen in Duitsland waar deze route per 2025 verplicht wordt. Er komt daarmee steeds meer informatie beschikbaar en hopelijk dus ook meer inzicht in het lot van de verschillende metalen.

4.8 Toekomstig scenario 4: Brongescheiden systemen (Nieuwe Sanitatie)

4.8.1 Toegepaste technologie

Bij brongescheiden sanitatie, ook Nieuwe Sanitatie genoemd, worden verschillende huishoudelijke afvalwaterstromen apart ingezameld en verwerkt. Zie de [Saniwijzer](#) voor voorbeelden van dit soort systemen in o.a. Nederland, Duitsland en Zweden. Over het algemeen wordt het afvalwater gesplitst in toiletafvalwater (zwart water) en de overige stromen (grijs water). Verdere opsplitsing door bijvoorbeeld urine ook apart in te zamelen is ook mogelijk, en soms worden ook etensresten opgenomen in de behandelingsconcepten. Binnen de uitwerking van het hier beschreven scenario worden etensresten buiten beschouwing gelaten, zie verder hoofdstuk 3 voor verwerkingsmethoden hiervoor. Aparte urineverwerking komt aan bod in hoofdstuk 5. Dit scenario 4 gaat uit van het gescheiden behandelen van toiletafvalwater.

Door zwart water gescheiden te houden komen de hierin aanwezige zware metalen en micronutriënten niet op de rwzi terecht, maar in een eigen aparte behandelingsinstallatie zoals in o.a. Sneek (Waterschoon) en Kerkrade (Superlocal) gebeurt. Dit heeft gevolgen voor de slibamenstelling op de rwzi, en er wordt een aparte zwartwaterslibfractie met eigen samenstelling geproduceerd. De momenteel meest gebruikte methode voor gescheiden behandeld zwart water is inzameling met vacuümtoiletten gevolgd door anaerobe vergisting van het resulterende sterk geconcentreerde zwart water.

Gezien de bijdrage van de sector consumenten aan de lozing van koper en zink op het riool, is het onwaarschijnlijk dat de gescheiden behandeling van zwart water de concentraties koper en zink in zuiveringsslib voldoende omlaag zullen brengen, ook niet als dit samen met het afkoppelen van regenwater gebeurt.

4.8.2 Hoeveelheden micronutriënten die via producten worden teruggewonnen

Zwart water bevat vooral urine, ontlasting, toiletpapier en spoelwater. Andere stromen die via het toilet geloosd worden vormen slechts een klein aandeel (STOWA 2018), en blijven in deze analyse buiten beschouwing. Er waren weinig betrouwbare gegevens voor de metalengehaltes van met name ontlasting, en de spreiding in data was groot (Rose, Parker et al. 2015). Uiteindelijk is op basis van onderzoek naar zware metalen in zwart water (Tervahauta 2014) is de jaarlijkse vrucht in Nederland berekend (Tabel 4-6). Het onderzoek van Tervahauta laat verder zien dat het grootste aandeel aan zware metalen in zwart water afkomstig is van ontlasting, gevolgd door urine. Toiletpapier bevat relatief slechts kleine hoeveelheden. Voor Pb en Cu is ook het leidingwater een belangrijke bron. Gezien de kleine bijdragen van toiletpapier en de selectieve bijdrage van leidingwater kan gesteld worden dat de metalen in zwart water voor het overgrote deel uit de menselijke voeding afkomstig zijn.

Tabel 4-6. Jaarlijkse vrucht aan zware metalen in zwart water, gemiddelde van waarden verzameld door Tervahauta (Tervahauta 2014), vergeleken met totale instroom op rwzi (zie Tabel 4-4).

	Vracht in zwart water (kg/jaar)	Vracht naar rwzi (kg/jaar)	Aandeel zwart water (%)
Cd	62	435	14
Cr	6.462	14.130	46
Cu	17.896	133.000	13
Hg	75	194	39
Ni	5.724	17.391	33
Pb	416	28.269	1.5
Zn	69.692	433.742	16
As	250	6.449	3.9

Tabel 4-7 geeft gevonden waarden voor zware metalen in het slib van zwartwater-vergisters, in vergelijking met de normen voor zuiveringsslib in het Uitvoeringsbesluit meststoffenwet.

Tabel 4-7. Gehalte aan zware metalen (mg/kg ds) in slib van zwart watervergisting, gemiddelde van waarden gemeten aan slib uit de Nieuwe Sanitatieprojecten in Sneek (Lemmerweg en Noorderhoek) (STOWA 2014), en metingen van de Graaff (de Graaff 2010), vergeleken met maximale gehalten in het Uitvoeringsbesluit meststoffenwet.

	Gehalte in slib van vergisting van zwart water*	Gehalte in zuiveringsslib (berekend o.b.v. gegevens 4.2)	Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet
Cd	0,8	1,0	1,25
Cr	12	39	75
Cu	234	391	75
Hg	0,4	0,5	0,75
Ni	12	26	30
Pb	25	84	100
Zn	848	1057	300
As	5,7	11	15

* In Sneek Noorderhoek worden ook vermalen etensresten met het zwart water verwerkt. Vanwege het beperkte aantal beschikbare metingen en de overeenkomst in gehalten zijn de gehalten wel meegerekend voor het gemiddelde.

Uit Tabel 4-6 blijkt dat volledige afkoppeling van zwart water een vrachtreductie van zo'n 15% kan opleveren voor koper en zink op de rwzi. Dit is niet voldoende om de in het begin van dit hoofdstuk berekende benodigde reductie te halen. Ook is volledige afkoppeling niet realistisch, zie de volgende paragraaf.

4.8.3 Haalbaarheid en toekomstbestendigheid

Nieuwe Sanitatie is praktisch mogelijk, zie de voorbeelden op Saniwijzer. In Sneek is hier op kleine schaal ervaring mee, maar er zijn ook toepassingen op grotere schaal (>1000 i.e.) in Helsingborg en Gent. Een voorwaarde voor gescheiden inzameling van zwart water is een gescheiden binnenriolering, wat het makkelijkst is te realiseren bij nieuwbouw. Bij bestaande bouw is dit meestal niet mogelijk (of technisch/economisch haalbaar), hoewel er voorbeelden zijn zoals Superlocal in Kerkrade. Daarnaast moeten er aparte behandelingsinstallaties komen en dit is ook een uitdaging qua locaties en ruimtebeslag. Het zal niet praktisch mogelijk zijn om al het zwart water af te koppelen.

Het apart behandelen van zwart water is juridisch mogelijk, maar ook als al het zwart water apart behandeld wordt zal de kwaliteit van het rwzi-slib niet voldoende zijn om aan de normen te voldoen. Uit ervaringen in Sneek blijkt dat het slib uit aparte behandeling zelf ook niet aan de normen voldoet (Tabel 4-7).

Nieuwe Sanitatie staat momenteel vooral in de belangstelling vanuit de mogelijkheden voor nutriëntenterugwinning. Door systemen met minder spoelwater te gebruiken ontstaat er zwart water met hoge concentraties organisch materiaal, N en P, waardoor anaerobe vergisting met nageschakelde nutriëntenterugwinning mogelijk wordt. Bijvoorbeeld via struvietprecipitatie en strippen. Verder kan decentrale zuivering een optie zijn waar nieuwbouwwijken niet op de rwzi aangesloten kunnen worden vanwege gebrek aan capaciteit. Op het moment dat gekeken wordt naar decentrale zuivering is het goed om te kijken naar de mogelijkheid van gescheiden stromen, voor efficiëntere verwerking en grondstoffenterugwinning. Momenteel is er een EU call voor projecten die de potentie van de combinatie van centrale en decentrale (afval)watersystemen inzichtelijk maken.

Tabel 4-7 laat zien slib uit de vergisting van zwart water qua zware metalen schoner is dan het gemiddelde voor al het Nederlandse zuiveringsslib, maar dat koper en zink ook hier boven de norm liggen. Bij de huidige normen is afzet van dit slib naar de landbouw juridisch niet mogelijk.

4.9 Kennishiaten

Databeschikbaarheid/kennis m.b.t. metalen in verschillende (slib)fracties

Er is weinig informatie beschikbaar over de samenstelling m.b.t. micronutriënten in verschillende fracties communaal en industrieel slib. Inzicht in de gehalten in primair slib, secundair slib, slibdigestaat, ontwaterde fracties, rejectiewaters en bijvoorbeeld uitgezeefde materialen is nodig om de potentie voor hergebruik beter in te kunnen schatten. Zoals de concentraties voor primair en secundair slib in Tabel 4-5 laten zien, kan er tussen rwzi's veel variatie in gehalten zware metalen zitten. Door beter te begrijpen hoe de situatie op een rwzi invloed heeft op de slibkwaliteit kunnen er mogelijk routes geïdentificeerd worden om tot slibstromen te komen die wel voldoen aan de wettelijke eisen.

Slibas en eventuele stromen daaruit

Zoals aangegeven in het hoofdrapport van WP4 zijn er geen goede recente samenstellingsgegevens voor slibas beschikbaar. Ook zijn de beschikbare technologieën voor extractie van metalen uit water, slib en slibas-stromen niet selectief, en ontbreekt het aan informatie over de samenstelling m.b.t. micronutriënten voor de verschillende mogelijke producten. In wetenschappelijke literatuur over P-winning uit slibas worden zware metalen wel benoemd, maar meer diepgaand literatuuronderzoek is nodig om de informatie goed te kunnen interpreteren en door te vertalen naar praktische inzichten voor deze studie.

Gedrag van metalen in mesofiele en thermofiele slibgisting

Het kan zijn dat het rejectiewater na ontwatering van het slib hogere concentraties metalen bevat dan na vergisting bij mesofiele temperaturen. Binnen deze studie was echter geen ruimte voor een literatuurstudie naar deze effecten, om hier meer stellige uitspraken over te kunnen doen. De verdeling van metalen over ontwaterd slib en rejectiewater na bepaalde behandelingen zoals vergisting is een factor in het zoeken naar richtingen om de gehalten in ontwaterd slib te verlagen tot onder de norm.

4.10 Recente projecten rond zuiveringsslib

Hieronder een aantal recente projecten/initiatieven m.b.t. zuiveringsslib.

Stowaprojecten

In Nederland worden de meeste projecten m.b.t. slib in Stowaverband gedaan. Voor een overzicht zie: <https://www.stowa.nl/zoeken?keywords=slib>

PPS "Sludge2Soil" (2015-2018)

Van zuiveringsslib naar meststoffen en bodemverbeteraars

<https://tkideltatechnologie.nl/project/sludge2soil-van-zuiveringsslib-naar-mestsstoffen-en-bodemverbeteraars>

PPS “Productie van fosforzuur en organische zuren uit slib van awzi’s en bermgras” (2020-2022)

Ontwikkeling van een proces dat laagwaardig slib en bermgras(sap) op kostenefficiënte wijze omzet in de hoogwaardiger grondstoffen fosforzuur en azijnzuur.

<https://projecten.landbouwwatervoedsel.nl/project/productie-van-fosforzuur-en-organsiche-zuren-uit-slib-van-afvalwaterzuiveringsinstallaties-en-uit-bermgras>

EU H2020 SMART-PLANT (2016-2020)

Scale-up of low-carbon footprint material recovery techniques in existing wastewater treatment plants

<https://cordis.europa.eu/project/id/690323> en <https://www.smart-plant.eu>

EU H2020 SCALIBUR (2018-2022)

Scalable technologies for bio-urban waste recovery

<https://cordis.europa.eu/project/id/817788> en <https://scalibur.eu>

EU H2020 FLASH2PHOS (2021-2025)

The complete thermochemical recycling of sewage sludge

<https://cordis.europa.eu/project/id/958267> en <https://flashphos-project.eu>

Horizon Europe OXYCON (2023-2024)

The role of micro-aeration-based processes for the valorisation of polluted sludge to value-added chemicals

<https://cordis.europa.eu/project/id/101068409>

Horizon Europe SusPhos (2022-2023) & (2023-2025)

The first economically viable process for phosphate recycling

<https://cordis.europa.eu/project/id/101071928> en <https://cordis.europa.eu/project/id/190186984>

<https://www.susphos.com>

Horizon Europe MinE-UP (2024-2025)

Treasure from trash: mining critical elements from sewage sludge using plants

<https://cordis.europa.eu/project/id/101105237>

Interreg/Euregio: Zuiveringsslib als organische bodemverbeteraar

<https://stichtingbiomassa.nl/projecten/zuiveringsslib-als-organische-bodemverbeteraar>

Sustainable URban FERTilizer – SURFER (2021-2024)

Within the SURFER project we are contributing with new knowledge for development of safe treatment and recycling of nutrients from blackwater, for production of a sustainable urban fertilizer.

<https://www.ltu.se/research/subjects/VA-teknik/Forskningsprojekt/Hallbar-stadsgodsel-SURFER-2021-2024-1.215106?!=en>

5. Urine

5.1 Afbakening van deze afvalstroom

Dit scenario betreft de aparte behandeling van menselijke urine. Urine is een belangrijke bron van stikstof; 85% van de stikstof afkomstig uit huishoudelijk afvalwater is afkomstig van urine, en 47% van het fosfaat (STOWA 2006). Vanwege de hoge concentratie aan deze nutriënten, is urine een interessante stroom om meststoffen uit te winnen. De samenstelling van urine is wat betreft macronutriënten goed bekend. Over gehalten aan metalen en micronutriënten is minder bekend, maar op basis van literatuur is hier wel een inschatting van te maken.

In de uitgewerkte scenario's gaat het over onverdunde urine. Er is ervaring met inzameling hiervan, hoewel niet op grote schaal. Op de logistieke uitdagingen van het op grotere schaal verzamelen van urine wordt in deze rapportage niet ingegaan.

5.2 Huidige verwerking

5.2.1 Verwerkingsroutes urine

Op dit moment wordt vrijwel alle urine samen met het overige huishoudelijke afvalwater afgevoerd via het rioolstelsel naar de communale rwzi. In Nederland is 99,7% van de huishoudens aangesloten op het riool (Saniwijzer 2023). Ook bedrijven zijn meestal aangesloten op het riool, soms via een eigen afvalwaterzuiveringsinstallatie.

Er zijn uitzonderingen op deze wijze van verwerking. Bijvoorbeeld in gevallen waarbij huizen niet zijn aangesloten op het riool, of waarbij er een aparte verwerkingsroute is specifiek voor toiletafvalwater. Dit zijn echter zeer kleine aantallen, dusdanig klein dat deze huidige alternatieve verwerkingsroutes niet zijn meegenomen in het baseline scenario. Daarnaast zijn nog er bedrijven met een eigen AWZI. Bij AWZI's wordt vaak ook huishoudelijk afvalwater gezuiverd, dus een deel van de urine zal via AWZI's verwerkt worden. Er zijn echter geen recente gegevens van de hoeveelheid huishoudelijk afvalwater die via AWZI's worden verwerkt; de Statline database heeft slechts gegevens van AWZI's tot en met 2016, waarbij geen onderscheid wordt gemaakt tussen bedrijfsafvalwater en huishoudelijk afvalwater van werknemers bij de betreffende bedrijven. Dit is dus een kennishiaat. Het ligt echter voor de hand dat dit slechts een heel beperkt deel is van de totale hoeveelheid urine.

Verwerking van urine in de communale rwzi wordt daarom beschouwd als het 'baseline scenario' voor urine. In de volgende paragraaf wordt hier verder op ingegaan middels de opgestelde massabalans. Urine komt samen met andere afvalwaterstromen, en vaak ook hemelwater, terecht in het rioolstelsel. Het wordt hiermee aanzienlijk verdund voor het op de rwzi aankomt zoals hieronder stapsgewijs berekend:

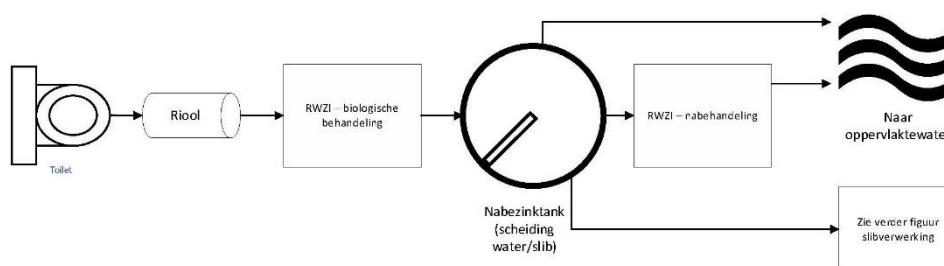
- De dagelijkse hoeveelheid urine die per persoon wordt geproduceerd is ongeveer 1,4 liter/persoon/dag (l/p/d) (Rose et al. 2015). De dagelijkse afvalwaterhoeveelheid is ongeveer 119 l/p/d (STOWA 2018). Dit betekent dat urine al binnen het huishouden met een factor 86 wordt verdund.
- Het inwoneraantal van Nederland was in mei 2023 17.861.351 inwoners (CBS 2023). De jaarlijkse hoeveelheid urine die in Nederland wordt geproduceerd is daarmee ongeveer 9.133.000 m³ per jaar.

- De totale hoeveelheid afvalwater die in Nederland op het riool terecht komt is 1.963.884.000 m³/jaar (StatLine 2023). Naast huishoudelijk afvalwater is dit voornamelijk hemelwater, en industrieel afvalwater dat op de rwzi wordt gezuiverd.
- Met behulp van bovenstaande getallen kan worden berekend dat de urinestroom in totaal met een factor 215 wordt verdund in de afvalwaterketen.

Communale rwzi's in Nederland zijn allemaal op basis van het Actief Slib systeem. Hierbij wordt afvalwater gezuiverd met behulp van bacteriën, welke organische verbindingen en stikstof biologisch omzetten tot slib, CO₂ en N₂. Fosfaat wordt soms biologisch en soms chemisch, met behulp van neerslagreacties met metaalzouten, verwijderd. De bacteriën en vaste stoffen samen vormen het slib, wat wordt afgescheiden van het water. Soms wordt er nog een nabehandeling uitgevoerd voor een extra hoge effluentkwaliteit, bijvoorbeeld zandfiltratie. Door steeds strenger worden eisen zal het aantal rwzi's met een nabehandeling toenemen. Het water wordt geloosd op oppervlaktewater. De verwerking van het slib staat beschreven in §4.1.

Micronutriënten uit urine zullen voor het een groot deel in het slib terechtkomen en voor een deel in het effluent. Een uitzondering is hierbij magnesium, zoals toegelicht in het hoofdrapport van WP4. Deels door bijvoorbeeld adsorptie, deels door neerslagreacties. Het overige deel blijft in de waterfractie achter en komt bij het lozen van het effluent in het oppervlaktewater terecht.

In onderstaande afbeelding staat de huidige verwerking schematisch weergegeven.



Figuur 5-1 Schematische weergave verwerking urine

5.2.2 Concentraties N, P en micronutriënten in urine

Om een goede massabalans te kunnen opstellen, is allereerst onderzocht wat naar schatting de concentraties zijn van diverse zware metalen en micronutriënten in urine. Dit is gedaan op basis van een (beperkt) literatuuronderzoek. Er zijn veel data beschikbaar over de samenstelling van urine voor wat betreft macroparameters. Voor micronutriënten bleken de data schaarser, en er was zeer weinig literatuur te vinden specifiek voor Nederland. Het ligt voor de hand dat gehalten aan micronutriënten per land (en ook binnen een land) significant anders kunnen zijn, als gevolg van verschillen in dieet en leefomgeving. Bij het literatuuronderzoek is daarom in elk geval zoveel mogelijk gebruik gemaakt van studies uitgevoerd in Europa, onder gezonde volwassenen. Van deze data is voor elke stof een gemiddelde waarde berekend.

In Tabel 5-1 staan de waarden van de verschillende micronutriënten in urine weergegeven. Deze zijn omgerekend naar een totale vracht per jaar, op basis van een gemiddelde urineproductie van 1,4 l/p/d (Rose, Parker et al. 2015) en een inwoneraantal van 17.861.351 (in eind mei 2023; CBS 2023).

Tabel 5-1. Gehaltes micronutriënten in urine en jaarlijkse vrachten. Bronnen: (Kujawa-Roeleveld and Zeeman 2006, Ronteltap, Maurer et al. 2007, STOWA 2018, Heitland and Köster 2021, Rempelos, Wang et al. 2022, LeAF bv 2023).

Soort stof	Stofnaam	Geschatte concentratie urine	Eenheid	Vracht totaal per jaar in NL	Eenheid
Macronutriënt	N	7.857	mg/l	71.762	ton/jaar
Macronutriënt	P	500	mg/l	4.567	ton/jaar
ZM	As	151,0	µg/l	1.379	kg/jaar
ZM	Cd	1,9	µg/l	17,4	kg/jaar
ZM	Hg	0,4	µg/l	3,82	kg/jaar
ZM	Pb	7,4	µg/l	67,3	kg/jaar
ZM	Ni	4,3	µg/l	38,8	kg/jaar
ZM en MN	Cr	3,8	µg/l	34,9	kg/jaar
ZM en MN	Cu	27,7	µg/l	253	kg/jaar
ZM en MN	Zn	230	µg/l	2.100	kg/jaar
MN	B	1.046	µg/l	9.554	kg/jaar
MN	Co	4,8	µg/l	43,4	kg/jaar
MN	Fe	8,2	µg/l	74,9	kg/jaar
MN	Mg	115.052	µg/l	1.050.820	kg/jaar
MN	Mn	0,1	µg/l	1,17	kg/jaar
MN	Se	16,1	µg/l	147	kg/jaar

In onderstaande tabel staat per micronutriënt weergegeven hoeveel van de vracht genoemd in Tabel 5-1 er naar het water, en hoeveel naar het slib gaat op de rwzi. Deze verdeling is gebaseerd op dezelfde data als die van het zuiveringsslib in Tabel 4-4. We nemen hierbij aan dat de verhouding tussen de hoeveelheid micronutriënten die op de rwzi in het slib eindigen ten opzichte van wat er in het effluent achterblijft, representatief is voor de micronutriënten die specifiek afkomstig zijn uit urine.

Tabel 5-2. Micronutriënten vanuit urine op de rwzi – verdeling over water en slib

Soort stof	Stofnaam	Vracht naar effluentwater	Vracht naar zuiveringsslib	Eenheid
Macronutriënt	P	565	4.002	ton/jaar
ZM	As	557	822	kg/jaar
ZM	Cd	3,28	14	kg/jaar
ZM	Hg	0,512	3,310	kg/jaar
ZM	Pb	2,96	64,4	kg/jaar
ZM	Ni	16,0	22,9	kg/jaar
ZM en MN	Cr	4,60	30,3	kg/jaar
ZM en MN	Cu	17,4	235	kg/jaar
ZM en MN	Zn	334	1.766	kg/jaar
MN	B	8.858	695	kg/jaar
MN	Co	29,1	14,4	kg/jaar
MN	Fe	<i>IJzer wordt vaak toegevoegd in de rwzi om fosfaat te binden. Hier is daardoor geen verwijderingsrendement van te berekenen</i>		
MN	Mg	832.303	218.470	kg/jaar
MN	Mn	0,870	0,300	kg/jaar
MN	Se	37,1	109	kg/jaar

Uit bovenstaande tabel blijkt dat het grootste gedeelte van de zware metalen en micronutriënten afkomstig uit urine uiteindelijk in het zuiveringsslib eindigen. De verdere verwerkingsroute van micronutriënten die in het slib terechtkomen is te vinden in §4.1. Zware metalen en micronutriënten die in het effluent van de rwzi terechtkomen, eindigen momenteel in de meeste gevallen in het oppervlaktewater waar het effluent op geloosd wordt. Soms is er nog sprake van een extra zuiveringsstap op het effluent vanuit de nabezinktank, bijvoorbeeld zandfiltratie. Dit betreft tot nog toe een minderheid van de rwzi's.

Opslag van urine

In scenario's voor de behandeling van urine speelt opslag een belangrijke rol. Zowel m.b.t. praktische aspecten (plaats en afmetingen van de urinetank, leidingwerk, ventilatie, etc.) als veranderingen die tijdens de opslag in de urine plaatsvinden. Ureum wordt omgezet in ammonium, waardoor de pH stijgt. Het is bekend dat verschillende metalen tijdens de opslag neerslaan. Welke dit zijn en in welke mate neerslag plaatsvindt hangt af van verschillende factoren waaronder de samenstelling van de urine en de opslagcondities. (Ronteltap, Maurer et al. 2007) zag tijdens experimenten dat Cd, Cu en Pb in urine neerslaan, terwijl dit voor As, Co, Cr en Ni niet het geval was.

5.3 Recente en toekomstige ontwikkelingen

5.3.1 Gescheiden inzameling en verwerking van urine

Zoals al genoemd in §5.1 is er al langere tijd aandacht voor urine als belangrijke potentiële bron van nutriënten. Een meer recente ontwikkeling is het apart opvangen van urine bij evenementen, waarbij met grote aantallen mensen kan worden geëxperimenteerd met methodes hiervoor.

Ook zijn er diverse watervrije urinoirs op de markt. Deze worden toegepast in diverse openbare gebouwen in Nederland, bijvoorbeeld AFAS Live, Schiphol en alle Nederlandse restaurants van McDonald's (STOWA en Stichting Rioned 2021). Er konden geen data worden gevonden over het aantal watervrije urinoirs in Nederland, of een trend hierin. Bij AFAS live (voorheen Heineken Music Hall) werd tot 2022 urine in een tank opgevangen, waarna er op rwzi Amsterdam West struiviet van werd gemaakt (H2O/Waternetwerk 2016).

De verwachting is dat er interesse zal blijven om urine apart in te zamelen met het oog op toepassing in de landbouw. Met name in Zweden is dit een belangrijk onderzoeksgebied [REF], maar ook in Nederland blijft het een thema dat in de belangstelling staat. Urine van evenementen die door middel van bijvoorbeeld plaskruizen wordt ingezameld, wordt vanwege de efficiëntie bij het inzamelen nu nog gemengd met ander afvalwater. Mogelijk dat hier kansen liggen voor aparte inzameling.

Het Nederlandse bedrijf Semilla Sanitation ontwikkelt een technologie om urine te concentreren tot een bruikbare meststof. Een van de scenario's voor urine is het apart inzamelen van urine en behandeling door verdamping, eventueel in combinatie met membraanfiltratie als voorzuivering. Uit het concentraat van de verdampingsstap kan dan meststof worden gemaakt. Deze verwerkingsmethode is in dit onderzoek uitgewerkt als Scenario 1.

5.3.2 Niet genormeerde risico's

Er zijn geen aparte normen voor urine, deze stroom valt onder (huishoudelijk) afvalwater. De niet-genormeerde risico's komen overeen met die voor zuiveringsslib, zie §4.3.4. Waar van de ene kant belangstelling is voor urine als (bron van) meststof, is er van de andere kant het besef dat deze stroom ook o.a. hormonen en medicijnresten bevat. Dit is een aandachtspunt bij de verwerking van urine. Of er speciale normen komen voor meststoffen uit specifiek urine is niet bekend.

5.4 Toekomstig scenario 1: Aparte urine-inzameling gevolgd door membraanfiltratie en toepassing van concentraat in de landbouw

Het Nederlandse bedrijf Semilla Sanitation ontwikkelt een technologie om urine te concentreren tot een bruikbare meststof. Een van de scenario's voor urine is het apart inzamelen van urine en behandeling door verdamping, eventueel in combinatie met membraanfiltratie als voorzuivering. Uit het concentraat van de verdampingsstap kan dan meststof worden gemaakt.

5.4.1 Toegepaste technologie

De technologie voor het concentreren van urine is op basis van een combinatie van nanofiltratie en omgekeerde osmose, en vervolgens verdamping (concept 1), of directe verdamping (concept 2).

De 2 concepten werken als volgt:

- Concept 1: urine wordt door middel van directe nanofiltratie behandeld voor het verwijderen van schadelijke stoffen. Micronutriënten zullen in het permeaat blijven. Het permeaat hiervan wordt vervolgens behandeld met omgekeerde osmose. Door de omgekeerde osmose stap worden de micronutriënten geconcentreerd. Een klein deel van de micronutriënten zal met in het permeaat van de omgekeerde osmose achterblijven. Het concentraat van de omgekeerde osmose wordt verder behandeld door middel van verdamping. Deze verdampingsstap zorgt voor verder concentreren van de micronutriënten. Het volume van de verdampingsstap is 14%

van het volume daarvoor. Het uiteindelijke volume van het concentraat van de verdamping bevat het grootste deel van de oorspronkelijk vracht micronutriënten, en is ongeveer 2% van het oorspronkelijke volume.

- Concept 2: urine wordt behandeld door middel van verdamping. Het volume wordt hierbij gereduceerd tot ongeveer 14% van het oorspronkelijke volume. De aanname is dat aanwezige micronutriënten geheel in het concentraat achterblijven.

5.4.2 Hoeveelheden micronutriënten die via producten worden teruggewonnen

Het tijdens de verdamping ontstane concentraat bevat een hoog gehalte aan (micro)nutriënten. De vracht aan micronutriënten is in concept 1 wat kleiner dan de oorspronkelijke vracht in urine, omdat er een klein gedeelte afgescheiden wordt met het permeaat. In concept 2 is de vracht micronutriënten in het concentraat van de verdamping gelijk aan de oorspronkelijke vracht. De hoeveelheden en concentraties die via deze weg kunnen worden teruggewonnen staan in onderstaande tabel vermeld.

Tabel 5-3. Potentiële jaarvracht die kan worden teruggewonnen in Nederland met de twee doorgerekende concepten

Soort stof	Stofnaam	Potentiële jaarvracht die kan worden teruggewonnen		Eenheid
		Concept 1: nanofiltratie, RO, verdamping	Concept 2: enkel verdamping (terugwinpotentieel gelijk aan totale vracht in urine)	
Macronutriënt	N	65.232	71.762	ton/jaar
Macronutriënt	P	4.521	4.567	ton/jaar
ZM	As	1.337	1.379	kg/jaar
ZM	Cd	16,9	17,4	kg/jaar
ZM	Hg	3,72	3,82	kg/jaar
ZM	Pb	65,4	67,3	kg/jaar
ZM	Ni	38,5	38,9	kg/jaar
ZM en MN	Cr	34,5	34,9	kg/jaar
ZM en MN	Cu	248	253	kg/jaar
ZM en MN	Zn	2.100	2.100	kg/jaar
MN	B	6.210	9.554	kg/jaar
MN	Co	43,3	43,4	kg/jaar
MN	Fe	74,0	74,9	kg/jaar
MN	Mg	1.050.820	1.050.820	kg/jaar
MN	Mn	1,16	1,17	kg/jaar
MN	Se	147	147	kg/jaar

5.4.3 Praktische haalbaarheid

De technologie is beschikbaar. Echter het grootschalig inzamelen van aparte, onverdunde urine is een uitdaging. Het is wel goed praktisch haalbaar in situaties waarin urine onverdund op grote schaal kan worden ingezameld. Bijvoorbeeld op festivals of evenementenlocaties.

5.4.4 Juridische haalbaarheid

Urine heeft op dit moment een afvalstatus waardoor dit niet zomaar toegepast kan worden; zie §2.2.2.

Er zijn twee routes denkbaar om meststoffen uit urine in dit scenario goed te laten keuren als meststof. De eerst is een toevoeging aan bijlage Aa van de Uitvoeringsregeling Meststoffenwet; zie §2.7. Een andere mogelijkheid is het aanvragen van een einde-afvalstatus; zie §2.2.2.

5.4.5 Toekomstbestendigheid

Dit scenario is toekomstbestendig, al zal het opschalen praktisch lastig zijn zoals genoemd in §5.4.3. Urine zal uiteraard altijd beschikbaar blijven. Op dit moment is er in Nederland veel vraag naar nieuwe woningen. Dit biedt kansen voor het installeren van sanitatie waarbij rekening wordt gehouden met het apart opvangen van urine. Daarnaast is er blijvende belangstelling voor inzameling van urine op bijvoorbeeld festivals. Het kan zijn de samenstelling van festival-urine afwijkt van die van 'normale' urine. Dit vraagstuk is niet in het onderzoek opgenomen.

Bij toepassing van dit scenario zullen relatief weinig micronutriënten in de kringloop worden gebracht; urine bevat vooral veel stikstof en fosfaat. Op dit moment is hier niet veel vraag naar, omdat er in Nederland sprake is van een overschot van dierlijke mest.

5.5 Toekomstig scenario 2: Aparte inzameling en winning van struviet voor toepassing in de landbouw

5.5.1 Toegepaste technologie

Een tweede scenario is het terugwinnen van struviet vanuit urine, waarbij micronutriënten uit urine mogelijk deels worden ingevangen in, of afgescheiden met, de struviet en zo de kringloop in kunnen worden gebracht. Deze route is interessant omdat er al veel ervaring is met struvietprecipitatie en er in wet- en regelgeving ruimte is gemaakt om gebruik van struviet uit de afvalwaterketen mogelijk te maken. Struviet kan vanuit urine worden neergeslagen door toevoegen van magnesium. Naar struviet zijn diverse onderzoeken gedaan, zowel naar neerslag direct vanuit urine als naar struviet vanuit huishoudelijk afvalwater. Struviet wordt ook al teruggewonnen op 12 rwzi's in Nederland (Unie van Waterschappen 2023), in dat geval altijd vanuit rejectiewater.

In het verleden werd apart opgevangen urine van diverse locaties verwerkt in de SaNiPhos installatie van GMB bio-energie. Hieruit werd struviet en ammoniumsulfaat gewonnen. Deze installatie is eind 2017 gestopt (STOWA en Stichting Rioned 2017).

5.5.2 Hoeveelheden micronutriënten die via producten worden teruggewonnen

Er zijn diverse data beschikbaar over de samenstelling van struviet, ook naar struviet gewonnen uit urine zijn diverse onderzoeken bekend. De data specifiek over gehalten zware metalen en andere micronutriënten is beperkter. In onderstaande tabel gehalten van zware metalen uit diverse onderzoeken genoemd, in mg/kg P₂O₅. Ter vergelijking staan de normwaarden uit het Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet.

Tabel 5-4. Zware metalen (mg/kg P₂O₅) in diverse struvieten uit urine en van rwzi's, en normwaarden Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet (UBM).

	UBM	Struviet menselijke urine (Gell, De Ruijter et al. 2011) (gedroogd bij 40°C***)	Struviet menselijke urine* (Zamora, Georgieva et al. 2017) (gewassen)	Struviet van rwzi's** (STOWA 2015) (gewassen en gedroogd bij 40°C***)			
				Amsterdam West	Uitgegist slib		Rejectiewater
				Echten	Leuven	Land van Cuijk	
Cd	31,3	< 6	15	0,50	0,59	<0,21	<0,36
Cr	1.875	< 6	19	46,64	93,57	20,92	16,28
Cu	1.875	336	34	90,37	40,96	14,65	<6,9
Hg	18,8	-	-	0,26	0,18	0,98	0,03
Ni	750	6	13	46,64	47,01	<4,18	9,77
Pb	2.500	<81	129	78,71	13,56	5,23	<3,26
Zn	7.500	841	58	314,82	122,96	85,79	9,77
As	375	<42	48	2,89	2,12	0,65	<0,36

*In deze studie was sprake van veel waarden beneden de detectielimiet. De gehalten zijn daarom in een aantal gevallen waarschijnlijk in werkelijkheid lager.

** ZM gemeten na droging bij 105°C zijn omgerekend o.b.v. P-gehalten gemeten in vers product.

***Struviet bij lagere temperatuur gedroogd, om te voorkomen dat het uiteenvalt.

De in struviet gemeten gehalten zware metalen variëren sterk. Uit het nakijken van de door de auteurs gebruikte analysemethoden bleek dat het erg lastig is om de getallen één op één met elkaar te kunnen vergelijken. Naast de verschillen in uitgangsmateriaal (urine, uitgegist slib, rejectiewater) spelen meerdere factoren een rol. Aspecten die opvielen waren dat soms de struviet gewassen wordt voordat de analyse gedaan wordt, en dat er gerekend wordt met waarden die met verschillende methoden voor droging zijn verkregen. Struviet kan niet bij 105°C gedroogd worden omdat het dan desintegreert, terwijl droge stof bij die temperatuur wordt bepaald. Fosforgehalten worden soms op vers product-basis gegeven en soms op droge stofbasis. Ook is te zien dat bij diverse waarden sprake was van waarden beneden de rapportagegrens. Daarbij is gerekend met de rapportagegrens om het te toetsen aan de normwaarden.

De gehalten blijven wel in alle gevallen ver onder de normwaardes. Zware metalen vormen daarom geen bezwaar voor toepassing van struviet in de landbouw.

Er is voor deze studie geprobeerd om op basis van literatuur een inschatting te maken van de totale vrachten van de verschillende micronutriënten die via struviet terug naar de landbouw zouden kunnen worden gebracht. Hiervoor is gekeken naar de gehalten micronutriënten gevonden in struviet uit menselijke urine, en dan omgerekend naar de vracht indien alle urine in Nederland op deze manier zou worden ingezameld. In de berekening is aangenomen dat alle P uit de urine wordt omgezet in struviet. Bij de literatuurstudie bleek al dat veelal sprake was van concentraties beneden de detectielimiet. Hiermee is geen betrouwbare berekening te maken. Er is voor een indicatie van maximale teruggewonnen hoeveelheden een berekening gemaakt waarbij, in geval van een waarde beneden de detectielimiet, de detectielimiet zelf als waarde werd aangenomen. Echter in meerdere gevallen kwam de berekening hierbij uit op waarden hoger dan de totaalvracht vanuit menselijke urine genoemd in Tabel 5-1.

Een van de effecten die hierbij een rol kunnen spelen is dat metalen tijdens opslag en struvietvorming ook in andere vormen kunnen neerslaan. Bij het bepalen van de gehalten en het terugwinningspotentieel zou duidelijk onderscheid gemaakt moeten worden tussen gehalten die in struviet en gehalten die met struviet worden afgescheiden.

Geconcludeerd kan worden dat het niet goed mogelijk is een betrouwbare inschatting te maken van de hoeveelheden micronutriënten die via struvietprecipitatie kunnen worden teruggevonden.

5.5.3 Praktische haalbaarheid

De technologie is beschikbaar en met het produceren van struviet is al relatief veel praktijkervaring. Net als in scenario 1 voor filtratie en verdamping van urine, vormt de belangrijkste uitdaging voor dit scenario het gescheiden inzamelen van urine.

5.5.4 Juridische haalbaarheid

De juridische obstakels en mogelijke routes om struviet gemaakt uit urine goed te laten keuren als meststof zijn dezelfde als genoemd in §5.4.4. Voor struviet geproduceerd uit rioolwater op enkele rwzi's in Nederland is al sprake van een einde-afvalstatus zoals eerder genoemd in §2.6. Echter struviet uit urine zal waarschijnlijk niet beschouwd worden als vergelijkbare situatie. Er moet daarom rekening worden gehouden met een lange doorlooptijd bij het aanvragen van een einde afvalstatus, en de uitkomst is onzeker. De lange doorlooptijd en onzekerheid van de uitkomst gelden ook bij een aanvraag voor de Bijlage Aa.

5.5.5 Toekomstbestendigheid

Voor de toekomstbestendigheid van dit scenario zijn dezelfde zaken van toepassing als genoemd in §5.4.5.

5.6 Kennishiaten

Net als bij de andere afvalstromen is er ook bij urine gebrek aan inzicht in de samenstelling voor wat betreft gehalten aan micronutriënten. Vergelijkbaar met de andere stromen worden deze stoffen minder vaak gemeten, en als er wel gemeten wordt ligt de focus veelal op alleen de zware metalen. Vanwege de lage concentraties komt het regelmatig voor dat de waardes onder het meetbereik liggen.

Een factor die specifiek voor urine een rol speelt is dat niet alle studies vergelijkbare urine onderzoeken. In sommige studies wordt gekeken naar concentraties in verse urine, in andere studies gaat het om opgeslagen urine waar in sommige gevallen ook een deel spoelwater bij zit (dit onderzoek heeft zich beperkt tot data voor situaties zonder spoelwater). Waardes kunnen vanwege verdunning lager uitvallen, of hoger als gevolg van uitloging uit leidingen en tanks. Ook is bekend dat Cd, Cu en Pb in opgeslagen urine neerslaan (Ronteltap, Maurer et al. 2007). Daar staat tegenover dat inzameling, eventueel met beperkte hoeveelheden spoelwater, met daarna een periode van opslag waarschijnlijk representatiever is dan zeer verse urine. Daarnaast is maar een deel van studies representatief voor een algemene Nederlandse (West-Europese) context.

De uitkomsten van de scenario's voor urine (§5.4 en §5.5) schetsen een zeer beperkt potentieel voor terugwinning van micronutriënten. Wanneer er ontwikkelingen zijn waardoor urine opnieuw als bron van micronutriënten in beeld komt, is aan te raden om een uitgebreidere literatuurstudie te doen, liefst aangevuld met metingen van representatieve urine- en eventueel struvietmonsters.

5.7 Recente projecten rond urine

Hieronder een aantal recente projecten/initiatieven m.b.t. urine.

PPS project “Kringloopsluiting van Nutriënten uit Afvalwater en Proceswater (KNAP)”

Een van de cases binnen dit project gaat over urine.

<https://www.tkiwatertechnologie.nl/projecten/kringloopsluiting-van-nutrienten-uit-afvalwater-en-proceswater-knap>

Swedish University of Agricultural Sciences en Sanitation360

The team at SLU is working to disrupt the way we manage wastewater and design sanitation systems.

<https://www.slu.se/en/ew-news/2022/3/can-urine-help-save-food-production-under-crises>

<https://sanitation360.se>

EIC Accelerator project: Toopi-Regen

Unleash the power of urine to finally scale a real closed loop and regenerative farming system

<https://toopi-organics.com>

Melissa Space Research Program

MELISSA is the European project of circular life support system. It was established to gain knowledge on regenerative system, aiming to the highest degree of autonomy and consequently to produce food, water and oxygen from mission wastes.

<https://www.melissafoundation.org/page/melissa-project>

VunaNexus

The VUNA project was led by Eawag research between 2010 and 2015 with the goal to recover nutrients from urine and empower farmers in South Africa. VunaNexus AG was created in 2022, to focus solely on the urine treatment technology and fertiliser production.

<https://www.vunanexus.com>

<https://business.esa.int/projects/vunanexus>

ZirkulierBAR

In Barnim, Germany, the project zirkulierBAR establishes a circular living-lab for the production of hygienically safe and quality-assured recycling fertilizers, namely compost from solid matters and liquid fertilizer from urine.

<https://zirkulierbar.de>

BlueCity Circular Water

In de kelder van BlueCity worden gescheiden sanitaire waterstromen gerealiseerd met als doel deze waterstromen te hergebruiken.

<https://bluecitycircularwater.info>

Literatuurlijst

- ACM. (2023). "ACM positief over afspraken afvalinzamelaars om recycling te stimuleren." from <https://www.acm.nl/nl/publicaties/acm-positief-over-afspraken-afvalinzamelaars-om-recycling-te-stimuleren>.
- Agentschap NL Uitvoering Afvalbeheer (2011). Nederlands afval in cijfers, 2000-2008.
- Banks, C. J., S. Heaven, Y. Zhang and U. Baier (2018). Food waste digestion - Anaerobic Digestion of Food Waste for a Circular Economy. I. B. T. 37.
- Carmona-Cabello, M., I. L. García, J. Sáez-Bastante, S. Pinzi, A. A. Koutinas and M. P. Dorado (2020). "Food waste from restaurant sector – Characterization for biorefinery approach." *Bioresource Technology* **301**: 122779.
- CBS (2023). Gemeentelijke afvalstoffen; hoeveelheden.
- CBS. (2023). "Werkgelegenheidsstructuur." from <https://www.cbs.nl/nl-nl/visualisaties/dashboard-arbeidsmarkt/banen-werkgelegenheid/toelichtingen/werkgelegenheidsstructuur>.
- Commissie Deskundigen Meststoffenwet (2016). Protocol beoordeling stoffen Meststoffenwet versie 3.2. *Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu*. Wageningen.
- De Afvalspiegel and Witteveen+Bos (2023). Onderzoek samenstelling restafval uit KWD-sector in kader van Programma VANG Buitenshuis.
- de Graaff, M. (2010). *Resource recovery from black water* PhD, Wageningen University.
- El-Mashad, H. M. and R. Zhang (2010). "Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste." *Bioresource Technology* **101**(11): 4021-4028.
- Europese Commissie (2023). Commission Staff Working Document / Evaluation - Council Directive 86/278/EEC of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture.
- Gell, K., F. De Ruijter, P. Kuntke, M. De Graaff and A. Smit (2011). "Safety and effectiveness of struvite from black water and urine as a phosphorus fertilizer." *Journal of Agricultural Science* **3**(3): 67.
- Götze, R., A. Boldrin, C. Scheutz and T. F. Astrup (2016). "Physico-chemical characterisation of material fractions in household waste: Overview of data in literature." *Waste Management* **49**: 3-14.
- H2O/Waternetwerk (2016). Van urine Heineken Music Hall wordt mest gemaakt.
- Heitland, P. and H. D. Köster (2021). "Human biomonitoring of 73 elements in blood, serum, erythrocytes and urine." *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* **64**.
- Jensen, M. B., J. Møller and C. Scheutz (2017). "Assessment of a combined dry anaerobic digestion and post-composting treatment facility for source-separated organic household waste, using material and substance flow analysis and life cycle inventory." *Waste Management* **66**: 23-35.
- Kujawa-Roeleveld, K. and G. Zeeman (2006). "Anaerobic Treatment in Decentralised and Source-Separation-Based Sanitation Concepts." *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* **5**(1): 115-139.

- KWR (2016). Terugwinnen zware metalen en zeldzame aardmetalen uit afvalwater en slibeindverwerking (vooronderzoek).
- KWR (2018). Terugwinnen van metalen uit water, slib en vliegas.
- LeAF bv (2023). Eigen XRF metingen gescheiden ingezamelde urine.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2021). Landelijk afvalbeheerplan 2017-2029 / Slimmer omgaan met grondstoffen (versie tweede wijziging). Den Haag.
- Ministerie van Landbouw, N. e. V. (2023). Nota bij beantwoording van aanvullende Kamervragen over over juridische belemmeringen voor composteren gft met wormen.
- Partners for Innovation (2011). Inventarisatie van biomassastromen in de gemeente Den Haag.
- Rempelos, L., J. Wang, M. Barański, A. Watson, N. Volakakis, C. Hadall, G. Hasanaliyeva, E. Chatzidimitriou, A. Magistrali, H. Davis, V. Vigar, D. Średnicka-Tober, S. Rushton, K. S. Rosnes, P. O. Iversen, C. J. Seal and C. Leifert (2022). "Diet, but not food type, significantly affects micronutrient and toxic metal profiles in urine and/or plasma; a randomized, controlled intervention trial." The American Journal of Clinical Nutrition **116**(5): 1278-1290.
- Rijkswaterstaat (2023). Afvalmonitor.
- Rijkswaterstaat (2023). Samenstelling van het huishoudelijk restafval, sorteeranalyses 2022 / Gemiddelde driejaarlijkse samenstelling 2021, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Ronteltap, M., M. Maurer and W. Gujer (2007). "The behaviour of pharmaceuticals and heavy metals during struvite precipitation in urine." Water Research **41**(9): 1859-1868.
- Rose, C., A. Parker, B. Jefferson and E. Cartmell (2015). "The Characterization of Feces and Urine: A Review of the Literature to Inform Advanced Treatment Technology." Crit Rev Environ Sci Technol **45**(17): 1827-1879.
- Skrzypczak, D., K. Trzaska, M. Mironiuk, K. Mikula, G. Izydorczyk, X. Polomska, J. Wiśniewski, K. Mielko, K. Moustakas and K. Chojnacka (2023). Recent innovations in fertilization with treated digestate from food waste to recover nutrients for arid agricultural fields.
- Steenhuisen, F. (2022). Voedselverspilling in Fijn huishoudelijk restafval en GFT-afval, Nederland 2022, CREM Waste Management.
- STOWA (2012). Explorative research on innovative nitrogen recovery.
- STOWA (2014). Haalbaarheid van thermofiele slibgisting in Nederland.
- STOWA (2014). Nieuwe Sanitatie Noorderhoek, Sneek. Deelonderzoeken en overkoepelend eindrapport.
- STOWA (2015). Stand van zaken pathogenen, antibiotica en antibioticaresistentie.
- STOWA (2015). Verkenning van de kwaliteit van struviet uit de communale afvalwaterketen.
- STOWA (2018). Ontwatering van thermofiel slib. Onderzoek naar verbetering van ontwaterbaarheid.
- STOWA (2018). PACAS poederkooldosering in actiefslib voor verwijdering van microverontreinigingen. Onderzoek naar effectiviteit en efficiëntie op rwzi Papendrecht.

- STOWA (2018). Rol van afvalwater bij verspreiding antibioticaresistentie.
- STOWA (2018). Theoretische analyse van de zuurstofvraag van huishoudelijk afvalwater.
- STOWA (2019). Afkoppelen; kansen en risico's van anders omgaan met hemelwater in de stad.
- STOWA (2021). PFAS in influent, effluent en zuiveringsslib. Resultaten van een meetcampagne op acht rwzi's.
- STOWA (2021). Stikstof terugwinning uit rioolwater; van marktambitie naar praktijk.
- STOWA (2021). Verkenning van verwijderingsroutes microplastics in de rwzi.
- STOWA (2023). Life Cycle Analysis (LCA) van acht grondstoffen uit rioolwater.
- STOWA en Stichting Rioned. (2017). "SaNiPhos." *Saniwijzer - Nieuwe sanitatie in de praktijk* from <https://www.saniwijzer.nl/projecten/saniphos/detail=103>.
- STOWA en Stichting Rioned. (2021). "Watervrij urinoir." *Saniwijzer - Nieuwe sanitatie in de praktijk* from <https://www.saniwijzer.nl/technieken/inzameling-afvalwater/urinoirs/watervrije-urinoirs>.
- Tampio, E., T. Salo and J. Rintala (2016). "Agronomic characteristics of five different urban waste digestates." *Journal of Environmental Management* **169**: 293-302.
- Tervahauta, T. (2014). *Phosphate and organic fertilizer recovery from black water* PhD, Wageningen University.
- Unie van Waterschappen (2022). Bedrijfsvergelijking zuiveringsbeheer 2022.
- Unie van Waterschappen (2023). WAVES Databank
- VANG-HHA (2020). Verbetering afvalscheiding in de hoogbouw / Meer bronscheiding van gfe in steden door gedragsverandering, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- VANG-HHA (2022). Uitvoeringsprogramma VANG - Huishoudelijk Afval / Herijking voor de periode t/m 2025, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Werkgroep Afvalregistratie (2023). *Afvalverwerking in Nederland: gegevens 2021*. Utrecht, Rijkswaterstaat.
- Zamora, P., T. Georgieva, I. Salcedo, N. Elzinga, P. Kuntke and C. J. Buisman (2017). "Long-term operation of a pilot-scale reactor for phosphorus recovery as struvite from source-separated urine." *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* **92**(5): 1035-1045.
- Zhang, Y. and M. Walker (2010). *Optimising Processes for the Stable Operation of Food Waste Digestion*, University of Southampton, UK.



Correspondentie adres voor dit rapport:
Wageningen University & Research
Bornse Weilanden 9
6708 WG Wageningen
T 0317 48 33 60

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Correspondentieadres voor dit rapport:
Wageningen University & Research
Bornse Weilanden 9
6708 WG Wageningen
T 0317 48 33 60

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.
