

KWR 2026.029 |November 2026

# Analyse herkomst zware metalen en arseen in aerobe biomassa van agrifood industrie

## PPS KNAP project

KNAP
Kringloopsluiting van Nutriënten uit Afvalwater en Proceswater

KWR

Bridging Science to Practice

Het Publiek Private Samenwerking (PPS) project **Kringloopsluiting van Nutriënten uit Afvalwater en Proceswater (KNAP)** richt zich op het integraal sluiten van nutriëntenkringlopen vanuit sanitatie, communaal afvalwater en industrieel proceswater van de agro-food industrie. Het doel is om terugwinning en hergebruik van nutriënten uit afvalwater richting landbouw (of daarbuiten) naar een hoger niveau te tillen met de ontwikkeling van een kwaliteitssysteem voor gerecyclede meststoffen uit afvalwater. De verslaglegging van het KNAP project bestaat uit diverse publicaties, waarvan onderliggend product er één van is. Alle resultaten, publicaties en meer informatie is te vinden op https://doi.org/10.18174/726842 en www.nutrientplatform.org/knap

Penvoerder van het project is het **Nutrient Platform.** Onderzoeksorganisaties voor de uitvoering zijn **Wageningen University & Research (WUR)**, **KWR Water Research** en **LeAF b.v**. Het projectconsortium bestaat uit diverse partners o.a. vanuit akkerbouw, glastuinbouw, voedselverwerkende industrie, meststofbedrijven, waterschappen en afvalwater sector, laboratoria, techniek bedrijven, gemeentelijke en provinciale overheden, natuurorganisaties en hogescholen.

Dit project is mede gefinancierd met cash en in-kind bijdrages van de KNAP partners en Publiek Private Samenwerking (PPS) financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en Wageningen Research capaciteit vanuit TKI Agri & Food van het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur. De resultaten van dit project, waaronder deze rapportage, zijn openbaar.

# Colofon

## Analyse herkomst zware metalen in aerobe biomassa van agrifood industrie

**KWR 2026.029 | November 2026**

**Opdrachtnummer LWV/projectnummer KWR**
LWV2214/404368

**Projectmanager**
Frank Oesterholt

**Opdrachtgever**
KNAP consortium

**Auteur**
Josje Brouwers

**Kwaliteitsborger**
Frank Oesterholt

**Verzonden naar**
KNAP consortium

Deze activiteit is mede gefinancierd met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. De resultaten van deze activiteit waaronder deze rapportage zijn openbaar. Werkwijzen, rekenmodellen, technieken, ontwerpen van proefinstallaties, prototypen en door KWR gedane voorstellen en ideeën alsmede instrumenten, waaronder software, die in het onderzoeksresultaat zijn opgenomen, zijn en blijven het eigendom van KWR. Ook alle rechten die voortvloeien uit intellectueel en industrieel eigendom, alsmede de auteursrechten, blijven bij KWR berusten en derhalve eigendom van KWR.

**Keywords**

zware metalen, massabalansen, stromenanalyse, material flow analysis, agrifood industrie, aerobe biomassa, nutriëntenkringloop

Jaar van publicatie
2026

Meer informatie
Frank Oesterholt
T 06 215 07 897
E frank.osterholt@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

November 2026 ©
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

# Samenvatting

Binnen het KNAP-project is onderzocht wat de herkomst en verspreiding is van de zware metalen koper (Cu), zink (Zn), cadmium (Cd) en arseen (As) in aerobe biomassa afkomstig van een aardappelverwerkende fabriek en een bierbrouwerij. Aerobe biomassa uit proceswaterzuiveringen wordt gezien als een potentiële circulaire meststof. De aanwezigheid van zware metalen kan dit hergebruik echter beperken. Het doel van dit onderzoek was daarom om inzicht te verkrijgen in de bronnen, transportroutes en uiteindelijke bestemming van zware metalen binnen beide productiesystemen, zodat mogelijkheden voor brongerichte maatregelen kunnen worden geïdentificeerd. Voor beide casussen is een Material Flow Analysis (MFA) uitgevoerd. Op basis van massastromen, analyses van grondstoffen, hulpstoffen, processtromen en reststromen zijn massabalansen opgesteld. Hiermee is onderzocht via welke routes de metalen de fabriek binnenkomen, hoe zij zich tijdens verwerking, verpakken en proceswaterzuivering verplaatsen en in welke mate zij uiteindelijk terechtkomen in de aerobe biomassa.

De aardappelcasus laat een consistent en goed sluitend beeld zien. De belangrijkste bronnen van koper, zink en cadmium zijn de aangevoerde aardappelen, terwijl arseen voornamelijk wordt aangevoerd via aanhangende grond. Tijdens de verwerking komen metalen deels vrij in proceswaterstromen en worden zij vervolgens vastgelegd in aerobe biomassa. Ongeveer een kwart tot een derde van de aangevoerde koper-, zink- en cadmiumvracht komt uiteindelijk terecht in de aerobe biomassa. Voor arseen is de bijdrage van aanhangende grond relatief groot, maar ook hiervan wordt slechts een beperkt deel teruggevonden in de biomassa. De resultaten laten zien dat verwijdering van gronddeeltjes in de wasstappen al effectief verloopt en dat verdere optimalisatie hiervan slechts een beperkte reductie van de metaalbelasting van de aerobe biomassa zal opleveren.

De bierbrouwerijcasus blijkt complexer. Lage concentraties, meetwaarden rond detectiegrenzen en een grote variatie in processtromen maken het opstellen van sluitende massabalansen moeilijk, met name voor cadmium en arseen. Ondanks deze onzekerheden biedt de analyse waardevolle inzichten in de belangrijkste bronnen van metalen. Koper, cadmium en arseen blijken slechts in beperkte mate aanwezig te zijn, terwijl zink de belangrijkste bijdrage levert aan de metaalbelasting van de aerobe biomassa. Een deel van dit zink wordt bewust toegevoegd ten behoeve van het gistmetabolisme en verlaat het proces via surplusgist. Daarnaast blijkt het gebruik van zinkhoudende corrosie-inhibitoren in de verpakkingsafdeling een belangrijke bron van zink in de proceswaterzuivering en uiteindelijk in de aerobe biomassa. Ook retourflessen vormen een moeilijk beheersbare bron van verontreinigingen doordat de samenstelling van de achtergebleven inhoud grotendeels onbekend is.

De studie laat zien dat MFA een waardevol hulpmiddel is om bronnen van zware metalen in agrifoodprocessen zichtbaar te maken en gerichte maatregelen te onderbouwen. Tegelijkertijd blijkt de betrouwbaarheid van de resultaten sterk afhankelijk van de beschikbaarheid en kwaliteit van meetgegevens. Vooral bij lage concentraties kunnen aannames over waarden onder de detectiegrens een grote invloed hebben op de uitkomsten van

Op basis van de resultaten wordt aanbevolen om in aardappelverwerkende processen de aandacht vooral te richten op de kwaliteit van aangevoerde grondstoffen en een goede verwijdering van aanhangende grond. Voor bierbrouwerijen ligt de grootste kans voor reductie van metaalgehalten in aerobe biomassa bij het vervangen van zinkhoudende corrosie-inhibitoren door zinkvrije alternatieven. Daarnaast wordt aanbevolen om kritische processtromen beter te monitoren, bemonstering van retourflessenstromen te verbeteren en bij toekomstige studies extra aandacht te besteden aan meetonzekerheden en concentraties nabij detectiegrenzen. Hiermee kan de kwaliteit van massabalansen verder worden verbeterd en kunnen beter onderbouwde keuzes worden gemaakt voor toepassing van aerobe biomassa als circulaire meststof.

# Inhoud

**Colofon** **2**
**Samenvatting** **3**
**Inhoud** **4**

**1 Introductie** **5**

**2 Material Flow Analysis** **6**

**3 Aardappelverwerkend bedrijf** **7**
3.1 Systeembeschrijving 7
3.2 Databronnen 7
3.3 Resultaten 8
3.3.1 Massabalans koper aardappelverwerkend bedrijf 9
3.3.2 Massabalans zink aardappelverwerkend bedrijf 10
3.3.3 Massabalans cadmium aardappelverwerkend bedrijf 11
3.3.4 Massabalans arseen aardappelverwerkend bedrijf 12
3.4 Conclusie en discussie casus aardappelverwerkend bedrijf 13

**4 Bierbrouwerij** **14**
4.1 Systeembeschrijving 14
4.2 Databronnen 15
4.3 Resultaten 16
4.3.1 Massabalans koper bierbrouwerij 16
4.3.2 Massabalans zink bierbrouwerij 18
4.3.3 Massabalans cadmium bierbrouwerij 20
4.3.4 Massabalans arseen bierbrouwerij 22
4.4 Conclusies en discussie casus bierbrouwerij. 24

**5 Conclusies & aanbevelingen** **25**

**Referenties** **27**

# 1 Introductie

Het PPS project *Kringloopsluiting van Nutriënten uit Afvalwater en Proceswater* (KNAP) richt zich op het integraal sluiten van nutriëntenkringlopen vanuit communale en industriële afvalwatersystemen. Het doel is om terugwinning en hergebruik van nutriënten uit afvalwater richting landbouw (of daarbuiten) naar een hoger niveau te tillen met de ontwikkeling van een kwaliteitssysteem voor gerecyclede meststoffen uit afvalwater. Hieraan wordt binnen 8 verschillende cases aan gewerkt. Dit rapport is geschreven binnen de casus duurzame toepassing van waardevolle nutriënten uit agrifood industrie (casus F/I), waarin onderzoek wordt gedaan naar het hergebruik van aerobe biomassa als meststof in de landbouw.

Aerobe biomassa is een restproduct van afvalwaterzuivering waar relatief veel waardevolle macro- en micronutriënten in zitten (Raheem et al., 2018). Hierdoor vormt het een bruikbaar en duurzaam alternatief voor bemesting met kunstmest. Het hergebruik van aerobe biomassa als meststof wordt momenteel echter belemmerd door (te) hoge concentraties van met name koper (Cu), zink (Zn), cadmium (Cd) en arseen (As). Koper en zink behoren tot de essentiële micronutriënten en zijn in kleine hoeveelheden nodig voor het fysiologisch functioneren van gewassen. Cadmium en arseen daarentegen vervullen geen fysiologische functies. Overmatige blootstelling aan koper, zink, cadmium of arseen kan gezondheidsproblemen veroorzaken (Genchi et al., 2020; Jomova et al., 2011; Plum et al., 2010; Stern, 2010).

Dit onderzoek is gestart om antwoord te vinden op de vraag waar de zware metalen en arseen in de aerobe biomassa van agrifood verwerkers vandaan komen. Om die vraag te beantwoorden zijn massabalansen opgesteld voor twee type agrifood bedrijven: een aardappelverwerkend bedrijf en een bierbrouwerij. Deze twee type bedrijven zijn uitgekozen omdat daarmee zowel de verwerking van een grondgebonden product (aardappel) als een niet-grondgebonden product (graan) wordt geanalyseerd. In hoofdstuk 2 wordt de methodiek achter het opstellen van deze massabalansen kort beschreven. In hoofdstuk 3 en 4 worden de data en resultaten voor respectievelijk het aardappelverwerkend en het bier producerend bedrijf beschreven en geïnterpreteerd. In hoofdstuk 5 worden conclusies en aanbevelingen beschreven.

# 2 Material Flow Analysis

*Material Flow Analysis* (MFA) is een wetenschappelijke methode om de kwantiteit van bepaalde materiaalstromen ('*flows*') en voorraden ('*stocks*') in een systeem in kaart te brengen. Het systeem betreft in dit geval de productielocaties van het aardappelverwerkend bedrijf en de bierbrouwerij en de materiaalstromen betreffen koper (Cu), zink (Zn), cadmium (Cd) en arseen (As). Voor het opstellen van de massabalans worden een aantal stappen doorlopen: (1) visualiseren van het systeem, (2) verzamelen van massa en concentratie data, (3) mate van data onzekerheid bepalen en (4) balanceren. Deze stappen zijn uitgevoerd met behulp van de door Cencic & Rechberger (2008) ontwikkelde software STAN. Deze software ondersteunt bij het visualiseren van de massabalans én het reconciliëren van data uit verschillende bronnen. In situaties waarbij onvoldoende data beschikbaar is of de kwaliteit van de inputdata onvoldoende is, kan het balanceren van de massabalans niet worden uitgevoerd. In dat geval zijn alleen stap 1 en 2 doorlopen.

De systeemvisualisaties (stap 1) zijn ontwikkeld in samenwerking met de betreffende agrifood bedrijven. Om de totale hoeveelheid aan zware metalen en arseen in het systeem te berekenen is data nodig van de massa van een stroom en de concentraties van zware metalen en arseen in die massa. De data voor massa en concentraties (stap 2) is zoveel mogelijk opgehaald bij de bedrijven zelf. Wanneer massa data niet beschikbaar was, zijn stromen berekend tijdens het balanceren van de massabalans (stap 4) met behulp van STAN. Wanneer concentratie data niet beschikbaar was zijn waardes uit literatuur gebruikt. Om de massabalans te kunnen balanceren, is een indicatie nodig van de mate van onzekerheid van de data (stap 3). In dit onderzoek is de mate van onzekerheid gebaseerd op de standaardafwijking van de concentratie data als deze beschikbaar was of berekend kon worden. Indien de standaardafwijking niet bekend was en niet kon worden berekend is de mate van data onzekerheid bepaald aan de hand van de methodiek van Laner et al (2016).

# 3 Aardappelverwerkend bedrijf

## 3.1 Systeembeschrijving

In het aardappelverwerkend bedrijf worden aardappels verwerkt tot aardappelproducten als (gekruide) aardappelpartjes, -blokjes of -schijfjes, aardappelgratin, aardappelpuree of friet. De massabalans is opgesteld voor één productielocatie en bijbehorende proceswaterzuivering gedurende één (onbepaald) jaar.

Binnenkomende aardappels worden op een schudzeef ontdaan van droge aanhangende grond, waarna ze in de wasinstallatie terecht komen. Hier bezinken de aanwezige stenen vrijwel direct. In draaiende trommels worden de aardappels ontdaan van de natte aanhangende grond die bestaat uit zand en klein (lutum fractie). Na de trommels worden de opdrijvende loofresten verwijderd. Het waswater wordt gerecirculeerd over de wasinstallatie met een debiet van 60 $m^3$/uur. De helft daarvan wordt behandeld via cyclonen voor het verwijderen van zand. Vervolgens wordt de fijnere fractie gecoaguleerd met een polymeer en verwijderd met een bandindikker. Zand en klei worden afgevoerd als natte grond. Een klein deel van het op deze manier gereinigde waswater wordt rechtstreeks gespuid naar de proceswaterzuivering. De rest van het water gaat met het overige waswater terug naar de wasinstallatie. De grote van de spui komt overeen met de toevoer van schoon water naar de wasinstallatie. Hiervoor wordt effluent van de proceswaterzuivering gebruikt.

De effectiviteit van de wasinstallatie hangt af van de hoeveelheid aanhangende grond en de samenstelling van de grond. Ook van belang is of de aardappels direct van het land komen (veel aanhangende (natte) grond) of uit de opslag (minder grond en groter aandeel droog materiaal). Verwijderingspercentages in de wasinstallatie voor zand en klei zijn niet bekend, maar kunnen in de praktijk sterk variëren. De verwachting is dat een deel van de aanhangende grond uiteindelijk ook in de proceswaterzuivering terecht komt en daar wordt verwijderd met de aerobe biomassa. Bij normaal bedrijf zal het vooral gaan om de fijnste fracties. Bij het periodiek reinigen van de wasinstallatie kunnen grotere hoeveelheden grondresten in de proceswaterzuivering terecht komen.

In het bedrijf worden gekoelde aardappelproducten geproduceerd. Hiertoe worden de aardappels geschild (stoomschillen), gesorteerd, gesneden, getransporteerd en geblancheerd. Water wordt intern gerecirculeerd onder andere over de snij- en blancheerprocessen en deels gespuid naar de proceswaterzuivering. Pasteurisatie en autoclaveren van de (verpakte) producten wordt uitgevoerd met gesloten verpakkingen.

Naast de geproduceerde aardappelproducten worden er verschillende bijproducten geproduceerd zoals de aardappelschillen die vrijkomen bij het stoomschillen, aardappelsnippers die vrijkomen bij het snijden en zetmeel dat via hydrocyclonen uit het circulerende water wordt gewonnen. Deze producten worden afgezet als veevoer.

De proceswaterzuivering bestaat uit een anaerobe zuivering gevolgd door een aerobe zuivering. Vanuit de anaerobe zuivering wordt slechts een kleine hoeveelheid (korrel)slib afgevoerd en hergebruikt als entmateriaal. Het zuiveringsslib uit de aerobe zuivering (aerobe biomassa) wordt ingedikt en afgevoerd voor verbranding.

## 3.2 Databronnen

Voor de massabalans zijn 16 stromen geïdentificeerd (Tabel 1). Voor stroom F1 tot en met F10 zijn binnen het KNAP-project labanalyses uitgevoerd om de concentratie aan zware metalen en arseen vast te stellen. Voor de

aardappelproducten (F03) is uitgegaan van dezelfde concentratie als in de aardappelen (F01). In het geval dat de concentraties lager uitvielen dan de detectiegrens is de detectiegrens aangehouden als concentratiewaarde. Dit was met name het geval voor stoomschillen (F04), snippers (F06), zetmeel (F07), drinkwater (F12) en het effluent (F15). De concentraties voor drinkwater (F12) zijn gebaseerd op openbare waterkwaliteitsgegevens van het lokale drinkwaterbedrijf. De concentraties van koper, zink en cadmium in afstromend regenwater (F13) zijn gebaseerd op gegevens een publicatie van RIONED en STOWA (Liefting et al., 2020). Voor de arseenconcentratie in afstromend regenwater is dezelfde waarde als cadmium aangenomen door gebrek aan beschikbare concentratiegegevens. De stromen additieven (F11) en chemicaliën (F16) zijn toegevoegd aan het processchema ter volledigheid en om richting te geven aan eventueel vervolgonderzoek, maar er is aangenomen dat beide stromen geen zware metalen of arseen bevatten. De hoeveelheid zware metalen en arseen in proceswater zijn berekend in STAN (zie Hoofdstuk 2).

*Tabel 1 gehaltes aan zware metalen in de verschillende onderscheiden stromen in een aardappelverwerkend bedrijf. De waardes in de gearceerde rijen zijn gebaseerd op eigen analyses. Waardes voor drinkwater (F12) en afstromend hemelwater (F13) zijn afkomstig van het lokale drinkwaterbedrijf en waterschap.*

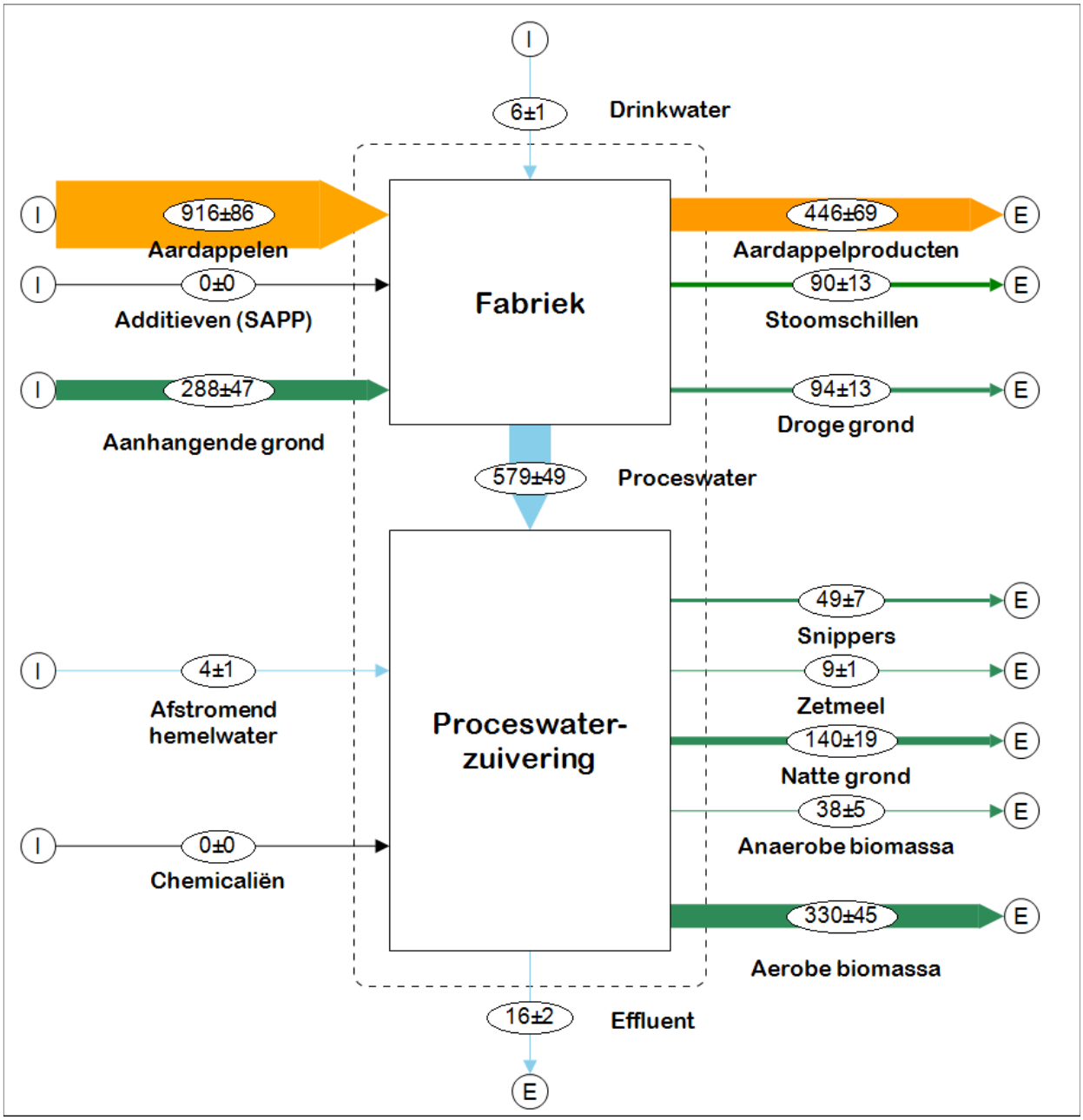
| # | Flow naam | Massa (kiloton) | DS% | Zware metalen concentraties | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Cu | Zn | Cd | As | Eenheid |
| *F01* | Aardappels | 200.0 | 20.0 | 0,9 | 4,4 | 0,03 | 0,02 | mg/kg |
| *F02* | Aanhangende grond | 12.0 | 95.0 | 13,7 | 41,3 | 0,32 | 8,93 | mg/kg ds |
| *F03* | Aardappelproducten | 100.0 | 20.0 | 0,9 | 4,4 | 0,03 | 0,02 | mg/kg |
| *F04* | Stoomschillen | 27.0 | 13.4 | 5,0 | 5,0 | 0,21 | 0,05 | mg/kg ds |
| *F05* | Droge grond | 3.5 | 90.5 | 11,0 | 34,0 | 0,25 | 1,52 | mg/kg ds |
| *F06* | Snippers | 22.5 | 10.4 | 5,0 | 5,0 | 0,13 | 0,05 | mg/kg ds |
| *F07* | Zetmeel | 3.0 | 26.4 | 5,0 | 5,0 | 0,09 | 0,05 | mg/kg ds |
| *F08* | Natte grond | 1.4 | 40.9 | 14,9 | 66,0 | 0,38 | 7,96 | mg/kg ds |
| *F09* | Anaerobe biomassa | 0.7 | 6.0 | 183,5 | 1370,0 | 4,20 | 12,8 | mg/kg ds |
| *F10* | Aerobe biomassa | 4.0 | 23.2 | 71,3 | 321,0 | 1,67 | 5,73 | mg/kg ds |
| *F11* | Additieven (SAPP) | 10.0 | 2.4 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 0,00 | mg/kg ds |
| *F12* | Drinkwater | 640.0 | | 2,0 | 5,0 | 0,05 | 0,05 | µg/L |
| *F13* | Afstromend hemelwater | 15.0 | | 20,0 | 594,0 | 1,40 | 1,40 | µg/L |
| *F14* | Proceswater | 655.0 | | - | - | - | - | µg/L |
| *F15* | Effluent | 640.0 | | 5,0 | 16,3 | 0,40 | 1,50 | µg/L |
| *F16* | Chemicaliën | 0.5 | | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 0,00 | µg/L |

## 3.3 Resultaten

In deze paragraaf zijn de resultaten opgenomen van de material flow analysis (MFA) die is uitgevoerd en gevisualiseerd met STAN. Die analyse is uitgevoerd voor de vier metalen in
Tabel 1. Het resultaat is per metaal weergegeven in een flowschema met massastromen per afzonderlijke stroom waarbij het gepresenteerde resultaat is uitgedrukt in g/kton verwerkt product (aardappelproducten). De MFA's voor de verschillende metalen zijn gebalanceerd.
Met "proceswater" in het schema wordt bedoeld de som van waswater uit de wasinstallatie voor binnenkomende aardappels en het water dat vrijkomt bij de verschillende verwerkingsprocessen (en dat als gebruikt proceswater wordt afgevoerd naar de proceswaterzuivering). Met "proceswaterzuivering" in het schema wordt bedoeld de combinatie van waswaterinstallatie en proceswaterzuivering (anaeroob – aeroob), waarbij vanuit de waswaterinstallatie effectief alleen de stroom "natte grond" vrijkomt.

### 3.3.1 Massabalans koper aardappelverwerkend bedrijf

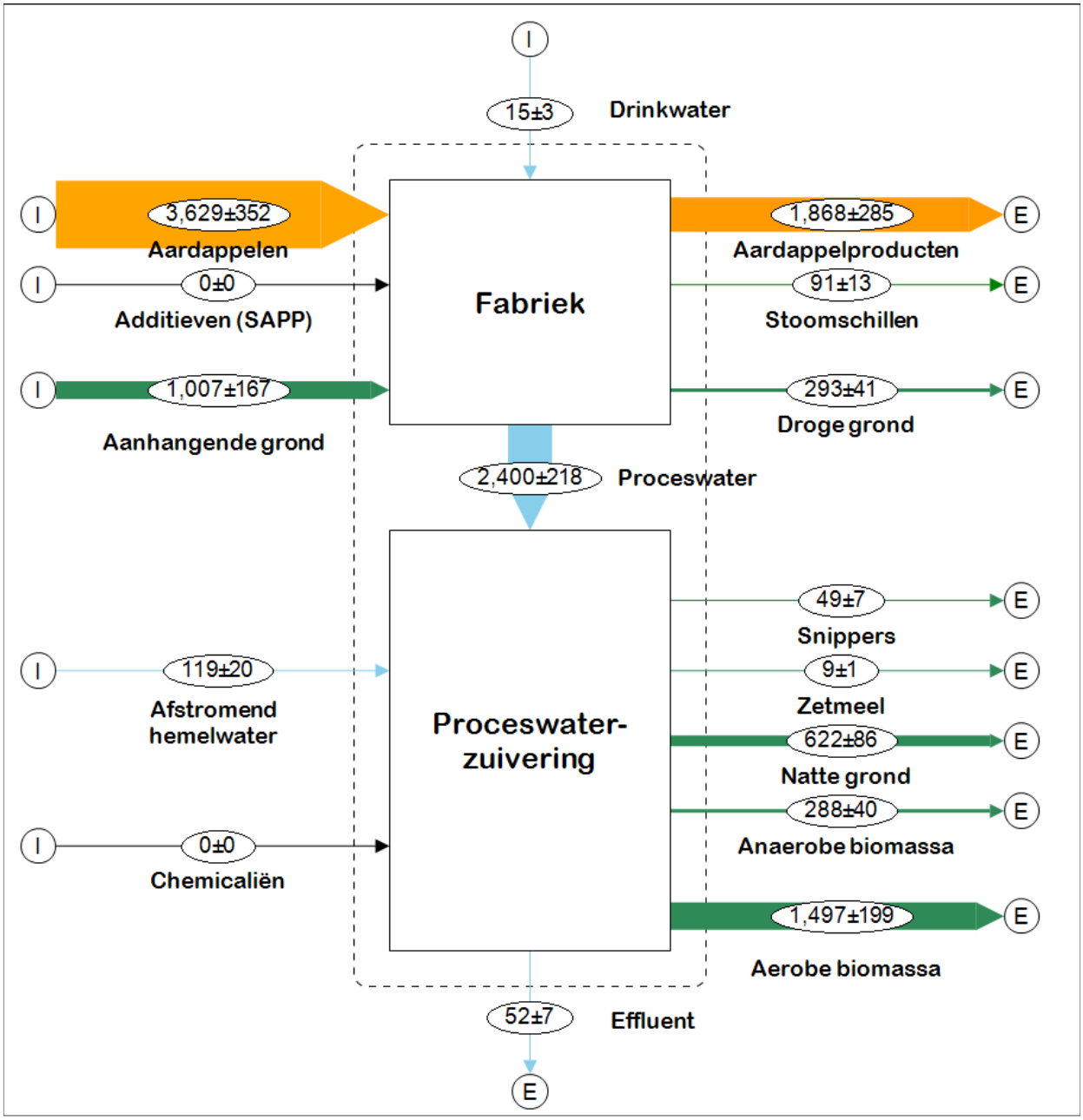
- Uitgaande van de volledige verwerking van 1 kton aan aardappelen is de totale ingaande hoeveelheid koper ongeveer 1.200 g.
- De meeste koper (75 %) wordt aangevoerd met de aardappelen en ongeveer 24 % met de aanhangende grond. Ongeveer 37 % van het koper blijft in de geproduceerde aardappelproducten, terwijl 27 % in de aerobe biomassa terecht komt. Via de droge grond en natte grond wordt 19 % van het koper afgevoerd.




*Figuur 1 Gebalanceerde massabalans van een aardappelverwerkend bedrijf voor koper (g/kton aardappelproducten)*

### 3.3.2 Massabalans zink aardappelverwerkend bedrijf

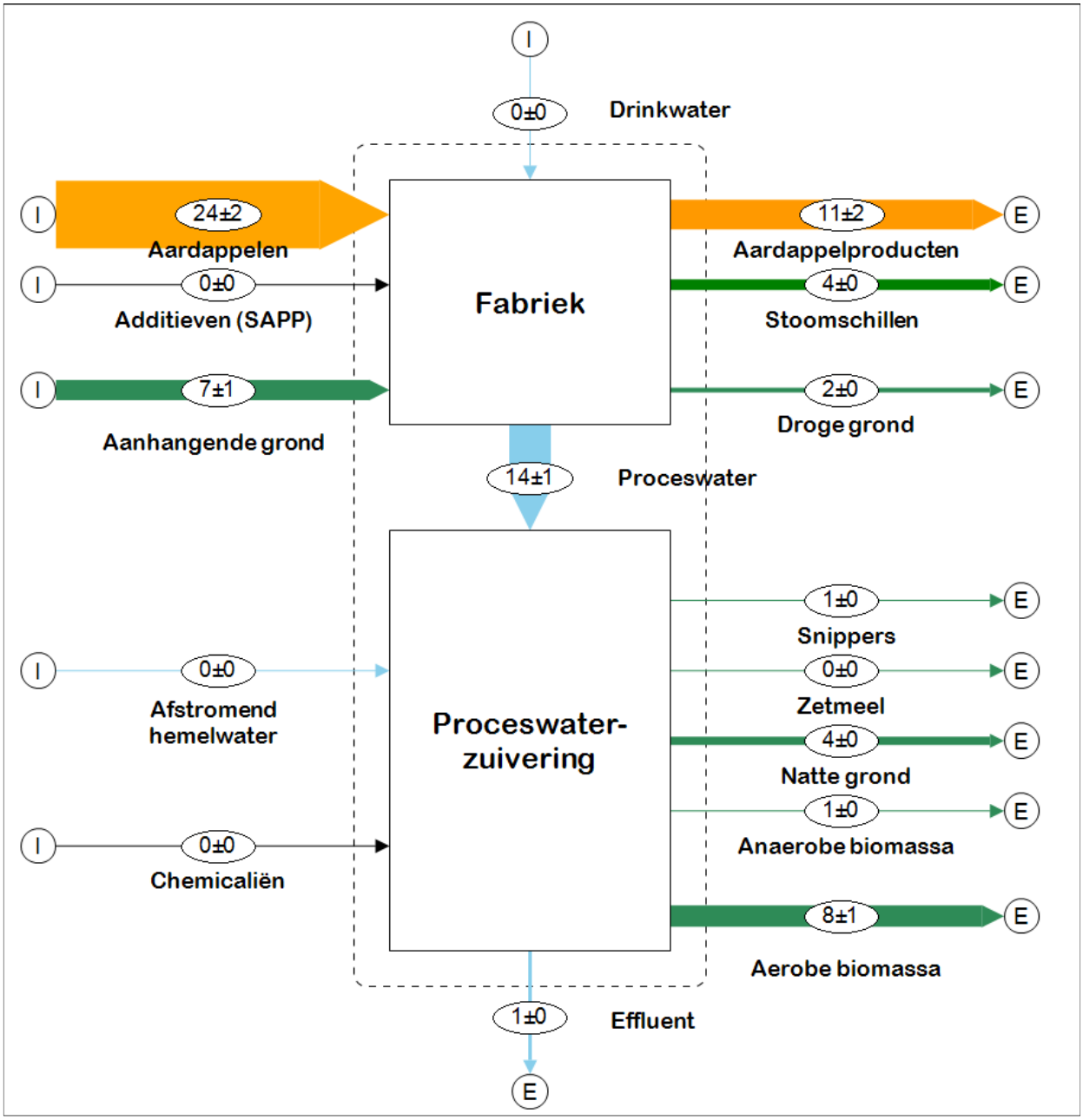
- Uitgaande van de volledige verwerking van 1 kton aan aardappelen is de totale ingaande hoeveelheid zink ongeveer 4.770 g.
- Het meeste zink (76 %) wordt aangevoerd met de aardappelen en ongeveer 21 % met de aanhangende grond. Ongeveer 39 % van het zink blijft in de geproduceerde aardappelproducten, terwijl 31 % in de aerobe biomassa terecht komt. Via de droge grond en natte grond wordt 19 % van het zink afgevoerd. Deze percentages zijn vergelijkbaar met die van koper.




*Figuur 2 Gebalanceerde massabalans van een aardappelverwerkend bedrijf voor zink (g/kton aardappelproducten)*

### 3.3.3 Massabalans cadmium aardappelverwerkend bedrijf

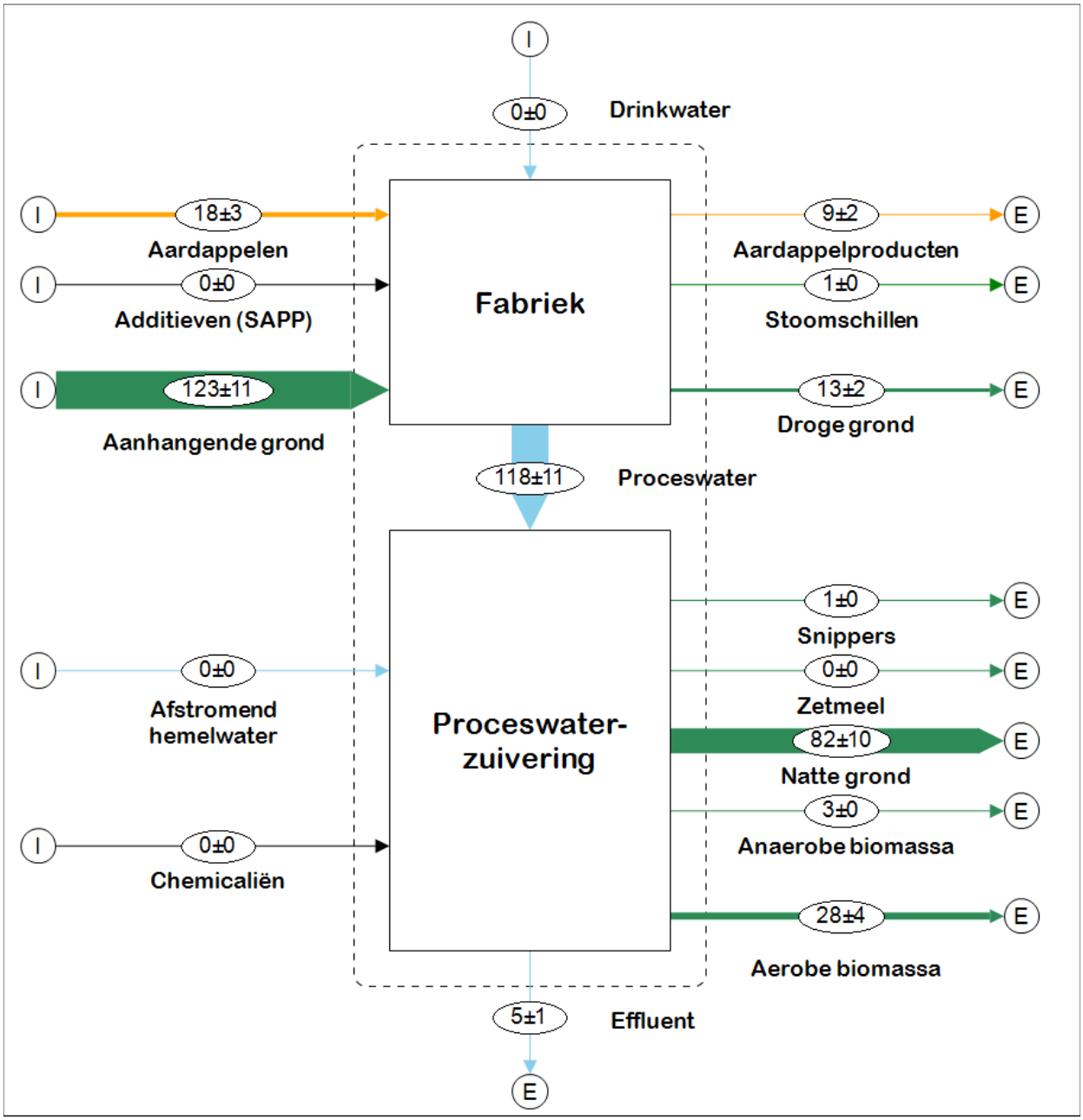
- Uitgaande van de volledige verwerking van 1 kton aan aardappelen is de totale ingaande hoeveelheid cadmium ongeveer 31g.
- Het meeste cadmium (77 %) wordt aangevoerd met de aardappelen en ongeveer 22,5 % met de aanhangende grond. Ongeveer 34 % van het cadmium blijft in de geproduceerde aardappelproducten, terwijl 25 % in de aerobe biomassa terecht komt. Via de droge grond en natte grond wordt 19 % van het cadmium afgevoerd. Deze percentages zijn vergelijkbaar met die van koper en zink.




*Figuur 3 Gebalanceerde massabalans van een aardappelverwerkend bedrijf voor cadmium (g/kton aardappelproducten)*

### 3.3.4 Massabalans arseen aardappelverwerkend bedrijf

- Uitgaande van de volledige verwerking van 1 kton aan aardappelen is de totale ingaande hoeveelheid arseen ongeveer 141 g.
- Het meeste arseen (87 %) wordt aangevoerd met de aanhangende grond en ongeveer 13 % met de aardappelen. Ongeveer 67 % van het arseen wordt afgevoerd via de droge en natte zandfracties, terwijl 20 % in de aerobe biomassa terecht komt.




*Figuur 4 Gebalanceerde massabalans van een aardappelverwerkend bedrijf voor cadmium (g/kton aardappelproducten)*

## 3.4 Conclusie en discussie casus aardappelverwerkend bedrijf

- Zoals mag worden verwacht worden de metalen aangevoerd met het gewas en met de aanhangende grond. De aangevoerde aardappelen zijn de belangrijkste bron voor koper, zink en cadmium (rond 75 %). Voor arseen is dat de aanhangende grond (87 %).
- Uit de MFA volgt dat de metalen koper, zink en cadmium zich vergelijkbaar gedragen en verdelen over de verschillende stromen. Zo'n 25 – 31 % van de aangevoerde metalen komt uiteindelijk in de aerobe biomassa terecht. Het grootste deel daarvan is afkomstig uit het gewas zelf. De verklaring hiervoor is dat de metalen bij het verwerken (snijden, blancheren, transport) deels vrijkomen uit het gewas en in het proceswater terecht komen. Omdat het spuiwater uit de verschillende verwerkingsprocessen niet separaat is bemonsterd, kan niet worden vastgesteld welk verwerkingsproces daar het meest aan bijdraagt.
- Voor koper, zink en cadmium geldt dat op basis van de MFA kan worden vastgesteld dat slechts 2 % (Zn) tot maximaal 5 % (Cu) van de met de aanhangende grond aangevoerde metalen terecht komt in de aerobe biomassa. De rest komt terecht in de natte of droge grond. Dit duidt erop dat de verwijdering van gronddeeltjes in het circulerende waswater effectief verloopt. Of anders geformuleerd: verdere optimalisatie van de afscheiding van zand en klei in de wasinstallatie zal maximaal leiden tot 5 % minder belasting van deze metalen in de aerobe biomassa.
- Arseen gedraagt zich anders. Blijkbaar wordt arseen in vergelijking met de andere beschouwde metalen door de aardappelplant en -knollen minder snel opgenomen. In dit geval is de belasting van de aerobe biomassa met arseen voor het grootste deel afkomstig van de aanhangende grond, maar ook hier geldt dat slechts 20 % van het aangevoerde arseen in de aerobe biomassa terecht komt.

# 4 Bierbrouwerij

## 4.1 Systeembeschrijving

In een bierbouwerij kunnen de volgende hoofdprocessen worden onderscheiden: bierproductie, vul- en verpakkingsafdeling en proceswaterzuivering.

De bierproductie verloopt volgens een gestandaardiseerd proces waarbij water, gemoute gerst (mout), hop, hopextract, gist en andere ingrediënten (enzymen, suikers) worden gebruikt als hoofdbestanddelen van het brouwproces. Naast andere micronutriënten (zoals calcium) wordt ook zink toegevoegd omdat het essentieel is voor het metabolisme van de gist.
Het brouwproces bestaat uit het malen van de mout, maischen (mout mengen met warm water om de suikers vrij te maken), lauteren (scheiden van wort en bierborstel), koken van het wort met hop, whirlpooling en koelen (eiwitten verwijderen en wordt koelen), vergisten, lagering/rijping en filtratie. Voor de filtratie wordt kieselguhr (diatomeeënaarde) gebruikt. Hierbij wordt de gist afgescheiden (en het in de gist aanwezige zink).
Relevante bijproducten die vrijkomen bij de bierproductie zijn moutstof (bij het malen van de mout), bierborstel (brewer's spent grain, BSG), overtollige gist, alcoholdistillaat en gebruikt kieselguhr. Belangrijk in dit verband om op te merken is dat het zink dat wordt toegevoegd om de groei van gist te bevorderen voor het grootste deel wordt afgevoerd via de bierborstel en het overtollige gist. Naast deze bijproducten wordt tijdens het brouwproces ook water gebruikt voor reinigingsactiviteiten, koeling en andere ondersteunende processen. Dit water wordt afgevoerd naar de proceswaterzuivering

In de bottelarij en verpakkingsafdeling wordt het bier vanuit de bieropslag afgevuld in vaten, flessen en/of blik Geretourneerde flessen worden eerst geleegd, grondig gereinigd en gespoeld in een flessenwasmachine. Hierbij worden eveneens de oude etiketten en de oude lijm verwijderd. De flessenwasmachine is de meest relevante waterverbruiker in dit hoofdproces. Na deze reiniging kunnen de retourflessen opnieuw worden afgevuld. Het vuile water en spoelwater uit de flessenwasmachine wordt afgevoerd naar de proceswaterzuivering.
Flessen en blikjes worden na het vullen gespoeld met water en gepasteuriseerd, waarna de flessen worden geëtiketteerd. Bij het pasteurisatieproces moeten de onderdelen van de pasteur zelf en de blikjes worden beschermd tegen corrosie. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van een zinkhoudend additief (corrosiebeschermer). Deel van de flessen en de blikjes worden vervolgens verpakt.
Tijdens het afvul- en verpakkingsproces wordt ook water gebruikt voor reinigingsactiviteiten en andere ondersteunende processen. Dit water wordt eveneens afgevoerd naar de proceswaterzuivering.

Het afvalwater uit de hoofdprocessen wordt via een bedrijfsriool afgevoerd naar de proceswaterzuivering. In het bedrijfsriool hopen zich niet opgeloste bestanddelen op die met enige regelmaat worden verwijderd. Door verbeteringen in reiniging en door good housekeeping maatregelen is de totale hoeveelheid rioolslib inmiddels verwaarloosbaar klein geworden ten opzichte van de totale slibmassa van het bedrijf (< 1 %) en wordt om die reden verder buiten beschouwing gelaten (stroom F25).
Het regenwater afkomstig van daken wordt opgevangen en geloosd op de proceswaterzuivering.

De proceswaterzuivering bestaat uit een zeefbocht en een bezinkstap waarbij grove delen worden verwijderd. Vervolgens wordt het water behandeld in een anaerobe reactor (IC en/of UASB). Hierbij ontstaat een geringe hoeveelheid anaeroob slib en wordt biogas gevormd. Na deze anaerobe behandeling wordt het water nabehandeld

in een aerobe zuivering. Hierbij worden aanzienlijke hoeveelheden zuiveringsslib of aerobe biomassa gevormd. Deze aerobe biomassa wordt ingedikt en ontwaterd met een zeefbandpers.

Afhankelijk van de wijze waarop het effluent wordt geloosd, kan er nog een nabehandeling nodig zijn zoals filtratie, UV-desinfectie en/of N/P-verwijdering.

Bij de zuiveringsstappen maar vooral bij de behandeling van aerobe biomassa worden hulpchemicaliën gebruikt. Dat gaat voornamelijk om coagulanten en flocculanten die de vast-vloeistof scheiding verbeteren.

## 4.2 Databronnen

Voor de massabalans zijn in eerste instantie 28 mogelijk relevante stromen geïdentificeerd. Bijbehorende massa, droge stofgehaltes en concentraties zware metalen zijn vervolgens intern bij het bedrijf opgehaald (Tabel 2). Het was niet mogelijk om voor alle geïdentificeerde stromen de gevraagde gegevens op te halen. Bij concentratiewaarden die lager waren dan de detectiegrenzen hebben we gerekend met de helft van de detectiegrens. Dus bijvoorbeeld bij een analyseresultaat van <1 mg/kg DS zijn we uitgegaan van 0.5 mg/kg DS.

*Tabel 2. Gehaltes aan zware metalen in de verschillende onderscheiden stromen in een bier producerend bedrijf. De waardes in de gearceerde rijen zijn gebaseerd op eigen analyses.*

| # | Flow naam | Massa (ton) | DS% | Zware metalen concentraties | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Cu | Zn | Cd | As | Cr | Ni | Eenheid |
| *F01* | Gemoute gerst | 135.013 | 92,5 | 3,60 | 20,09 | 0,01 | 0,07 | 0,08 | - | mg/kg DS |
| *F02* | Hop/ hopextract | 40 | 95,0 | 4,41 | 0,10 | 0,01 | - | 0,62 | - | mg/kg DS |
| *F03* | Gist | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| *F04* | Overige ingrediënten | 861.849 | - | - | 0.6 | - | - | - | - | mg/kg DS |
| *F05* | Kiezelgoer | 1.331 | 49.3 | 0,31 | 27,00 | 0,00 | - | 2,28 | - | mg/kg DS |
| *F06* | Additieven/ chemicaliën | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| *F07* | Drinkwater | 1.988.480 | - | 1,00 | 1,00 | 0,05 | 0,05 | 0,25 | 0.5 | ug/l |
| *F08* | Inhoud retourflessen | 816 | - | 269,50 | 3.200,00 | 0,65 | 6,70 | 104,50 | 18,00 | ug/l |
| *F09* | Etiketten retourflessen | 364 | 95,0 | 160,0 | 45,00 | 0,06 | 0,11 | 2,40 | 0,65 | mg/kg DS |
| *F10* | Additieven/ chemicaliën | 16 | 100,0 | - | 2,42 | - | - | - | - | % |
| *F11* | Etikettenlijm | 7 | 57,5 | 0,06 | 20,00 | 0,01 | 0,01 | 0,08 | 0,06 | mg/kg DS |
| *F12* | Drinkwater | 636.909 | - | 0,25 | 1,25 | 0,01 | 2,75 | 0,05 | 1,50 | ug/l |
| *F13* | Hemelwater | 60.000 | - | 41,00 | 2.600,00 | 0,20 | 3,10 | 22,00 | - | ug/l |
| *F14* | Chemicaliën | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| *F15* | Bier | 861.849 | - | 50,00 | 11,00 | 0,50 | 2,50 | 9,00 | 2,50 | ug/l |
| *F16* | Proceswater | 988.802 | - | - | - | - | - | - | - | |
| *F17* | Proceswater | 636.909 | - | - | - | - | - | - | - | |
| *F18* | Proceswater | 1.625.711 | - | - | - | - | - | - | - | |
| *F19* | Moutstof | 103 | 95,0 | - | - | - | - | - | - | |
| *F20* | Bierbostel | 156.829 | 22,0 | 9,75 | 84,50 | 0,00 | 0,01 | 3,88 | - | mg/kg DS |
| *F21* | Gist restant | 13.445 | 20,3 | 20,00 | 103,00 | 0,00 | 0,02 | - | - | mg/kg DS |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *F22* | Alcohol distilaat | 6.596 | 5,0 | - | - | - | - | - | - | |
| *F23* | Kiezelgoer restant | 1.024 | 50,0 | 3,10 | 27,00 | 0,43 | 0,62 | 9,40 | 8,80 | mg/kg DS |
| *F24* | Verpakt bier | 827.050 | - | 50,00 | 11,00 | 0,50 | 2,50 | 9,00 | 2,50 | ug/l |
| *F25* | Rioolbezinksel | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| *F26* | Effluent | 1.680.323 | - | 4,00 | 12,50 | - | - | - | - | ug/l |
| *F27* | Aerobe biomassa | 6.506 | 17,2 | 49,30 | 471,00 | 0,40 | 8,80 | 61,00 | - | mg/kg DS |
| *F28* | Anaeroob slib | 1.679 | 15,0 | - | - | - | - | - | - | |

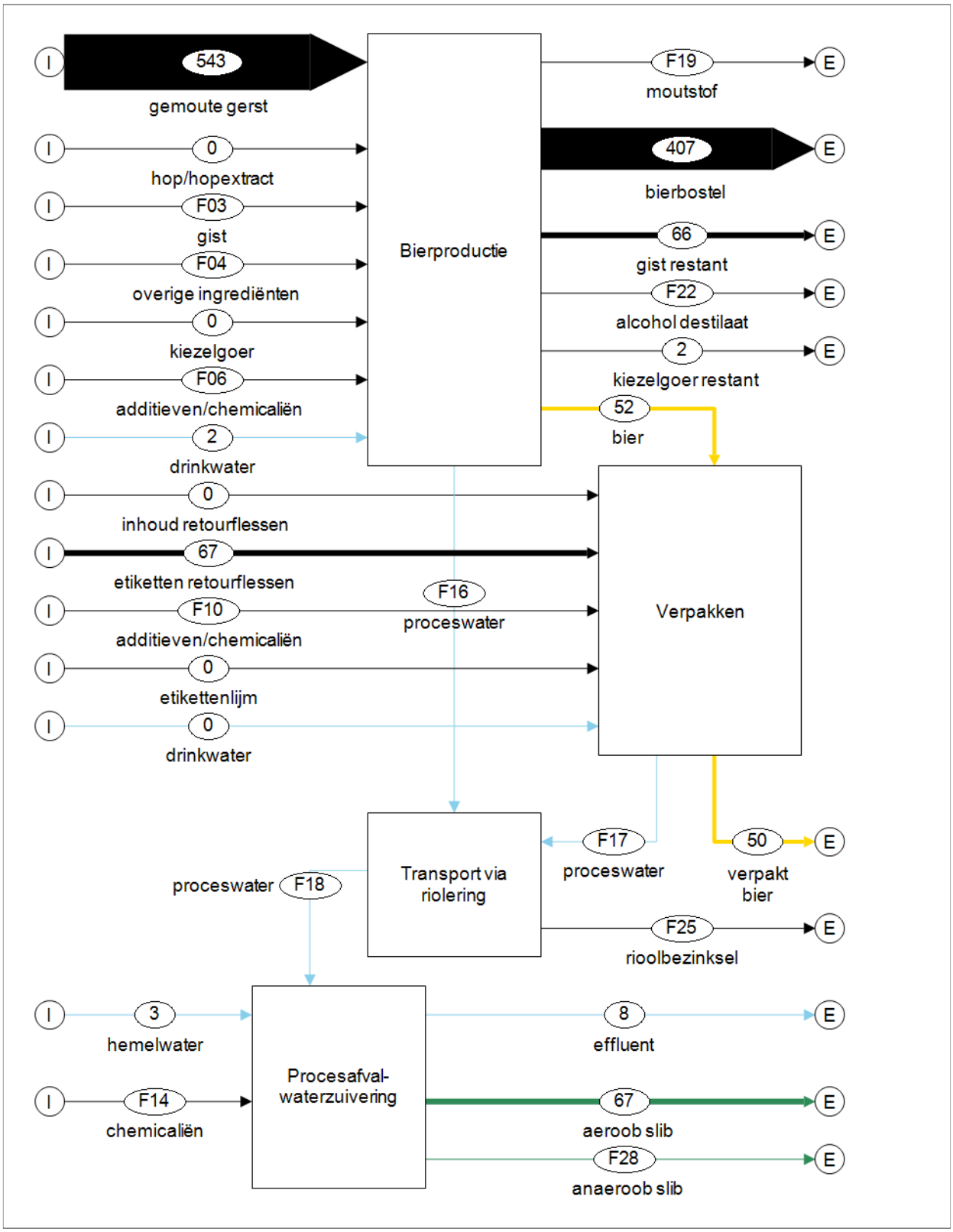
## 4.3 Resultaten

In deze paragraaf zijn de resultaten opgenomen van de material flow analysis die is uitgevoerd voor de casus bierbrouwerij en die is gevisualiseerd met STAN. Die analyse is uitgevoerd voor koper, zink, cadmium en arseen. Voor nikkel en chroom zijn geen massabalansen opgesteld door een gebrek aan beschikbare data. Het resultaat is per metaal weergegeven in een flowschema met massastromen per afzonderlijke stroom waarbij het gepresenteerde resultaat is uitgedrukt in g/kton verwerkt product (in dit geval verpakt bier) voor koper en zink en mg/kton verwerkt product voor cadmium en arseen. In deze situatie bleek het niet mogelijk de massabalansen voor de metalen te balanceren.

### 4.3.1 Massabalans koper bierbrouwerij

Zie schema op de volgende bladzijde.

- Per kton verwerkt product bedraagt de totale input (F01 t/m F14) van koper 616 g. De totale output (F19 t/m F28) is 600 g/kton verwerkt product.
- De meeste koper wordt aangevoerd met de gemoute gerst (88%). Daarnaast vormen de etiketten van de retourflessen een significante bron voor koper (11 %).
- Zoals in de massabalans aangegeven wordt een groot percentage van de koper die met de gemoute gerst wordt aangevoerd in de eerste stappen van het productieproces (maischen/lauteren) weer met de bierbostel afgevoerd (75 %).
- De massabalans is niet gebalanceerd maar op basis van metingen is in ieder geval vastgesteld dat een klein deel van de koper die het proces binnenkomt in de aerobe biomassa terecht komt (11 %).

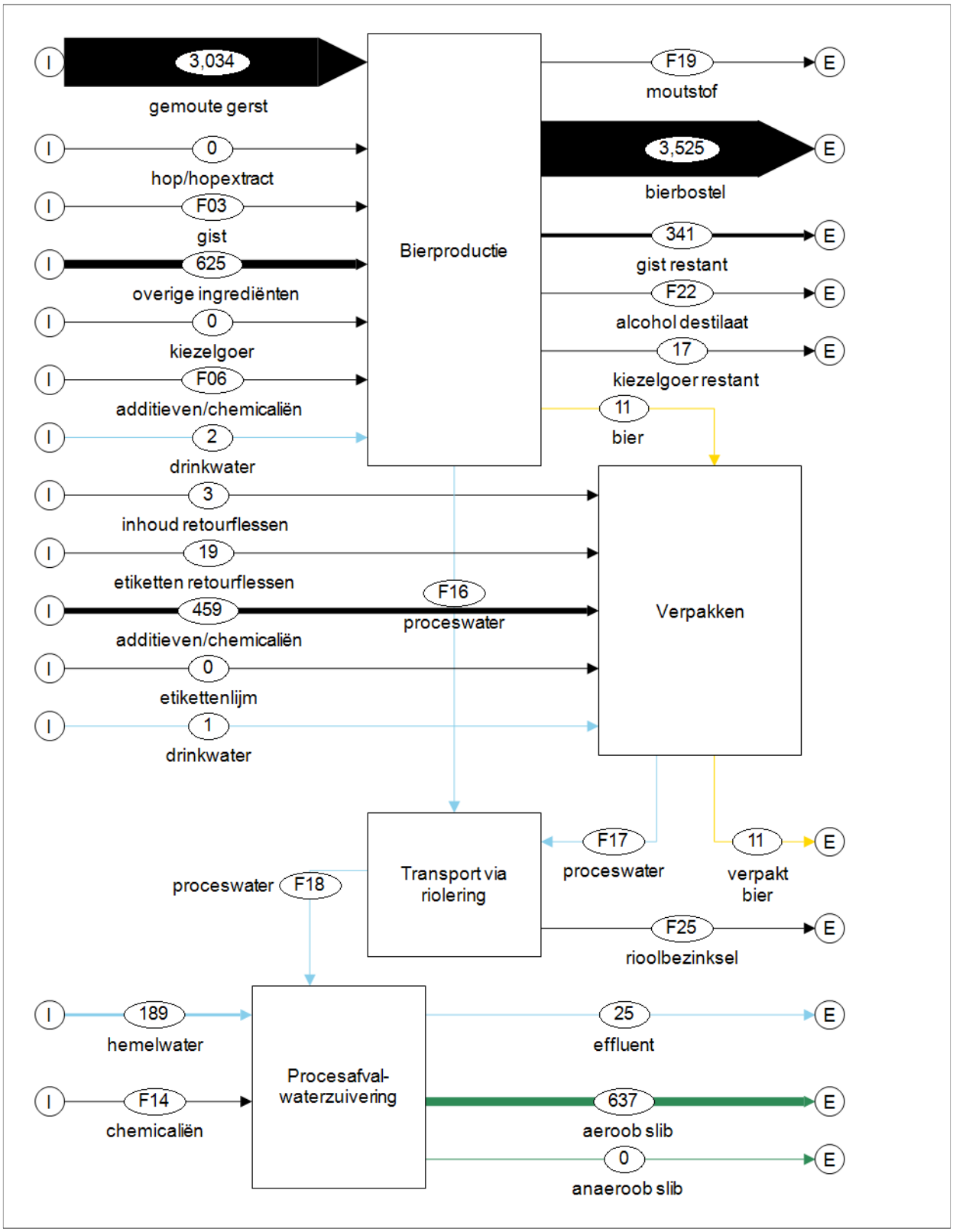



*Figuur 5 Ongebalanceerde massabalans van een bierproducerend bedrijf voor koper (g/kton verwerkt product)*

### 4.3.2 Massabalans zink bierbrouwerij

Zie schema op de volgende bladzijde:

- Per kton verwerkt product bedraagt de totale input (F01 t/m F14) van zink 4.332 g. De totale output (F19 t/m F28) is 4.556 g/kton verwerkt product.
- Het meeste zink wordt aangevoerd met de gemoute gerst (70 %).
- Een andere relevante stroom (F04) betreft voedingstoffen voor de gist die worden toegevoegd. Hierbij wordt ook een kleine hoeveelheid zink opgelost in de wordt direct voor de fermentatie. Dat zink is als sporenelement van belang voor de groei van de gist. Dit is ongeveer 14 % van de totale input van zink.
- Zoals in de massabalans aangegeven zal een groot percentage van het zink die met de gemoute gerst wordt aangevoerd in de eerste stappen van het productieproces (maischen/lauteren) weer met de bierbostel worden afgevoerd. Op basis van de data is de balans over deze twee stappen zelfs negatief.
- Een derde belangrijke inputstroom voor zink (met een bijdrage van 10,6 %) is het zinkchloride die wordt toegevoegd als bestanddeel van een anti-corrosie middel in de verpakkingslijn van blik (F10).
- De massabalans is niet gebalanceerd maar op basis van metingen is in ieder geval vastgesteld dat een significant deel van het zink die het proces binnenkomt in de aerobe biomassa terecht komt (15 %).

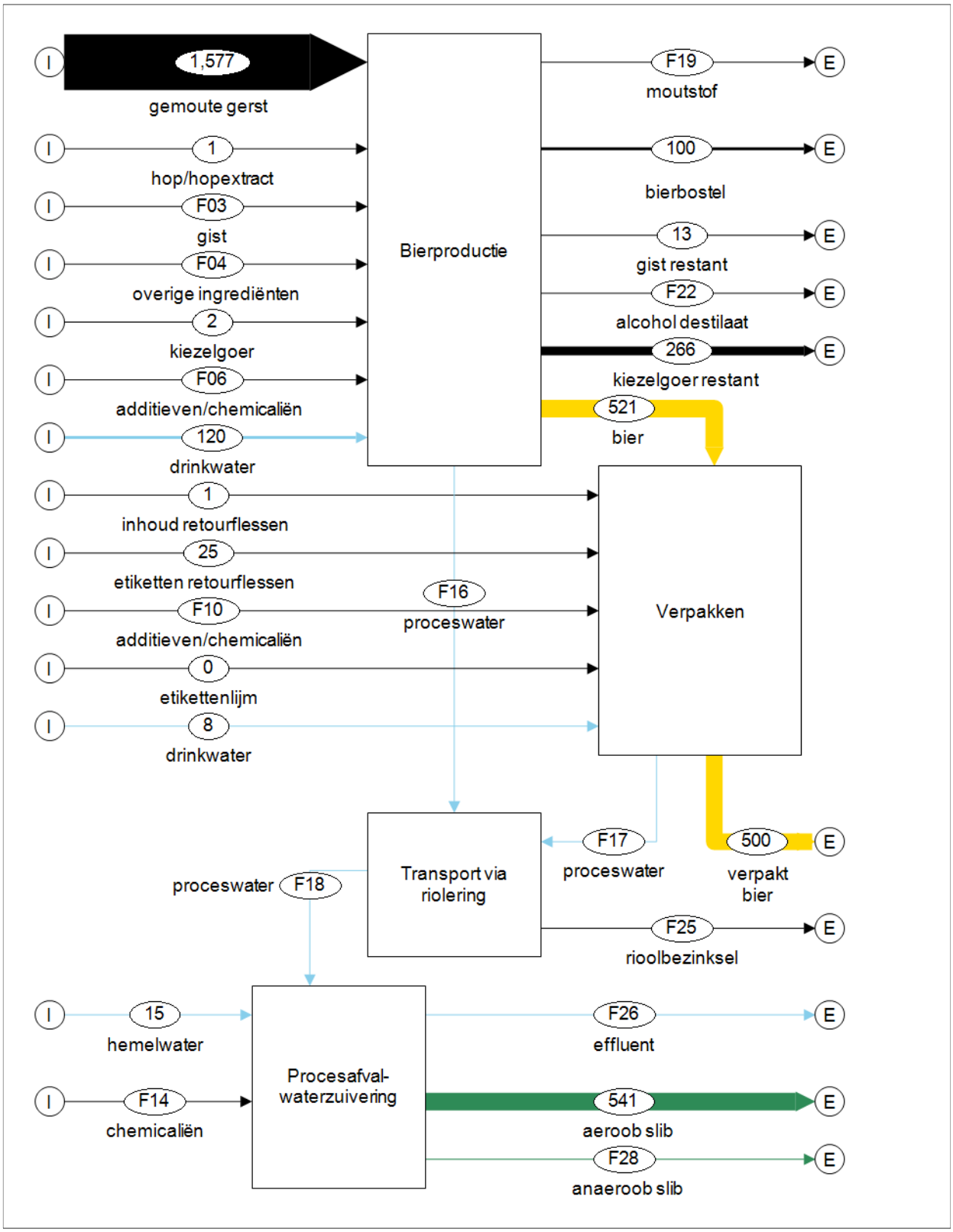



*Figuur 6 Ongebalanceerde massabalans van een bierproducerend bedrijf voor zink (g/kton verwerkt product)*

### 4.3.3 Massabalans cadmium bierbrouwerij

Zie schema op de volgende bladzijde:

- Totale input (F01 t/m F14) is 1.747 mg cadmium per kton verwerkt product. Totale output (F19 t/m F28) is 1.420 mg/kton.
- Veruit de grootste input stroom van cadmium is de gemoute gerst met 1577 mg Cd per kton verwerkt product (90 %).
- Een significant deel van het cadmium (31 %) komt terecht in de aerobe biomassa (541 mg/kton)
- De grootste output stromen zijn kiezelgoer-restant (266 mg/kton) en verpakt bier (500 mg/kton). Maar dat laatste getal is onzeker want gebaseerd op een gemeten gehalte (in bier) van < 1 µg/l (detectiegrens) waarvoor uiteindelijk in de berekening 0,5 µg/l is meegenomen.

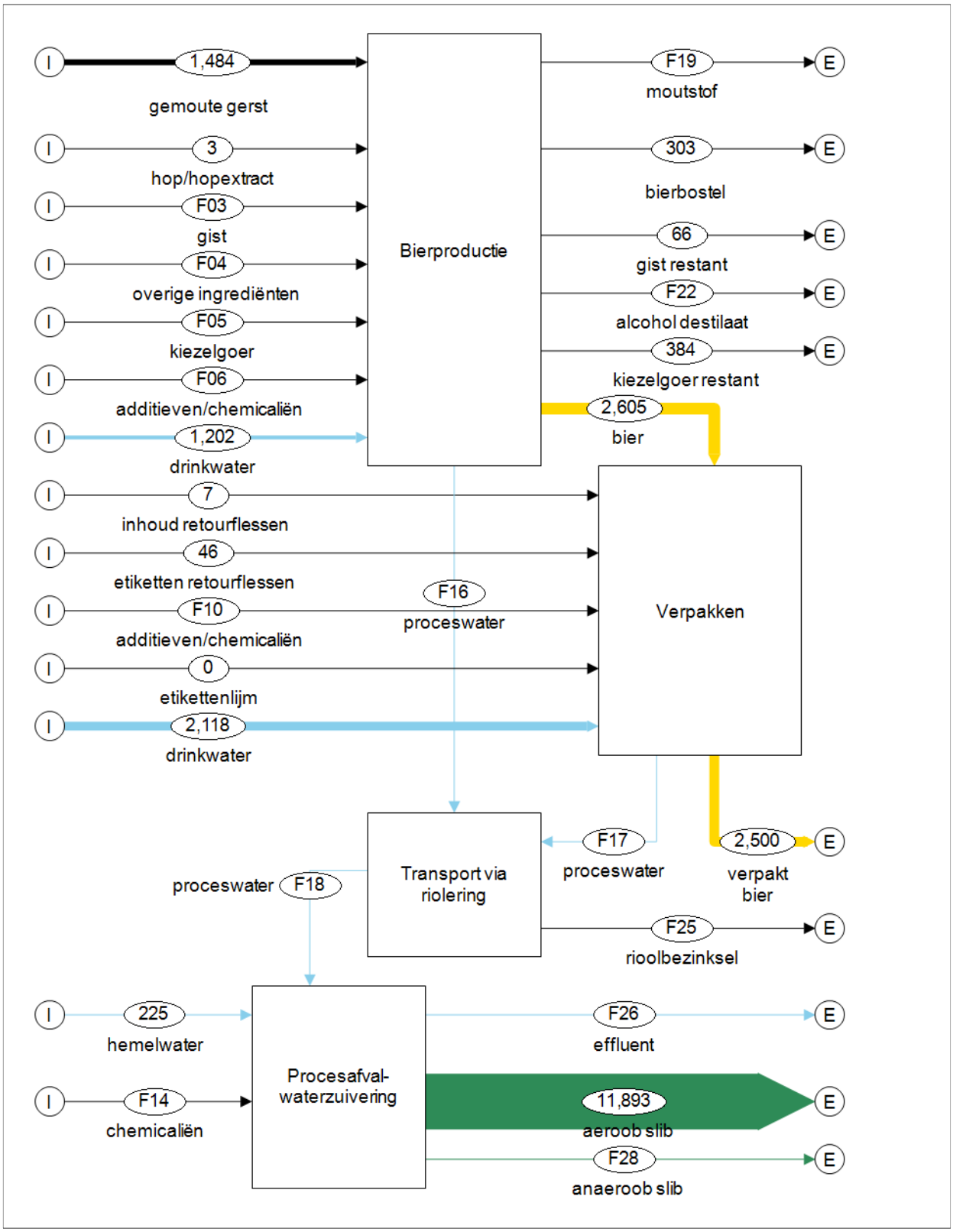



*Figuur 7 Ongebalanceerde massabalans van een bierproducerend bedrijf voor cadmium (mg/kton verwerkt product)*

### 4.3.4 Massabalans arseen bierbrouwerij

Zie schema op de volgende bladzijde:

- Totale input (F01 t/m F14) voor arseen is berekend op 5.084 mg per kton verwerkt product.
- Belangrijkste inputstromen zijn drinkwater (65 %) en gemoute gerst (29 %).
- De totale output (F19 t/m F28) die is berekend op basis van beschikbare data is echter veel hoger en bedraagt 15.146 mg arseen per kton verwerkt product.
- Ongeveer 79 % van die output aan arseen komt ten laste van de aerobe biomassa.
- De output via verpakt bier lijkt significant (17 %) maar is onzeker want gebaseerd op een gemeten gehalte (in bier) van < 5 µg/l (detectiegrens) waarvoor uiteindelijk in de berekening 2,5 µg/l is meegenomen.




*Figuur 8 Ongebalanceerde massabalans van een bierproducerend bedrijf voor arseen (mg/kton verwerkt product)*

## 4.4 Conclusies en discussie casus bierbrouwerij.

- Veel analyseresultaten lager dan de detectiegrens maken het onzeker om een goede inschatting te kunnen maken van daadwerkelijke concentraties, dit geldt met name voor cadmium en arseen. De metalen zijn in zeer lage gehaltes in een aantal stromen aanwezig. Als dan vervolgens voor stromen die lager zijn dan de detectiegrens, bijvoorbeeld 1 µg/l voor Cd, een waarde van 0,5 µg/l wordt aangenomen dan heeft dat een groot effect op de massabalans.
- In dit verband moet nog worden opgemerkt dat het drinkwater op de (beschouwde) brouwerij standaard wordt (na)behandeld met RO. Hiermee is in bovenstaande beschouwing geen rekening gehouden. Dit heeft vooral consequenties voor de massabalans van arseen, omdat door toepassing van RO de aanwezigheid van arseen in het permeaat van de RO (en daarmee in stroom F07 en F12) hoogst onwaarschijnlijk is.
- Voor koper geldt dat de belasting van het proces met dit metaal relatief gering is ten opzichte van zink. Dat geldt ook voor de belasting van de aerobe biomassa met koper.
- In het geval van zink is er sprake van een negatieve balans over de eerste twee stappen in het productieproces. Dit is fysisch niet mogelijk. Deze discrepantie weerspiegelt waarschijnlijk onzekerheden in metingen, rapportage en de schatting van het droge-stofgehalte. Bovendien is de waarde van zink in bierbostel gebaseerd op één enkele bemonsteringsdag, wat de nauwkeurigheid en representativiteit van de schatting beperkt. Kleine afwijkingen in deze parameters kunnen leiden tot aanzienlijke verschuivingen in de berekende zinkbalans. In zekere zin mag worden aangenomen dat het zink die met de gemoute gerst wordt aangevoerd volledig met de bierbostel wordt afgevoerd.
- Op basis van de MFA kan worden vastgesteld dat er mogelijkheden zijn om met brongerichte maatregelen de zinklast van de aerobe biomassa aan te pakken.
- Voor het metabolisme van de gist is beschikbaarheid van voldoende zink essentieel. Omdat het hier gaat om de kern van het brouwproces is het niet gewenst en niet realistisch om in stroom F04 aanpassingen te doen die zouden kunnen leiden tot reductie van de zinkvracht naar de proceswaterzuivering. Bovendien blijkt uit de MFA dat een significant deel van het zink die wordt toegevoegd, zich bindt aan de gistcellen tijdens de fermentatie en wordt afgevoerd met het surplus aan gist.
- Omdat zink dat wordt gebruikt als corrosie-inhibitor in de pasteurisatiesystemen voor een belangrijk deel verantwoordelijk is voor de zinklast in de aerobe biomassa, ligt hier een belangrijke kans om met alternatieve corrosie-inhibitors die zinklast aanzienlijk te verminderen. Dit biedt ook milieuvoordelen aangezien een deel van het zink ook met het effluent wordt geloosd. Hier kan worden aanbevolen om alternatieve zinkvrije corrosie-inhibitors te gaan toepassen. Zo zijn er specifiek geformuleerde food-grade corrosie-inhibitors beschikbaar, fosfaat- en silicaatgebaseerde corrosie-inhibitors en/of organische corrosie-inhibitors.
- Andere, minder effectieve mogelijkheden om de zinklast in de aerobe biomassa te verlagen, zijn de overgang naar metaalvrije etiketten en het afkoppelen van regenwater afkomstig van de daken.
- Een onzekere belasting qua metalen maar ook als het gaat om andere verontreinigingen vormt de inhoud van de retourflessen. Die flessen worden in een flessenspoelmachine geleegd, intensief gereinigd (onder andere met loog) en gespoeld. Hierbij komt de inhoud van de flessen terecht in het reinigings- en spoelwater en uiteindelijk in de proceswaterzuivering. De samenstelling van deze stroom valt grotendeels buiten de invloedssfeer van de brouwerij en vormt daarmee een potentieel risico voor het gebruik van aerobe biomassa als potentiële meststof (maar bijvoorbeeld ook voor het hergebruik van het effluent van de proceswaterzuivering). De enige optie om deze stroom te controleren, is door het separaat op te vangen en (voor) te behandelen.

.

# 5 Conclusies & aanbevelingen

### Algemeen

Dit onderzoek is gestart om antwoord te vinden op de vraag waar zware metalen en arseen in de aerobe biomassa van agrifood verwerkers vandaan komen. Hiertoe is een Material Flow Analysis (MFA) uitgevoerd voor een aardappelverwerkend bedrijf en een bierbrouwerij. Met alle beperkingen van de methodiek die hieronder nader zijn toegelicht kan in algemene zin worden vastgesteld dat het doen van een MFA inzicht biedt in de herkomst van de metalen en de migratie van de metalen door de processen.

### Aardappelverwerkend bedrijf

In het geval van het aardappelverwerkend bedrijf konden de massabalansen voor de zware metalen (Cu, Zn en Cd) worden gebalanceerd, wat inzicht gaf in de waarschijnlijke herkomst van de zware metalen, over de verdeling van de metalen over de verschillende stromen en de belasting van de aerobe biomassa met zware metalen. De massabalans voor arseen kon ook worden gebalanceerd, maar dit metaal lijkt zich toch net iets anders te gedragen.

### Bierbrouwerij

Bij de bierbrouwerij bleek het lastig om een kloppende massabalans op te stellen. Tijdens het modelleren van de veel verschillende massastromen bleek voor zink, cadmium en arseen de berekende output groter te zijn dat de input, wat in werkelijkheid natuurlijk niet mogelijk is. Dit kan verschillende oorzaken hebben. Het is mogelijk dat relevante stromen over het hoofd zijn gezien tijdens het opstellen van het stroomschema. Hiervan achten we de kans echter klein in omdat het processchema zorgvuldig en in overleg met de bierbrouwerij is opgesteld. Het is ook mogelijk dat er onverwachts veel zware metalen en/of arseen zit in de stromen die door gebrek aan data niet volledig in beeld konden worden gebracht, zoals in de additieven en chemicaliën die worden toegevoegd tijdens het bierproductie proces (F06) of voor de afvalwaterzuivering (F14), maar het is onwaarschijnlijk dat eventuele zware metalen of arseen in stroom F06 of F14 het volledige verschil tussen input en output kunnen verklaren. Een laatste, en naar onze inschatting meest waarschijnlijke verklaring, is dat de aangeleverde data voor massastromen en bijbehorende concentraties aan zware metalen en arseen een onvoldoende gemiddeld beeld geven en daarmee te veel een momentopname vormen. Dit is aannemelijker, zeker aangezien het verschil tussen input en output substantieel groter is dan verwacht kan worden op basis van normale, verwachte meetonzekerheid.

Ondanks dat het niet mogelijk was om een gebalanceerde MFA op te stellen, geeft de beschikbare date alsnog enig inzicht in hoe zware metalen en arseen in het bierproductie proces terecht komen en hoe het zich gedraagt. De stromen die nu niet volledig in kaart gebracht konden worden of waarvan deze analyse hoge gehaltes aan zware metalen en/of arseen suggereert, kunnen richting geven aan nadere data inventarisatie en onderzoek.

### Beperkingen van de methodiek

Wat zijn aanbevelingen ten aanzien van het uitvoeren van een MFA voor beide situaties. Wat zouden we anders doen? Wat maakt het uitvoeren van zo'n analyse lastig?

Beperkingen van de methodiek ontstaan ook door beperking in de beschikbare data, zowel kwantitatief als kwalitatief. De in dit rapport uitgevoerde MFA's zijn gebaseerd op meerdere databronnen, waaronder rapportagetools, metingen en inkoopgegevens. Hoewel de inkoopcijfers vaak een volledig productiejaar bestrijken, is er geen garantie dat begin- of eindejaarsvoorraden volledig zijn meegenomen. Dit kan leiden tot kleine

afwijkingen in de massaschattingen. Het combineren van verschillende bronnen binnen hetzelfde bedrijf voor kwantitatieve schattingen brengt eveneens onzekerheden met zich mee, aangezien definities en tijdsperiodes mogelijk niet volledig op elkaar aansluiten. Sommige gegevens, zoals procesvolumes of afvalstromen, zijn handmatig ingevoerd of door operators gerapporteerd. Dit kan afrondingsfouten of onnauwkeurigheden hebben geïntroduceerd die de betrouwbaarheid van een massabalans beïnvloeden. Verder zijn metaalconcentraties niet in alle stromen met dezelfde frequentie gemeten. Sommige stromen, zoals de aerobe biomassa zijn herhaaldelijk geanalyseerd. Andere stromen, waaronder bijvoorbeeld hemelwater, zijn vaak slechts één keer bemonsterd. Dat geeft een momentopname maar bijvoorbeeld geen jaargemiddelde waarde die bij voorkeur in een MFA wordt toegepast.
Batchverschillen of merkspecifieke variatie in grondstoffen en gebruikte materialen zijn niet meegenomen en kunnen de nauwkeurigheid van de bronattributie beïnvloeden.

# Referenties

Cencic, O., & Rechberger, H. (2008). Material flow analysis with Software STAN. *Journal of Environmental Engineering and Management*, *18*, 3–7.

Demeulmeester, K. (n.d.). *Aardappelen: Onderwatergewicht*. Inagro. Retrieved 1 April 2025, from https://inagro.be/advies/teeltgerichte-adviesdiensten/aardappelen-teeltgericht-advies/aardappelen-onderwatergewicht

Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020). The Effects of Cadmium Toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(11), Article 11. https://doi.org/10.3390/ijerph17113782

Jomova, K., Jenisova, Z., Feszterova, M., Baros, S., Liska, J., Hudecova, D., Rhodes, C. J., & Valko, M. (2011). Arsenic: Toxicity, oxidative stress and human disease. *Journal of Applied Toxicology*, *31*(2), 95–107. https://doi.org/10.1002/jat.1649

Laner, D., Feketitsch, J., Rechberger, H., & Fellner, J. (2016). A Novel Approach to Characterize Data Uncertainty in Material Flow Analysis and its Application to Plastics Flows in Austria. *Journal of Industrial Ecology*, *20*(5), 1050–1063. https://doi.org/10.1111/jiec.12326

Liefting, H. J., Boogaard, F. C., & Langeveld, J. G. (2020). *Kwaliteit van afstromend hemelwater in Nederland. Database kwaliteit afstromend hemelwater* (2020–05). Stichting RIONED & STOWA.

Plum, L. M., Rink, L., & Haase, H. (2010). The Essential Toxin: Impact of Zinc on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *7*(4), Article 4. https://doi.org/10.3390/ijerph7041342

Raheem, A., Sikarwar, V. S., He, J., Dastyar, W., Dionysiou, D. D., Wang, W., & Zhao, M. (2018). Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. *Chemical Engineering Journal*, *337*, 616–641. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.149

Stern, B. R. (2010). Essentiality and Toxicity in Copper Health Risk Assessment: Overview, Update and Regulatory Considerations. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, *73*(2–3), 114–127. https://doi.org/10.1080/15287390903337100