



Magnesium

Whitepaper Circulaire Meststoffen voor de Glastuinbouw



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH
GLASTUINBOUW
CLUB VAN 100
LEADING IN HORTICULTURAL INNOVATION



Referaat

Dit whitepaper over magnesium komt uit een serie whitepapers ontwikkeld met de Club van 100, waarin gekeken wordt naar de eisen en opties van circulaire meststoffen specifiek voor de glastuinbouw. Magnesium wordt op moment uit eindige gemijnde bronnen gewonnen. In tegenstelling tot stikstof en fosfor, veroorzaakt magnesium geen eutrofiëring van oppervlaktewater en staat daarom minder in de schijnwerpers van milieumaatregelen. Toch zijn magnesiummeststoffen net zo afhankelijk van mondiale, lineaire ketens. Omdat magnesium uit meerdere ertsen komt en veel breder toegepast wordt dan alléén voor meststoffen, beginnen we met een overzicht van huidige ketens. Dan worden circulaire alternatieven besproken, zowel uit reststromen als uit waterstromen. Deze worden geïnventariseerd en vergeleken, met een aanvullende kwantificering van magnesium uit waterstromen. Daarna worden technologieën en bekende integrale processen vergeleken. Tenslotte bespreken we de mogelijkheid om niet-oplosbare producten toe te passen door ze op te lossen in zuur, en worden contaminanten besproken.

Abstract

This white paper on magnesium is one of a three-part series of white papers developed with the Club of 100, in which the requirements and options for circular fertilisers for greenhouse horticulture are investigated. Magnesium is currently extracted from finite natural reserves. Unlike nitrogen and phosphorus, magnesium does not cause surface water eutrophication, which is why it receives far less attention in terms of environmental policy. Still, magnesium fertilisers are just as dependent on global linear supply chains. Because magnesium comes from various ores and has far more applications than just fertiliser, we start with an overview of current supply chains. Then, circular alternatives are discussed, both from side-streams and water. This is followed by a comparison of technologies and integrated processes. Lastly, we discuss the possibilities of applying insoluble products through dissolution in acid, as well as discussing considerations around contaminants.

Gegevens

Rapportnummer:	WPR-1445
Projectnummer:	3742357700
DOI:	https://doi.org/10.18174/694536

Dit project / onderzoek is mede tot stand gekomen door de collectieve bijdrage van de Club van 100. De stuurgroepleden van de begeleidingscommissie zijn Grodan, Van der Hoeven, ICL, Van der Knaap en Yara.

Disclaimer

© 2025 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw, Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, www.wur.nl/plant-research.

Kamer van Koophandel nr.: 09098104

BTW nr.: NL 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen University & Research

Business unit Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 - 48 56 06

glastuinbouw@wur.nl

wur.nl/glastuinbouw



Inhoud

1	Introductie	1
	1.1 Huidige mangesiumbronnen	1
	1.2 Magnesium in de glastuinbouw	2
	1.3 Huidige magnesiumketens	3
2	Circulaire Magnesiumstromen	6
	2.1 Reststromen	6
	2.2 Zeewater en brakwater	7
3	Technologieën	10
	3.1 Precipitatie	10
	3.2 Voorconcentratie uit reststromen	10
	3.3 Integrale processen	11
	3.3.1 Uit zoute stromen	11
	3.3.2 Uit (RWZI)-effluenten	13
	3.3.3 Uit assen	13
4	Toepassing in de Glastuinbouw	16
	4.1 Oplosbaarheid	16
	4.2 Contaminanten	17
	Afronding	18
	Referenties	19
Bijlage 1	Overzicht Mg-reststromen	22

1 Introductie

Magnesium (Mg) is één van de essentiële plant-mesonutriënten. Het speelt in verschillende plantfuncties een rol – zo is het bijvoorbeeld het centrale atoom van chlorofyl. De Nederlandse glastuinbouw is extreem efficiënt met meststoffen, maar de keerzijde hiervan is dat deze efficiëntie juist door eindige gemijnde minerale bronnen mogelijk wordt gemaakt. Deze bronnen worden op den duur uitgeput. Bovendien kunnen globale ketens gevoelig zijn voor schokken en onverwachte prijsstijgingen. Zo is de Mg-prijs verviervoudigd in 2021.¹

Er wordt steeds meer gedaan om de glastuinbouw van lineaire meststoffen richting circulaire meststoffen te bewegen. Dit gebeurt vooral voor stikstof (N) en fosfor (P). Deze twee nutriënten zijn belangrijke factoren voor algengroei in oppervlaktewaters, waardoor aanwezigheid van N en P in oppervlaktewaters leidt tot eutrofiëring,² en hier dus veel actie op is om N en P te verwijderen en terug te winnen. Magnesium veroorzaakt geen eutrofiëring en staat daarom minder in de schijnwerpers van milieumaatregelen. Toch is Mg net zo afhankelijk van mondiale, lineaire ketens. Bovendien is het, hoewel minder prominent dan N en P, ook in de glastuinbouw een essentieel nutriënt. Het merendeel van het wereldwijde magnesiumgebruik ligt echter buiten de landbouw, bijvoorbeeld in de auto-industrie en elektronica.

In deze whitepaper wordt verkend hoe een circulaire keten van Mg-meststoffen voor de glastuinbouw eruit kan komen te zien.

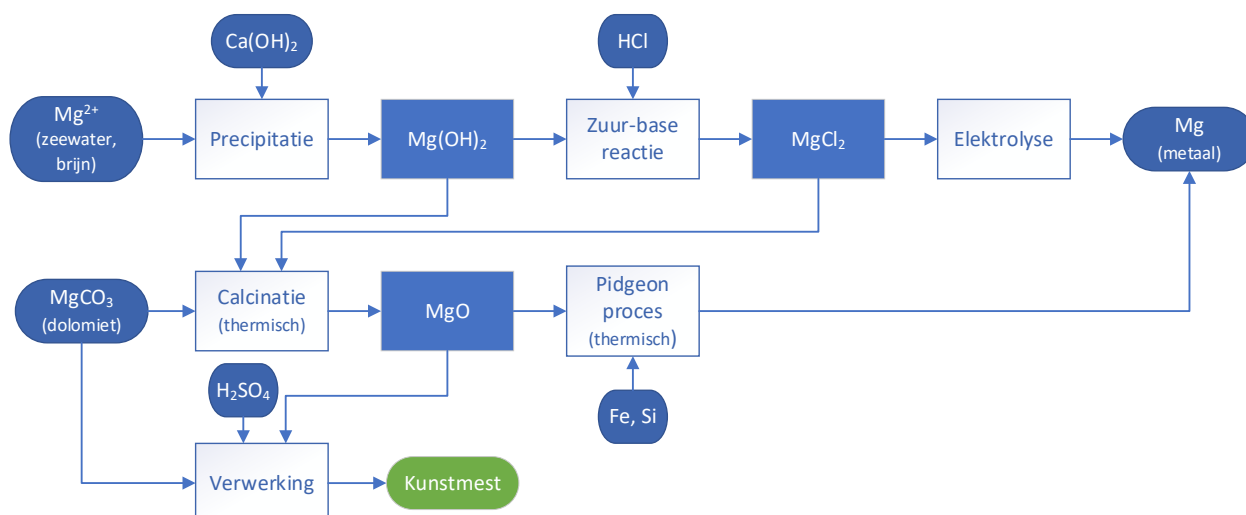
1.1 Huidige magnesiumbronnen

Magnesium is het achtste meest voorkomende element in de aardkorst, met een gemiddeld gehalte van 2%. Magnesium komt in de natuur niet in zijn elementaire vorm voor, maar uitsluitend in minerale verbindingen die te vinden zijn in gesteenten, zeewater en pekel.³

De belangrijkste grondstoffen voor de winning van magnesium zijn dolomiet ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), magnesiet (MgCO_3) en bruciet ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Deze mineralen worden in mijnen gewonnen uit gesteenten of ertsen. Een ander belangrijk mineraal is kieseriet ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), afkomstig uit zeezoutafzettingen. Daarnaast zijn er tientallen andere magnesiummineralen bekend.³

In zeewater en pekel komt magnesium voor als Mg^{2+} -ion. De concentratie van Mg^{2+} varieert afhankelijk van het type water. Gemiddeld bevat zeewater een Mg^{2+} -concentratie van ongeveer 1300 mg/l, maar in sommige zeeën, zoals de Dode Zee, kan dit oplopen tot 36 000 mg/l. In de pekel die in Veendam wordt opgepompt uit zoutafzettingen voor zoutproductie is de concentratie zelfs 82 000 mg/l.³

De omzetting van magnesiumhoudende grondstoffen naar verschillende industriële en landbouwkundige toepassingen hangt af van zowel het bronmateriaal als het gewenste eindproduct. Figuur 1 laat een vereenvoudigd overzicht zien van de belangrijkste procesroutes, inclusief de rol van magnesium in kunstmestproductie.



Figuur 1 Vereenvoudigde verwerkingsprocessen van verschillende magnesiumverbindingen en de plaats van kunstmest hierin. Elk procesblok vertegenwoordigt een proces dat kan plaatsvinden, afhankelijk van de gekozen grondstof en gewenste toepassing. Niet alle grondstoffen en processen zijn tegelijkertijd nodig om een bepaalde verbinding te vormen; in de praktijk worden specifieke procesroutes geselecteerd op basis van de beschikbare grondstoffen en economische of technische overwegingen.^{4,5}

Mg voor kunstmest is voornamelijk afkomstig uit gesteenten zoals dolomiet of uit verwerkt magnesita (MgO). De proceslijnen vanuit gesteenten en zeewater/brijn kunnen beide leiden tot magnesiummetaal (Mg) als eindproduct. Tijdens deze processen worden verschillende tussenvormen van magnesium gevormd, zoals magnesita (MgO), magnesiumhydroxide (Mg(OH)_2) en magnesiumchloride (MgCl_2).⁴

Uit deze figuur worden ook de belangrijkste unit operations zichtbaar die worden toegepast om magnesium uit grondstoffen om te zetten naar vormen geschikt voor kunstmest, namelijk:

- **Precipitatie** verwijst naar het neerslaan van magnesiumhydroxide (Mg(OH)_2) uit een oplossing met Mg^{2+} . Door de toevoeging van geschikte reagentia vormt het Mg^{2+} -ion nieuwe verbindingen en slaat het neer als vaste stof. Dit kan bijvoorbeeld worden bereikt door de toevoeging van calciumhydroxide (Ca(OH)_2), calciumoxide (CaO) of natriumhydroxide (NaOH). Het resulterende product is meestal een slurry, die verder moet worden verwerkt, bijvoorbeeld door droging en zuivering.⁵
- **Calcinatie** is een thermische behandeling van een vaste stof, zoals een magnesiumhoudend gesteente, waarbij het materiaal wordt verhit zonder te smelten. Dit proces vindt meestal plaats onder toevoer van zuurstof en heeft als doel de thermische decompositie van magnesiumverbindingen, zoals magnesiumcarbonaat (MgCO_3). Hierbij worden carbonaatgroepen afgebroken tot magnesita en komt koolstofdioxide vrij volgens de reactievergelijking: $\text{MgCO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{MgO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$.⁴
- **Zuur-base reactie** is in deze keten een reactie waarbij het vaste Mg(OH)_2 d.m.v. het toevoegen van zoutzuur (HCl) wordt omgezet in MgCl_2 , een oplosbaar zout. Dit vindt plaats via de volgende reactie: $\text{Mg(OH)}_2(\text{s}) + 2 \text{HCl}(\text{aq}) \rightarrow \text{MgCl}_2(\text{aq}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$.⁶
- **Verwerking** is noodzakelijk om (grond)stoffen verder te bewerken tot de ingrediënten van kunstmest. Hiervoor zijn verschillende technieken beschikbaar, afhankelijk van het type grondstof en het uiteindelijke product. Zo kan de verwerking van gesteenten zoals dolomiet bijvoorbeeld bestaan uit vermalen tot fijnere deeltjes om de toegang tot de magnesiumverbindingen te verbeteren. De verwerking van magnesita (MgO) kan bijvoorbeeld een reactie met zwavelzuur (H_2SO_4) zijn, waarbij magnesiumsulfaat (MgSO_4) wordt gevormd, wat een belangrijk ingrediënt is voor kunstmestproductie.⁷

1.2 Magnesium in de glastuinbouw

De ordegrootte van Mg gebruik in de Nederlandse glastuinbouw kan geschat worden door uit te gaan van de data die bekend is over tomaat. Per hectare gebruikt de gemiddelde hightech tomatenteelt 220 kg Mg.⁸ In Nederland is er 10 000 ha aan glastuinbouw areaal aanwezig, dus als we het Mg-gebruik van tomaat extrapoleren naar het totaal Mg gebruik in Nederland, leidt dit tot 2200 ton Mg. Deze inschatting ligt

waarschijnlijk aan de hoge kant, aangezien tomaten relatief veel meststoffen gebruiken. Dezelfde benadering voor stikstof geeft 17 800 ton N voor de hele sector, terwijl preciezere berekeningen door Van der Lugt (2022) maar 10 300 ton N schatten. Als we onze cijfer voor Mg uit tomaat hierop schalen, krijgen we $2200 * 10\,300 / 17\,800 = 1270$ ton Mg voor de hele Nederlandse glastuinbouw. Het is een benadering, maar in deze whitepaper gaan we uit van dit getal. Verschillende Mg-producten worden in de glastuinbouw toegepast. Voornamelijk de goed oplosbare magnesium sulfaat en magnesium nitraat worden als nutriënt gebruikt in de glastuinbouw (Tabel 1). Door een betere- en snellere oplosbaarheid¹⁰ worden meer gehydrateerde vormen van magnesium gebruikt in de glastuinbouw, wat tot een iets lagere Mg-gewichtsgehalte kan leiden vergeleken met de akkerbouw.

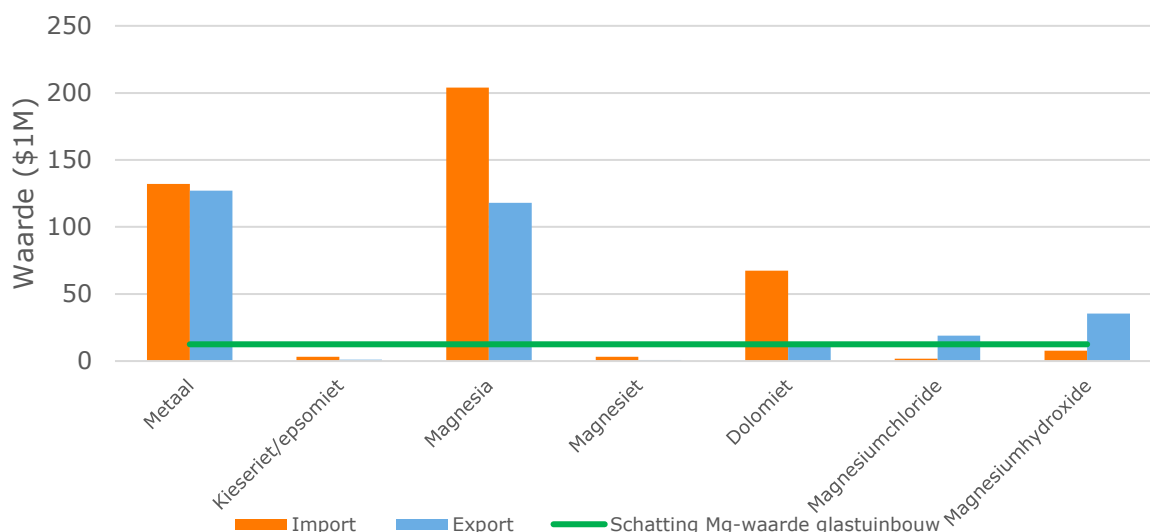
Tabel 1 Een overzicht van de toegepaste Mg-producten in de glastuinbouw.¹¹

Stof	Formule	% MgO	% Mg	% anderen
Kieseriet	MgSO ₄ ·H ₂ O	27	16	21 S
Epsomzout	MgSO ₄ ·7H ₂ O	16	10	13 S
Magnesiumnitraat (zout)	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	15	9	11 N
Magnesiumnitraat (oplossing)	Mg(NO ₃) ₂	27 ¹	16 ¹	19 N ¹

¹ Afhankelijk van de concentratie van de oplossing.

1.3 Huidige magnesiumketens

Mg is volgens de Europese Unie een 'critical raw material', maar deze categorisatie gaat over Mg-metaal, wat bijvoorbeeld in de auto-industrie wordt gebruikt, en niet zozeer over Mg-meststoffen. Doordat Mg uit verschillende soorten minerale gesteentes komt, spreken we niet van één Mg-keten maar van meerdere ketens met verschillende oorsprongen en toepassingen (Tabel 2). In dit hoofdstuk geven we een kort overzicht van de import van Mg-producten naar Nederland. Daarnaast wordt ook de export meegenomen, aangezien Nederland door de Europoort in Rotterdam vaak als tussenhandelaar fungeert.



Figuur 2 Een overzicht van het import- en export van Mg naar- en van Nederland in 2022, uitgedrukt in miljoen USD (\$1M).¹²⁻¹⁷ Een schatting van de waarde van Mg in de Nederlandse glastuinbouw – ongeveer \$12,5 miljoen – is aangegeven op basis van de totale hoeveelheid en een gemiddelde prijs uit het online-catalogus van Royal Brinkman.

De totale waarde van de glastuinbouw is relatief klein t.o.v. het import- en export van alle Mg-producten, al is het wel meer waard dan het import van alle producten behalve metaal, magnesia en dolomiet. Puur kijkend naar de economische waarde is Nederland netto-importeur van alle vormen van Mg behalve MgCl₂ en Mg(OH)₂. MgCl₂ wordt vooral door Nedmag in Veendam gewonnen, een jaarlijkse hoeveelheid van 200-270 kiloton, en door Kisuna in Veendam naar Mg(OH)₂ verwerkt. Vooral bij magnesia en dolomiet zien we een

groot verschil tussen import en export. Waar ze dan ook vandaan komen, zijn deze bronnen niet circulair, maar Tabel 2 geeft de oorsprong- en toepassingen van de verschillende vormen van Mg.

Tabel 2 De verschillende vormen Mg-gesteente, de top 3 grootste exporteurs naar Nederland in 2022 volgens het Observatory of Economic Complexity ¹² en de belangrijkste toepassingen (naast eventueel de glastuinbouw in het groen). Percentages tellen niet op tot 100% aangezien andere landen niet weergegeven worden. Productie van struviet ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) wordt aangegeven in het groen omdat het mogelijk een circulaire fosfor-bron wordt, wellicht ook voor de glastuinbouw.

Vorm	Formule	NL import uit	Toepassingen
Metaal	Mg	China (83%) Duitsland (6%) Turkije (<2%)	Auto-industrie Lucht- en ruimtevaart Elektronica
Kieseriet/epsomiet	$MgSO_4 \cdot H_2O$ / $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Duitsland (93%) België (5%) Tsjechië (<2%)	Glastuinbouw Landbouw Dierlijke voeding
Magnesia	MgO	China (62%) Duitsland (13%) Brazilië (11%)	Glastuinbouw (voor $Mg(NO_3)_2$) Struvietprecipitatie Staalproductie
Magnesiet	$MgCO_3$	Spanje (90%) België (4%) Verenigd Koninkrijk (2%)	Magnesia-productie Vuurvaste materialen Voedingsmiddelen en farmacie
Dolomiet	$CaMg(CO_3)_2$	België (84%) Noorwegen (11%) Duitsland (3%)	Bodemverbeteraar landbouw Bouwmaterialen Decoratieve stenen / grind
Magnesiumchloride	$MgCl_2$	Tsjechië (36%) Duitsland (18%) België (17%)	Struvietprecipitatie De-icing en stofbestrijding Magnesiumproductie
Magnesiumhydroxide	$Mg(OH)_2$	Rusland (35%) China (21%) Hong Kong (6%)	Struvietproductie Neutralisatie afvalwater Rookgasreiniging

Tabel 2 laat zien dat best veel van het Mg wat Nederland importeert uit Europa komt. Europa heeft ook genoeg Mg-reserves om de komende decennia zelfvoorzienend te zijn voor alle toepassingen, vooral in de vorm van magnesiet, dolomiet en zoutafzettingen. Al zouden ze wellicht gebruikt kunnen worden, zou dit niet helpen met het bereiken van circulariteitsdoelen.

Om ons op de glastuinbouw toe te spitsen, zien we twee relevante gesteentes die nu bron zijn van Mg voor de sector. Magnesia wordt gebruikt als input voor $Mg(NO_3)_2$ productie (Figuur 1). Kieseriet/epsomiet kan direct worden toegepast in de glastuinbouw, met een 1:1 verhouding $Mg^{2+}:SO_4^{2-}$. De voorkeur ligt op gebruik van epsomiet door zijn betere oplosbaarheid.

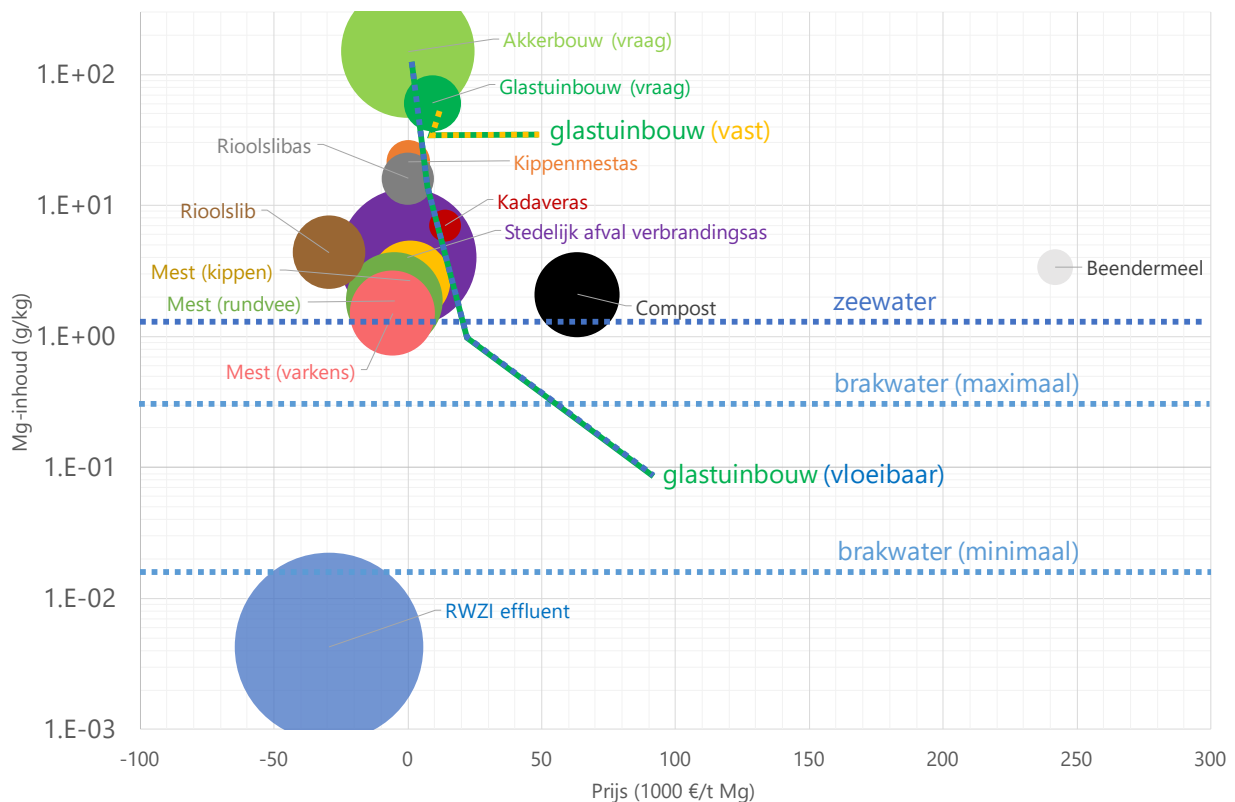


2 Circulaire Magnesiumstromen

In dit hoofdstuk worden circulaire reststromen in Nederland besproken die als potentiële bronnen voor Mg kunnen dienen. De inventarisatie is in eerste instantie gebaseerd op informatie van eerdere WUR-rapporten over (organische) reststromen.^{18,19,20}

2.1 Reststromen

Er bestaan verschillende reststromen in Nederland waaruit Mg teruggewonnen kan worden (Figuur 3). Gerecyclede Mg-metaal is buiten beschouwing gelaten. Het wordt ook maar voor 7% gerecycled in de EU.²¹ Bovendien is het recyclen van Mg-metaal naar metaal een hoogwaardigere toepassing dan naar meststoffen, dus is dit niet meegenomen.



Figuur 3 Een overzicht Mg-reststromen in Nederland, met prijs (1000 € per ton Mg) op de horizontale as en Mg-gehalte (g/kg) aan de verticale as (logaritmisch). De grootte van de bollen geeft weer hoeveel Mg het jaarlijks voorstelt. De kunstmest-vraag van akkerbouw en glastuinbouw worden ook weergegeven; met mogelijk bereik aan concentratie en prijs voor de glastuinbouw weergegeven voor zowel vast- (geel) als vloeibare producten (blauw). Drie horizontale stippenlijnen geven de concentraties van zeewater en brakwater aan.

Uit deze figuur blijkt dat er genoeg Mg aanwezig is in de geanalyseerde reststromen om te voldoen aan de vraag in de glastuinbouw. Beendermeel en compost worden al gebruikt in de land- en tuinbouw als bodemverbeteraar. Ze zijn te duur voor de glastuinbouw, en compost wordt vooral voor de organische stof gebruikt en niet zozeer voor het Mg.

De overblijvende reststromen zijn per ton Mg goedkoper dan glastuinbouwreststoffen, met een redelijk kleine prijsvariatie en een zwak verband tussen prijs en concentratie. Het gaat om de volgende categorieën:

- **Mest** wordt grotendeels uitgereden of geëxporteerd. Aangezien magnesium geen emissie-probleem vormt (zoals stikstof of fosfor), en mest al een nuttige toepassing kent, is Mg-terugwinning hier minder zinvol. Daarnaast bemoeilijkt regelgeving het hergebruik van dierlijke nevenstromen.
- **Rioolslib** wordt voornamelijk verbrand in Nederland. Daarom gaat bijna 100% van het Mg in rioolslib naar rioolslib-as. Uit Figuur 3 is een groot verschil tussen rioolslib en rioolslib-as te zien: dit komt uit onzekerheden in de gegevens waarop de studie van Van Eekert & Bisschops (2023) gebaseerd is. In ieder geval omvat het niet genoeg Mg voor de glastuinbouw sector.
- **Assen** hebben over het algemeen een hoge Mg-concentratie en zijn vrij aan pathogenen en organische contaminanten zoals medicijnresten. Stedelijk afval verbrandingsas is de enige as-stroom wat genoeg Mg bevat voor de hele glastuinbouwsector.
- **RWZI effluent** is het gezuiverde wat afvalwater wat gezuiverd is door rioolwaterzuiveringsinstallaties. Dit effluent wordt geloosd op oppervlaktewater. Het heeft de laagste concentratie van Mg van alle reststromen, maar in absolute hoeveelheden bevat het wel het meeste Mg.

Zeewater en brakwater worden hieronder apart toegelicht, aangezien het verhaal iets anders is dan bovenstaande reststromen.

2.2 Zeewater en brakwater

Zeewater als potentiële drinkwater en Mg bron

Drinkwaterproductie uit zeewater wordt in Nederland momenteel niet toegepast, maar door de verwachte waterschaarste in de toekomst worden echter de mogelijkheden onderzocht. Drinkwaterbedrijf Brabant Water voert hier bijvoorbeeld onderzoek naar en wil in de toekomst een deel van zijn drinkwater uit zeewater produceren.²²

Magnesium is na natrium (Na^+) het meest voorkomende kation in de zeewater, met een concentratie van ongeveer 1270 mg/l. Is het winnen van Mg uit de zee duurzaam? De oceanen bevatten in totaal ongeveer $1,7 \times 10^{15}$ ton magnesium.²³ Ter vergelijking: de wereldwijde magnesiumproductie bedroeg in 2019 'slechts' 1,12 miljoen ton.²⁴ Bij het huidige productieniveau zou de zee theoretisch ruim 1,5 miljard jaar als magnesiumbron kunnen dienen. Bovendien wordt magnesium continu aangevuld door natuurlijke processen zoals de verwerking van gesteente.²⁵ Zeewater kan dus naast een bron voor drinkwater, ook een bron voor Mg terugwinning zijn.

Brakwater als potentiële drinkwater- en Mg-bron

In Nederland wordt drinkwater voornamelijk gewonnen uit zoet oppervlakte- en grondwater maar er zijn ook initiatieven om drinkwater te produceren uit brak grondwater.²⁶ Hierbij wordt brak water uit diepe grondlagen opgepompt en gezuiverd, terwijl het resterende concentraat (brijn) weer in de ondergrond wordt geïnfilteerd. Brakwater bevat echter aanzienlijk minder magnesium dan zeewater, met concentraties die variëren van slechts 13 mg/l tot maximaal 330 mg/l.²⁷ Dit betekent dat, hoewel het produceren van drinkwater goedkoper is²⁸, de opbrengst van magnesium uit brakwater lager zal zijn dan bij brijn uit zeewaterontzilting.

Mg potentie uit zeewater en brakwater in perspectief

De potentie van magnesiumwinning uit zeewater en brakwater is grofweg te berekenen op basis van de volume water die ermee geleverd wordt. Voor zeewater gaan we van 50% schoonwater herwinning uit, wat betekent dat er twee keer zoveel water nodig is als input als wat er als product geleverd wordt. Voor brakwater ligt dit getal rond de 75%. Ervan uitgaand dat alle Mg in het brijn achterblijft, kunnen we op basis van de Mg-concentratie van het ingaande water een hoeveelheid Mg berekenen en naar de glastuinbouw vertalen. Nederland verbruikt jaarlijks zo'n 85,5 miljoen m^3 drinkwater.²⁹ Het percentage hiervan wat uit ontzilting zou moeten komen om genoeg Mg te produceren als reststof voor de glastuinbouw wordt in Tabel 3 weergegeven, en is berekend door de benodigde uitgaande volume drinkwater eerst te bepalen. Dat is 1270 ton (vraag glastuinbouw), gedeeld door de Mg-concentratie van de bron keer de herwinningsefficiëntie van het ontziltingsproces.

Tabel 3 De percentage van Nederlands drinkwater wat uit ontzilting zou moeten komen om in de brijnen als restproduct genoeg Mg te produceren voor de glastuinbouw.

	Zeewater	Brakwater	
		Laag	Hoog
Benodigde Nederlandse drinkwaterproductie uit ontzilting om glastuinbouw van Mg te voorzien	0,1%	9%	0,3%

Zoals Tabel 3 laat zien, zou al met slechts 0,1% van het Nederlandse drinkwater afkomstig uit zeewaterontzilting in de magnesiumbehoefte van de glastuinbouw kunnen worden voorzien. Bij brakwater met de laagste concentraties – wat voor drinkwaterproductie het meest gunstig is – zou 9% van wat Nederland jaarlijks nodig heeft uit ontzilting moeten komen. Op basis van de huidige capaciteit in Nederland ^{30,31}, zou 4,5% van het drinkwater uit ontzilting kunnen komen, al wordt dit niet voor drinkwater gebruikt ²⁸ maar industriële doeleinden.

Reverse osmosis



3 Technologieën

In dit hoofdstuk worden interessante casestudies besproken waarin magnesium wordt (terug)gewonnen uit waterstromen en as. Hierbij wordt ook ingegaan op de werking van de toegepaste technologieën en de manier waarop een integrale aanpak kan bijdragen aan een efficiëntere benutting van reststromen. Veel van de Mg-terugwinning technologieën zijn gefocust op Mg terugwinning uit waterstromen. Daarom kijken we eerst naar technologieën om Mg te precipiteren of op te concentreren voor verdere terugwinning. Vervolgens worden Mg terugwintechologieën behandeld, en worden integrale processen uit casestudies behandeld voor terugwinning van Mg en andere componenten uit reststromen.

3.1 Precipitatie

Precipitatie is de meest gebruikte techniek voor de (terug)winning van magnesium uit waterstromen. Hierbij worden chemicaliën toegevoegd om een onoplosbaar Mg-zout te vormen, dat vervolgens neerslaat. Veelgebruikte reagenten zijn NaOH, Ca(OH)_2 en NH_3 (ammonia), waarmee bijvoorbeeld Mg(OH)_2 wordt gevormd. Een belangrijk voordeel van deze techniek is de hoge selectiviteit en efficiëntie, met magnesiumterugwinningen van 94-100% bij gebruik van NaOH en een Mg(OH)_2 -zuiverheid van 94-99%³². Een nadeel is de mogelijke vorming van ongewenste neerslagen, zoals CaCO_3 en CaSO_4 , wanneer calcium aanwezig is, wat de zuiverheid van het eindproduct verlaagt en filtratie bemoeilijkt. Hoewel NaOH geen calcium toevoegt, heeft deze component als nadeel dat de precipitatie langzamer en is de resulterende slurry moeilijk te filteren.³³

Ondanks het brede gebruik van precipitatie in de praktijk, wordt er nog steeds onderzoek gedaan naar optimalisatie. Dit richt zich vooral op het verlagen van het reagentia-verbruik en het verbeteren van de kristalvorming om filtratie te vergemakkelijken en de efficiëntie van het proces te verhogen. Een andere techniek voor precipitatie is **elektrocoagulatie**: Hierbij wordt door middel van elektrodes en energie OH^- ionen geproduceerd uit water. Deze ionen zorgen er weer voor dat Mg (en calcium) precipiteren. Deze technologie wordt vooral toegepast om water te ontharden, en dus om Ca en Mg te verwijderen. Het voordeel hiervan is dat er geen chemicaliën moeten worden toegevoegd om Mg (en calcium) te precipiteren, maar de investeringskosten zijn wel aan de hoge kant. Vervolgstappen zijn nodig om Mg selectief te verwijderen.³³

Mg kan worden teruggewonnen in de vorm van **struviet** (magnesiumammoniumfosfaat; $\text{Mg(NH}_4\text{)PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), een slecht oplosbaar zout dat waardevol is als 'slow-release' fosfaatmeststof in de landbouw. Struviet kan worden gevormd uit reststromen die magnesium (Mg), stikstof (N) en fosfor (P) bevatten, of door doelgerichte menging van verschillende stromen om deze componenten samen te brengen. In onbehandeld effluent of mest slaat struviet doorgaans niet spontaan neer. Voor een efficiënte precipitatie is een pH tussen 8,0 en 9,5 gewenst, wat vaak bereikt wordt door het toevoegen van een base of door CO_2 -verwijdering. Daarnaast is de verhouding tussen N, P en Mg essentieel voor een optimale precipitatie. In de praktijk wordt de fosfor-magnesiumverhouding vaak aangepast naar een P:Mg-molratio tussen 1,2 en 2 om een efficiënte precipitatie te bevorderen.³⁴

3.2 Voorconcentratie uit reststromen

Precipitatie van Mg^{2+} is voor elke waterstroom mogelijk, echter, voor een praktisch nut en economisch haalbaarheid is het beter als de magnesiumconcentratie zo hoog mogelijk is. Vandaar dat vaak wordt gekeken om een waterstroom te verkrijgen waarin magnesium is vorgeconcentreerd, om daarna selectief te worden geprecipiteerd. Voorconcentreren kan bijvoorbeeld m.b.v.:

Ionenwisselaars (IEX): Ionenwisselaars bestaan uit geladen harsdeeltjes die geladen opgeloste componenten kunnen binden, en dus verwijderen uit oplossingen. Mg^{2+} en Ca^{2+} kunnen op die manier verwijderd worden door gebruik te maken van negatief geladen hars in ionenwisselaars. Ionenwisselaars zijn niet Mg-selectief, en zullen dus ook andere tweewaardig positief geladen componenten, zoals Ca^{2+} . Dit soort IEX wordt vaak gebruikt bij waterontharding. Regeneratie van IEX zorgt voor een periodieke waterstroom met opgehoogde Mg- (en Ca-) concentraties. Voor regeneratie zijn wel weer zouten, zoals NaCl, nodig.

Membraanfiltratie: Membraanfiltratie is een veelgebruikte technologie om waterstromen te zuiveren en waardevolle componenten te concentreren. Bij processen zoals omgekeerde osmose, ook **reverse osmosis (RO)** genoemd, en **nanofiltratie (NF)** wordt water onder druk door een membraan gepompt, waarbij ionen zoals magnesium en calcium grotendeels worden tegengehouden. Hierdoor ontstaat een gescheiden waterstroom: een schoon permeaat en een concentraat (retentaat) waarin de tegengehouden zouten in hogere concentraties voorkomen. Voor magnesiumterugwinning biedt membraanfiltratie belangrijke voordelen. Het proces verhoogt de Mg^{2+} concentratie in het retentaat, wat de efficiëntie van vervolgstappen zoals precipitatie of extractie kan verbeteren. Tegelijkertijd wordt een schone waterstroom geproduceerd. Een nadeel is dat niet alleen Mg^{2+} wordt geconcentreerd, maar ook andere opgeloste stoffen zoals NaCl (bij RO) en calcium (bij RO en NF) in zoutwaterstromen. Daarnaast vergt membraanfiltratie investeringen en energie-input, aangezien het een drukgedreven proces is.

Electrodialyse (ED): Bij ED worden ionen op basis van hun lading van elkaar gescheiden. Positieve ionen, zoals Mg^{2+} en Ca^{2+} , bewegen naar de negatieve elektrode, terwijl negatieve ionen in de richting van de positieve elektrode migreren. Dit proces wordt gestuurd door een elektrische stroom en vindt plaats tussen meerdere selectieve membranen. Door specifieke membranen te gebruiken die alleen tweewaardige kationen doorlaten, kunnen Mg^{2+} en Ca^{2+} effectief worden gescheiden van eenwaardig geladen ionen zoals natrium (Na^+) en kalium (K^+). Hierdoor wordt magnesium opgeconcentreerd in een aparte stroom. Een belangrijk verschil met membraanfiltratie (zoals RO en NF) is dat ED selectief tweewaardige ionen uit het water haalt, terwijl andere opgeloste componenten grotendeels in de oorspronkelijke waterstroom blijven. Dit betekent dat de magnesiumrijke stroom minder vervuild is dan het retentaat van membraanfiltratie, waarin ook andere zouten en opgeloste stoffen zijn geconcentreerd. Echter, in tegenstelling tot RO of NF levert ED geen aparte stroom schoon water op.

Electrodialyse kan ook worden toegepast op het retentaat van RO of NF, waardoor de magnesiumconcentratie verder wordt verhoogd en waardevolle componenten efficiënter kunnen worden teruggewonnen. Dit maakt ED een interessante technologie voor geïntegreerde processen gericht op magnesiumterugwinning uit diverse waterbronnen.

3.3 Integrale processen

In deze paragraaf behandelen we enkele casestudies waarbij magnesium is teruggewonnen uit rest- of waterstromen. We maken hierbij onderscheid tussen zoute waterstromen (brijn, zeewater en brak water), effluënten (van bijvoorbeeld RWZI's) en assen.

3.3.1 Uit zoute stromen

Magnesiumproductie uit RO-concentraten

Zoals beschreven in Hoofdstuk 2, wordt reverse osmose gebruikt om zoet water te produceren uit brakke/zoute waterstromen, bijvoorbeeld voor drinkwater. Het concentraat wat overblijft, wordt vaak als afval beschouwd en grotendeels geloosd, wat een milieubelasting kan vormen. De laatste jaren is er echter meer aandacht voor duurzame afvalbeheerstrategieën, zoals zero liquid discharge (ZLD) en minimum liquid discharge (MLD), om het volume van geloosde brijn te minimaliseren. Hiermee kunnen de geproduceerde zouten met minder impact op land of water worden afgevoerd, wat kansen biedt voor herwinning van waardevolle componenten zoals magnesium.

Magnesium kan uit deze concentraten worden teruggewonnen via standaard-precipitatie, waarbij $Mg(OH)_2$ wordt gevormd. Op vergelijkbare wijze kan ook calcium worden gescheiden, waarna de resterende brijn

verder kan worden opgewaardeerd tot NaCl en KCl via andere technieken. Hoewel deze processen zich nog in de testfase bevinden, lijken ze economisch haalbaar voor de terugwinning van mineralen uit zeewater.³⁵ Een andere studie laat zien dat brijn gemaakt uit zeewater ook gebruikt kan worden als goedkope Mg bron voor struviet precipitatie. Deze Mg-rijke brijnen worden toegevoegd aan een N- en P-rijke bron (zoals urine of vergist slib uit RWZI's) om struviet te precipiteren.^{34,36,37}

Selectief voorconcentreren

Een alternatief voor Mg terugwinning uit zeewater is om divalente kationen eerst selectief op te concentreren. Dit kan m.b.v. electrodialyse (ED). M.b.v. membranen die alleen tweewaardige kationen doorlaten, wordt Mg^{2+} selectief uit zeewater onttrokken naar een andere waterstroom. Hierdoor wordt een waterstroom verkregen met verhoogde Mg^{2+} concentraties en zonder andere verontreinigingen. Deze stroom biedt kansen om efficiënter struviet te maken d.m.v. precipitatie. Nadeel is dat ook Ca^{2+} in de productstroom komt.³⁸

Terugwinning van magnesium uit regeneratiewater van ionenwisselaars

Een pilotstudie³⁹ heeft onderzocht hoe brijn verwerkt kan worden om waardevolle componenten terug te winnen. In deze studie zijn zuiver water, magnesium en calcium herwonnen. Eerst werden magnesium en calcium uit de brijn verwijderd met behulp van een ionenwisselaar. Hierbij binden alle tweewaardig positief geladen ionen (kationen) zich aan het geladen hars in de ionenwisselaar, waardoor Mg en Ca effectief worden gescheiden.

Om het hars te regenereren en de gebonden ionen vrij te maken, werd het systeem gespoeld, wat resulteerde in een Mg- en Ca-rijke reststroom. Deze reststroom werd vervolgens behandeld met loog (NaOH), waardoor eerst $Mg(OH)_2$ en daarna $Ca(OH)_2$ neersloegen. De magnesiumterugwinning was meer dan 80%, met een $Mg(OH)_2$ -zuiverheid van meer dan 90%.³⁹

Adsorptie als verbeterde methode voor magnesiumterugwinning

Om het proces van precipitatie en terugwinning efficiënter te maken, is onderzoek gedaan naar een combinatie van precipitatie en adsorptie.⁴⁰ In deze studie werd een RO-concentraat gebruikt, waarbij $Mg(OH)_2$ werd geprecipiteerd door toevoeging van NaOH of CaO. Het gevormde $Mg(OH)_2$ hechtte direct aan het oppervlak van magnetiet (Fe_3O_4) deeltjes van 8 micrometer, die magnetisch zijn. Hierdoor kon het $Mg(OH)_2$ eenvoudig uit de oplossing worden verwijderd met een magneet.

Om het magnesium vervolgens weer los te krijgen van het magnetiet (desorptie), werd een zuur toegevoegd. Afhankelijk van het gebruikte zuur konden verschillende magnesiumzouten worden gevormd, zoals $MgSO_4$, $MgCl_2$ en $Mg(HCO_3)_2$. Dit proces resulteerde in een product met een zuiverheid van >97%. Een eerste kostenanalyse laat zien dat de productie van $MgSO_4$ en $Mg(HCO_3)_2$ kostenefficiënt is, terwijl $MgCl_2$ vergelijkbare kosten heeft als commerciële alternatieven.⁴⁰

Magnesium als bijproduct van lithiummijnen

Zeezoutafzettingen vormen een belangrijke bron voor de winning van lithium. Het aanwezige magnesium is daarbij een cruciale parameter, omdat de scheiding van lithium en magnesium technisch uitdagend is. Hoewel lithiumproductie de hoofdreden is voor onderzoek naar deze scheiding, wordt ook gekeken naar efficiënte methoden om magnesium uit brijnen te verwijderen.

Een veelbelovende technologie voor de terugwinning van magnesium uit brijnen is vloeistof-vloeistof-extractie⁴¹. Dit proces maakt gebruik van twee niet-mengbare vloeistoffen, waarmee magnesium selectief geëxtraheerd kan worden. De studie beschrijft een methode om specifiek magnesium uit magnesiumrijke brijnen afkomstig van zeezoutafzettingen te verwijderen, met als doel zuiver lithium te produceren. Deze aanpak wordt gezien als duurzamer dan conventionele methoden, die vaak veel chemicaliën vereisen voor de precipitatie van calcium, magnesium en lithium.

In de eerste stap wordt magnesium gebonden aan een extractiemiddel, waarna het in de tweede stap weer wordt teruggewonnen door toevoeging van water. Dit resulteert in de productie van $MgCl_2$ met een zuiverheid van >99%. Hoewel lithiumwinning in Nederland nog niet plaatsvindt, zijn er op verschillende locaties lithiumvoorraden in de bodem aangetroffen. Dit kan in de toekomst mogelijkheden bieden voor zowel lithium- als magnesiumwinning.⁴²

3.3.2 Uit (RWZI)-effluenten

RWZI-effluent bevat aanzienlijk minder magnesium dan zeewater, maar nog steeds in relevante hoeveelheden. Terwijl zeewater doorgaans 1300 mg/l magnesium bevat, varieert de concentratie in RWZI-effluent rond de 4 à 5 mg/l, met plekken waar 150 mg/l ook mogelijk is.⁴³ De samenstelling van RWZI-effluent verschilt sterk van die van zeewater. Waar zeewater voornamelijk uit natrium (Na^+) en chloride (Cl^-) bestaat, aangevuld met andere ionen zoals magnesium (Mg^{2+}), calcium (Ca^{2+}), sulfaat (SO_4^{2-}) en kalium (K^+), bevat RWZI-effluent een complexere mix van afvalstoffen. Hierbij komen organische verbindingen in hoge concentraties voor, en komen ook stikstofverbindingen (zoals ammonium, nitraat en nitriet) en fosforverbindingen voor, terwijl andere zouten zoals natrium, chloride en calcium in vergelijkbare concentraties als magnesium aanwezig zijn.⁴⁴ Omdat RWZI-effluent naast magnesium ook aanzienlijke hoeveelheden nutriënten (stikstof en fosfor) bevat, worden terugwinningstechnieken vaak gecombineerd om zowel N, P als Mg efficiënt terug te winnen.

Integrale zuivering en terugwinning puur water en struviet

In een pilotstudie⁴⁵ is onderzocht hoe RWZI-effluent hergebruikt kan worden. Een integraal proces is ontworpen waarbij het effluent wordt gezuiverd via ultrafiltratie (UF), nanofiltratie (NF), ionenwisseling (voor sulfaatverwijdering) en een tweede nanofiltratiestap. Dit zuiveringsproces levert water op dat geschikt is voor diverse toepassingen en bij verdere behandeling zelfs drinkwaterkwaliteit kan bereiken.

De concentraatstroom van de laatste NF-stap bevat sterk verhoogde concentraties Mg^{2+} en Ca^{2+} , waarbij Mg^{2+} tot 25 keer is opgeconcentreerd tot 300-400 mg/l. Dit biedt de mogelijkheid om magnesium terug te winnen via standaard $\text{Mg}(\text{OH})_2$ precipitatie.

In de betreffende studie is onderzocht hoe de terugwinning van Mg, P en N gecombineerd kan worden als precipitatie als struviet ($\text{Mg}(\text{NH}_4)\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Omdat de concentraties PO_4^{3-} en NH_4^+ in RWZI-effluent laag zijn door biologische omzetting, is het NF-contraat gemengd met een bijproduct van slibvergisting in RWZI's. Dit bijproduct is rijk aan fosfaat en ammonium, maar bevat onvoldoende magnesium. Door precipitatie als struviet kon Mg worden teruggewonnen met een efficiëntie van 48–84%, terwijl de PO_4^{3-} -terugwinning varieerde tussen 37–90%, afhankelijk van het proces en de samenstelling van de voeding. De ammoniumterugwinning was lager, omdat er een overmaat van ammonium was.

Het is interessant om op te merken dat in verschillende studies naar nutriënt terugwinning uit effluent magnesium (vaak in de vorm van MgCl_2) wordt toegevoegd om struviet te laten neerslaan.⁴⁶ Dit betekent dat deze studies in feite concurreren met de terugwinning van magnesium zelf. Terwijl wij streven naar technologieën die alle waardevolle componenten kunnen terugwinnen, wordt magnesium in veel processen juist verbruikt als hulpstof voor precipitatie.⁴⁷

Terugwinning van magnesium als $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ met fluidized bed techniek

Een nieuwe technologie, Fluidized Bed Homogeneous Crystallization (FBHC), wordt gebruikt om magnesiumcarbonaatpellets ($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) te produceren.⁴⁸ In deze techniek wordt magnesiumrijk effluent (~2000 mg/l) samen met de reactant Na_2CO_3 aan een reactor gevoed. Dit Na_2CO_3 is op zijn beurt een bijproduct van de afvang van industrieel CO_2 -gas met NaOH. Door de pH zorgvuldig te regelen, ontstaat in de FBHC-reactor een omgeving waarin $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ kristallen kunnen groeien zonder toevoeging van zaadmateriële zoals silica. Hierdoor kan meer dan 85% van het magnesium worden teruggewonnen, met een zuiverheid van ~94%. Bovendien maakt de pelletvorm van het magnesium het transport en hergebruik aanzienlijk eenvoudiger in vergelijking met opvang in slurrievorm. Een opmerking is dat in deze studie een industrieel effluent is gebruikt met een zeer hoge Mg^{2+} concentratie. De werking met andere effluenten is onbekend.

3.3.3 Uit assen

Een alternatief dat hierboven nog niet is meegenomen, is de terugwinning van magnesium uit as, zoals houtas en vliegash. Na de verbranding van hout blijft een as achter die rijk is aan magnesium, voornamelijk in de vorm van MgO. In houtas is magnesium aangetroffen in concentraties van 16 tot 60 g Mg per kg as.⁴⁹

Verschillende studies hebben onderzocht hoe dit type magnesium kan worden teruggewonnen. Veel van deze onderzoeken richten zich op de precipitatie van magnesium als struviet door Mg-rijk as toe te voegen aan waterstromen met een hoog gehalte aan ammonium (NH_4^+) en fosfaat (P).^{50,51}

Er is onderzocht of de toevoeging van houtas aan gescheiden urine kon leiden tot de vorming van struviet. Hoewel 50% van het magnesium kon worden teruggewonnen, bleek het neerslagproduct niet puur struviet te zijn, omdat ook calciëten zware metalen neersloegen. Daarnaast had het product een lagere bemestingswaarde dan houtas zelf, doordat 60% van het kalium in oplossing bleef. Economisch gezien is houtas goedkoper dan industriële magnesiumbronnen, maar door de lage zuiverheid en mogelijke aanwezigheid van zware metalen bleek het minder geschikt als meststof en beter bruikbaar als bodemverbeteraar voor zure bodems.⁴⁹

In een ander project is as uit hout- en turfverbranding gebruikt om struviet te laten neerslaan uit de vloeibare fase van anaeroob digestaat (Myllymäki et al., 2019). Dit onderzoek richtte zich op de terugwinning van stikstof (N) en fosfor (P), waarbij as werd onderzocht als een goedkope alternatief voor de magnesiumpoeders die doorgaans worden gebruikt bij struvietprecipitatie. Aangezien magnesium tot 75% van de kosten voor struvietprecipitatie kan uitmaken, kunnen dergelijke assen een kostenefficiënte bron van magnesium vormen.⁵⁰ De vliegassludge verwijderde 43% van het ammoniumstikstof en 33% van het fosfaat uit de vloeibare fase van het digestaat, en daarmee ook een gedeelte van het magnesium uit het as.

Er is geen literatuur gevonden over Mg terugwinning uit de vermelde assen uit Hoofdstuk 2 (kippenmest, stedelijkverbrandingsas, en rioolslib). Aangezien de casestudies hierboven laten zien dat assen als goedkope Mg bron kunnen fungeren, in combinatie met het gegeven dat de circulaire bronnen uit hoofdstuk 2 veel Mg bevatten, zou het een optie zijn om deze bronnen ook te inventariseren als goedkope Mg-bron voor (struviet) precipitatie.



4 Toepassing in de Glastuinbouw

In dit hoofdstuk kijken we naar de toepasbaarheid in de glastuinbouw vanuit twee eisen die specifiek voor de glastuinbouw van belang zijn: oplosbaarheid en contaminanten.

4.1 Oplosbaarheid

De glastuinbouw, met deels uitzondering van potplanten, gebruikt het liefst meststoffen in oplossing. Veel Mg-terugwinningstechnologieën produceren onoplosbare precipitaten en kunnen dus niet direct toegepast worden in deze systemen. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ kan via huidige ketens worden omgezet naar gangbare meststoffen (Figuur 1), die nu al mineraal $\text{Mg}(\text{OH})_2$ gebruikt. Eventueel dit het te duur wordt zou het met zuur direct in de glastuinbouw toegepast kunnen worden. Dan wordt de reactie $\text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{HA} \rightarrow \text{MgA}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ en de verhouding aan nutriënten voorspelbaar.

Bij struviet ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) is het iets anders. Struviet bevat per mol Mg 1 mol NH_4^+ en 1 mol P. Naast de A- en B-bakken zou het in een aangezuurde 'C'-bak opgelost kunnen worden. Met chemische simulaties is bepaald dat om struviet op te lossen naar een concentratie wat typisch zou zijn voor een B-bak (rond de 150 mmol/l), 300 mmol/l zuur nodig is.¹⁹ Dit geeft een Mg:H⁺ verhouding van 1:2. Met bijvoorbeeld salpeterzuur (HNO_3), betekent dat de C-bak per mol Mg, 2 mol NO_3^- meegaat.

Als we deze verhoudingen meenemen om een nutriëntenrecept voor komkommer te berekenen, kunnen we een idee krijgen van de toepasbaarheid van struviet als Mg-bron in een aangezuurde C-bak. Dit is gedaan door gangbare meststoffen te mengen met Excel Solver om zo dicht mogelijk bij het gewenste recept te komen. Hierin zijn als zuur voor de C-bak HNO_3 en H_2SO_4 als opties meegenomen.

Tabel 4 Een komkommer gietwaterrecept met struviet als Mg-bron, aangezuurd in een derde 'C'-bak met HNO_3 en H_2SO_4 . Cijfers zijn uitgedrukt in mmol/l. Dit nieuw recept betekent dat MgSO_4 , maar ook KH_2PO_4 , niet meer toegepast worden; de concentraties in een gangbaar recept zijn doorgestreept en in het grijs aangegeven. Het verschil tussen de recepten wordt onderaan gegeven.

Toediening	Product	Conc.	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NO_3^-	SO_4^{2-}	H_2PO_4^-	H^+	OH^-
C-bak	$\text{Mg}(\text{NH}_4)\text{PO}_4$	1,0	1,0			1,0			1,0		
	HNO_3	1,8					1,8			1,8	
	H_2SO_4	0,1						0,1		0,2	
Vervangen door struviet	MgSO_4	1,0				1,0		1,0			
	KH_2PO_4	1,25		1,25					1,25		
A-/B-/loogbakken	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	3,5			3,5		7,0				
	K_2SO_4	0,8		1,6				0,8			
	KOH	2,0		2,0							2,0
	KNO_3	2,9		2,9			2,9				
Recept met C-bak			1,0	6,5	3,5	1,0	11,7	0,9	1,0	2,0	2,0
Doelrecept			1,0	6,5	2,8	1,0	11,7	1,0	1,25	n.v.t.	n.v.t.
Vershil			0	0	+0,7	0	0	-0,1	-0,25	n.v.t.	n.v.t.

Tabel 4 laat zien dat er net niet exact voldoen kan worden aan het doelrecept voor komkommer als struviet als nutriënt wordt toegevoegd in een C-bak. Er zal dan meer calcium, en minder sulfaat en fosfaat in het recept komen. Alle drie nutriënten zitten wel goed binnen 1 mmol/l van het doelrecept, wat nog steeds aanvaardbaar is en tot een aanvaardbaar recept leidt.

4.2 Contaminanten

Er is altijd een kans aanwezig van de introductie van contaminanten bij gebruik van reststromen. Voor de glastuinbouw bestaan er geen officiële grenswaarden voor contaminanten. Wel zijn er limieten die voor de akkerbouw gelden, maar deze zijn waarschijnlijk veel te ruim voor recirculerende glastuinbouwsystemen.¹⁹ In de N-whitepaper ²⁰ zijn N-specifieke limieten berekend, op basis van de methodologie van een publicatie over fosfor.¹⁹ Dezelfde aanpak kan ook gebruikt worden voor Mg en andere meststoffen. In deze whitepaper is dat niet specifiek voor Mg-producten uitgezocht. Dit komt mede omdat de totale som aan geïntroduceerde contaminanten in de aangeboden meststoffen uiteindelijk belangrijk is, en niet de contaminant-gehalten van elke individuele meststof. Deze totale som kan met genoemde aanpak ook bepaald worden.

Afronding

In deze whitepaper zijn mogelijke circulaire routes voor magnesium (Mg) voor de glastuinbouwsector in kaart gebracht. In tegenstelling tot fosfor en stikstof is circulair magnesium als meststof nog relatief weinig onderzocht terwijl het wel essentieel is voor gewasgroei en plantgezondheid.

De terugwinning van magnesium uit waterstromen (zoals RWZI effluent, brakwater en zeewater) en (verbrandings)assen blijkt kansrijk als circulaire Mg-bron voor de glastuinbouw. Voor deze alternatieve bronnen zijn integrale procesconcepten verkend, waarin zowel de productie van drinkwater als de terugwinning van magnesium en andere componenten zijn onderzocht.

De meest toegepaste technologie voor Mg-terugwinning is precipitatie, met name in de vorm van magnesium hydroxide ($Mg(OH)_2$) en struviet ($Mg(NH_4)PO_4 \cdot 6H_2O$). Hoewel beide vaste stoffen niet direct bruikbaar zijn als oplosbare meststof in de glastuinbouw, zijn er wel praktische routes voor implementatie denkbaar. Ze kunnen namelijk óf worden ingezet als grondstof in bestaande ketens voor meststofproductie, óf door tuinders zelf worden opgelost in een aangezuurde 'C-bak', waarmee directe toepassing alsnog mogelijk wordt.

Benieuwd geworden?

Neem contact met ons op via glastuinbouw@wur.nl, of lees meer op wur.nl/circulaire-glastuinbouw. Deze whitepaper is gebaseerd op het [Kennisbasis rapport](#) over fosfor.⁵² Een soortgelijke whitepaper is al voor stikstof (N) gepubliceerd,²⁰ met een derde wat over een micronutriënt wordt.

Auteurs

Alexander van Tuyl¹, Marc Lanting², Erik Vriezেকolk²

Peer review

Norbert Kuipers²

Samenwerking

1 Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw & Bloembollen

2 Wageningen Food & Biobased Research

Referenties

1. Rahimpour Golroudbary, S., Makarava, I. & Kraslawski, A. Environmental Assessment of Global Magnesium Production. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* **44**, 389–406 (2023).
2. Chislock, M. F., Doster, E., Zitomer, R. A. & Wilson, A. E. Eutrophication: Causes, Consequences, and Controls in Aquatic Ecosystems | Learn Science at Scitable.
https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/eutrophication-causes-consequences-and-controls-in-aquatic-102364466/?utm_source=chatgpt.com (2013).
3. Amundsen, K. et al. Magnesium. in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (John Wiley & Sons, Ltd, 2003). doi:10.1002/14356007.a15_559.
4. RAW MATERIAL OUTLOOK PLATFORM. <https://www.rawmaterialoutlook.org/magnesium> (2025).
5. Seeger, M., Otto, W., Flick, W., Bickelhaupt, F. & Akkerman, O. S. Magnesium Compounds. in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (John Wiley & Sons, Ltd, 2011). doi:10.1002/14356007.a15_595.pub2.
6. Rizley, J. H. & Høy-Petersen, N. Magnesium processing - Extraction, Alloying, Applications | Britannica. <https://www.britannica.com/technology/magnesium-processing/The-metal-and-its-alloys> (2020).
7. Lafuente, B., Downs, R. T., Yang, H. & Stone, N. 1. The power of databases: The RRUFF project. in *Highlights in Mineralogical Crystallography* (eds. Armbruster, T. & Danisi, R. M.) 1–30 (De Gruyter (O), 2015). doi:10.1515/9783110417104-003.
8. van Tuyll, A. et al. Quantification of material flows: A first step towards integrating tomato greenhouse horticulture into a circular economy. *Journal of Cleaner Production* **379**, 134665 (2022).
9. Van der Lugt, G. *Nutriënten Verdeling Gewassen*.
https://www.innovatieglastuinbouw.nl/media/registered_downloads/n/nutriënten-gtb-en-kringlopen-df.pdf (2022).
10. Härdter, R., Rex, M. & Orlovius, K. Effects of different Mg fertilizer sources on the magnesium availability in soils. *Nutr Cycl Agroecosyst* **70**, 249–259 (2005).
11. Sonneveld, C. & Voogt, W. Plant Nutrition in Future Greenhouse Production. in *Plant Nutrition of Greenhouse Crops* (eds. Sonneveld, C. & Voogt, W.) 393–403 (Springer Netherlands, Dordrecht, 2009). doi:10.1007/978-90-481-2532-6_17.
12. OEC. The Observatory of Economic Complexity. *The Observatory of Economic Complexity* <https://oec.world/en/> (2022).
13. OEC. Magnesium in Netherlands. *The Observatory of Economic Complexity* <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/magnesium/reporter/nld> (2022).
14. Magnesium in Netherlands Trade. *The Observatory of Economic Complexity* <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/magnesium/reporter/nld>.
15. Magnesium Hydroxide and Peroxide in Netherlands Trade. *The Observatory of Economic Complexity* <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/magnesium-hydroxide-and-peroxide/reporter/nld>.
16. Dolomite in Netherlands Trade. *The Observatory of Economic Complexity* <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/dolomite/reporter/nld>.
17. Magnesium chloride in Netherlands Trade. *The Observatory of Economic Complexity* <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/magnesium-chloride/reporter/nld>.
18. Van Eekert, M. & Bisschops, I. *Micronutriënten in de Kringloop: eindrapportage WP4: afvalwater en huishoudelijk organisch afval, herkomst, bestemming en stofstroom analyse, scenariostudies voor terugwinning uit huishoudelijke organische reststromen*.
<https://research.wur.nl/en/publications/d3942097-5060-4793-b53f-468d46604fa3> (2023)
doi:10.18174/642932.
19. van Tuyll, A. R. et al. A new circular fertiliser framework for greenhouse hydroponic systems using phosphorus as a case study. *Nutr Cycl Agroecosyst* (2024) doi:10.1007/s10705-024-10376-3.
20. van Tuyll, A. R. & Lanting, M. *Stikstof: Whitepaper Circulaire Meststoffen voor de Glastuinbouw*.
<https://research.wur.nl/en/publications/748e5e08-45ff-41d4-811f-9e95ac114c1f> (2024)
doi:10.18174/685765.
21. Wang, L. et al. Progress and prospects in magnesium alloy scrap recycling. *Journal of Magnesium and Alloys* **12**, 4828–4867 (2024).
22. van Leerdam, R., As, K. & van der Aa, N. *De drinkwatervoorziening van de toekomst. Ontwikkeling bronnen, zuiveringstechnologie en klimaatrisico's 2030 tot 2050*.
<https://rivm.openrepository.com/handle/10029/645839> (2025) doi:10.21945/RIVM-2024-0221.
23. US Department of Commerce, N. O. and A. A. How much water is in the ocean?
https://oceanservice.noaa.gov/facts/oceanwater.html?utm_source=chatgpt.com (2024).
24. Statista. Global primary magnesium production 2023. *Statista* <https://www.statista.com/statistics/569515/primary-magnesium-production-worldwide/> (2024).

25. Pogge Von Strandmann, P. A. E., Forshaw, J. & Schmidt, D. N. Modern and Cenozoic records of seawater magnesium from foraminiferal Mg isotopes. *Biogeosciences* **11**, 5155–5168 (2014).
26. Oosterhof, A. *et al.* Doorbraak voor gebruik van brak grondwater als alternatieve bron voor drinkwatervoorziening. *H 2 O* **42**, 14 (2009).
27. van Dijk, G. *et al.* Verbrakking in het laagveen-en zeekleilandschap. *Boschap, bedrijfsschap voor bos en natuur, Driebergen* (2013).
28. Drinkwaterplatform. Drinkwater maken uit zeewater: kan dat ook in Nederland? *Drinkwaterplatform* <https://www.drinkwaterplatform.nl/drinkwater-maken-uit-zeewater-kan-dat-ook-in-nederland/> (2022).
29. IUCN. Het Nederlandse drinkwaterdilemma | IUCN NL. <https://www.iucn.nl/> <https://www.iucn.nl/blog/het-nederlandse-drinkwaterdilemma/> (2023).
30. EMODnet. EMODnet Map Viewer. (2022).
31. Desalination.com. Water Desalination Report. *Desalinationdotcom* <https://www.desalination.com/desalination-suppliers/evides-industriewater>.
32. Fontana, D., Forte, F., Pietrantonio, M., Pucciarmati, S. & Marcoaldi, C. Magnesium recovery from seawater desalination brines: a technical review. *Environ Dev Sustain* **25**, 13733–13754 (2023).
33. Tan, K. E. B. & Choi, E. A. S. Development of Separation Techniques for Magnesium Recovery: A Mini-Review. *Chemical Engineering Transactions* **106**, 55–60 (2023).
34. Aguilar-Pozo, V. B. *et al.* Struvite precipitation in wastewater treatment plants anaerobic digestion supernatants using a magnesium oxide by-product. *Science of The Total Environment* **890**, 164084 (2023).
35. Panagopoulos, A. Brine management (saline water & wastewater effluents): Sustainable utilization and resource recovery strategy through Minimal and Zero Liquid Discharge (MLD & ZLD) desalination systems. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* **176**, 108944 (2022).
36. Fattah, K. P. *et al.* Impact of Magnesium Sources for Phosphate Recovery and/or Removal from Waste. *Energies* **15**, 4585 (2022).
37. Liu, B., Giannis, A., Zhang, J., Chang, V. W.-C. & Wang, J.-Y. Characterization of induced struvite formation from source-separated urine using seawater and brine as magnesium sources. *Chemosphere* **93**, 2738–2747 (2013).
38. Ghyselbrecht, K. *et al.* Cationic selectrodialysis for magnesium recovery from seawater on lab and pilot scale. *Separation and Purification Technology* **221**, 12–22 (2019).
39. Vassallo, F. *et al.* A pilot-plant for the selective recovery of magnesium and calcium from waste brines. *Desalination* **517**, 115231 (2021).
40. Lehmann, O., Nir, O., Kuflik, M. & Lahav, O. Recovery of high-purity magnesium solutions from RO brines by adsorption of Mg(OH)₂(s) on Fe₃O₄ micro-particles and magnetic solids separation. *Chemical Engineering Journal* **235**, 37–45 (2014).
41. Li, Z., Mercken, J., Li, X., Riaño, S. & Binnemans, K. Efficient and Sustainable Removal of Magnesium from Brines for Lithium/Magnesium Separation Using Binary Extractants. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **7**, 19225–19234 (2019).
42. Verhaegen, R. Lithium uit Nederland is 'zeer interessant', meer onderzoek nodig. *RTL Nieuws & Entertainment* <https://www.rtl.nl/rtl-nieuws/economie/artikel/5411447/lithium-metaal-limburg-aardwarmte-grondwater-batterij> (2023).
43. Panagopoulos, A. & Haralambous, K.-J. Minimal Liquid Discharge (MLD) and Zero Liquid Discharge (ZLD) strategies for wastewater management and resource recovery – Analysis, challenges and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **8**, 104418 (2020).
44. Mavhungu, A. *et al.* Advocating circular economy in wastewater treatment: Struvite formation and drinking water reclamation from real municipal effluents. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **8**, 103957 (2020).
45. Bastrzyk, A. *et al.* Management of secondary effluent using novel membrane technology to recover water and magnesium ions for phosphate precipitation: An integrated pilot-scale study. *Separation and Purification Technology* **338**, 126440 (2024).
46. Moerman, W., Carballa, M., Vandekerckhove, A., Derycke, D. & Verstraete, W. Phosphate removal in agro-industry: Pilot- and full-scale operational considerations of struvite crystallization. *Water Research* **43**, 1887–1892 (2009).
47. Ye, Y. *et al.* Nutrient recovery from wastewater: From technology to economy. *Bioresource Technology Reports* **11**, 100425 (2020).
48. Le, V. G. *et al.* Recovery of Magnesium from Industrial Effluent and Its Implication on Carbon Capture and Storage. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **9**, 6732–6740 (2021).
49. Sakthivel, S. R., Tilley, E. & Udert, K. M. Wood ash as a magnesium source for phosphorus recovery from source-separated urine. *Science of The Total Environment* **419**, 68–75 (2012).
50. Moyo, L. B., Simate, G. S. & Mamvura, T. A. Magnesium recovery from ferrochrome slag: kinetics and possible use in a circular economy. *Heliyon* **8**, e12176 (2022).
51. Myllymäki, P. *et al.* The Use of Ca- and Mg-Rich Fly Ash as a Chemical Precipitant in the Simultaneous Removal of Nitrogen and Phosphorus—Recycling and Reuse. *Recycling* **4**, 14 (2019).

52. Van Tuyl, A. *et al. Sustainable Phosphorus for Soilless Greenhouse Horticulture: An Exploration of Potential Routes.* (2024).
1. Shutterstock. (2015). Kas hydroponic. Shutterstock Image, 10426129_kas_hydroponic.jpg. Toegevoegd door: removed user, 8 juni 2015.
 2. Shutterstock. (2020). Komkommer kas. Shutterstock Image, shutterstock_1699768201_komkommer_kas.jpg. Toegevoegd door: Larissa Mulder, 17 september 2024.
 3. Shutterstock. (2016). Meeuw zee. Shutterstock Image, shutterstock_65321305_meeuw_zee.jpg. Toegevoegd door: Petra Siebelink, 18 februari 2016.
 4. Shutterstock / Sundry Photography (2019). San Jose / CA / USA – Reverse Osmosis equipment at the Silicon Valley Advanced Water Purification Center located in South San Francisco bay area; the Santa Clara Valley Water District. Shutterstock Image, 1430594210.jpg.
 5. Vlekke, G.J. (2019). Installatie met diverse (mest)stoffen in onderzoekskas. Fotostudio GJ Vlekke/Fotovak, 20190423GW012.jpg. Plant Sciences Group (PSG).

Bijlage 1 Overzicht Mg-reststromen

Tabel 5 De achterliggende cijfers over van de magnesium reststromen, getoond in Figuur 3.

Stroom	Hoeveelheid	Concentratie	Prijs
	ton Mg / jaar	g Mg / kg	1000 € / ton Mg
Akkerbouw (vraag)	7000	15	6,6
Beendermeel	510	3,4	24
Compost	2860	2,1	63
Glastuinbouw (vast)	Onbekend	96	4,1
Glastuinbouw (vloeibaar)	Onbekend	55	9,8
Glastuinbouw (gemiddeld)	1270	60	9,2
Kadaveras	410	7,0	14
Kippenmestas	760	22	0,1
Mest (kippen)	2550	2,7	0,8
Mest (rundvee)	3710	1,9	-4,9
Mest (varkens)	2860	1,5	-5,7
Rioolslib	2090	4,4	-29
Rioolslibas	1100	16	-0,005
RWZI-effluent	14 130	0,004	n.v.t.
RWZI-influent	17 620	0,007	n.v.t.
Stedelijk afval verbrandingsas	7560	4,0	-0,03
Brakwater (minimaal)	n.v.t.	0,01	n.v.t.
Brakwater (maximaal)	n.v.t.	0,3	n.v.t.
Zeewater	n.v.t.	1,3	n.v.t.

Correspondentieadres voor deze paper:

Postbus 20

2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1

2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

F +31 (0)10 522 51 93

wur.nl/glastuinbouw

Whitepaper WPR-1445

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, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 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.
