



Stikstof

Whitepaper Circulaire Meststoffen voor de Glastuinbouw



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

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



Referaat

Dit whitepaper 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. Hier kijken we naar stikstof, wat op moment uit de lucht gefixeerd wordt met het Haber-Bosch proces, met aardgas. Er bestaan duurzamere alternatieven om stikstof te winnen, zowel uit de lucht als uit reststromen. We beginnen door de beschikbare reststromen in Nederland te inventariseren en vergelijken, concluderend dat er niet genoeg beschikbaar is om aan alle vraag aan kunstmest inclusief de landbouw te voldoen. Daarna worden technologieën vergeleken, met name in energieverbruik maar ook kwalitatieve aspecten. Die kunnen (1) stikstof uit de lucht halen, (2) stikstof uit reststromen halen en (3) ammonium omzetten in nitraat, de vorm van stikstof die de glastuinbouw met name gebruikt. Tenslotte presenteren we contaminant-limieten, per gram stikstof, die meststoffenproducenten kunnen hanteren om risico's tijdens- en na de teelt beter uit te sluiten.

Abstract

This white paper is one of a three-part series of white papers developed with the Club of 100, in which the requirements and options of circular fertilisers for greenhouse horticulture are explored. In this report, we look at nitrogen, which is currently fixed from air through the Haber-Bosch process, using natural gas. There are more sustainable alternatives to produce nitrogen fertiliser, both using fixation and side-streams. We start with an comparative inventory of side-streams in the Netherlands, concluding that not enough nitrogen is available to cover demand of synthetic nitrogen fertiliser for both greenhouse horticulture and arable farming. Next, technologies are compared, in terms of energy consumption but also qualitative factors. These technologies can (1) fixate nitrogen from the air, (2) recover nitrogen from side-streams and (3) convert ammonium to nitrate, since nitrate is used in much higher amounts than ammonium in greenhouse horticulture. Lastly, this white paper presents contaminant limits, per g nitrogen, which manufacturers of circular fertilisers can use to better rule out risks in the cultivation system and beyond.

Gegevens

Rapportnummer: WPR-1364
Projectnummer: 3742357700
DOI: [https://doi.org/ 10.18174/685765](https://doi.org/10.18174/685765)

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

© 2024 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
2	Reststromen	3
3	Technologieën	6
	3.1 N-terugwinning uit reststromen	6
	3.2 N-fixatie	9
	3.3 Ammoniak naar nitraat	11
4	Limieten voor contaminanten in producten	14
	Afronding	16
	Referenties	17
Bijlage 1	Overzicht N-reststromen	21

1 Introductie

Stikstof (N) is essentieel voor het maken van aminozuren die op hun beurt de bouwstenen zijn voor eiwitten, en deze zijn weer cruciaal voor planten. Het belang van N als meststof voor de glastuinbouw is ook te zien in het voorbeeldrecept van gietwater voor tomaten in Tabel 1. In grondloze systemen wordt N voornamelijk gegeven in de vorm van nitraat (NO_3^-) wat goed opneembaar is voor planten, hoewel ammonium (NH_4^+) ook in kleinere hoeveelheden toegediend wordt. Dit is anders voor de akkerbouw, waar vaak ammoniumnitraat wordt gebruikt als meststof, en nitraat en ammonium dus evenveel aanwezig zijn op molaire basis. Op het land wordt ammonium omgezet in nitraat door bacteriën. In grondloze systemen moet N direct opneembaar zijn, en moet het dus toegediend worden in de vorm van nitraat.

Tabel 1 Een voorbeeldrecept van gietwater voor tomaten in een recirculerend grondloos systeem.

Nutriënt	NO_3^-	NH_4^+	H_2PO_4^-	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}
Concentratie (mmol l ⁻¹)	16,0	1,2	1,5	9,5	5,4	2,4	4,4

De Nederlandse glastuinbouw is uiterst efficiënt met meststoffen, maar de sector is niet circulair. De grondstoffen voor kunstmest komen uit eindige bronnen die uitgeput zullen raken. Bovendien zitten deze bronnen verspreid over heel de wereld, wat de glastuinbouw kwetsbaar maakt voor globale verstoringen. Stikstof (N) is een uitzonderlijke nutriënt, omdat het uit de lucht (~70% N_2) gefixeerd kan worden, wat nu met het Haber-Bosch proces gebeurt. Tijdens dit proces wordt N_2 omgezet in ammoniak (NH_3) met behulp van waterstof (H_2).

Het Haber-Bosch proces vergt echter veel energie, op dit moment voornamelijk aardgas (CH_4) als een bron voor H_2 , met een reactie wat 'stoomreforming' heet. Daarna wordt ammoniak omgezet in nitraat (NO_3^-), wat beter opneembaar is voor planten, door middel van het Ostwald-proces. Het Haber-Bosch proces staat onder druk, aangezien 1-2% van het wereldwijde energieverbruik voor dit proces wordt gebruikt, waarvan de meederheid nodig is voor stoomreforming voor waterstof productie¹. Per kg gefixeerde N is er 10-13 kWh nodig².

Tegelijkertijd heeft Nederland een stikstofoverschot: met 46 kg per ha stoot Nederland ook vier keer zoveel N uit als het EU-gemiddelde³, en is het de bedoeling dat dit omlaag gaat⁴. Deze twee kanten van de huidige lineaire keten van N laten de noodzaak zien van circulaire alternatieven. Daarnaast draagt het terugwinnen van stikstof bij aan het Grondstoffenakkoord en Klimaatakkoord⁵.

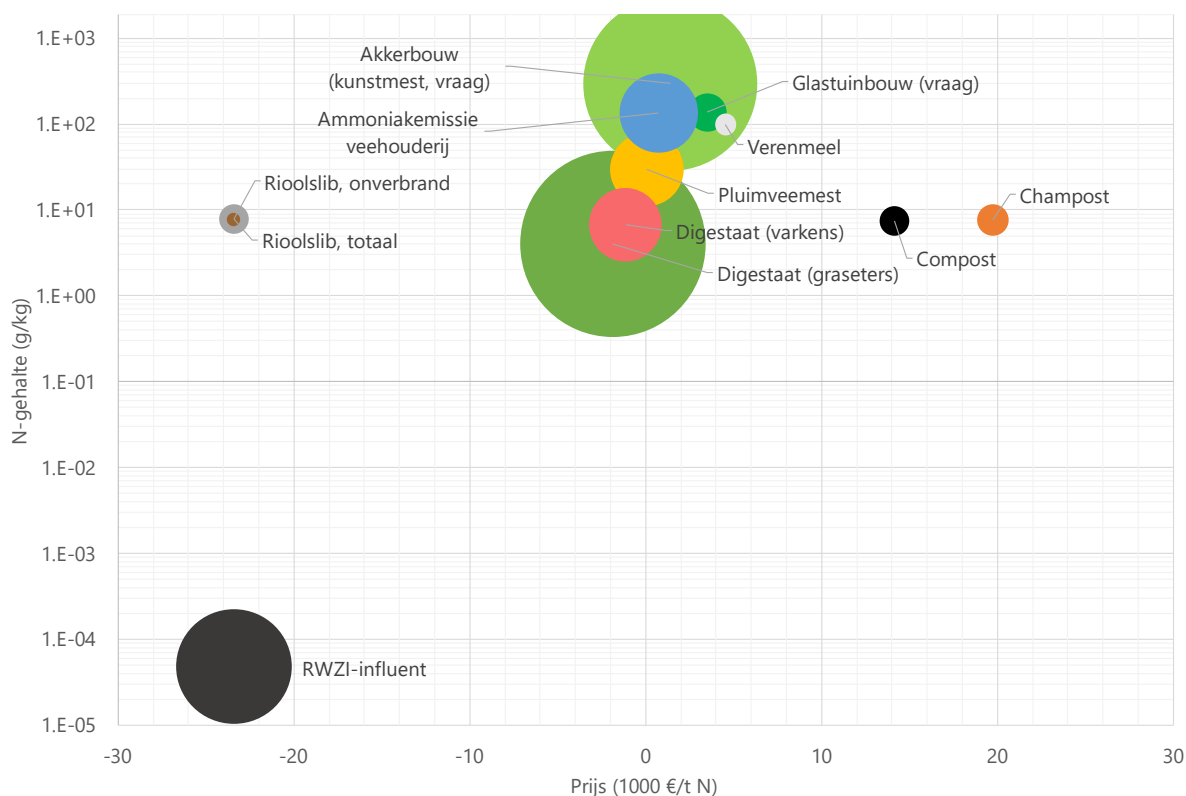
Hoe ziet dat eruit voor de Nederlandse glastuinbouw? Deze whitepaper is een inventarisatie en vergelijking van de verschillende beschikbare mogelijkheden en aspecten: reststromen, technologieën, en contaminant-eisen in producten. Bij de technologieën worden twee verschillende routes om hernieuwbare N-producten voor de glastuinbouw te produceren uitgelicht: (1) N terugwinnen uit N-rijke reststromen (bijvoorbeeld mest en afvalwater), en (2) N-fixatie uit de lucht door middel van alternatieve processen voor het gangbare Haber-Bosch-proces.



2 Reststromen



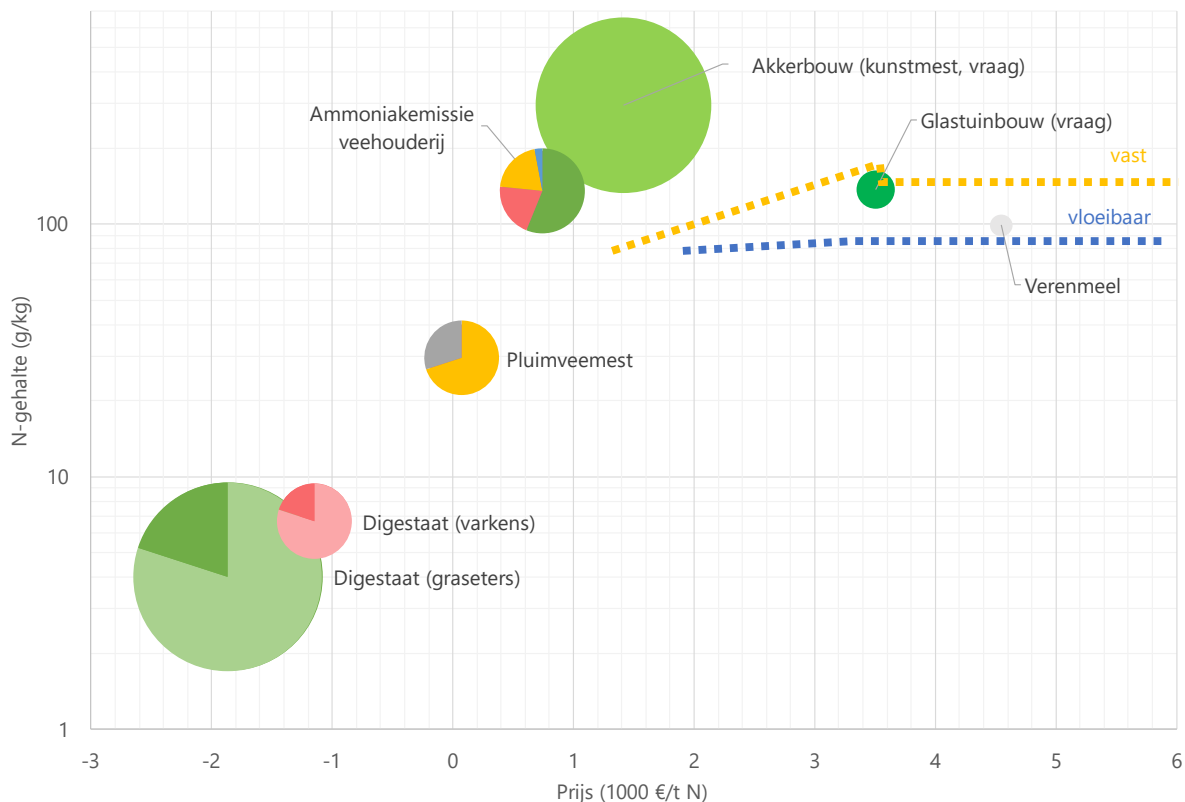
Naast dat N uit de lucht gefixeerd wordt, bestaan er verschillende reststromen in Nederland waaruit N teruggewonnen kan worden. Dit gaat gepaard met technologische uitdagingen door variërende N-concentraties, mogelijke contaminanten, en de vorm waarop dit N aanwezig is. Ook kan de logistiek uitdagend zijn doordat het N uit meerdere verspreide puntbronnen komt. Toch kan het voordelen hebben: er wordt geen 'nieuw' N gefixeerd en bestaande N-emissies kunnen worden omgezet naar een product. Afhankelijk van de technologie kan het ook minder energie gebruiken dan N uit de lucht fixeren, maar meer hierover in Hoofdstuk 3.



Figuur 1 Overzicht N-reststromen in Nederland, met prijs (1000 € per ton N) op de horizontale as en N-gehalte (g/kg) aan de verticale as (logaritmisch). De grootte van de bollen geeft weer hoeveel stikstof het jaarlijks voorstelt. De kunstmest-vraag van akkerbouw en glastuinbouw worden ook weergegeven.

Zwart water is de grootste N-reststroom, maar ook die met de laagste concentratie (<0.1 mg N/kg zwart water). Op dit moment wordt in RWZI's vooral gebruik gemaakt van biologische omzetting van ammonium tot stikstof (N_2), wat dan vrijkomt in de lucht. Rond de 85% van alle stikstof wordt op deze manier verwijderd en 15–25% eindigt in het rioolslib⁵. Ondanks de lage concentratie N in zwartwater is de absolute hoeveelheid N hierin hoog. Daarom wordt er ook onderzoek gedaan naar N-terugwinning hieruit. Bijvoorbeeld in het KNAP (Kringloopsluiting Nutriënten uit Afvalwater en Proceswater)-project⁶ worden producten van RWZI's zoals ammoniawater onderzocht.

Op dit moment wordt het rioolslib vaak vergast, waarna er een vloeibare fractie (centraat) en een vaste fractie ontstaat. De concentratie N in het centraat is relatief hoog (0,5–2,5 g N per liter), waardoor het meer geschikt is voor terugwinprocessen⁵. Om andere reststromen duidelijker in beeld te brengen, laten we zwart water ('RWZI influent'), rioolslib, compost en champost even weg (zie Figuur 2).



Figuur 2 Overzicht N-reststromen in Nederland, met prijs (1000 € per ton N) op de horizontale as en N-gehalte (g/kg) aan de verticale as (logaritmisch). Rioolstromen en compost zijn weggehaald, om verder in te zoomen op de inhoud van Figuur 1. De grootte van de bollen geeft weer hoeveel stikstof het jaarlijks voorstelt. De kunstmest-vraag van akkerbouw en glastuinbouw worden ook weergegeven, met het bereik aan prijzen en concentraties voor vast- en vloeibare glastuinbouwmeststoffen weergegeven met stippenlijnen. Ammoniakemissie is opgesplitst naar graseters, varkens, pluimvee en overige. Bij de digestaten is de hoeveelheid toegepast binnen de Nederlandse landbouw lichter uitgedrukt; de rest is export. Het grijze gedeelte van pluimveemest wordt op moment verbrand.

Al lijkt de vraag van de glastuinbouw klein, is het toch één twintigste van wat de akkerbouw aan N-kunstmest gebruikt, op minder dan één procent van het landareaal. Hoewel er veel variatie tussen verschillende meststofproducten is, is de gemiddelde N-meststof voor de glastuinbouw duurder dan voor de akkerbouw. Dit biedt meer ruimte om nieuwe en hernieuwbare technieken haalbaar te maken.

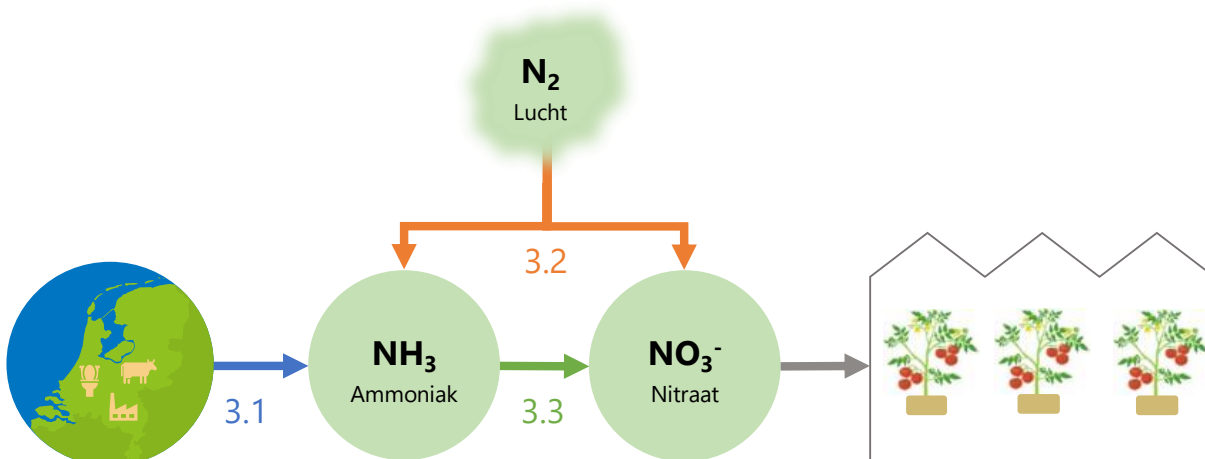
Voor reststromen met een hogere concentratie zien we ook een hogere prijs per ton N. Alle soorten mest zijn in omvang groot genoeg om de glastuinbouwsector te dekken, maar ze hebben vaak al toepassingen in de landbouw. Ook als alle ammoniak uit stallucht opgevangen zou worden, zou dat ruim genoeg zijn voor de glastuinbouw. Wel lijkt het dat, met de akkerbouw erbij, Nederland net niet alle N-kunstmest uit reststromen kan halen. Dit is omdat dierlijk mest al toegepast wordt binnen de landbouw, in ongeveer dezelfde hoeveelheid als aan het kunstmest binnen de akkerbouw gebruikt wordt⁷.

In de toekomst zullen er in deze cijfers veranderingen optreden afhankelijk van verschillende scenario's, zoals bijvoorbeeld door Lesschen et al. omschreven⁸. Een voorbeeld is de toekomst van de veehouderijsector in Nederland. Een mogelijkheid is dat export van dierlijke producten naar buiten Europa afneemt en daardoor ook de productie in Nederland. Zo'n 27% wordt op moment naar buiten Europa (inclusief VK) geëxporteerd⁹. Dit is goed om in gedachte te houden wat betreft de toekomstige beschikbaarheid van mest en dierlijk ammoniak. Aan de andere kant wordt EU-wetgeving zoals derogatie, wat Nederland toelaat meer dierlijk mest uit te rijden, afgebouwd, wat de Nederlandse mestoverschot zou laten toenemen¹⁰.



3 Technologieën

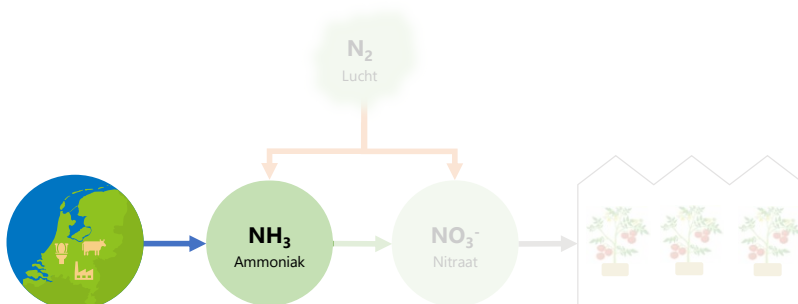
Er zijn verschillende manieren om stikstof uit reststromen te halen – of, zoals nu gangbaar is, te fixeren uit de lucht. In dit hoofdstuk geven we een overzicht van de technologieën voor beide opties om N-producten voor de glastuinbouw te leveren. Ook bestaan er hybride-processen die N uit de lucht fixeren om direct salpeterzuur (HNO_3) te produceren, wat gebruikt kan worden om ammoniak uit stallucht te halen met een luchtwasser ('scrubber')¹¹.



Figuur 3 De visualisatie van de relatie tussen de verschillende processen in dit hoofdstuk. Stikstof (vaak in de vorm van NH_3) kan uit reststromen gehaald worden (paragraaf 3.1), of direct uit de lucht (in de vorm van NH_3 of NO_3^- , (paragraaf 3.2)). Er bestaan ook processen om NH_3 om te zetten naar NO_3^- (paragraaf 3.3).

3.1 N-terugwinning uit reststromen

In de glastuinbouw wordt idealiter gewerkt met zuivere meststoffen. Reststromen hebben vaak een complexe samenstelling of een lage N-concentratie, waardoor het lastig is om met één technologie de gewenste N meststof te produceren. Bij sommige technologieën, zoals omgekeerde osmose en elektrolyse, kan een N-rijk concentraat, dat een mengsel aan



diverse componenten bevat, geproduceerd worden uit een reststroom. Zulke technologieën voldoen op zichzelf niet voor N-terugwinning in de glastuinbouw. Deze technologieën kunnen wel gebruikt worden als voorbehandelingsstap om reststromen op te concentreren om de N-concentratie te verhogen. Daarna kan een andere technologie, zoals bijvoorbeeld strippen, gebruikt worden om meststoffen te produceren met hoge zuiverheid. Strippen is namelijk pas praktisch haalbaar en kosten-efficiënt is bij concentraties boven de 2-3 g/l $\text{NH}_4\text{-N}$ ¹². Elke technologie heeft dus zijn toepassingsgebied qua N-gehalte. Een samenvatting van de technologieën, TRL, input en output, energiebehoefte en terugwinrendement is weergegeven in tabellen 2 en 3, met onderliggende data in de bijlage.

Strippen en scrubben (TRL 9)

Strippen en scrubben zijn de technologieën die het verst ontwikkeld zijn (TRL 9) en waarvan commerciële installaties al beschikbaar zijn. Er zijn een aantal bedrijven, ook in Nederland, die dit al in praktijk brengen. Met deze processen kan ammonium uit diverse N-rijke vloeibare stromen (zoals de vloeibare fractie van mest en centraat) worden omgezet in ammoniumzouten, zoals ammoniumsulfaat of ammoniumnitraat. De N-rijke stroom wordt eerst gestript. Tijdens dit proces wordt opgelost ammonium (NH_4^+) verwijderd uit de stroom door de pH en de temperatuur te verhogen. Hierdoor wordt ammonium omgezet in ammoniak (NH_3). Ammoniak is vluchtig, waardoor het verwijderd (gestript) kan worden uit de vloeistof door een gas die door de vloeistof geleid wordt. Vervolgens wordt het ammoniak uit deze N-rijke luchtstroom verwijderd ('gescrubd') door een zure vloeistof, zoals met een luchtwasser gebeurt. Hierdoor wordt het ammoniak (in gasvorm) weer omgezet naar ammonium (opgelost). De lucht kan weer gerecirculeerd worden naar de stripper⁵. De energiebehoefte voor dit proces ligt rond de 9 kWh/kg $\text{N}_{\text{verwijderd}}$ met een terugwinrendement van 50-90%^{2,5}.

Een alternatief voor dit proces waarbij chemicaliën worden teruggewonnen wordt ontwikkeld door Nijhuis Industries. Hierdoor worden er geen ammoniumzouten geproduceerd als eindproduct, maar worden deze zouten weer omgezet in ammonia. Hiermee wordt geschat dat 90% van de chemicaliën kan worden teruggewonnen, maar dat hiervoor wel extra energie, 7 kWh/kg $\text{N}_{\text{verwijderd}}$, voor nodig is. Een ander alternatief is dat N-rijke lucht, bijvoorbeeld emissiegassen uit compost of stallen, meteen gescrubd wordt. Omdat de grondstof in dit geval al een N-rijke lucht is, is er in dit geval geen stripper nodig⁵.

Bij scrubben wordt vaak zwavelzuur gebruikt om ammoniak aan te zuren en ammonium te vormen. Zwavelzuur is goedkoop, maar een nadeel is dat ammonium sulfaat maar beperkt gebruikt kan worden als meststof voor de glastuinbouw. Dit is om twee redenen. Ten eerste is ammonium maar beperkt in het grondloze gietwaterrecept nodig vergeleken met nitraat (zie Tabel 1). Ten tweede, al zou het ammonium omgezet worden in nitraat (Sectie 0), dan zou er teveel zwavel in het product zitten voor het recept. Daarom heeft salpeterzuur (HNO_3) de voorkeur. Hierdoor wordt ammonium nitraat geproduceerd, wat omgezet kan worden in een bioreactor tot nitraat. Dit maakt het proces echter wel duurder.

Membraanstrippen (TRL 7-8)

Membraanstrippen werkt volgens dezelfde principes als strippen en scrubben. Eerst wordt de pH en de temperatuur van een N-rijke vloeibare stroom verhoogd om ammonium om te zetten in ammoniak. De warme alkalische vloeistof stroomt daarna langs een membraan dat alleen gas doorlaat. Hierdoor kan ammoniak door dit membraan diffunderen, waardoor het uit de vloeistof verwijderd wordt. Aan de andere zijde van het membraan moet het ammoniak continu verwijderd worden zodat de ammoniakconcentratie laag blijft. Dit maakt continue verwijdering mogelijk. Dit verwijderen van ammoniak kan door middel van vacuüm, of door het toevoegen van een zuur zodat ammoniak weer omgezet wordt in ammoniumzouten (bijvoorbeeld ammoniumsulfaat). Voor dit proces is er ~ 11 kWh/kg $\text{N}_{\text{verwijderd}}$ nodig. Het terugwinrendement is circa 83%⁵.

Elektrodialyse (TRL 5-7)

Electrodialyse (ED) is een technologie waarbij ionen gescheiden worden op basis van lading, en dus zouten (ionen) verwijderd kunnen worden uit een waterige oplossing. Het maakt gebruik van een positieve electrode (die negatief geladen deeltjes aantrekt), een negatieve electrode (die positief geladen deeltjes aantrekt) en elektriciteit. Deze technologie zou goed gebruikt kunnen worden als voorbehandelingsstap, voor bijvoorbeeld membraanstrippen, om N in reststromen op te concentreren. Tijdens dit proces wordt N teruggewonnen als ammonium. Als ammoniak het gewenste (tussen)product is, moet ammonium eerst gestript worden uit de oplossing door middel van pH- en temperatuurverhoging, en daarna moet het weer gescrubd worden. De energieconsumptie van ED hangt erg af van de geleidbaarheid van de vloeistof. Hoe lager de geleidbaarheid, hoe hoger de energieconsumptie is¹³. De energieconsumptie zal 4,5-8,5 kWh/kg $\text{N}_{\text{verwijderd}}$ zijn, met een terugwinrendement van 58-78%¹³.

Elektrodialyse met bipolair membraan (EDBM) (TRL 5-7)

EDBM is een speciale variant van ED. Hierbij wordt gebruikt wordt gemaakt van een bipolairmembraan dat aan één kant positief geladen is, en aan de andere kant negatief. Dit zorgt ervoor dat water bij dit membraan gesplitst wordt in OH^- en H^+ ionen. Er worden dus ter plekke zuren en basen geproduceerd. Ammoniumionen worden getransporteerd door kation-doorlatende membranen. Als ze door deze membranen getransporteerd zijn, komen ze samen met OH^- ionen die gevormd zijn in het concentraat-kanaal van het systeem. Hierdoor wordt er ammoniak gevormd. Een voordeel van deze technologie ten opzichte van elektrodialyse is dat er ter plekke ammoniak geproduceerd wordt, waardoor de productstroom meteen gestript kan worden zonder dat er externe pH of temperatuur veranderingen nodig zijn. Dit zorgt ervoor dat dit proces een lage CO_2 impact heeft⁵. Voor dit proces is rond de 3-5 kWh/kg $\text{N}_{\text{verwijderd}}$ nodig, en het heeft een terugwinrendement van 60-90%^{5,13}. Net als ED wordt EDBM ook gezien als voorbehandelingsstap voor bijvoorbeeld membraanstrippen. Een voordeel van EDBM ten opzichte van ED is dat er ammoniak geproduceerd wordt, en dus geen ammonia, wat direct gebruikt kan worden voor de membraanstrippen.

Ionenwisselaar (TRL 5-7)

Een ionenwisselaar bestaat uit een adsorptie kolom gevuld met geladen deeltjes ('resins'). Er bestaan positieve en negatieve geladen resins. Positieve resins kunnen negatieve componenten binden en negatieve resins positieve componenten. Ionenwisselaars zijn geschikt om specifiek componenten met een lage concentratie uit vloeistoffen te verwijderen. De positief geladen NH_4^+ kan worden geabsorbeerd door negatief geladen resins, waardoor NH_4^+ uit de vloeistof verwijderd kan worden. NH_4^+ kan teruggewonnen worden uit de ionenwisselaar door deze te regenereren met een zuur (H^+ ionen). Het product zal een zure NH_4^+ oplossing zijn (bijvoorbeeld $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). Het energiegebruik is circa 0,3-0,4 kWh/kg $\text{N}_{\text{verwijderd}}$. Het terugwinrendement is 90-98%. Deze technologie is door het bedrijf Agua DB verder ontwikkeld om nitraat uit afvalwater terug te winnen en om hier een N-meststof van te maken¹⁴.

Omgekeerde osmose (TRL 7-9)

Omgekeerde osmose ('reverse osmosis', of RO) is een membraan technologie waarbij gebruik wordt gemaakt van druk en een semi-permeabel membraan. Opgeloste deeltjes worden tegengehouden door het membraan, terwijl water door het membraan gedrukt wordt. RO wordt vaak gebruikt om water uit stromen terug te winnen en de stromen dus in te dikken. RO kan dus ook toegepast worden op digestaat¹⁵. Hierdoor ontstaat er een concentraat dat rijk is aan N en kalium, zodat het gebruikt kan worden als vloeibare meststof in de akkerbouw. Dit concentraat zal niet 'puur' in N zijn. Toepassing van RO op digestaat wordt dan ook meer gezien worden als voorbehandelingsstap om nutriënten op te concentreren, waarna het behandeld zou kunnen worden met een stripper (Mubita et al., 2023). Er is verder onderzoek nodig om te kijken hoe nutriënten uit deze stroom teruggewonnen kunnen worden¹³. Het energieverbruik van RO is afhankelijk van de feed die behandeld wordt. Voor dierlijke mest, is dit rond de 4,3-5,5 kWh/ m^3_{feed} met een N-retentie van 90-98%¹⁶. Voor digestaat is de energieconsumptie voor RO 2,4 kWh/ton digestaat¹⁷.

Tabel 2 Een samenvatting van alle processen, met gegevens voor stripping/scrubbing, membraanstrippen, EDBM en ionenwisseling uit Elbersen et al.⁵, voor electro dialyse uit Mubita et al.¹³ en voor omgekeerde osmose uit Adam et al.¹⁷ en Al-Juboori et al.¹⁶.

Proces	TRL	Input	Producten	Energiebehoefte (kWh/kg N _{verwijderd})	Rendement (%)
Stripping/scrubbing	7-9	Digestaat, centraat, vloeibare mest, urine, lucht van compost	Ammonium zouten oplossing	1-9,3*	50-90
Omgekeerde Osmose	7-9	N-rijke stromen	N-Concentraat	0,25-0,55	90-98
Electrodialyse	7-9	Digestaat, urine, centraat	N-Concentraat	4,5-8,5	58-78
Membraanstrippen	7-8	Vloeibare mestdigestaat of centraat	Ammonium zouten oplossing	11	83
Electrodialyse met Bipolaire Membranen	5-7	Centraat (hoge NH ₄ ⁺ gehalte)	NH ₃ (evt. na membraanstrippen ammonium zouten)	2,8-5,3	60-90
Ionenwisseling	5-7	Rioolwater of concentraat	ammonium zouten oplossing	0,3-0,4	90-98

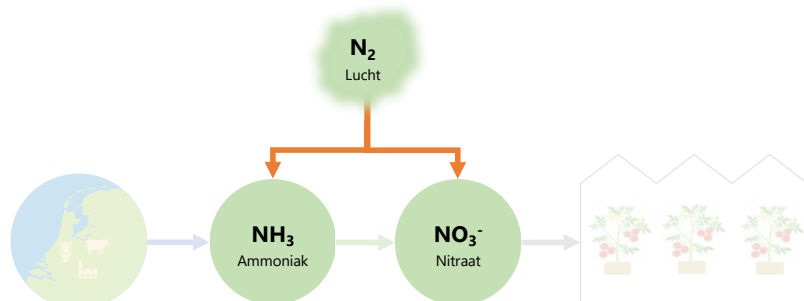
*In praktijk ligt het meer rond de 9 kWh/kg². Omgekeerde osmose gebruikt tussen de 2,5 en 5,5 kWh per m³ feed; de cijfer in dit tabel gaat van dierlijk mest uit (10 kg N/m³).

Struvietprecipitatie (TRL 7-9)

Een alternatief proces is om N neer te slaan in de vorm van struviet (Mg(NH₄)PO₄·6H₂O). Dit is een materiaal dat gebruikt kan worden als 'slow-release' meststof in de akkerbouw. Ondanks dat het niet oplosbaar is in water, is er gekeken naar of struviet toch gebruikt kan worden in de glastuinbouw^{18,19}. Uit studies blijkt dat struviet opgelost kan worden in een aparte, aangezuurde meststoftank, zodat het toch toegepast kan worden in de glastuinbouw. Maar dit zou wel een systeemverandering bij een tuinder vereisen, aangezien de tuinder een extra meststoftank nodig zal hebben.

3.2 N-fixatie

Zoals beschreven in Hoofdstuk 2, is er een beperkte hoeveelheid stikstof aanwezig in de reststromen voor de glastuinbouw en akkerbouw samen. Daarom zal het altijd nodig zijn om, naast N-terugwinprocessen uit reststromen, stikstof uit de lucht te fixeren als alternatief voor het



Haber-Bosch proces. Met het evalueren van de processen moet er rekening gehouden worden met schaal. Sommige processen werken beter op grotere schaal, terwijl anderen juist kleinschalig en decentraal ingezet kunnen worden. Deze sectie gaat over alternatieve en duurzame N-fixatieprocessen. Deze technologieën, hun TRL en hun energiebehoefte zijn samengevat in Tabel 3.

Groene ammoniak (TRL 5-8)

In het traditionele Haber-Bosch proces wordt gebruik gemaakt van stoomreforming voor de productie van waterstof. In dit proces wordt aardgas in combinatie met stoom bij hoge temperaturen (850-900 °C) en druk (25-35 bar) omgezet in koolstofmonoxide en waterstof ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$)²⁰. 75% van het energieverbruik voor het Haber-Bosch proces wordt gebruikt voor stoomreforming¹. Dit proces vindt plaats op grote schaal, wat toelaat dat warmte efficiënt teruggewonnen kan worden en het gevormde CO₂ opgevangen en gebruikt kan worden. Allebei kunnen zo makkelijker in andere productieprocessen ingezet worden.

Voor de productie van 'groene' ammoniak wordt in principe ook gebruik gemaakt van het Haber-Bosch proces. Het benodigde waterstof gas komt dan niet uit stoomreforming, maar van water elektrolyse. Hierbij wordt water omgezet in waterstof en zuurstof door middel van elektrodes en elektriciteit. Van de N-fixatie processen, is deze electrolyser route het meest ontwikkeld (TRL 5-8).

Er zijn pilot plants die op deze manier 20-30 kg N per dag kunnen produceren²⁰, en de eerste grootschalige fabrieken worden geopend²¹. Voor het Haber-Bosch proces zelf zijn ook nog hoge temperaturen (400–500 °C) en druk (boven 100 bar) nodig²⁰, waardoor er nog zo'n 10–12 kWh per kg 'groene' NH₃ nodig is²⁰.

Deze route wordt al op pilot schaal getest in Oxford (door Siemens) en in Fukushima (door Rukushima Renewable Energy Institute). Daarnaast is Yara bezig met het bouwen van een hybride demonstratie-plant in Australië²⁰ en het ombouwen van hun grote fabriek in Sluiskil hiervoor²².

Plasma N-fixatie (TRL 4-7)

Een andere manier om N uit de lucht te fixeren is via een plasma-proces. Plasma is geïoniseerd gas. Dat kan worden geproduceerd met elektriciteit. Doormiddel van plasma kan stikstof (N₂) uit de lucht geoxideerd worden tot NO_x²³. Wanneer dit gas in contact komt met water, wordt er salpeterzuur (HNO₃) gevormd. Voor dit proces is rond de 48 kWh/kg N nodig^{23,24}. Voor dit proces wordt een theoretisch minimum van rond de 4 kWh/kg N gerapporteerd^{2,24}.

Er zijn diverse bedrijven die dit uitvoeren, zoals Nitricity en VitalFluid. Nitricity produceert nog op kleine schaal 0,5 ton calciumnitraat per jaar, maar verwacht uit te breiden. Op dit moment is het energiegebruik nog 77 kWh/kg N voor het proces van Nitricity, maar ook dit wordt verwacht verbeterd te worden. Een voordeel van dit proces is dat het op kleine schaal, en dus lokaal bij een boer/tuinder, geproduceerd kan worden²⁵. Zoals eerder vermeld zou het gevormde nitraat dan ook gebruikt kunnen worden om ammoniak te scrubben uit bijvoorbeeld stallen.

Een andere toepassingsrichting van dit proces is ontwikkeld door het bedrijf N2 Applied. Zij maken ook gebruik van plasmatechniek om een mix van NO/NO₂ te produceren van stikstof uit de lucht. Zij voegen deze mix toe aan de vloeibare fractie van organische reststromen (bijvoorbeeld mest of digestaat), waardoor organisch N omgezet wordt in voor de plant opneembare NO₃⁻²⁶. Hierdoor is er ook minder N-verlies in de vorm van ammoniak bij de boer.

Elektrochemisch (TRL 1-3)

De benodigde energie om N te fixeren kan ook geleverd worden in elektrochemische systemen via elektrodes en elektriciteit. Er zijn verschillende elektrochemische systemen om N te fixeren. De eerste methode (TRL 1-3) is dat stikstof en water in één elektrolyse systeem omgezet worden in ammoniak en zuurstof. Deze methode is in theorie het meest efficiënt (~tot 70% efficiëntie), en zal volgens het model van Wang et al.²⁰ het meest kosteneffectief zijn. De tweede methode is dat eerst water gesplitst wordt in waterstof en zuurstof in een aparte elektrolyser. Vervolgens wordt in een andere elektrolyser stikstof door middel van het geproduceerde waterstof gereduceerd naar NH₃ (TRL 1-3). Een nadeel van dit systeem is dat er twee elektrolyzers nodig zijn, waardoor aanschafkosten hoger zullen liggen, en dat de efficiëntie lager zal zijn (~50%)²⁰. De derde variant is dat lithium gebruikt kan worden als katalysator in de elektrolyse proces (TRL 1-3)²⁰.

Voor deze elektrochemische processen zal er ~13-17 kWh/kg NH₃ nodig zijn²⁰. Een andere paper vermeldt een energiegebruik van ongeveer 10-20 kWh/kg NH₃²⁷.

Tabel 3 Een overzicht van processen om stikstof uit de lucht te fixeren, met energiebehoeftes.

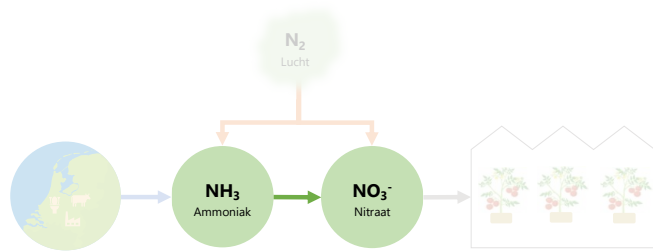
Proces	TRL	Input	Producten	Energiebehoefte (kWh/kg N)	Proces
Groene ammoniak	5–8	Water, lucht	Ammoniak	12–15	Groene ammoniak
Plasma N-fixatie*	4–7	Water, lucht	Salpeterzuur (nitraat)	48–77	Plasma N-fixatie
Elektrochemisch	1–3	Water, lucht	Ammoniak	12–28	Elektrochemisch

*Let wel op: plasma N-fixatie produceert meteen nitraat, terwijl de andere twee processen ammoniak maken.

Bij de processen die ammoniak produceren via N-fixatie, zoals groene ammoniak productie en elektrochemische N-fixatie, zal ammoniak nog omgezet moeten worden naar nitraat. Dit kan ook weer energie kosten.

3.3 Ammoniak naar nitraat

Het merendeel van de processen die hierboven beschreven zijn, produceren ammoniumzouten. In de glastuinbouw wordt vooral nitraat (NO_3^-) gebruikt als meststof. In deze sectie worden verschillende methodes besproken om nitraat te produceren uit ammoniak/ammoniumzouten.



Ostwald-proces

Het Ostwald-proces zet ammonia om in salpeterzuur (HNO_3), wat gebruikt wordt in de glastuinbouw als meststof. Dit proces moet uitgevoerd worden op hoge temperaturen ($\sim 700 - 950\text{ }^\circ\text{C}$) en hoge druk (4-10 atm), maar is een exotherm proces. Hierdoor kan de energie die vrijkomt ook weer gebruikt worden. Omdat dit proces vaak gekoppeld is aan het Haber-Bosch proces, wat NH_3 produceert, kan de energie die vrijkomt gebruikt worden voor het Haber-Bosch proces waardoor de gecombineerde processen energie efficiënter worden.

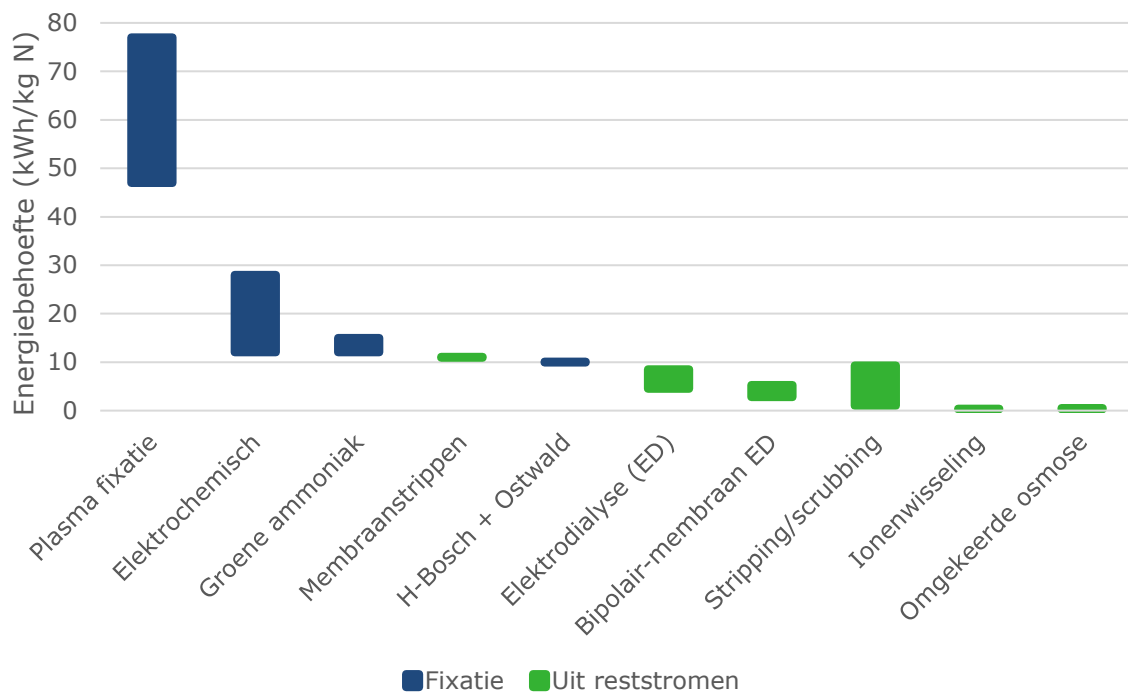
Desondanks wordt er relatief veel N_2O gevormd (tussen de 0,5% en 2,5%), een broeikasgas wat zo'n 300 keer meer impact heeft dan CO_2 ²⁸, al worden al jaren katalysatoren gebruikt om de N_2O -productie te verminderen²⁹ (met meer dan 90% verwijdering mogelijk³⁰). Verder is de bron van deze hoge temperaturen van belang: om alle industriële processen te elektrificeren, is er een dubbele hoeveelheid aan elektriciteit nodig wat we op dit moment gebruiken. Dit maakt het lastig om huidige thermische processen in de industrie te vervangen door elektriciteit¹.

Nitrificerende bacteriën

In de natuur zetten nitrificerende bacteriën ammonium om naar nitraat. Deze processen kunnen ook uitgevoerd worden in bioreactoren om nitraat te produceren³¹. In de praktijk wordt ook al processen uitgevoerd die gebaseerd zijn op dit mechanisme. Met het GreenSwitch[®] proces van Van Iperen kunnen in een bioreactor ammoniak/ammonium zouten worden omgezet (geoxideerd) naar nitraat door middel van nitrificerende bacteriën³². Een ander voorbeeld is het Organic Water System van Van der Knaap, wat organische N-componenten, zoals eiwitten, omzetten in NO_3^- ³³. Deze twee processen kunnen dus N-rijke (rest)stromen behandelen om nitraat te produceren.

Onderzoek

Er wordt onderzoek gedaan om ammonia elektrochemisch direct te oxideren naar nitraat. Een voordeel van dit proces is dat er geen N_2O gevormd wordt, wat wel het geval is bij het Ostwald-proces. Deze technologie is in onderzoeksfase, dus nog niet op korte termijn toepasbaar²⁸.



Figuur 4 Een overzicht van het energieverbruik van de processen eerder omschreven. De staven gaan tussen het minimum- en maximumwaarde voor elke technologie. Over het algemeen kost het minder energie om N uit reststromen te halen dan om het uit de lucht te fixeren, al bestaan er overlappingen tussen de twee principes.



4 Limieten voor contaminanten in producten

Wat zijn de risico's van contaminanten als teruggewonnen meststoffen gebruikt worden? Het gewas moet niet te veel schadelijke stoffen opnemen, voor zowel gewasgezondheid als die van de mens en milieu. De glastuinbouw maakt bovendien gebruik van recirculerende systemen. Alles wat niet door de plant opgenomen wordt, hoopt op in het fertigatiewater en kan tot risico's leiden. Daarom wordt er in de glastuinbouw momenteel pure meststoffen gebruikt. Als er teruggewonnen meststoffen gebruikt worden, moeten contaminant-gehalten daarom laag zijn, maar hoe laag precies?

In een recent WUR-rapport¹⁹ over circulair fosfaat voor de glastuinbouw is gekeken naar de eisen van de glastuinbouw voor gerecycled fosfaat door middel van een nieuwe methodologie. Deze methodologie koppelt eisen van een teelt vervolgens aan specificaties/limieten van de meststoffen zelf. Hiermee kon geconcludeerd worden of een fosfaatmeststof zal voldoen aan de eisen van de glastuinbouw of niet. In dit hoofdstuk berekenen we limieten waar stikstofproducten aan zouden moeten voldoen met behulp van deze zelfde aanpak.

De methodologie neemt aan dat 100% van een contaminant (in dit geval specifieke elementen) in óf fertigatiewater, óf vruchten, óf restbiomassa terecht komt. Deze drie hebben hun eigen limieten:

1. In fertigatiewater kunnen contaminanten ophopen tot niveaus die slecht zijn voor het gewas³⁴. Bij contaminanten zoals koper of zink, die ook micronutriënten zijn, is het ook belangrijk dat gehalten onder het gietwater-recept zitten³⁵.
2. Vruchten hebben wettelijke limieten voor contaminanten^{36,37}.
3. Restbiomassa heeft ook limieten, bepaald voor compost, waar restbiomassa normaal naartoe gaat³⁸.

Door 100% accumulatie in alle drie aan te nemen, kunnen we terugrekenen wat contaminant limieten in (teruggewonnen) meststoffen zouden mogen zijn. Dit zijn natuurlijk extreme aannames. Als concentraties van contaminanten in de meststoffen boven de limieten van deze methodologie zitten, betekent het dus niet noodzakelijk dat gebruik van deze meststoffen tot problemen zullen leiden. 100% ophoping in één van de drie locaties is zeer onwaarschijnlijk. De limieten zijn er om andersom gebruikt te worden: als concentraties van contaminanten in meststoffen onder de limieten vallen, is het vrijwel uit te sluiten dat er problemen zullen ontstaan bij gebruik van een circulaire meststof. Dit zou namelijk betekenen dat zelfs met 100% ophoping de meststof veilig te gebruiken is. Mochten concentraties er toch boven vallen, dan zou onderzoek nodig zijn om te kijken waar de contaminanten zich ophopen, en of de limieten in fertigatiewater, vruchten, of restbiomassa niet overschreden worden.

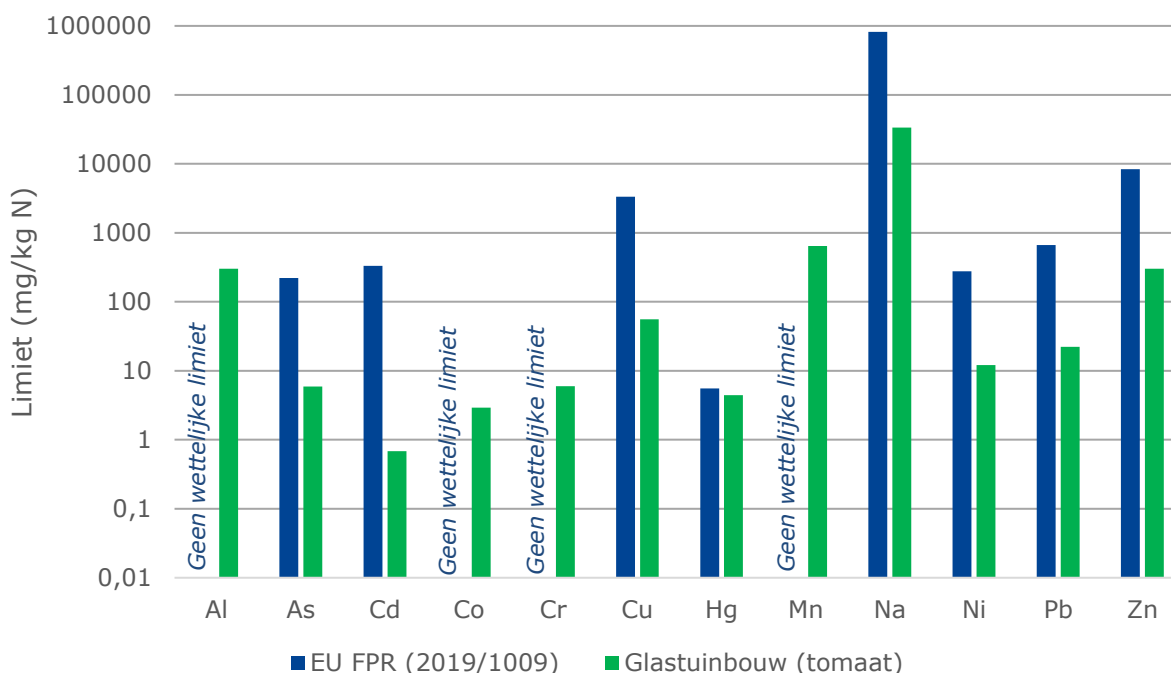
Er is momenteel EU-wetgeving voor contaminant limieten in meststoffen voor de akkerbouw, de 'Fertilising Products Regulation' (FPR, 2019/1009). Deze wetgeving geeft limieten voor bepaalde elementen, uitgedrukt in mg per kg drogestof (DM). De meest geconcentreerde stikstofmeststoffen hebben een stikstof-concentratie van 18%^{39,40}.

Tabel 4 laat zien wat deze berekende limieten voor fertigatiewater, vruchten, en biomassa zijn voor tomaat met de aanpak van het fosfaat-rapport¹⁹. Deze berekende limieten zijn weergegeven in kolom 2, 3 en 4,. Deze limieten worden vergeleken met de FPR-limieten (in kolom 5 en 6). De laatste kolom in Tabel 4 laat zien hoe gevoelig recirculerende glastuinbouwsystemen zijn vergeleken met bestaande wetgeving, waar percentageel weergegeven wordt hoeveel minder de berekende limieten mogen zijn ten opzichte van de huidige FPR. Een meststof die precies aan de limieten van EU FPR voldoet, is lang niet puur genoeg voor de glastuinbouw volgens de berekende limieten. Ter voorbeeld, de gevoeligste limiet voor cadmium is voor de glastuinbouw is maar 0,2% van die van de EU FPR.

Tabel 4 De berekende limieten voor bepaalde contaminanten voor tomaat (kolom 2, 3, en 4), in mg per kg N, en hoe ze vergelijken met de EU Fertilising Products Regulation (FPR, 2019/1009), in mg/kg drogestof (DM) zoals in de wetgeving en uitgerekend naar mg/kg N met de aanname van 18% N. De strengste limieten zijn ingevuld in donkergroen.

	Berekende limieten			Bestaande limieten		Vergelijking Strengste limiet relatief FPR %
	Fertigatie	Vruchten	Restbiomassa	EU FPR		
	mg/kg N			mg/kg N (18% N)	mg/kg DM	
Al	303	-	-	-	-	-
As	5,9	-	140 000	222	40	2,7
Cd	0,7	8,9	932 000	333	60	0,2
Co	2,9	-	-	-	-	-
Cr	6,0	-	466 000	-	-	-
Cu	55,6	2227,3	839 000	3 330	600	1,7
Hg	-	4,5	280 000	4,6	1	80
Mn	642	-	-	-	-	-
Na	33 500	-	-	622 000	148 000	4,1
Ni	12,2	-	186 000	278	50	4,4
Pb	302	22,3	932 000	667	120	3,3
Zn	303	-	2700 000	8 330	1 500	3,6

Figuur 5 laat de berekende limieten (groene grafiek) en FPR limieten (blauw) zien per contaminant dat in meststof zou mogen zitten, uitgedrukt per kg N dat toegevoegd wordt. Hieruit valt weer te zien dat, om risico's uit te sluiten, meststoffen voor de glastuinbouw vaak ordes van grootte minder contaminanten moeten bevatten vergeleken met de limieten uit de EU FPR.



Figuur 5 De limieten van de EU FPR (2019/1009) vergeleken met limieten berekend voor de glastuinbouw, in mg contaminant per kg N (logaritmisch weergegeven). Voor de EU FPR cijfers nemen we een product aan dat 18% N bevat.

Afronding

In deze whitepaper zijn mogelijke routes voor circulaire stikstof voor de glastuinbouw in kaart gebracht. Stikstof kan uit reststromen gehaald worden met verschillende technologieën, maar het kan ook direct uit de lucht gefixeerd worden, als alternatief voor het huidige Haber-Bosch proces.

Stikstof uit reststromen halen heeft vaak minder energie nodig dan het Haber-Bosch proces en andere N-fixatietechnieken, maar de hoeveelheid stikstof die nodig is in de glastuinbouw en akkerbouw samen is groter dan de hoeveelheid (terugwinbaar) N die we in reststromen in Nederland op dit moment bij elkaar hebben. Om stikstof zonder aardgas uit de lucht te fixeren, bestaan er verschillende technologieën. In het algemeen gebruiken de grootschalige technologieën minder energie per kg stikstof, maar kleinschalige technologieën kunnen makkelijker decentraal ingezet worden. Vaak moet NH_3 omgezet worden in NO_3^- , waar ook verschillende methodes voor bestaan.

Voor circulaire meststoffen uit reststromen kunnen contaminanten een zorg zijn, zeker in de glastuinbouw waar pure meststoffen van belang zijn. In deze whitepaper zijn limieten berekend en voorgesteld voor stikstof meststoffen die kunnen helpen met het uitsluiten van risico's. Deze limieten zijn vaak ordes van grootte strenger dan de huidige EU-wetgeving.

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 fosfaat¹⁹. Er komen ook soortgelijke whitepapers door de Club van 100 ontwikkeld over magnesium (Mg) en zink (Zn).

Auteurs

Alexander van Tuyl¹, Marc Lanting²

Peer review

Norbert Kuipers²

Samenwerking

1 Wageningen University & Research, Business unit Glastuinbouw & Bloembollen

2 Wageningen Food & Biobased Research

Referenties

1. Lim, J., Fernández, C. A., Lee, S. W. & Hatzell, M. C. Ammonia and nitric acid demands for fertilizer use in 2050. *ACS Energy Letters* **6**, 3676–3685 (2021).
2. Chen, T.-L. *et al.* Advanced ammonia nitrogen removal and recovery technology using electrokinetic and stripping process towards a sustainable nitrogen cycle: A review. *Journal of Cleaner Production* **309**, 127369 (2021).
3. EMEP Centre on Emission Inventories and Projections. Reported emission data. (2022).
4. Milieu Centraal. Stikstof - alles wat je moet weten. <https://www.milieucentraal.nl/klimaat-en-aarde/milieuproblemen/stikstof-in-de-lucht-en-bodem/>.
5. Elbersen, R. *Stikstofterugwinning Uit Rioolwater; van Marktambitie Naar Praktijk*. (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), 2021).
6. Van Dijk, K. PPS Kringloopsluiting van Nutriënten uit Afvalwater en Proceswater (KNAP). *WUR* <https://www.wur.nl/nl/project/pps-kringloopsluiting-van-nutriënten-uit-afvalwater-en-proceswater-knap.htm> (2023).
7. Roskam, J. Verschillen in stikstofgebruik tussen regio's nemen toe. (2023).
8. Lesschen, J. P. *et al.* *Scenariostudie perspectief voor ontwikkelrichtingen Nederlandse landbouw in 2050*. <https://research.wur.nl/en/publications/a14d6e69-4627-4e44-9e78-fa76d1ccc80c> (2020)
doi:10.18174/512111.
9. Jukema, G., Ramaekers, P. & Berkhout, P. *De Nederlandse Agrarische Sector in Internationaal Verband*. <https://research.wur.nl/en/publications/3c4009d5-b836-4256-ae2f-ddb92d072a8e> (2023)
doi:10.18174/648919.
10. Velthof, G. Wat betekent 'einde derogatie' voor de Nederlandse landbouw en natuur? *WUR* <https://www.wur.nl/nl/show/wat-betekent-einde-derogatie-voor-de-nederlandse-landbouw-en-natuur.htm> (2022).
11. KU Leuven. Luchtwater project: concept. <https://www.biw.kuleuven.be/m2s/cok/Groups/Johan-Martens/research/ammonia-scrubber/nl/concept> (2024).
12. Cruz, H. *et al.* Mainstream ammonium recovery to advance sustainable urban wastewater management. *Environmental Science & Technology* **53**, 11066–11079 (2019).

13. Mubita, T. *et al.* *Ammonium Recovery from Residual Aqueous Streams*. <https://edepot.wur.nl/588320> (2023).
14. Agua DB. What we do. <https://www.aguadb.com/blank-3> (2022).
15. Brienza, C. *et al.* *Factsheets of Five Large-Scale Anaerobic Digesters Applying Nutrient Recovery and Reuse: A Product from the H2020 Project SYSTEMIC*. (2021).
16. Al-Juboori, R. A., Al-Shaeli, M., Aani, S. A., Johnson, D. & Hilal, N. Membrane technologies for nitrogen recovery from waste streams: scientometrics and technical analysis. *Membranes* **13**, 15 (2022).
17. Adam, G. *et al.* Fractionation of anaerobic digestates by dynamic nanofiltration and reverse osmosis: An industrial pilot case evaluation for nutrient recovery. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **6**, 6723–6732 (2018).
18. Carreras-Sempere, M., Caceres, R., Viñas, M. & Biel, C. Use of recovered struvite and ammonium nitrate in fertigation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) production for boosting circular and sustainable horticulture. *Agriculture* **11**, 1063 (2021).
19. Van Tuyll, A. *et al.* *Sustainable Phosphorus for Soilless Greenhouse Horticulture: An Exploration of Potential Routes*. (2024).
20. Wang, M. *et al.* Can sustainable ammonia synthesis pathways compete with fossil-fuel based Haber–Bosch processes? *Energy & Environmental Science* **14**, 2535–2548 (2021).
21. Yara opens renewable hydrogen plant: “A major milestone” | Yara International. *Yara None* <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-opens-renewable-hydrogen-plant-a-major-milestone/> (2024).
22. Gunter, G. *Climate Roadmap 2030*. <https://www.yara.nl/globalassets/2220875-yara-climate-roadmap-brochure-juni-2022-lr.pdf> (2022).
23. Hollevoet, L. *et al.* Towards green ammonia synthesis through plasma-driven nitrogen oxidation and catalytic reduction. *Angewandte Chemie* **132**, 24033–24037 (2020).
24. Cherkasov, N., Ibhadon, A. O. & Fitzpatrick, P. A review of the existing and alternative methods for greener nitrogen fixation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* **90**, 24–33 (2015).
25. Tyraskis, I. & AgriFood, S. T. Decentralized production of Nitrogen-based fertilizers. (2022).
26. Skjolde, I. TECHNOLOGY. *N2 Applied* <https://n2applied.com/the-technology/>.

27. Hollevoet, L., De Ras, M., Roeffaers, M., Hofkens, J. & Martens, J. A. Energy-Efficient Ammonia Production from Air and Water Using Electrocatalysts with Limited Faradaic Efficiency. *ACS Energy Lett.* **5**, 1124–1127 (2020).
28. Johnston, S. *et al.* Copper-Catalyzed Electrosynthesis of Nitrite and Nitrate from Ammonia: Tuning the Selectivity via an Interplay Between Homogeneous and Heterogeneous Catalysis. *ChemSusChem* **14**, 4793–4801 (2021).
29. Stoltenberg, L.-C. *et al.* A data-driven approach for deducing process parameter influences on N₂O selectivity for the Ostwald process. *Chemical Engineering Journal* **496**, 153908 (2024).
30. Nitrous-oxide-abatement-catalyst. *matthey.com* <https://matthey.com/products-and-markets/pgms-and-circularity/pgm-industrial-products/nitrous-oxide-abatement-catalyst>.
31. Xie, Y., Spiller, M. & Vlaeminck, S. E. A bioreactor and nutrient balancing approach for the conversion of solid organic fertilizers to liquid nitrate-rich fertilizers: Mineralization and nitrification performance complemented with economic aspects. *Science of The Total Environment* **806**, 150415 (2022).
32. Van Iperen International. The GreenSwitch® Nitrate factory. *Van Iperen International* <https://www.vaniperen.com/greenswitch/the-greenswitch-nitrate-factory/>.
33. Van der Knaap Group. Duurzame Teeltsystemen | Van der Knaap. <https://www.vanderknaap.info/nl/duurzaam/duurzame-teeltsystemen>.
34. Ayers, R. S. & Westcot, D. W. *Water Quality for Agriculture*. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1985).
35. 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.
36. Europees Parlement. *EC 396/2005*. *OJ L* vol. 070 (2005).
37. Europese Commissie. *EC 2023/915*. (2023).
38. BVOR. Beoordelingsrichtlijn Keurcompost 8.0. *Keurcompost* <https://keurcompost.nl/beoordelingsrichtlijn/> (2023).
39. Fertigro AN vat (1000) 202 ltr/250 kg | Royal Brinkman. <https://royalbrinkman.nl/meststoffen-gewasverzorging/meststoffen/vloeibare-meststoffen/fertigro-an-vat-1000-202-ltr-3-250-kg-150120591>.
40. Reduktan 40A (ureumbox) 1050 kg | Royal Brinkman. <https://royalbrinkman.nl/meststoffen-gewasverzorging/meststoffen/vloeibare-meststoffen/reduktan-40a-ureumbox-1050-kg-150120508>.
 1. Shutterstock. (2015). Kas hydroponic. Shutterstock Image, 10426129_kas_hydroponic.jpg. Toegevoegd door: removed user, 8 juni 2015.

2. Shutterstock. (2016). Kas tomaten. Shutterstock Image, 96980021_kas_tomaten.jpg. Toegevoegd door: Petra Siebelink, 3 maart 2016.
3. Shutterstock. (2014). Modern stalinterieur met koeien en boer aan het werk. Shutterstock Image. Toegevoegd door: removed user, 23 december 2014. Inc, signed model release filed with Shutterstock.
4. Shutterstock. (2018). Waterzuivering. Shutterstock Image, 175430180_waterzuivering.jpg. Toegevoegd door: Petra Admin Siebelink, 18 juli 2018.
5. Vlekke, G.J. (2004). Installatie met diverse (mest)stoffen in onderzoekskas. Fotostudio GJ Vlekke/Fotovak, 20040414_BLEISWIJK_GV_070.jpg. Toegevoegd door: Petra Siebelink, 25 juni 2015. Plant Sciences Group (PSG).

Bijlage 1 Overzicht N-reststromen

Tabel 5 De achterliggende cijfers over van de stikstof reststromen, getoond in Figuren 1 en 2.

Stroom	Hoeveelheid	Concentratie	Prijs
	ton N / jaar	g N / kg	1000 € / ton N
Akkerbouw (kunstmest, vraag)	213 000	296,0	1,4
Ammoniakemissie veehouderij	44 000	135,0*	1,0*
Champost	6 900	7,6	19,7
Compost (GFTe)	6 300	7,4	14,0
Digestaat (graseters)	244 900	4,0	-7,5
Digestaat (varkens)	37 700	6,7	-2,0
Glastuinbouw (vraag)	10 300	80-184	-1,0
Pluimveemest	30 700	29,6	2,2
Rioolslib, onverbrand	1 300		
Rioolslib, totaal	12 700	7,8	-23,0
RWZI-influent	93 900	0,001	-23,0
Verenmeel	3 300	99,0	4,5

* Ervan uitgaand dat dit ammoniak herwonnen wordt als ammoniumni

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-1364

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.
