



Transitiepaden naar een Circulaire Glastuinbouw

Alexander Boedijn, Alexander van Tuyl, Chris Blok en Jim van Ruijven

Rapport WPR-1203

Referaat

De glastuinbouw is een innovatieve sector die hoge kwaliteit groente, fruit en planten oplevert en op veel vlakken zeer efficiënt met grondstoffen omgaat. Toch zijn de productieketens veelal lineair, niet circulair. Voor grondstoffen is de glastuinbouw namelijk, net als veel andere sectoren, afhankelijk van primaire grondstoffen uit natuurlijke reserves die over de hele wereld verspreid liggen. Denk aan aardgas voor energie, CO₂ en de productie van nitraatmeststoffen. Of aan fosfaatgesteente (P) en potas (K) dat uit mijnen wordt gewonnen om meststoffen van te maken. Basalt en veen voor substraat. Ruwe olie voor plastic. Dit rapport bevat een overzicht van de verscheidene uitdagingen en mogelijke transitiepaden om naar gesloten kringlopen te komen voor zes kenmerkende materiaalstromen in de glastuinbouw; water, meststoffen, CO₂, substraat, plastics en biomassa. De kennis die is ontwikkeld voor en beschikbaar is via dit rapport, is onderdeel van het Kennisbasis Onderzoek Programma: Circulair en Klimaatneutraal dat gefinancierd wordt door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. De Business unit Glastuinbouw van Wageningen University & Research is aandrijver en uitvoerder van het overkoepelende onderzoek (KB-34-007-007) dat focust op de transitie naar een circulaire glastuinbouw sector.

Abstract

Greenhouse horticulture is an innovative sector that efficiently uses resources to produce high-quality vegetables, fruits and plants. Still, the total supply chains are often linear, not circular. For resources, greenhouse horticulture, like many other sectors, depends on raw materials that come from natural reserves located all over the world. Think for instance of natural gas for energy, CO₂ and the production of nitrate fertilizers. Or phosphate rock (P) and potash (K) extracted from mines to produce fertilizers. Basalt and peat for substrate. Crude oil for plastic. This report contains an overview of the various challenges and possible transition pathways towards closed resource cycles of six typical material flows in greenhouse horticulture; water, fertilizers, CO₂, substrate, plastics and biomass. The knowledge developed for and available through this report is part of the Knowledge Base Research Programme: Circular and Climate Neutral that is funded by the Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality. The Business unit Greenhouse Horticulture of Wageningen University & Research has conducted the research project (KB-34-007-007) that focuses on the transition towards a circular greenhouse horticulture sector, of which this report is a deliverable.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1203

Projectnummer: 3742284401

Gunningscode: KB-34-007-007

DOI: <https://doi.org/10.18174/586187>

Thema: Energie en klimaat

Dit project/onderzoek is mede tot stand gekomen door de bijdrage van het Kennisbasis Onderzoek Programma: Circulair en Klimaatneutraal dat gefinancierd wordt door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (KB-34-007-007).

Disclaimer

© 2022 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, BU Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

Inhoud

1	Inleiding	5
	1.1 Naar een circulaire economie	5
	1.2 Naar een circulaire glastuinbouw	5
2	Materiaalstromen in de glastuinbouw	9
	2.1 Meststoffen	9
	2.2 Substraat	11
	2.3 CO ₂	13
	2.4 Biomassa	15
	2.5 Plastics	16
	2.6 Water	18
3	Kwantificeren en prioriteren	21
4	Cross-overs	23
	4.1 Glastuinbouw & Aquacultuur	25
	4.2 Glastuinbouw & Varkenshouderij	25
	4.3 Glastuinbouw & Paddenstoelenteelt	26
	Literatuur	27

1 Inleiding

1.1 Naar een circulaire economie

Van mondiale tot regionale beleidskaders wordt er ingezet op een transitie naar een circulaire economie:

- **Mondiaal:** De Sustainable Development Goals (SDG's) van de Verenigde Naties bevatten veel elementen die overeenkomen met doelen en indicatoren die gebruikt worden in beleid dat gericht is op circulariteit. Doel 12 'Responsible Consumption and Production' is daar een voorbeeld van.
- **Europees:** 'Economische groei zonder uitputting van grondstoffen' is een van de pijlers van de Europese Green Deal. Daaronder valt de Farm to Fork Strategy waar de focus ligt op duurzame voedselsystemen.
- **Nationaal:** Op nationaal niveau stelt het Rijksbrede programma Nederland Circulair in 2050 een ambitieus doel voor de samenleving en alle productiesectoren: in 2030 gebruikt Nederland 50% minder primaire grondstoffen (mineralen, metalen en fossiel). Om dit doel te behalen wordt er ingezet op efficiënter gebruik van grondstoffen, een omslag naar hernieuwbare grondstoffen en circulair ontwerp van productiemethodes en producten.

Ook de landbouw zal de komende jaren een transitie gaan doormaken. De Visie Landbouw, Natuur en Voedsel: Waardevol en Verbonden stuurt aan op kringlooplandbouw. Een uitgangspunt voor de kringlooplandbouw is dat hergebruik de norm wordt: reststromen uit de ene keten worden verwaard tot grondstoffen voor een andere keten. Om kwaliteit en (voedsel)veiligheid te borgen moeten reststromen dus op basis van grondstofsificaties worden geproduceerd.

1.2 Naar een circulaire glastuinbouw

De glastuinbouw is een innovatieve sector die hoge kwaliteit groente, fruit en planten oplevert en op veel vlakken zeer efficiënt met grondstoffen omgaat. Neem bijvoorbeeld het recirculeren van water en meststoffen in de kas. Toch zijn de productieketens veelal lineair, niet circulair. Voor grondstoffen is de glastuinbouw namelijk, net als veel andere sectoren, afhankelijk van natuurlijke reserves die over de hele wereld verspreid liggen. Denk aan aardgas voor energie, CO₂ en de productie van nitraatmeststoffen. Of aan fosfaatgesteente (P) en potas (K) dat uit mijnen wordt gewonnen om meststoffen van te maken. Basalt en veen voor substraat. Ruwe olie voor plastic.

De meeste natuurlijke reserves waar deze primaire grondstoffen vandaan komen, raken op den duur uitgeput. Voor sommige grondstoffen, zoals fosfaatgesteente, ligt die realiteit niet heel ver in de toekomst (M. A. de Boer *et al.* 2019). Ook bestaan er meer leveringsrisico's dan alleen de eindigheid van een grondstof. Hierdoor kunnen grondstofprijzen instabiel worden en bovendien heeft winning en transport van primaire grondstoffen een aanzienlijke impact op het milieu. (Zie ook de EU Critical Raw Material List.) Recyclen kennen we allemaal, maar het overgrote deel van de grondstoffen die we gebruiken eindigt vooralsnog in de bodem, rivieren, zeeën en lucht met vaak negatieve gevolgen voor mens en natuur. Ook zijn de grondstoffen na uitstoot zeer moeilijk terug te winnen omdat ze sterk verspreid zijn. Fosfaat terughalen uit een oceaan of rivier, is vergelijkbaar met een schepje suiker terughalen nadat je het hebt opgelost in een zwembad.

Daarom is het belangrijk dat we met elkaar nadenken over verbeteringen. Met inzichten die zijn opgedaan in het Kennisbasisonderzoek (KB) en in samenwerking met de Club van 100, hebben wij een richtinggevend toekomstbeeld opgesteld van de glastuinbouw in een circulaire economie (Figuur 1). Daarin staat voor zes kenmerkende materiaalstromen – water, meststoffen, CO₂, substraat, plastics en biomassa – verbeeld dat de afhankelijkheid van primaire grondstoffen wordt afgebouwd. In plaats daarvan wordt er via r-strategieën (zie de R-ladder zoals gedefinieerd door het PBL) gewerkt aan gesloten kringloopketens. Daarmee voorkomt de glastuinbouw dat de sector bijdraagt aan uitputting en verlies van hulpbronnen, en de impact op het milieu wordt verminderd omdat grondstoffen niet meer worden uitgestoten naar de omgeving.

Wij voorzien dat de glastuinbouw, als schakel in een circulaire economie, niet alleen waarde toevoegt met het eindproduct, maar ook reststromen verwaardt. Enerzijds door de eigen reststromen geschikt te maken als herbruikbare grondstoffen en anderzijds door de verbinding aan te gaan met andere sectoren. Zo groeit de glastuinbouw door naar 'upcycling systeem'; een systeem dat minder afhankelijk is van primaire bronnen en meer inspeelt op de potentie van lokale, hernieuwbare bronnen.

Elk van de zes materiaalstromen die in dit rapport worden besproken (Hoofdstuk 2) kent specifieke uitdagingen en kansen in de zoektocht naar circulaire ketens. Technologie speelt hierin een belangrijke rol – denk aan (bio) detectie, (bio)conversie en fermentatietechnologie, scheidings- en zuiveringstechnieken, duurzame plastics technologie, eiwittechnologie – maar juist ook niet-technische aspecten zoals wet- en regelgeving, sociale normen, gedrag van actoren en verdienmodellen. Voordat nieuwe ketens kunnen worden opgezet moeten de basiscijfers bekend zijn; hoe groot zijn de materiaalstromen en hoe bewegen deze zich door een kas? Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de gekwantificeerde en vervolgens gevisualiseerde materiaalstromen in een Nederlandse tomatenteelt. Hoofdstuk 4 gaat in op 'cross-overs'; verbindingen tussen de glastuinbouw en andere sectoren. Het doel van die verbinding is om uitgaande materiaalstromen van het ene (voedsel) productiesysteem te verwaarden tot bruikbare grondstoffen voor een ander productiesysteem. Dit is één van de oplossingsrichtingen om het gebruik van primaire grondstoffen te verminderen en alternatieve (lokale) bronnen hoogwaardiger in te zetten binnen een circulaire economie.

2 Materiaalstromen in de glastuinbouw

Binnen het KB-onderzoek wordt gefocust op 6 materiaalstromen die gebruikt worden en/of vrij komen tijdens de productie van groente, fruit en planten in kassen: water, meststoffen, CO₂, substraat, plastics en biomassa. Elk van deze stromen heeft een eigen verhaal met specifieke uitdagingen om tot gesloten kringlopen te komen.

2.1 Meststoffen

De glastuinbouw maakt gebruik van meststoffen; zes macro-elementen (N, P, K, Mg, Ca en S) en zes micro-elementen (Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo). Recirculeren van meststoffen behoort op veel Nederlandse glastuinbouwbedrijven al tot de norm en dit resulteert in een zeer efficiënt gebruik in de kas. Vrijwel alle meststoffen die een glastuinbouwbedrijf ingaan, komen er namelijk uit als eindproduct (bijvoorbeeld een tomaat) of als restbiomassa (plantmateriaal zoals stengels, blad, wortels); een omzettings-rendement van (vrijwel) 100%. De gehele keten is echter nog niet circulair omdat de grondstoffen voor de meeste (kunst) meststoffen afkomstig zijn uit mijnen die op den duur uitgeput zullen raken.

Voor meststoffen die stikstof bevatten ligt het verhaal iets anders. Stikstof wordt namelijk op basis van het Haber-Bosch proces uit de lucht gehaald en omgezet naar ammoniak. Voor dit proces wordt wel weer aardgas als grondstof en als bron van energie gebruikt; ongeveer 1000 m³ per ton ammoniak in Nederlandse fabrieken (Meststoffen Nederland, 2015). De afgelopen jaren is er aanzienlijk geïnvesteerd om energiegebruik en CO₂ uitstoot van Nederlandse ammoniakfabrieken te verminderen door het proces verder te optimaliseren.



Figuur 2 Een tunnel in een mijn waaruit potas wordt gehaald. Potas bevat kaliumcarbonaat en kaliumzouten zoals kaliumchloride en kaliumsulfaat waarvan kunstmeststoffen worden gemaakt. Bron: Sergey Mikhailenko/Shutterstock.com.



Figuur 3 Delfstoffen worden vanuit de mijnbouw verscheept naar kunstmestproducenten die er hoge kwaliteit (zeer zuivere) meststoffen van kunnen maken. Voor de glastuinbouw zijn veel van deze meststoffen ook oplosbaar gemaakt zodat ze met het irrigatiewater mee te geven zijn aan het gewas. Bron: Vaakim/Shutterstock.com.

Meststoffen verlaten een glastuinbouwbedrijf als onderdeel van het product, zoals een tomaat, of als 'groenafval' zoals stengels en blad (ofwel biomassa). Nadat een tomaat is geconsumeerd eindigen veel van de waardevolle meststoffen in de natuur waar ze de nodige schade veroorzaken aan ecosystemen in de vorm van eutrofiëring (CBS, 2022; Sichler *et al.* 2022). Als de meststoffen worden uitgestoten naar rivieren en uiteindelijk de zee of oceaan, zijn deze zeer moeilijk terug te winnen. Stel je voor dat je een schepje suiker in een zwembad laat vallen en het vervolgens terug moet zien te halen.

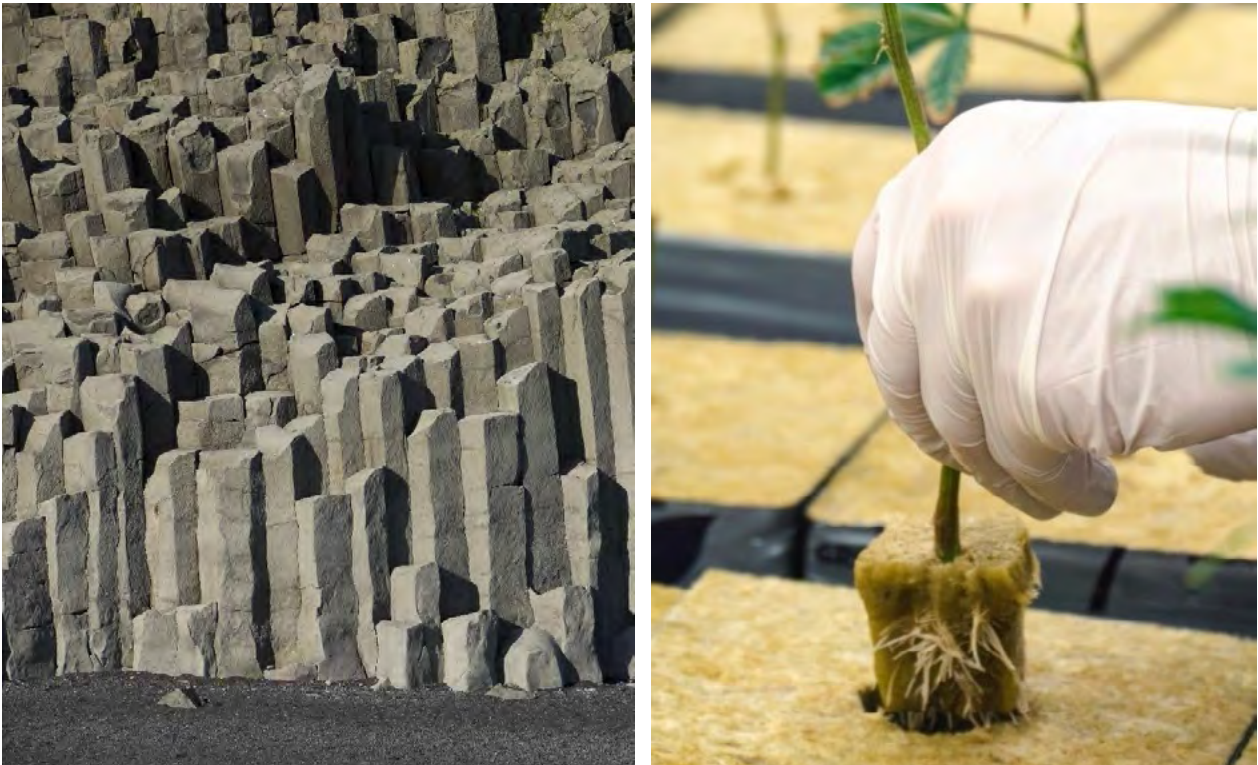
De uitdaging waar de sector voor staat is om de glastuinbouw tot schakel in een gesloten nutriëntenkringloop te maken. Het sluiten van kringlopen moet gebeuren op eigen bedrijf, regionaal en sectorbreed. Met de doelstelling om volledig emissieloos te telen in 2027 zullen er nagenoeg geen meststoffen meer verloren gaan vanuit de kas naar het oppervlaktewater omdat lozingen van drainwater en lekkages (nog verder) worden teruggedrongen.

Toch draait het niet alleen maar om efficiëntie in de kas. Om de afhankelijkheid van eindige, minerale meststoffen af te bouwen, is het nodig om meststoffen te ontwikkelen op basis van andere (organische) bronnen zoals dierlijke mest (van Iperen International, 2022), voedsel- en groenafval (Geerten van der Lugt, 2022; SIGN, 2020), maar ook zuiveringswater en -slib (Unie van Waterschappen, 2022). Hiervoor is het opbouwen van samenwerkingsverbanden met andere sectoren in Nederland en het opzetten van nieuwe toeleveringsketens op het gebied van mestterugwinning eveneens een belangrijke focus. Tegelijkertijd moeten deze meststoffen toepasbaar zijn in de teeltsystemen van de glastuinbouw en de kwaliteit moet gewaarborgd blijven om efficiënt gebruik en (voedsel)veiligheid te garanderen. Welke toeleveringsketens van de macro- en micro-elementen geprioriteerd moeten worden in deze transitie kan gebeuren op basis van beschikbaarheid (op welke termijn wordt grondstofbeschikbaarheid kritiek?) en milieu impact.

Nieuwe productieprocessen kunnen ook een positieve impact hebben, door bijvoorbeeld de energie-efficiëntie te verhogen. In het specifieke geval van stikstofmeststoffen kan 'Polymer electrolyte membrane' (PEM) elektrolyse het productieproces loskoppelen van de vraag naar aardgas (Yara, 2022).

2.2 Substraat

Er zijn verschillende materialen die voor substraat worden gebruikt in de glastuinbouw en een groot deel daarvan komt uit natuurlijke reserves zoals basalt voor steenwol en veen voor potgrond. Hoewel basalt een zeer veel voorkomend gesteente is en de wereldwijde reserves vrijwel onuitputbaar, heeft mijnbouw en transport een impact op het milieu (Dahl *et al.* 2011). In de bouwsector is het doel om steenwol als isolatiemateriaal zo veel mogelijk te blijven recycleren. In de glastuinbouw worden substraatmatten van steenwol na gebruik (nog) niet opnieuw tot substraatmat verwerkt.



Figuur 4 Basaltgesteente (links) komt veel voor als 'zuilen' en wordt onder andere gebruikt om steenwol van te maken. Steenwol (rechts) is zeer geschikt als substraat om planten op te groeien omdat het inert, ziektevrij, vormvast en uniform is. Ook kan water zich snel door het materiaal heen verplaatsen en het water wordt deels vastgehouden. Deze eigenschappen dragen bij aan een goede water- en meststoffenvoorziening voor de plant. Bronnen: Valery Kraynov en OpenRangeStock/Shutterstock.com.

Veen als grondstof voor substraat staat onder druk omdat er veel koolstof vastgelegd ligt in veenbodems die bij het afgraven grotendeels vrijkomt als CO₂ (een broeikasgas). Ontginning van veengebieden kan daarnaast ook leiden tot verlies van ecosystemendiensten zoals waterzuivering en waterberging. Een EU-breed verbod op ontginning en import van veen lijkt dan ook steeds dichterbij te komen. In Nederland is recentelijk het Convenant Milieu-impact potgrond en substraten getekend om tot een versnelling in duurzaamheid te komen.

Het voordeel van telen uit de bodem (op substraat of direct in water) ten opzichte van teelt in de bodem is dat water en meststoffen erg nauwkeurig gedoseerd kunnen worden. Ook wordt het opvangen en hergebruiken van water en meststoffen (recirculeren) een stuk makkelijker. In de huidige teeltsystemen neemt substraat daarom een belangrijke functie in om niet alleen efficiënt met water en meststoffen om te gaan, maar ook om lozing op de bodem en sloot te beperken.



Figuur 5 Ontginning van een veengebied. Bron: cparrphotos/Shutterstock.com.

Als materiaalstroom die de kas in gaat, is substraat een vrij zuivere stroom. Maar het materiaal raakt tijdens de teelt vermengd met meststoffen, water, plantwortels en wortellexudaten waardoor het geen 'monostroom' meer is. Een gemengde materialenstroom is vaak moeilijker te recyclen dan een monostroom. Substraat raakt daarnaast ook vaak vermengd met plastic. Steenwolmatten zitten bijvoorbeeld in een plastic hoes en potgrond gaat in plastic potten.

Dat neemt niet weg dat in Nederland steenwolmatten op grote schaal worden ingezameld en verwerkt tot nieuwe grondstoffen zoals steenwolgranulaat voor de productie van baksteen en plastic voor vuilniszakken (Roger Abbenhuijs, 2018). Andere substraatsoorten zoals kokosvezel en perliet worden ook verward tot nieuwe grondstof of product. Substraat in potplanten dat via de consument eindigt bij het groenafval, wordt (gedeeltelijk) weer verwerkt tot compost of bodemverbeteraar (Attero, 2022). Er wordt dus al veel met circulaire principes gewerkt. Toch worden er elk jaar vele tonnen primaire grondstoffen geïmporteerd om substraat voor de glastuinbouw te maken. De ketens zijn dus nog niet voor elk type substraat volledig gesloten.

De uitdaging is om alternatieve (biobased) bronnen te zoeken die primaire grondstoffen kunnen vervangen. En om materiaalstromen op een hoogwaardige wijze te recyclen zodat er opnieuw substraat van gemaakt kan worden. Ook kan onderzocht worden of de levensduur van substraten in de kas verlengd kan worden zodat er minder grondstoffen nodig zijn. Herontwerp van teeltsystemen zou voor sommige gewassen kunnen betekenen dat er helemaal geen substraat nodig is om uit de grond te telen. Bijvoorbeeld door de wortels direct in water of zelfs in de lucht te laten groeien.

2.3 CO₂

CO₂ staat wereldwijd bekend als broeikasgas dat bijdraagt aan de opwarming van de aarde. En hoewel de hoge uitstoot van CO₂ en resulterende klimaatcrisis niet ter discussie staan, blijft CO₂ een essentieel onderdeel van de atmosfeer voor de groei van planten. De concentratie CO₂ in de buitenlucht is de afgelopen 50 jaar van 325 ppm naar zo'n 410 ppm gestegen (Rebecca Lindsey, 2022). In een kas wordt de CO₂ concentratie tot wel 1000 ppm verhoogd omdat het gewas dan sneller groeit. Het aantal kilo's tomaten per m² neemt dan bijvoorbeeld flink toe. De meeste CO₂ die in de glastuinbouw gebruikt wordt, is afkomstig van fossiele brandstoffen. Het gaat dan voornamelijk om CO₂ die vrijkomt bij de verbranding van aardgas in WKK's. Een deel van de glastuinbouw krijgt CO₂ geleverd via een uitgebreid leidingnetwerk. Die CO₂ is gedeeltelijk bijproduct uit de petrochemische industrie en gedeeltelijk afkomstig uit een bio-ethanolfabriek (Van der Velden & Smit, 2019).



Figuur 6 Deze opslagtanks bevatten aardgas; nu nog een voorname bron van energie en CO₂ voor de glastuinbouw. Maar ook aardgas is een eindige grondstof en dus moet er over alternatieven worden nagedacht. Bron: tonton/Shutterstock.com.

Slechts een heel beperkt deel van de CO₂ die wordt gedoseerd in kassen wordt daadwerkelijk opgenomen en vastgelegd door het gewas. De rest (>90%) verdwijnt door de luchtramen naar de buitenlucht en is dus in feite uitstoot (Van Tuyll, Boedijn, *et al.* 2022). Het verlies van CO₂ door de ramen kan met wel 80% beperkt worden door slimmer te doseren op basis van meet- en regeltechniek. Ook kan een (semi-) gesloten kasontwerp met mechanische ventilatie de efficiëntie sterk verbeteren. Maar efficiënter gebruik van CO₂ maakt nog geen circulair gebruik.

Naarmate de energietransitie vordert en het gebruik van fossiele brandstoffen afneemt, neemt ook de productie van CO₂ af. Alternatieve bronnen moeten dus worden overwogen als de glastuinbouw gebruik wil blijven maken van CO₂ in de kas. Een van de mogelijkheden is de CO₂ die vrijkomt bij de verbranding van afval (AVR, 2019). Maar ook die bron zal op de langere termijn verdwijnen omdat er in een circulaire economie (vrijwel) geen afval bestaat om te verbranden.

De uitdaging is om innovatieve oplossingen voor CO₂ gebruik in de glastuinbouw te ontwikkelen. De atmosfeer kan daarin een belangrijke rol spelen als bron. CO₂ kan namelijk direct uit de buitenlucht worden gehaald met 'Direct Air Capture' (DAC) technologie (Fasihi *et al.* 2019). Op het moment is dit nog te duur voor toepassing in de glastuinbouw (Jasper Ros, 2022). Indirect zijn planten een bron van CO₂ uit de atmosfeer omdat zij CO₂ uit de buitenlucht vastleggen door middel van fotosynthese. Als organische reststromen zoals snoeiafval en mest verwerkt worden in bioreactoren komt die CO₂ weer vrij en zou gebruikt kunnen worden in de kas (Blok *et al.* 2022).

Als het om CO₂ gaat, is het bij elke innovatie van belang om het spanningsveld tussen circulariteit en klimaatverandering te beschouwen. Vanuit een circulair perspectief komt alle CO₂ die bv. uit de atmosfeer wordt gehaald ook weer terug in de atmosfeer en er is dus geen additionele uitstoot. Dit wordt ook wel 'klimaatneutraal' genoemd. Maar er gaan steeds meer stemmen op voor het verminderen van de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer om klimaatverandering tegen te gaan. Dit wordt ook wel aangeduid met 'klimaatpositief' en betekent dat de CO₂ uit afvanginstallaties, DAC installaties of bioreactoren langdurig moet worden opgeslagen. Denk aan ondergrondse reservoirs, maar ook aan biochar en zelfs bomen voor het vastleggen van koolstof (RVO, 2021).

Meer weten over de toekomst van CO₂ gebruik in de glastuinbouw? Lees het rapport 'Carbon Dioxide Enrichment for Greenhouses in a Decarbonised Future' door Van Tuyl *et al.* (2022).

2.4 Biomassa

In een kas groeien planten steeds groter door water, meststoffen en CO₂ om te zetten in 'biomassa'. Biomassa is organisch materiaal dat wordt geproduceerd door planten en dieren. Alle delen van een gewas zoals de wortels, stengels, bladeren, bloemen en vruchten zijn dus biomassa. In sommige teelten behoort de volledige plant tot het eindproduct voor de consument. Denk aan een orchidee. In andere teelten behoort slechts een deel van de totale biomassa die wordt geproduceerd tot het eindproduct. Denk bijvoorbeeld aan een tomaat. De wortels, bladeren en stengels van een tomatenplant worden beschouwd als groenafval.



Figuur 7 Hoewel het de consument (en de teler) vooral om de tomaat gaat, produceert een kas ook wortels, stengels en bladeren. De (economische) potentie van die biomassa zal steeds meer benut worden in de transitie naar een circulaire en 'biobased' economie. Bron: Roman Zaiets/Shutterstock.com.

Het groenafval uit de glastuinbouw wordt nu gedeeltelijk verwerkt tot een (laagwaardige) compost, maar in de transitie naar een circulaire economie gaat deze biomassa veel meer betekenen. Biomassa kan namelijk verwerkt worden tot allerlei hoogwaardige grondstoffen. Een knelpunt dat de verwaarding van groenafval uit de glastuinbouw in de weg staat, is dat deze vaak niet alleen bestaat uit plantmateriaal, maar ook plastic en metaal. Plastic touw, clipjes en ringetjes worden gebruikt om planten te ondersteunen en raken zo vermengd met het groenafval. Ook hier geldt dat een gemengde materiaalstroom lastiger te verwerken is dan een monostroom.

De uitdaging maar ook de kans waar de sector voor staat, is om verwaardingsketens op te zetten die ingericht zijn op het volledig benutten van biomassa uit de glastuinbouw. Er kan namelijk ontzettend veel uit biomassa gehaald worden: zouten voor meststoffen, organische stof of biostimulanten voor substraat, vezels voor verpakkingen en bouw materiaal, eiwitten voor (vee)voer, geur en kleurstoffen voor de cosmetische industrie en medicinale stoffen voor de farmaceutische industrie (SIGN, 2021). Er is onderzoek nodig om te bepalen welke plantreststromen geschikt zijn voor welke toepassingen en hoe de knelpunten kunnen worden weggenomen. Daarnaast is het net zo belangrijk om telers en ondernemers uit de proces- en verwerkingsindustrie te ondersteunen in het gezamenlijk opzetten van deze nieuwe verwaardingsketens en business cases.

2.5 Plastics

Plastic speelt een belangrijke rol als verpakkingsmateriaal van groente, fruit, planten en bloemen die in de glastuinbouw geproduceerd worden. Maar de 'plastic footprint' van het eindproduct gaat verder dan alleen de verpakking. In de kas wordt tijdens het teeltproces ook een reeks aan plastic producten gebruikt.

Een voor de hand liggend voorbeeld is de plastic pot. Maar er zijn ook folies voor het afdekken van de grond en teelttafels om onkruid tegen te gaan en zonlicht te reflecteren of juist te absorberen. Er zijn isolerende en verduisterende folies die bovenin de kas en bij de gevels gebruikt worden om energie te besparen of de lichtinval te beperken. Substraatmatten zijn afgedicht met een plastic hoes om verdamping, algengroei en de kans op ziektes te verminderen. Plastic touw, clips en stokken worden gebruikt om planten te ondersteunen en schade te voorkomen tijdens de teelt.

Al deze producten hebben een functie in de kas die de teeltprestaties en productie ten goede komt. Maar de huidige vorm van plasticgebruik heeft ook aanzienlijke nadelen en is niet circulair. Bijna alle plastics zijn namelijk gemaakt op basis van twee eindige primaire grondstoffen; ruwe olie en aardgas.



Figuur 8 Ruwe olie is een zeer veelzijdige grondstof waar o.a. etheen van gemaakt kan worden. Etheen is weer een belangrijke grondstof voor de productie van plastics. Een nadeel is dat olie- en gasvoorraden op den duur zullen zijn uitgeput en bovendien heeft de petrochemische industrie ook verscheidene negatieve gevolgen voor het milieu. Bron: Anan Kaewkhammul/Shutterstock.com.

Afhankelijkheid van olie en aardgas zal op de langere termijn moeten afnemen, maar plastics staan ook innovaties op de korte termijn in de weg. Bijvoorbeeld in glasgroenteteelten zoals tomaat, komkommer, paprika en aubergine blijven plastic clips, ringetjes en touw achter in de stengels en bladeren. Dat plantmateriaal wordt nu nog beschouwd als 'groenafval', maar is in feite biomassa dat verwaard kan worden tot nieuwe grondstoffen (Boedijn, de Lauwere, *et al.* 2022). De plastic vervuiling maakt dat het plantmateriaal moeilijk te verwerken is waardoor de waarde van het materiaal afneemt (Ruizendaal, 2022). Vervuiling van het milieu met plastics blijft ook een punt van aandacht. Hieronder valt ook de verspreiding en ophoping van microplastics in bodem en water.



Figuur 9 Touw, ringetjes en clips maken onderdeel uit van het succesvolle 'hogedraad' teeltsysteem, maar vervuilen het groenafval. Herontwerp van het teeltsysteem of bio-afbrekbare plastics zouden een oplossing kunnen bieden. Bron: Roman Zaiets/Shutterstock.com.

De uitdaging is om plasticgebruik in de glastuinbouw over de gehele product- en waardeketen mee te nemen in de transitie naar een circulaire economie. Dit bereiken we door kritisch na te gaan van plastic producten of deze daadwerkelijk een belangrijke functie hebben. Zo ja, dan kan deze functie misschien door een biobased materiaal worden vervuld zodat we minder afhankelijk worden van olie en aardgas. Nieuwe producten zouden bio-afbrekbaar kunnen zijn zodat groenafval makkelijker is te verwaarden. Anderzijds kunnen ketens zich richten op plastic producten die oneindig lang en hoogwaardig gerecycled kunnen worden na inzameling. Voor het behalen van de ambities rondom plastic zijn naast praktijkonderzoek ook coördinerende inspanningen nodig om ketenafspraken te maken; bijvoorbeeld om monostromen en retourlogistiek te organiseren (Greenport West-Holland, 2021).

2.6 Water

Water is essentieel voor een plant en dus ook voor glastuinbouwbedrijven. Het meeste water dat in kassen wordt gebruikt voor irrigatie is regenwater. In mindere mate wordt er grondwater gebruikt en slechts enkele teelten gebruiken oppervlaktewater. Leidingwater is ook een bron die vanwege kosten en kwaliteit maar weinig wordt ingezet.

Dat de voorkeur uitgaat naar regenwater, heeft onder andere te maken met waterkwaliteit. Voor de meeste (substraat)teelten is het van belang dat er zo min mogelijk natrium in het water zit (Raaphorst & Benninga, 2019). Natrium wordt maar beperkt opgenomen door het gewas waardoor het kan ophopen in het teeltsysteem bij hergebruik van drainwater. Een hoog natriumgehalte kan tot gevolg hebben dat meststoffen minder goed worden opgenomen door de plant. Grond-, oppervlakte- en leidingwater bevat vaak teveel natrium waardoor het eerst ontzout moet worden met behulp van bijvoorbeeld omgekeerde osmose. Oppervlaktewater kan daarnaast plantenziektes bevatten.

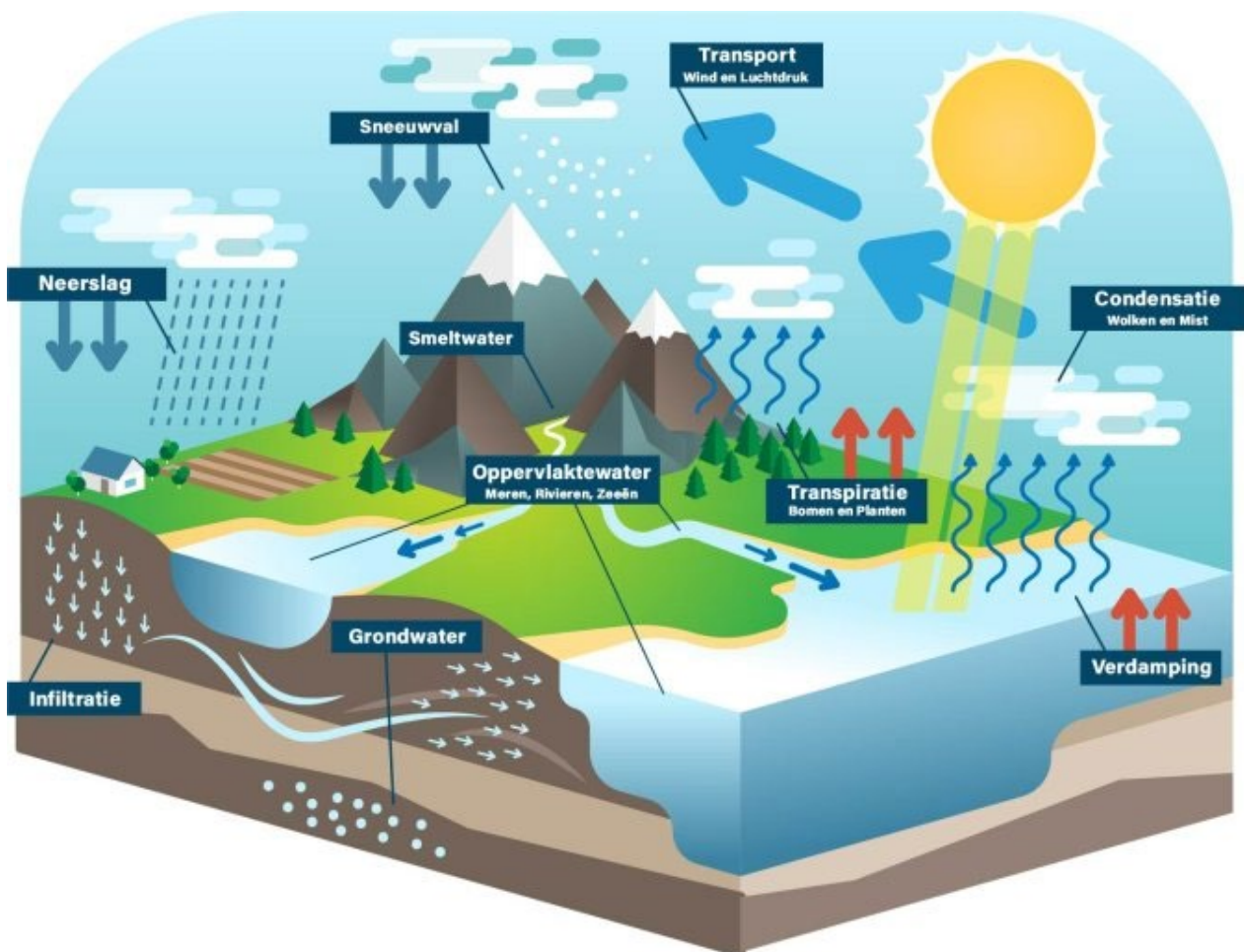


Figuur 10 'Teelt op water' waarin de wortels van het gewas direct in het water (en meststoffen) hangen. Bron: Ivan Karpov/Shutterstock.com.

Op een glastuinbouwbedrijf wordt al zeer efficiënt en circulair omgegaan met water. Dat komt omdat de meeste bedrijven gebruik maken van druppelirrigatie in combinatie met opvang en recirculatie van drainwater. Toch wordt er vaak nog incidenteel geloosd op het oppervlaktewater of riolering, bijvoorbeeld tijdens de teeltwisseling of omdat natrium zich ophoopt bij hergebruik. Het doel waar de sector naartoe werkt, is om in 2027 'emissieloos' te telen en dus niets meer te lozen (Glastuinbouw Waterproof, 2022). Maar als water een glastuinbouwbedrijf in gaat, waar komt het er dan uit?

Het overgrote deel van het gietwater wordt opgenomen en verdampt door de planten. Hierdoor wordt de kaslucht vochtiger en deze vochtige lucht gaat vervolgens door de ramen van de kas naar buiten als er geventileerd wordt. Dit water is zeer schoon en vormt geen probleem voor het milieu. Een klein deel van het water verlaat het bedrijf als onderdeel van het gewas. Een tomaat bestaat bijvoorbeeld voor zo'n 95% uit water.

Over het geheel genomen is de watercyclus van een kas zeer vergelijkbaar met een deel van de natuurlijke watercyclus; regenwater wordt opgenomen door planten die het vervolgens verdampen. Het verdampte water condenseert in de atmosfeer en komt terug als neerslag. Een circulair proces. Maar in tegenstelling tot veel andere materiaalstromen is de beschikbaarheid van water sterk afhankelijk van het klimaat.



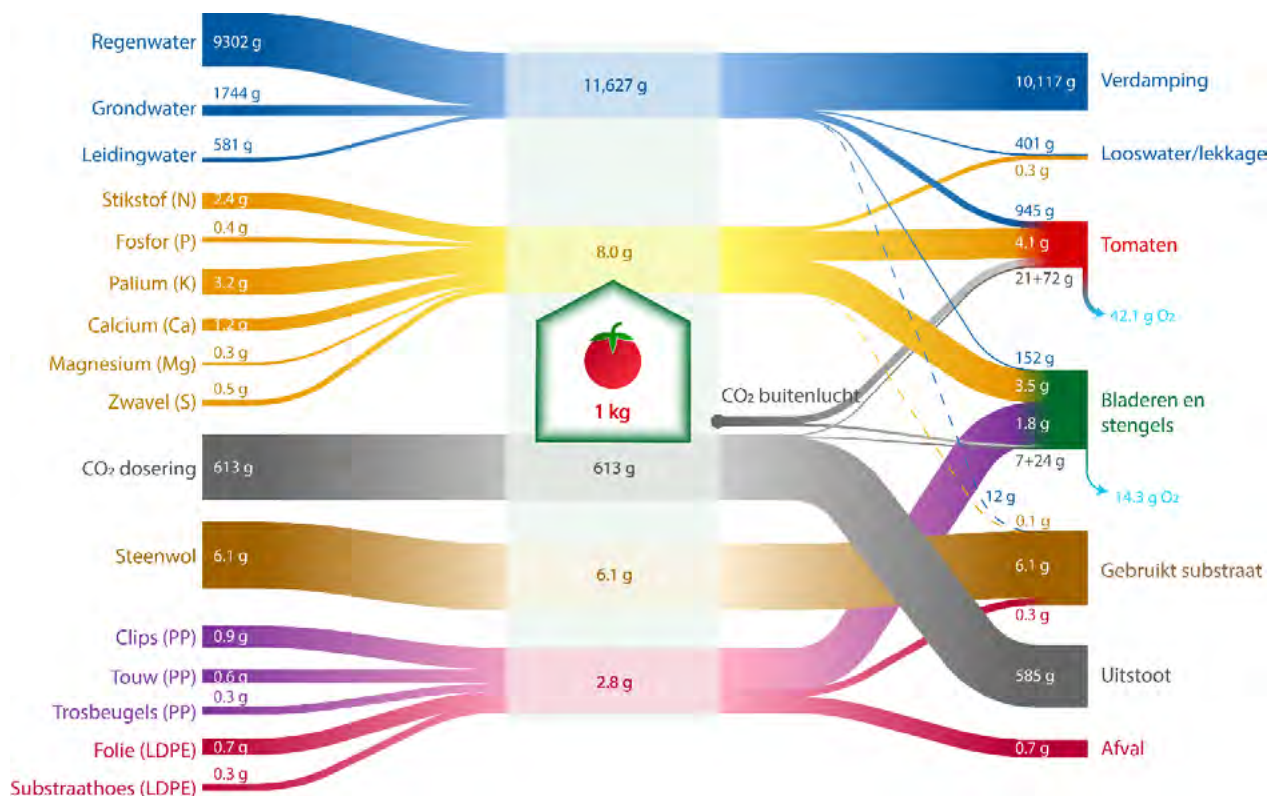
Figuur 11 Een schematisch overzicht van de natuurlijke watercyclus op aarde. Aan de hand van dit plaatje wordt snel duidelijk dat neerslag een cruciale rol speelt in de waterbalans. In gebieden waar weinig neerslag valt, is het aanwezige grondwater vaak een natuurlijke reserve die in de loop van duizenden jaren is opgebouwd. De reserves raken uitgeput als mensen elk jaar meer water onttrekken dan er natuurlijk wordt aangevuld. Bron: VectorMine/Shutterstock.com.

Hoewel Nederland niet verlegen zit om neerslag speelt ook hier klimaatverandering een rol. Door zwaardere buien in de winter en droge, hete zomers raakt de neerslag minder gelijk verdeeld over het jaar (KNMI, 2021). Dit leidt tot meer kans op overstromingen en problemen met wateropslag. De watervraag van glastuinbouwbedrijven is groter gedurende de zomer en de capaciteit van regenwaterbassins is vaak niet berekend op een zomer (vrijwel) zonder regen.

De uitdaging is om genoeg water met de juiste kwaliteit beschikbaar te houden voor de glastuinbouw zonder dat dit ten koste gaat van andere prioriteiten (Greenport West-Holland *et al.* 2021). Drinkwatervoorziening staat bovenaan die lijst, maar ook natuurgebieden hebben water nodig, en grondwater- en bodemkwaliteit moeten geborgd blijven. In een circulaire economie zullen watergebruikers uit verschillende sectoren, waterzuiveringsbedrijven en waterschappen naar samenwerkingsverbanden moeten zoeken om invulling te geven aan gezamenlijk waterbeheer. Een van de opties waar naar gekeken wordt, is om afvalwater uit andere (economische) processen te behandelen en in te zetten in de glastuinbouw (AquaConnect, 2022; Kierkels, 2020). Op het bedrijf zelf kan watergebruik nog efficiënter door bijvoorbeeld natriumfilters in te zetten of 'best practices' toe te passen tijdens de teeltwissel. Het vergroten en efficiënt managen van regenwateropslag kan zowel op bedrijfsniveau als gebiedsniveau bijdragen aan een optimale beschikbaarheid van regenwater (COASTAR, 2019; Rainlevel, 2017).

3 Kwantificeren en prioriteren

Hoewel iedere materiaalstroom specifieke uitdagingen en kansen biedt, staan de verschillende stromen niet los van elkaar en zullen oplossingen vaak een integrale aanpak vragen. Om integrale innovatie te bevorderen hebben we binnen het KB-onderzoek materiaalstroomdiagrammen opgesteld voor verscheidene teelten, zoals tomaat, phalaenopsis en roos. Figuur 12 laat een visualisatie zien voor de materiaalstromen in een Nederlandse tomatenteelt.



Figuur 12 Materiaalstroomdiagram van water, meststoffen, CO₂, substraat en plastic voor een tomatenteelt. Let op; binnen 1 type materiaalstroom kan de grootte van verschillende stromen worden vergeleken. Zo is bijvoorbeeld te zien dat van de meststoffen, kalium het meest gebruikt wordt en magnesium het minst. Tussen verschillende materiaalstromen kan de grootte van stromen niet worden vergeleken. Er is voor deze visualisatiemethode gekozen omdat water verreweg de grootste stroom is, waardoor de andere materiaalstromen verwaarloosbaar klein zouden moeten worden afgebeeld.

Dit soort overzichten geven aan wat er aan materialen een kas in gaat en hoe deze eruit komen. Ook is snel te zien hoe groot stromen ten opzichte van elkaar zijn en welke materiaalstromen gemengd raken tijdens de teelt. Het bijeenbrengen en visualiseren van deze kennis vormt een basis waarop gebouwd kan worden richting een circulaire glastuinbouw.

Enkele observaties zijn bijvoorbeeld dat, ondanks efficiënte recirculatie, meer dan 85% van het water de kas verlaat via verdamping. Als een hogere water efficiëntie van belang wordt (door bijvoorbeeld aanhoudende droogte), is daar de meeste winst te behalen in de kas. Bijvoorbeeld door gebruik te maken van (semi-)gesloten kassen die actieve koeling toepassen waardoor het condensatiewater kan worden teruggewonnen (Tsafaras *et al.* 2022).

Ook is te zien dat ongeveer de helft van de meststoffen in het eindproduct, de tomaat, terecht komt. Zeer weinig wordt uitgestoten naar de omgeving en een groot deel komt terecht in biomassa zoals stengels en blad. In de transitie naar gesloten meststofkringlopen kan deze biomassa een interessante bron zijn voor teruggewinning (Geerten van der Lugt, 2022).

Wat betreft CO₂ laat Figuur 12 zien dat de efficiëntie van doseren zeer laag is; >95% verlaat de kas als uitstoot. Het verhogen van die efficiëntie met behulp van gewaskennis, optimale klimaataansturing en slimmere regeltechniek zou al een flinke besparing kunnen opleveren (Gelder *et al.* 2012).

Uitgaande materiaalstromen zijn in sommige gevallen zeer verknoopt. Zo is de restbiomassa gemengd met plastic en het gebruikte steenwol met plastic, water, meststoffen (en wortels). Om voor die afvalstromen tot oplossingen te komen is het van belang om de opties binnen de gehele R-ladder te beschouwen. Zo kan het zijn dat herontwerp leidt tot nieuwe productiesystemen waarin er geen substraat meer nodig is, maar zouden innovatieve scheidingstechnieken het recyclen van reststromen juist kunnen bevorderen.

Hoewel Figuur 12 de efficiëntie van grondstofgebruik binnen het kassysteem in kaart brengt, zou zelfs 100% efficiëntie niet noodzakelijk tot een circulaire, duurzame glastuinbouw leiden. Daarvoor moeten hele ketens beschouwd worden. Stel dat de kas 100% van de CO₂ nuttig gebruikt, maar deze is afkomstig van fossiele brandstoffen, draagt de productie van tomaten nog steeds bij aan uitputting van primaire grondstoffen. Hetzelfde geldt voor bijvoorbeeld fosfor als er geen terugwinning plaatsvindt van deze meststof nadat het eindproduct is geconsumeerd. Om deze uitdagingen aan te gaan is er, als we de materialen volgen, een aanpak nodig die de glastuinbouwsector overstijgt.

Meer weten over materiaalstromen in de glastuinbouw? Lees de wetenschappelijke publicatie 'Quantification of material flows: A first step towards integrating tomato greenhouse horticulture into a circular economy' door van Tuyl, Boedijn, *et al.* (2022).

4 Cross-overs

Circulariteit gaat verder dan ieders eigen sector of expertise. Als het gebruik van primaire grondstoffen uit natuurlijke reserves moet afnemen dan zullen er alternatieve bronnen voor in de plaats moeten komen. Eén van de oplossingsrichtingen ligt in het verbinden van verschillende sectoren. Het doel van die verbinding is om uitgaande materiaalstromen van het ene (voedsel)productiesysteem te verwaarden tot bruikbare grondstoffen voor een ander productiesysteem. Dit concept noemen we 'cross-overs' en binnen het KB-onderzoek is een strategie opgezet om de potentie van zulke samenwerkingsverbanden in kaart te brengen.

In Figuur 14 is de aanvliegroute om tot cross-overs te komen gevisualiseerd. Het proces begint vaak met een vraag naar een bepaalde grondstof of de behoefte om een reststroom te verwaarden. Vervolgens wordt gekeken hoe vraag aan aanbod kan worden gekoppeld of vice versa; het vinden en verbinden van leverancier en afnemer. Daarna start er vaak een analyse om de verscheidene stromen te kwantificeren én om verschillen tussen gevraagde kwaliteit en beschikbare kwaliteit – denk aan concentratie en contaminanten – op te stellen. Na deze analyse kan er vaak al een eerste evaluatie plaatsvinden:

- Verantwoord de schaal van de potentiële toepassing nader onderzoek? Is er genoeg positieve impact te behalen?
- Kunnen kwaliteitsproblemen worden opgelost met beschikbare technologie?

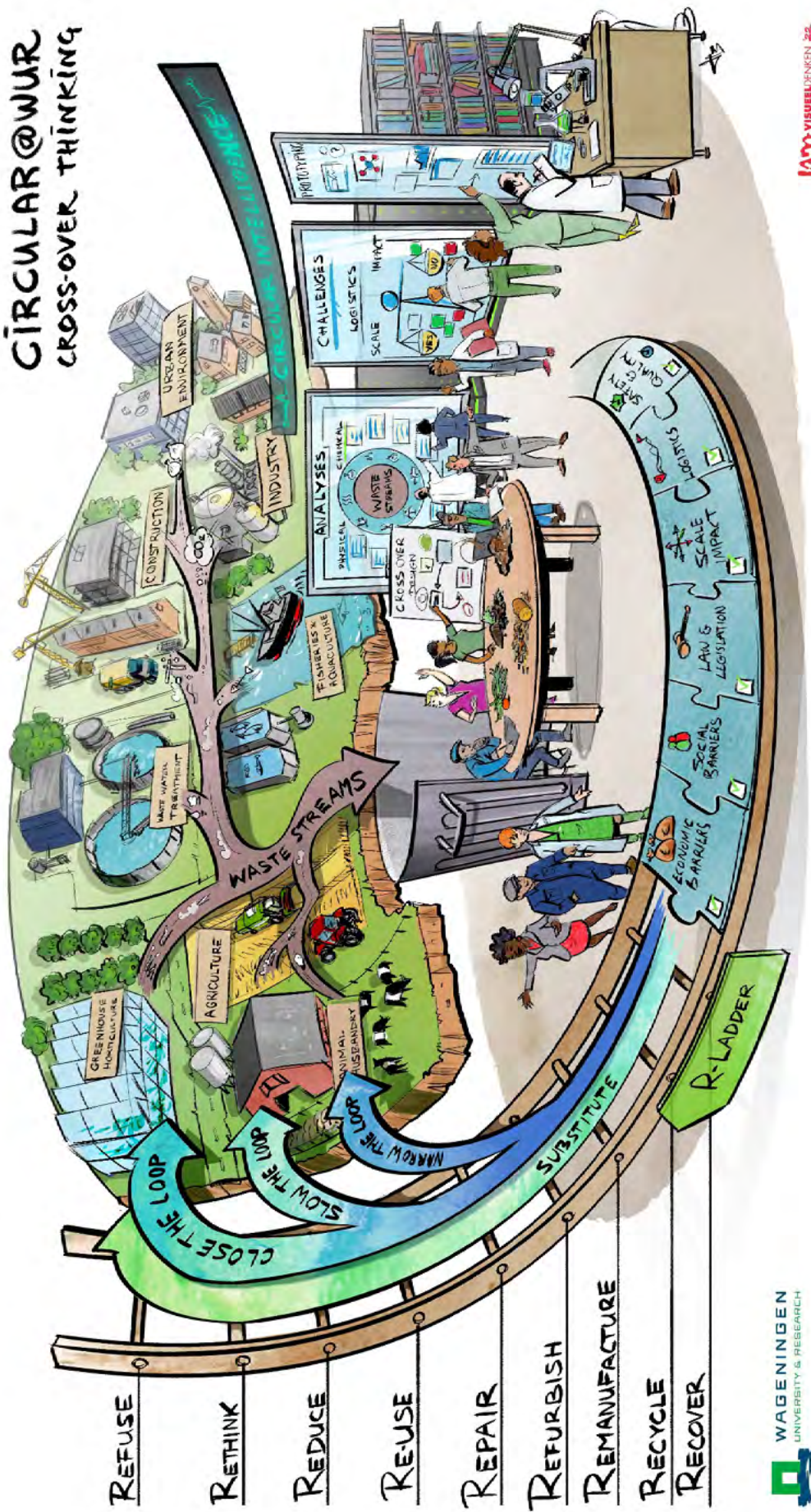
Als deze vragen een positief beeld geven, worden andere mogelijke uitdagingen geanalyseerd, vaak gebeurt dit in samenwerking met stakeholders in het bedrijfsleven en overheid. Het gaat hierbij om logistiek, wet- en regelgeving, sociale- en economische factoren. De afweging om uiteindelijk tot een pilot, prototype of opschaling van een toepassing over te gaan, is of de waargenomen uitdagingen zodanig kunnen worden opgelost dat het wenkend perspectief – het sluiten van een kringloop – de middelen waard is.

Binnen het KB-onderzoek zijn enkele casussen nader onderzocht. De opgedane kennis is beschikbaar via drie whitepapers (Figuur 13).



Figuur 13 De whitepapers 'Glastuinbouw & Aquacultuur', 'Glastuinbouw & Varkenshouderij' en 'Glastuinbouw & Paddenstoelenteelt' verkennen welke materiaalstromen tussen de respectievelijke sectoren kunnen worden uitgewisseld om kringlopen verder te sluiten.

CIRCULAR@WUR CROSS-OVER THINKING

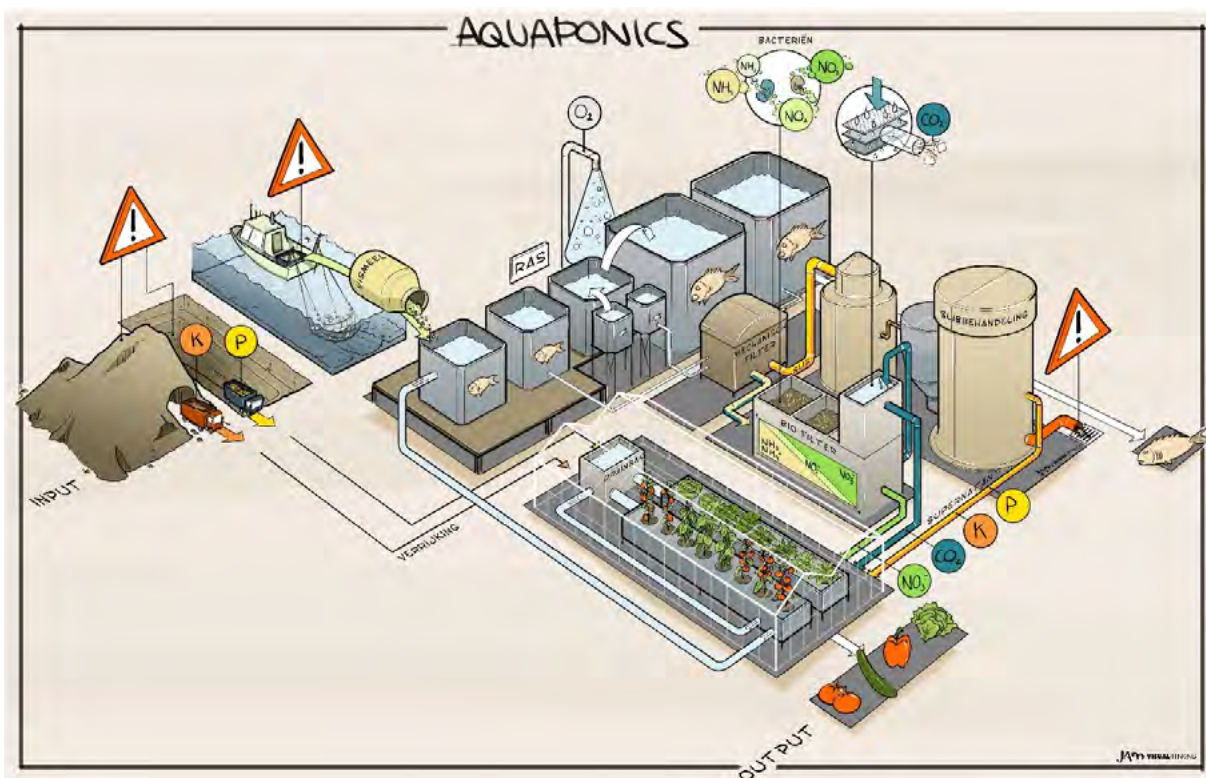


Figuur 14 Visualisatie van de 'cross-over' aanpak. Zo kan de potentie van reststroomverwerking in kaart worden gebracht voor verschillende toepassingen. Het wenkend perspectief is om kringlopen te sluiten door stappen te zetten op de R-ladder.

4.1 Glastuinbouw & Aquacultuur

De combinatie tussen glastuinbouw en aquacultuur, een vorm van 'aquaponics', is een concept dat al sinds de jaren 70 wordt onderzocht (Watten & Busch, 1984). Hoewel er voorbeelden zijn van commerciële ondernemingen is er nog geen sprake van een gevestigde aquaponics sector. Aquacultuur daarentegen is een snel groeiende sector waardoor er in de toekomst wellicht kansen liggen voor glastuinbouw- en aquacultuur om gezamenlijk stappen te zetten in circulariteit en duurzaamheid (FAO, 2020). De whitepaper 'Glastuinbouw & Aquacultuur' door A. Boedijn, Kals, *et al.* (2022) verkent de potentie van drie samenwerkingsverbanden:

- Efficiënter omgaan met water door cascadering en gedeelde infrastructuur.
- Verwaarding van afvoerwater en slib uit de aquacultuur tot meststoffen voor de glastuinbouw.
- CO₂ uit de aquacultuur doseren in de glastuinbouw.



Figuur 15 Schets van een aquaponic systeem; een cross-over tussen de glastuinbouw en visteelt.

4.2 Glastuinbouw & Varkenshouderij

De varkenshouderij is met 3.557 bedrijven in Nederland een aanzienlijke sector (Agrimatie, 2021). De transitie naar kringlooplandbouw biedt kansen om de varkenshouderij te verduurzamen en het varken als 'kringloopdier' in te zetten in een circulaire economie. Dit kan met name door varkens te voeren met gewasresten of reststromen uit de verwerkingsindustrie. Hierbij zetten varkens 'afvalstromen' om tot hoogwaardige voedingsstoffen voor de mens (I. J. M. de Boer & van Ittersum, 2019). Daarnaast produceren varkens mest dat kan worden verwerkt tot hoogwaardige meststoffen en CO₂ voor de groei van gewassen in de land- en glastuinbouw. De whitepaper 'Glastuinbouw & Varkenshouderij' door A. Boedijn, Casu, *et al.* (2022) verkent de potentie van twee samenwerkingsverbanden:

- Verwaarding van varkensmest tot hoogwaardige meststoffen voor de glastuinbouw.
- Verwaarding van koolstof in varkensmest tot fossielvrije CO₂ voor de glastuinbouw.

4.3 Glastuinbouw & Paddenstoelenteelt

De paddenstoelensector in Nederland wordt gedomineerd door de teelt van champignons die met een huidige productie van 240.000 ton circa 95% van de totale teelt van paddenstoelen beslaat. Nederland is op het moment de 4^e producent van champignons wereldwijd (LTO Noord, 2022). Naast champignons produceert Nederland zogenoemde exoten zoals de oesterzwam, koningsoesterzwam, shiitake en beukenzwam. Samenvattend staat de sector voor een aantal uitdagingen, niet alleen om duurzamer te worden, maar ook als gevolg van andere duurzaamheidsinspanningen. Doordat het afgraven van veen uitgefaseerd wordt, zullen er nieuwe materialen gevonden moeten worden voor dekaarde. Ook is de beschikbaarheid van substraten onzeker, doordat biomassa meer ingezet wordt voor andere toepassingen in een economie die zich richt op biobased materialen. Dit leidt tot concurrentie met de paddenstoelensector. Zeker voor exoten geldt dit, omdat materialen voor exotensubstraat de meeste toepassingen hebben. Daarentegen liggen er kansen om reststromen uit de paddenstoelenteelt te verwaarden: champost, maar ook CO₂ en ammoniak. De whitepaper 'Glastuinbouw & Paddenstoelenteelt' door Van Tuyll, Van Peer, *et al.* (2022) verkent de potentie van drie samenwerkingsverbanden:

- Verwaarding van ammoniak uit compostering voor champignons tot hoogwaardig nitraat voor de glastuinbouw.
- Verwaarding van koolstof uit de paddenstoelenketen tot fossielvrije CO₂ voor de glastuinbouw.
- Verwaarding van restbiomassa uit de glastuinbouw tot substraat voor de paddenstoelenteelt.

Literatuur

Agrimatie. (2021).

Agrimatie: Varkenshouderij. Wageningen University & Research. <https://agrimatie.nl/SectorResultaat.aspx?subpubID=2232§orID=2255&themaID=2286>

AquaConnect. (2022).

AquaConnect: Multidisciplinary research to to develop smart water grids for more robust future water supply in water-scarce areas. AquaConnect. <https://www.aquaconnect.nu/>

Attero. (2022).

Attero innoveert met productie Substraatcompost. <https://www.attero.nl/nl/onze-verwerking/uw-organisch-afval-wordt-compost-en-energie/onze-innovatieprojecten/productie-substraatcompost/>

AVR. (2019).

Eerste tonnen CO₂ uit restafval geleverd aan glastuinbouw. AVR. <https://www.avr.nl/nl/co2/eerste-tonnen-afgevangen-co2-uit-restafval-geleverd-aan-glastuinbouw/>

Blok, C., van Winkel, A., & Boedijn, A. (2022).

Inventarisatie van een mogelijke nieuwe bron voor koolzuurgas (CO₂). <https://doi.org/10.18174/574424>

Boedijn, A., Casu, F., & Booijen, M. (2022).

Cross-overs in de kringlooplandbouw: Glastuinbouw & Varkenshouderij.

Boedijn, A., de Lauwere, C. C., Boutkan, E., Kisters, T., & Weegels, M. F. (2022).

Verslag Workshop Circulaire Glastuinbouw & Plastics in Plantresten. <https://edepot.wur.nl/582650>

Boedijn, A., Kals, J., & Appelman, W. A. J. (2022).

Cross-overs in de kringlooplandbouw: Glastuinbouw & Aquacultuur. <https://edepot.wur.nl/581162>

CBS. (2022).

Steeds minder stikstof en fosfaat uit rioolwater in oppervlaktewater. <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2022/19/steeds-minder-stikstof-en-fosfaat-uit-rioolwater-in-oppervlaktewater>

COASTAR. (2019).

COASTAR: Zout op afstand, zoet op voorraad. COASTAR. <https://www.coastar.nl/>

Dahl, T. W., Clausen, A. U., & Hansen, P. B. (2011).

The human impact on natural rock reserves using basalt, anorthosite, and carbonates as raw materials in insulation products. *International Geology Review*, 53(8), 894–904. <https://doi.org/10.1080/00206810903233058>

de Boer, I. J. M., & van Ittersum, M. K. (2019).

Circularity in Agricultural production. <https://edepot.wur.nl/470625>

de Boer, M. A., Wolzak, L., & Slootweg, J. C. (2019).

Phosphorus: Reserves, Production, and Applications. In H. Ohtake & S. Tsuneda (Eds.), *Phosphorus Recovery and Recycling* (pp. 75–100). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8031-9_5

European Commission, Directorate-General for Internal Market Industry and Entrepreneurship and SMEs,

Bobba, S., Claudiu, P., Huygens, D., Alves Dias, P., Gawlik, B., Tzimas, E., Wittmer, D., Nuss, P., Grohol, M., Saveyn, H., Buraoui, F., Orveillon, G., Hámor, T., Slavko, S., Mathieux, F., Gislev, M., Torres De Matos, C., ...

Garbarino, E. (2018).

Report on critical raw materials and the circular economy. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2873/167813>

Europese Unie. (2022a).

Een Europese Green Deal. Europese Unie. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_nl

Europese Unie. (2022b).

Farm to Fork strategy. Europese Unie. https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_nl

FAO. (2020).

The State of World Fisheries and Aquaculture 2020 - Sustainability in action. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>

Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019).

Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>

Geerten van der Lugt. (2022).

Terugwinnen nutriënten uit gewasresten is zeer de moeite waard. *Onder Glas*. https://www.ongerglas.nl/terugwinnen-nutriënten-uit-gewasresten-is-zeer-de-moeite-waard/?utm_source=mailpoet&utm_medium=email&utm_campaign=Onder+Glas+Focus+week+48

Gelder, A. de, Warmenhoven, M. G., Kromdijk, J., Meinen, E., Zwart, H. F. de, Stolker, H., & Grootcholten, M. (2012).

Gelimiteerd CO₂ en het nieuwe telen Tomaat (Rapporten GTB : 1159). Wageningen UR Glastuinbouw. <https://edepot.wur.nl/212126>

Glastuinbouw Waterproof. (2022).

Emissieloos telen: Glastuinbouw Waterproof. Glastuinbouw Waterproof. <https://www.glastuinbouwwaterproof.nl/substraat/teelt-en-bemesting/emissieloos-telen/#:~:text=De%20overheid%20en%20de%20sector,zonder%20te%20lozen%2C%20mogelijk%20is.>

Greenport West-Holland. (2021).

Ambitie en Programma Plastics: Naar een verantwoord gebruik van plastics in de glastuinbouw in een circulaire economie.

Greenport West-Holland, Hoogheemraadschap Delfland, Provincie Zuid-Holland, Gemeente Westland, Glastuinbouw Nederland, & Innovatiefonds LTO Noord. (2021).

Toekomstplan Gietwatervoorziening Glastuinbouw. <https://greenportwestholland.nl/wp-content/uploads/2021/10/211004-Toekomstplan-Gietwater-def.pdf>

Jasper Ros. (2022).

DIRECT AIR CAPTURE FOR HORTICULTURE APPLICATION. https://www.kasalsenergiebron.nl/content/research/Rapport_Direct_Air_Capture_E20003_TNO.pdf

Kierkels, T. (2020).

Gereinigd afvalwater waardevolle grondstof voor de tuinbouw. *Onder Glas*. https://www.ongerglas.nl/gereinigd-afvalwater-waardevolle-grondstof-voor-de-tuinbouw/?utm_source=mailpoet&utm_medium=email&utm_campaign=Onder+Glas+Focus+week+52

KNMI. (2021).

Klimaatverandering. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. <https://www.knmi.nl/producten-en-diensten/klimaatverandering>

LTO Nederland. (2022).

Brede maatschappelijke coalitie gaat zich inzetten voor verdere versnelling reductie milieu-impact potgrond en substraten. LTO Nederland. <https://www.lto.nl/brede-maatschappelijke-coalitie-gaat-zich-inzetten-voor-verdere-versnelling-reductie-milieu-impact-potgrond-en-substraten/>

LTO Noord. (2022).

Paddenstoelen. LTO Noord. <https://www.ltonoord.nl/sector/paddenstoelen>

Meststoffen Nederland. (2015).

Productie van minerale meststoffen in Nederland. <https://www.meststoffennederland.nl/MESTNL/media/M/Documenten/Standpunten/Productie-van-minerale-meststoffen-in-Nederland-sept-2015.pdf>

PBL. (2020).

R-ladder - strategieën van circulariteit. Rijksoverheid Voor Ondernemend Nederland. <https://www.rvo.nl/onderwerpen/r-ladder#vragen-over-de-r-ladder%3F>

Raaphorst, M. G. M., & Benninga, J. (2019).

Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw 2019: Kengetallen voor Groenten-, Snijbloemen-, Pot- en perkplanten teelten.

Rainlevelr. (2017).

Rainlevelr. Rainlevelr. <https://rainlevelr.com/>

Rebecca Lindsey. (2022).

Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. NOAA Climate.Gov. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide#:~:text=Carbon%20dioxide%20concentrations%20are%20rising,in%20just%20a%20few%20hundred.>

Rijksoverheid. (2022a).

Nederland circulair in 2050. Rijksoverheid. <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/nederland-circulair-in-2050>

Rijksoverheid. (2022b).

Visie Landbouw, Natuur en Voedsel: Waardevol en Verbonden. Rijksoverheid. <https://www.rijksoverheid.nl/ministeries/ministerie-van-landbouw-natuur-en-voedselkwaliteit/visie-Inv>

- Roger Abbenhuijs. (2018).
 Circulaire glastuinbouw: substraatmat wordt grondstof voor bakstenen. *Onder Glas*. <https://www.underglas.nl/substraatmat-wordt-grondstof-bakstenen/>
- Ruizendaal, J. (2022).
 Plastic clips zijn lastig bij winnen meststoffen uit tomatenblad. *Onder Glas*. <https://www.underglas.nl/plastic-clips-zijn-lastig-bij-winnen-meststoffen-uit-tomatenblad/>
- RVO. (2021).
 Aramis. Rijksoverheid Voor Ondernemend Nederland. <https://www.rvo.nl/onderwerpen/bureau-energieprojecten/lopende-projecten/aramis>
- Sichler, T. C., Adam, C., Montag, D., & Barjenbruch, M. (2022).
 Future nutrient recovery from sewage sludge regarding three different scenarios - German case study. *Journal of Cleaner Production*, 333, 130130. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.130130>
- SIGN. (2020).
 Programma Circulaire tuinbouw 2020-2025.
- SIGN. (2021).
 Biomassa Living Labs: Pro-actief ondernemen met reststromen. Stichting Innovatie Glastuinbouw Nederland. https://www.innovatieglastuinbouw.nl/media/registered_downloads/s/signaal_36_biomassa_living_lab_def_pages.pdf
- Tsafaras, I., Campen, J. B., de Zwart, H. F., Voogt, W., Harbi, A. al, Assaf, K. al, Abdelaziz, M. E., Qaryouti, M., & Stanghellini, C. (2022).
 Quantifying the trade-off between water and electricity for tomato production in arid environments. *Agricultural Water Management*, 271. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107819>
- Unie van Waterschappen. (2022).
 Grondstoffen uit rioolwater krijgen nog te vaak stempel 'afval.' *Unie van Waterschappen*. <https://unievandwaterschappen.nl/grondstoffen-uit-rioolwater-krijgen-nog-te-vaak-stempel-afval/>
- United Nations. (2022).
 THE 17 GOALS | Sustainable Development. United Nations. <https://sdgs.un.org/goals>
- van der Velden, N., & Smit, P. (2019).
 CO₂-behoefte glastuinbouw 2030. <https://research.wur.nl/en/publications/co2-behoefte-glastuinbouw-2030>
- van Iperen International. (2022).
 GREENSWITCH®: DUURZAME NITRAATMESTSTOF UIT DRIJFMEST. <https://www.iperen.com/greenswitch-duurzame-nitratmeststof-uit-drijfmest/>
- van Tuyll, A. (2022).
 Carbon Dioxide Enrichment for Greenhouses in a Decarbonised Future.
- van Tuyll, A., Boedijn, A., Brunsting, M., Barbagli, T., Blok, C., & Stanghellini, C. (2022).
 Quantification of material flows: A first step towards integrating tomato greenhouse horticulture into a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134665. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134665>
- van Tuyll, A., van Peer, A., & Mondaca Duarte, F. (2022).
 Cross-overs in de kringlooplandbouw: Glastuinbouw & Paddenstoelenteelt.
- Wageningen University & Research. (2022a).
 "Club van 100" Glastuinbouw & Bloembollen - WUR. Wageningen University & Research. https://www.wur.nl/nl/landingspagina-redacteuren/nl/onderzoek-resultaten/onderzoeksinstituten/plant-research/glastuinbouw/club-van-100.htm?gclid=CjwKCAiAwc-dBhA7EiwAxPRyIPKt9HMIdnfsn9a5xQLPfw-iGLa3LzMtk1MI2q00mrcQ3toLwf7HyBoCQXUQAvD_BwE
- Wageningen University & Research. (2022b).
 Kennisbasis onderzoek (KB) - WUR. Wageningen University & Research. <https://www.wur.nl/nl/onderzoek-resultaten/onderzoeksprojecten-Inv/expertisegebieden/kennisbasis-onderzoek.htm>
- Watten, B. J., & Busch, R. L. (1984).
 Tropical production of tilapia (*Sarotherodon aurea*) and tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) in a small-scale recirculating water system. *Aquaculture*, 41(3), 271–283. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(84\)90290-4](https://doi.org/10.1016/0044-8486(84)90290-4)

Yara. (2022).

Yara and Linde Engineering agree to build a 24 MW green hydrogen demonstration plant in Norway. Both companies aim to achieve a significant carbon dioxide reduction in the production of fertilizers in Norway.
<https://www.yara.com/corporate-releases/yara-and-linde-engineering-agree-to-build-a-24-mw-green-hydrogen-demonstration-plant-in-norway.-both-companies-aim-to-achieve-a-significant-carbon-dioxide-reduction-in-the-production-of-fertilizers-in-norway/>

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



Wageningen University & Research,
BU Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
www.wur.nl/glastuinbouw

Rapport WPR-1203

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, 6.800 medewerkers (6.000 fte) en 12.900 studenten 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.