



# Inventarisatie van een mogelijke nieuwe bron voor koolzuurgas (CO<sub>2</sub>)

Inzet van oxidatieve bioreactoren voor gecombineerde productie van plantenvoeding en CO<sub>2</sub> uit organische restproducten

Chris Blok, Aat van Winkel en Alexander Boedijn

Rapport WPR-1160

## **Referaat**

Met financiële steun van het programma Kas als Energiebron heeft Wageningen University & Research, business unit Glastuinbouw een desk study gedaan naar de mogelijkheden koolzuurgas uit oxidatieve bioreactoren te gebruiken als koolzuurgasbron voor het bemesten van glastuinbouwgewassen. Oxidatieve bioreactoren worden sinds kort gebruikt om vloeibare plantenvoeding voor de glastuinbouw te produceren. De hierbij vrijkomende CO<sub>2</sub> wordt nog niet voor het gewas gebruikt. In de desk study is onderzocht of het mogelijk is een bioreactor met aangepaste input tegelijk voldoende plantenvoeding en koolzuurgas te laten produceren om te voldoen aan de vraag van een glastuinbouwgewas. Daarnaast wordt besproken wat dit betekent voor de input i.e. hoeveelheden benodigde grondstoffen en bijbehorende transportbewegingen. Tenslotte is er gekeken naar de te verwachten kwaliteit van de gasstroom en de te verwachten problemen bij het toepassen.

## **Abstract**

With financial support from the Greenhouse as Energy Source programme, Wageningen University & Research, business unit Greenhouse Horticulture, conducted a desk study into the possibilities of using carbon dioxide from oxidative bioreactors as carbon dioxide source for fertilising greenhouse crops. Oxidative bioreactors have recently been introduced to produce liquid nutrients for greenhouse horticulture. The CO<sub>2</sub> released is not yet being used for the crop. The desk study investigated if it is possible to make a bioreactor with an adapted input simultaneously produce sufficient liquid fertiliser and carbon dioxide to meet the demand of a crop. In addition, it is discussed what this means for the quantities of required input, i.e. raw materials and associated transport movements. Finally, we looked at the expected quality of the gas flow and the expected problems with its application.

## **Rapportgegevens**

Rapport WPR-1160

Projectnummer: 3742306100

DOI: <https://doi.org/10.18174/574424>

Thema: Water en nutriënten

Dit project/onderzoek is tot stand gekomen door de bijdrage van Kas Als Energiebron.

## **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](http://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

	<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>7</b>
	1.1 Achtergrond interesse in alternatieve koolzuurgasbronnen	7
	1.2 Doelstelling	7
	1.3 Aanpak	8
	1.4 Organisatie	8
	1.5 Bestaande kennis	8
<b>2</b>	<b>Onderzoek ingangsmateriaal</b>	<b>11</b>
	2.1 Overzicht organische reststromen in Nederland	11
	2.2 Voorbewerking van input voor oxidatieve bioreactoren	12
	2.3 Beschikbaarheid van organische reststromen in Nederland	14
<b>3</b>	<b>Combineren van inputs tot oplossingen</b>	<b>15</b>
	3.1 Aanbodmodule, basisinformatie van de inputs	17
	3.2 Vraagmodule, basisinformatie van gewas en teelt	18
	3.3 Balansmodule, afstemmen van aanbod en vraag	18
	3.4 Mengmodule, berekenen optimale input mengsel	18
	3.5 De rol van slib	18
	3.6 Distributiemodules, transport en brandstofverbruik	19
<b>4</b>	<b>Pakket van Eisen</b>	<b>21</b>
	4.1 Eisen aan de inputs	21
	4.2 Eisen aan de output van plantenvoeding en gas	22
	4.2.1 Maximale gehalten voor gasvormige bijproducten	22
	4.2.2 Benodigde verhoudingen plantenvoedingselementen	25
	4.2.3 Aanvoer concentratie koolzuurgas voor de kas	25
	4.2.4 Overeenkomsten en verschillen met digestaatgassen	26
	4.3 Eisen vanuit de techniek	26
	4.3.1 Omvang installatie	26
	4.3.2 Beheer van de installatie	27
	4.3.3 Bedrijfszekerheid van de installatie	27
	4.3.4 Energieverbruik van de installatie	27
	4.3.5 Ophopen van slib (conversieresten)	27
<b>5</b>	<b>Distributie, omvang van aan- en afvoer</b>	<b>29</b>
	5.1 Transport volumes en gerelateerde koolzuurgas emissie	29
	5.2 Verschuivingen in de organische restproductenmarkt	29

<b>6</b>	<b>Conclusies</b>	<b>31</b>
6.1	Conclusies	31
6.1.1	Technische haalbaarheid van de reactor	31
6.1.2	Beschikbaarheid van de inputs en maatschappelijke diensten	32
6.1.3	Energetische en koolzuurgasdoelstellingen	32
6.1.4	Veiligheid en samenstelling van de geproduceerde gassen	33
6.1.5	Tot slot	33
6.2	Keuze gecombineerde of gescheiden bioreactoren	33
	<b>Literatuur</b>	<b>35</b>
	<b>Bijlage 1 Organische reststromen in Nederland</b>	<b>37</b>
	<b>Bijlage 2 Modules voor aanbod, vraag en mengen van organische reststromen</b>	<b>45</b>
	<b>Bijlage 3 Gaskwaliteiten</b>	<b>53</b>
	<b>Bijlage 4 Voedingsrecepten komkommer, tomaat, roos.</b>	<b>57</b>
	<b>Bijlage 5 Gasanalyses door DNV dd 2022 03 09</b>	<b>59</b>

# Samenvatting

Voor het programma Kas als Energiebron heeft Wageningen University & Research, business unit Glastuinbouw een desk study gedaan naar de mogelijkheden koolzuurgas uit oxidatieve bioreactoren te gebruiken als koolzuurgasbron voor het bemesten van glastuinbouwgewassen.

In hoofdstuk 2 is een overzicht gegeven van beschikbare organische reststoffen die als input kunnen dienen voor een oxidatieve bioreactor. In hoofdstuk drie is een model gemaakt om uit te rekenen welke inputs in welke verhoudingen kunnen worden gebruikt om na verwerking in een oxidatieve bioreactor tegelijk een gewenste samenstelling van macro-elementen en voldoende koolzuurgas te leveren voor een specifiek gewas. In hoofdstuk vier is ingegaan op de te verwachten kwaliteit van de gassen uit de oxidatieve bioreactor en op de zeldzamere kans op afwijkende gassen en hoe daarmee om te gaan. In hoofdstuk 5 tenslotte wordt voorgerekend hoeveel transportbewegingen nodig zijn als de Nederlandse tuinbouw al zijn koolzuurgas/meststoffen op deze manier zou betrekken.

De conclusie is dat het mogelijk is met een oxidatieve bioreactor tegelijk plantenvoeding en koolzuurgas te produceren in ongeveer de juiste verhoudingen. Hierbij moeten dan 2-4 verschillende inputstromen gemengd worden, meestal een stikstofrijke, een kaliumrijke en een koolstofrijke stroom.

De gasvormige output van de reactor bevat maximaal 6000-7000 ppm koolzuurgas en is verzadigd met waterdamp. Deze waterdamp vertegenwoordigt (bij gelijktijdige winning van koolzuurgas) een hoeveelheid van 100 L/m<sup>2</sup>/jaar. Voor directe toepassing zal deze waterdamp grotendeels verwijderd moeten worden. Daarbij vertegenwoordigt de waterdamp een hoeveelheid energie die overeenkomt met 10 m<sup>3</sup> gas per m<sup>2</sup> kas. Deze energie kan grotendeels worden teruggewonnen door condensatie of door koelen van de reactor. Warmteterugwinning gecombineerd met het nauwkeuriger inbrengen van zuurstof in de reactor maakt het mogelijk de concentratie van koolzuurgas in de output op te voeren tot 8-10% wat voor de verdeling in de kas van praktisch belang is.

Rekening houdend met een grotere efficiency van koolzuurgasgebruik komt de productie uit op 1 Mton koolzuurgas per jaar. Het aantal transport bewegingen daarbij wordt gechat op 50.000 per jaar. De energiebehoefte voor transport omgerekend naar koolzuurgasequivalenten is 5.9 kton/jaar. Dit is 0.9 % van de 1.0 Mton opgewekt circulaire koolzuurgas bij dit scenario.

De benodigde hoeveelheden input voor de bioreactoren, zijn in de markt aanwezig als restmaterialen, maar de vraag bij productie van 1 Mton koolzuurgas in combinatie met de benodigde meststoffen zal op basis van droge stof in het product na composteren / digesteren 15-25% van de totale markt bedragen. De meest gunstige reststofstromen (bijvoorbeeld champost) zullen in zijn geheel opgebruikt worden. Dat betekent dat in de markt voor restproducten behoorlijke verschuivingen optreden, mogelijk ten koste van de akkerbouw.

Overigens is op veel punten uitgegaan van een volledige overschakeling naar koolzuurgas uit bioreactoren, terwijl het realistischer is uit te gaan van een basis hoeveelheid koolzuurgas uit een bioreactor. De dynamiek van de plantvraag kan dan deels worden opgevangen met koolzuurgas uit andere bronnen.

Er wordt aanbevolen over te gaan tot onderzoek met een pilotopstelling voor een semigesloten moderne kas met warmtewinning uit een bioreactor. De afdelingsgrootte is van ondergeschikt belang zolang reactor output van koolzuurgas en plantenvoeding nauwkeurig gevolgd kan worden.



# 1 Introductie

## 1.1 Achtergrond interesse in alternatieve koolzuurgasbronnen

De glastuinbouw staat voor een grote uitdaging rond het borgen van de beschikbaarheid van CO<sub>2</sub> voor de optimale gewasgroei en duurzame productie (Sleegers, 2020). De leveringszekerheid van het huidige distributiesysteem staat ter discussie. Daarbij werkt het huidige stelsel van CO<sub>2</sub>-emissierechten in de hand dat CO<sub>2</sub> uitstotende bedrijven in de nabije toekomst hun CO<sub>2</sub> in de diepe ondergrond zullen gaan injecteren (Anonymous, 2021). Ook kan de transitie naar een circulaire economie er op termijn toe leiden dat er geen industriële bedrijvigheid meer zal zijn die voldoende CO<sub>2</sub> als restproduct kan leveren aan de glastuinbouw (Sleegers, 2020). Tegelijk zal op termijn de CO<sub>2</sub>-voorziening uit rookgassen van WKK's en ketels wegvallen als de fossiele brandstof geleidelijk wordt vervangen door energiebronnen zonder CO<sub>2</sub>-emissie (Peeters *et al.* 2013).

Sinds enkele jaren zijn er oxidatieve bioreactoren op de markt voor het produceren van vloeibare meststoffen voor gebruik in druppelirrigatie (Opure, 2020; Lab, 2021; van Wijk and Blok 2021; Voogt, 2021). Deze oxidatieve bioreactoren verteren organische reststoffen (denk aan hoorn, leer, dierlijke mest en algen) en leveren een helder vloeibare output met daarin de voedingselementen als ionen. Tegelijk leveren oxidatieve bioreactoren ook koolzuurgas. Tot nu toe wordt het koolzuurgas in de buitenlucht geloosd. In dit project wordt met een desk study verkend of dit koolzuurgas te gebruiken is als koolzuurgasbemesting in de glastuinbouw.

## 1.2 Doelstelling

Het doel is te verkennen of de CO<sub>2</sub> behoefte van de glastuinbouw kan worden ingevuld door een systeem waarin een nieuw type on-site oxidatieve bioreactor een additionele rol krijgt als lokale bron voor CO<sub>2</sub> bemesting. In deze bioreactoren produceren aerobe micro-organismen voor de tuinbouw bruikbare meststoffen uit organische reststromen (de input / feed / feedstock voor de micro-organismen). Door het bijvoeden met laagwaardige reststromen met een hoog koolstofgehalte kan mogelijk bruikbare CO<sub>2</sub> geproduceerd worden op de bedrijven. Deze oplossing past bij de verduurzaming van de glastuinbouw en de ontwikkeling naar een circulaire economie.

### **Energiedoelstellingen**

- Dit project draagt bij aan de instandhouding van de CO<sub>2</sub> voorziening. Het draagt bij aan de reductie van het primaire energieverbruik doordat het de z.g. zomerstook kan beperken.
- Dit project is relevant voor alle teeltbedrijven die CO<sub>2</sub> bemesting toepassen.
- Een motief voor de toepassing van de resultaten uit dit project is dat het bijdraagt aan het zekerstellen van de CO<sub>2</sub> voorziening. De belemmeringen liggen in het gegeven dat er nog veel moet worden uitgezocht hoe dit technisch moet worden ingericht.

### **Nevendoelestellingen**

- In de nabije toekomst zullen grote afnemers aan de Nederlandse tuinbouw de vraag gaan stellen of onze producten wel passen in de nieuwe circulaire samenleving. Het gebruik van CO<sub>2</sub> uit zijstromen van de dierhouderij maakt dat de glastuinbouw een upcycling circulair systeem wordt, dat de waardevolle zijstroom CO<sub>2</sub> van andere agrarische bedrijvigheid kan verwaarden door het vast te leggen in producten. Daardoor past de glastuinbouw beter bij de circulaire economie, waardoor de "license to operate" wordt versterkt.

## 1.3 Aanpak

In deze verkennende studie wordt op basis van literatuur als eerste stap een overzicht gemaakt van de beschikbare organische reststromen in Nederland. Dit overzicht wordt uitgebreid met de nodige conversies van versproduct naar potentiële kilogrammen koolzuurgas. Met deze gegevens wordt in een tweede stap een bestaand mengmodel voor potgronden aangepast om deze materialen te mengen. De mengverhouding wordt in balans gebracht met de gemiddelde plantbehoefte, op zo'n manier dat tegelijk een gewenst voedingsrecept en een gewenste koolzuurgashoeveelheid worden geproduceerd. In een derde stap wordt een programma van eisen opgesteld voor de kwaliteit van de voeding en het koolzuurgas. In de vierde en laatste stap wordt berekend wat de transport bewegingen zijn die de Nederlandse tuinbouw zou genereren bij gebruik van bioreactoren voor het produceren van koolzuurgas.

## 1.4 Organisatie

Het projectvoorstel is opgesteld door Wouter Verkerke, Alexander Boedijn en Chris Blok van Wageningen University & Research, Glastuinbouw. Het project is opgezet en uitgevoerd door Chris Blok met hulp van Geert Franken, Martine Brunsting, Marta Streminska, Aat van Winkel en Barbara Eveleens van Wageningen University & Research, Glastuinbouw. Vanuit van der Knaap Groep was Karel de Bruijn de trekker. Vanuit OCAP waren André van der Linden en Jacob Limbeek betrokken. Het project is voor Kas als Energiebron begeleid door Dennis Medema.

## 1.5 Bestaande kennis

### **Borging van de CO<sub>2</sub> voorziening**

De borging van de CO<sub>2</sub> voorziening krijgt al langer aandacht. Er is gekeken naar houtstook, afvalverbranding, CO<sub>2</sub> uit de buitenlucht halen, biogas en het transport per schip (Medema, 2020; Slegers, 2020). Het is duidelijk dat de sector zich moet oriënteren op nieuwe bronnen om de CO<sub>2</sub> voorziening in stand te houden. Wij suggereren hierbij een nieuwe grote bron, die een circulaire oplossing biedt voor het lokaal, op het bedrijf produceren van CO<sub>2</sub>. Dit kan door een nieuw type bioreactoren, die organische meststoffen als input gebruiken en deze geschikt maken voor de glastuinbouw, ook in te gaan zetten voor de CO<sub>2</sub> voorziening. Deze bron lijkt op het al in ontwikkeling genomen gebruik van afgassen van vergistingsinstallaties (Pals-Lammers e.a., 2016). Overeenkomsten tussen vergisters en oxidatieve bioreactoren zijn de input van organische restproducten, de lage werkingstemperatuur en het gebruik van micro-organismen om de gewenste omzettingen uit te voeren. Verschillen tussen vergisters en oxidatieve bioreactoren zijn dat vergisters onder anaerobe omstandigheden afgassen leveren met daarin CH<sub>4</sub> en H<sub>2</sub> i.e. veel energie uit de input zit nu in de afgassen. Oxidatieve bioreactoren verbranden de input bij lage temperaturen veel vollediger (minder restmateriaal) maar het afgas bevat CO<sub>2</sub> en is daarmee energiearm. Het energieverval tussen de input en de afgassen moet ergens blijven, en oxidatieve bioreactoren worden dan ook veel warmer dan vergisters. Deze warmte wordt tot nu toe afgevoerd in de vorm van waterdamp.

### **Nieuwe bioreactoren voor de output van meststoffen**

Het idee om met een bioreactor voor de hightech glastuinbouw bruikbare meststoffen te produceren uit zijstromen van andere agrarische productiesystemen is door WUR ontwikkeld (Blok *et al.* 2017a; Blok *et al.* 2017b). Het gaat hier om een nieuwe type bioreactor dat gebruikt maakt van een aerob proces: er moet zuurstof (in lucht) ingebracht worden. Hierin verschilt het, zoals hierboven al toegelicht, van anaerobe vergisters (Peeters *et al.* 2013). De gebruikte bacteriën zijn afkomstig uit een 'gewone' afvalwaterzuiveringsinstallatie. Deze blijven in het vat omdat ze zich hechten aan kunststof dragers met een groot oppervlakte en minimale weerstand voor de doorstroming. De bacteriën houden zichzelf in stand zolang de input, temperatuur en pH optimaal blijven. Dit idee is opgepakt door verschillende commerciële partijen. Van der Knaap Group heeft met partners OPURE en TRIAQUA inmiddels eigen bioreactoren ontwikkeld en geplaatst voor enkele bedrijven in Canada en Nederland voor max 4 hectare vruchtgroenten (Van der Knaap, 2021). Deze reactoren zijn tot 10 m<sup>3</sup> groot.



### **Deze bioreactoren kunnen ook CO<sub>2</sub> leveren**

In het kennisbasisproject "Circulaire Glastuinbouw" van WUR zijn in 2020 de knelpunten geanalyseerd die de transitie naar circulariteit in de weg staan (van Tuyl e.a., 2022). In discussies tussen onderzoekers van verschillende disciplines werd geopperd dat de nieuwe bioreactoren voor de productie van circulaire meststoffen ook nieuwe kansen kunnen gaan bieden om de CO<sub>2</sub> voorziening voor de glastuinbouw te gaan verzorgen. Op dit moment wordt in de reactoren een stikstofrijk materiaal van dierlijke oorsprong gebruikt als bron voor de stikstofmeststof. Maar omdat in dit aerobe proces verschillende aanvoerstromen, met verschillende C:N verhoudingen, tegelijk verwerkt kunnen worden, kan de output aan koolzuurgas (C) en nitraat (N) via die aanvoer onafhankelijk van elkaar gestuurd worden. De CO<sub>2</sub> verlaat het systeem als gas, onafhankelijk van de afvoer van nitraat in water. Er komt dus veel CO<sub>2</sub> vrij bij dit proces, dat nu de lucht in wordt geblazen. Door de input van de reactor te modificeren kan de CO<sub>2</sub> output onafhankelijk van de nitraat/voedingsstroom opgevoerd en gestuurd worden. Het is verder de verwachting, van WUR-onderzoekers, dat in dit efficiënte aerobe proces veel minder stikstof als ammonia of NO<sub>x</sub> vervluchtigt (juist door de vollediger oxidatie) dan bij composteren of anaerobe omzetting, wat positief is voor de duurzaamheid.

### **Om hoeveel gaat het?**

De geprognostiseerde CO<sub>2</sub>-behoefte van de glastuinbouw in 2030 in de situatie zonder aardgas loopt uiteen van 1,8 tot 3,0 Mton, afhankelijk van het gekozen scenario (Van der Velden & Smit, 2019, 2020). Onze eigen berekeningen schatten de huidige behoefte op 2.0 Mton (Blok & Brunsting). Deze twee prognoses stemmen ongeveer overeen. Onze eerste berekeningen tonen aan dat de reactor, puur op mestoverschot uit de dierhouderij al 20-25 % van de CO<sub>2</sub> behoefte van een kas voor zijn rekening zou kunnen nemen, terwijl door het bijvoeden met andere bronnen hij in principe zowel voldoende meststoffen als voldoende CO<sub>2</sub> zou moeten kunnen leveren. Daarnaast heeft een eerste inventarisatie opgeleverd dat er in Nederland mogelijk 10x de hoeveelheid aan geschikte zij-stromen uit dierhouderij beschikbaar is om in de geprognostiseerde toekomstige CO<sub>2</sub> vraag te voorzien. Deze hoeveelheden zijn hoger dan eerder werd berekend voor anaerobe vergisting van biomassa (Peeters *et al.* 2013). In het onderzoek beschreven in dit verslag worden die hoeveelheden nogmaals kritisch besproken, zowel qua werkelijk beschikbare droge massa als qua leverzekerheid over de langere termijn. De markt voor restmaterialen is tenslotte sterk in beweging.



## 2 Onderzoek ingangsmateriaal

### 2.1 Overzicht organische reststromen in Nederland

Het is lastig dat er geen uniform overzicht is van de in Nederland verwerkte organische reststromen en dat bestaande bronnen niet zelden verschillen in door hen beschreven stromen. In Tabel 1 staan de belangrijkste door ons achterhaalde stromen en in Bijlage 1 staat eerst een verdere specificering en onderbouwing van Tabel 1, gevolgd door enkele opgaven uit andere bronnen.

Tabel 1

*Jaarlijks beschikbare organische stofstromen in Nederland uit verschillende bronnen met conversie van versgewichten naar droge stof gewichten, prijs en potentiële CO<sub>2</sub> productie per ton en per jaar voor Nederland.*

Bron	Beschikbaar-	Beschikbaar-	Prijs	Potentie CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> potentie
	heid in NL	heid in NL			bij huidige
	Ton/jaar	(ton DS /jaar)	€/ton	kg/ton	beschikbaarheid
		Ton DS/jaar			M kg/jaar
Dunne rundermest	7400000*	680800	-15	101	749
Dunne varkensmest	8800000*	968000	-15	92	809
Pluimveemest & overig	1160000*	174000	-15	143	166
GFT afval als compost	1297000	907900	-30	216	280
Champost	780000	261300	0	300	234
Plantresten tuinbouw	220000	88000	-30	411	90
Grasafval voorjaar	200000	80000	0	446	89
Grasafval najaar	300000	99000	0	329	99
Houtige massa fruitteelt/boomteelt	200000	100000	0	900	180
Groenafval bebouwde omgeving	670000	335000	0	513	344
Veilingafval	125000	50000	-30	411	51
Stro	1100000	935000	150	1374	1512
Diermeel	90000	87750	-90	1476	133
Korrelmaisstengels en kolven	512000	329728	30	614	314
Aardappelstoomschillen	450000	360900	20	1151	518
Aardappelpersvezels	395000	225150	36	818	323
Bierbostel	500000	218000	50	607	304
Totaal	24199000	5900528			6195
Totaal in Mton/jaar	24	5.9			6.2

NB1 Details en bronnen in de Bijlagen Tabel B1.1.c en B1.2.

\* De genoemde mesthoeveelheden zijn de getransporteerde hoeveelheden, niet de totaal geproduceerde hoeveelheden (want daarvan wordt het grootste deel op eigen bedrijf aangewend). De totale hoeveelheden zijn volgens CBS, 2019, rep 63, 19 en 1.5 Mton voor dunne rundermest, dunne varkensmest en pluimveemest en overig.

De eindwaarden in Tabel 1 zijn gebaseerd op conservatieve aannamen voor met name de gehalten droge stof en koolstof in de organische stof. De verwachting van deze onderzoekers is daarom dat de werkelijk in Nederland beschikbare hoeveelheid organische reststoffen uitgedrukt in koolzuurgas equivalenten uiteindelijk rond de 10 Mton/jaar zal liggen.

Deze hoeveelheden zijn niet uitsluitend beschikbaar voor het produceren van CO<sub>2</sub>, al of niet gecombineerd met het produceren van plantenmeststoffen. In Tabel 2 wordt getoond waar deze materialen nu voor gebruikt worden. Er is dus concurrentie tussen de waarden als veevoer, meststof akkerbouw, biogas en bodemverbeteraar/groeimedium. Daar worden vloeibare meststoffen en koolzuurgasproductie nu aan toegevoegd.

Tabel 2

Jaarlijks beschikbare organische stofstromen in Nederland uit verschillende bronnen met het hoofdgebruik op dit moment. Daarnaast nog het beschikbare droge stof gewichten en de potentiële CO<sub>2</sub> productie per ton.

Bron	Nu ingezet voor	Beschikbaar	Potentie CO <sub>2</sub>
		Ton DS/jaar	kg/ton
Dunne rundermest	Biogas, uitrijden P- en N- arme gebieden	680800	101
Dunne varkensmest	Biogas, uitrijden P- en N- arme gebieden	968000	92
Pluimveemest & overig	As als grondstof kunstmest	174000	143
GFT afval als compost	Compostering, vergisting	907900	216
Champost	Bodemverbeteraar	261300	300
Plantresten tuinbouw	Compostering	88000	411
Grasafval voorjaar	Laagwaardige compost	80000	446
Grasafval najaar	Compost	99000	329
Houtige massa fruitteelt/boomteelt	Laagwaardige compost	100000	900
Groenafval bebouwde omgeving	Compost	335000	513
Veilingafval	Laagwaardige compost	50000	411
Stro	Stalvloerbedekking, 2 <sup>e</sup> generatie biodiesel	935000	1374
Diermeel	Veevoer, meststoffen	87750	1476
Korrelmaisstengels en kolven	Veevoer	329728	614
Aardappelstoomschillen	Veevoer	360900	1151
Aardappelpersvezels	Veevoer	225150	818
Bierbostel	Veevoer, vergisting	218000	607

## 2.2 Voorbewerking van input voor oxidatieve bioreactoren

Voor de verwerking in een oxidatieve bioreactor moet het materiaal voorbereid worden. Aangezien de afbraak in de reactor voornamelijk verloopt door bacteriële afbraak, moet zo nauw mogelijk aangesloten worden bij de levenswijze van deze bacteriën.

### Voordrogen

Het te verwerken materiaal wordt meestal vooraf gedroogd om efficiënt te kunnen worden vervoerd en om door malen of andere bewerkingen op de juiste grootte gebracht te worden.

### **Kleine deeltjes/malen**

In de bioreactor wordt gewerkt in een vloeibare omgeving. Het aangevoerde materiaal moet dus klein genoeg zijn om door roeren door de gehele reactor verspreid te worden. Daarnaast bevinden de meeste bacteriën zich op (kunststof)dragers. De dragers bieden het voordeel van een groot oppervlakte en het behoud van de actieve bacteriemassa bij afvoer van de eindoplossing. De vertering door de bacteriën vindt plaats door exudatie van enzymen die de aangevoerde input verteren. Omdat deze enzymen voornamelijk aan de oppervlakte van de deeltjes aangrijpen, is het van belang dat de deeltjes zo min mogelijk dikte hebben. Daarom wordt de aangeboden organische stof gemalen tot deeltje van minder dan 100 micrometer diameter. Ter vergelijking heeft een bacterie zelf een diameter van 1-5 micrometer.

### **Hydrolyse/enzymen**

Voor het verteren van verbindingen met stikstof, zwavel en fosfor is het nodig complexe moleculen op te splitsen in kleinere moleculen die door bacteriën omgezet worden. Juist de omzetting van stikstof uit eiwitten naar nitraat is de belangrijkste stap in het produceren van vloeibare organische meststoffen. De stikstofrijke biomassa wordt hiertoe eerst verkleind (gemalen) en daarna met enzymen voorbereid, waarbij hydrolyse van eiwitten in aminozuren plaatsvindt. Deze aminozuren kunnen door de celwand van de bacteriën en het stikstofdeel wordt gebruikt om te verbranden tot nitraat. Deze specifieke omzetting vraagt om een pH venster tussen 6 en 7. Bij lagere pH verloopt de omzetting veel minder efficiënt en bij hogere pH zal een deel van de gevormde ammonium verluchtingen als  $\text{NH}_3$ .

### **Verontreinigingen/uitzeven**

Onverteerbare delen zoals klei en zand hopen op in de reactor en verstoren het bacteriële proces terwijl ook de afvoer leidt tot extra kosten. Het is daarom vaak nodig materialen vooraf te zeven en/of spoelen.

### **Ophoping van elementen/natrium**

De bacteriën in de reactor werken het best bij een temperatuur van 25-35 graden Celsius, een pH van 6-7, een zuurstofgehalte van 8-20 mg/L en een EC van 1.0-3.8 dS/m. Binnen die EC-grenzen is het belangrijk dat er een goed evenwicht is tussen de elementen. Met name van natrium is bekend dat het kan ophopen in de reactor waardoor de activiteit van de bacteriën terugloopt. Het maximale gehalte in de reactor is 8 mmol/L terwijl het maximale gehalte in de input 6 mmol/L is maar bij voorkeur zo laag mogelijk moet blijven. Daarnaast, en eigenlijk belangrijker, verdragen planten geen hoge natriumgehalten en hoopt natrium, door de lage opname van de planten, gemakkelijk op in de wortelomgeving. Tomaten verdragen een aanvoer van 1 mmol/L, paprika 0.5 mmol/L maar roos slechts 0.1 mmol/L (niet te verwarren met de maximale gehalten na accumulatie die ze verdragen voor er schade optreedt; deze gehalten zijn voor tomaat 17 mmol/L, paprika 12 mmol/L en roos 1-4 mmol/L).

### **Sporenelementen**

Naast de sporenelementen voor planten, hebben bioreactoren ook sporenelementen nodig voor het functioneren van de micro-organismen (Jiang, 2006; Brock, 2019). Van anaerobe bioreactoren is bekend dat ze kobalt, nikkel, wolframeen en molybdeen nodig hebben. Voor oxidatieve bioreactoren worden ook vanadium en selenium genoemd (naast de al voor de plant nodige Fe, Mn, Zn, Cu, B).

## 2.3 Beschikbaarheid van organische reststromen in Nederland

### Energie

Veel van de huidige bronnen kennen een negatieve prijs. De negatieve prijs komt vaak tot stand omdat ze concurreren met energiedragers als kolen, olie en veen. De bodemprijs voor veen was 15 Euro/m<sup>3</sup> met 30%w/w water. Dat watergehalte is belangrijk want het drogen van het materiaal voor het een oven in mag, komt bij de kosten en wordt daarom afgetrokken van de waarde. Ook de vervoerskosten worden verrekend. Zodoende is bijvoorbeeld de prijs voor bermgras negatief. Het gebruik van olie, gas en kolen wordt echter afgebouwd, omdat deze worden gezien als de hoofdoorzaak van de opwarming van de aarde. Het gebruik van veen voor de energieproductie is al verboden. Er wordt daarom verwacht dat de energieprijzen langzaam zal stijgen (september 2021). Bovendien zal bij het wegvallen van olie, gas en kolen gezocht worden naar alternatieve materialen en dat kunnen zoals nu algemeen verwacht, alleen maar biobased alternatieven zijn (Strenger and Elzenga, 2020). De vraag naar biomassa zal daarom in de komende 10 jaar 2-6 maal groter worden waardoor de prijzen van de materialen in Tabel 1 al snel op kunnen lopen en positief worden. Er zal dus een grotere concurrentie ontstaan rond het gebruik van organische restmaterialen.

### Veevoer

Het gebruik van met name mais, aardappelresten en bierborstel als veevoer wordt hier niet verder besproken. De mogelijk aanstaande veranderingen in de veeteelt zouden tot een kleiner areaal snijmais kunnen leiden en een overschot aan aardappelresten en bierborstel. Aardappelresten en bierborstel passen op zich goed als input voor oxidatieve bioreactoren.

### Organische meststoffen

Een tweede economische verschuiving met grote gevolgen voor de benodigde biomassa is het verlaten van het gebruik van lineaire niet duurzame meststoffen. Het gebruik van lineaire meststoffen leidt tot ophoping in het wereldwijde milieu en een enorme afname in soorten planten en dieren. Daarnaast veroorzaakt het Haber-Bosch procedé om ammoniak te produceren 2-3% van de huidige wereld koolzuurgas emissie. Als de nutriëntenbehoefte van landbouw en tuinbouwgewassen uit organische resten moeten komen, zal de vraag naar biomassa, net als voor energiedoelinden, enorm toenemen. Vanuit oogpunt van milieu-effectiviteit zijn stikstof en fosfaat de twee belangrijkste elementen. De emissies van stikstof en fosfaat zijn op dit moment het meest destructief voor kwetsbare ecosystemen en soorten.

### Bodemverbeteraar en groeimedia

Zowel in Nederland als wereldwijd neemt de waardering en aandacht voor het verhogen van organische stofgehalte in de bodems toe. Naast het vasthouden van water en plantenvoeding zorgt de organische stof ook voor een veel diverser bodemleven waardoor de kansen voor bepaalde ziekten afnemen.

Wat betreft groeimedia wordt er voorzichtig gebruik gemaakt van houtige composten. Voor groeimedia worden dus vrijwel uitsluitend composten van grove snoeiresten gebruikt. De kwalitatief voor professionele substraatteelten veel slechtere composten van met GFT gemengd materiaal worden vooral in de akkerbouw en consumentenmarkt gebruikt.

### Conclusies

Concluderend geldt dat de toekomstige vraag naar biomassa waarschijnlijk enkele malen groter zal zijn dan het aanbod. Er zal dus concurrentie ontstaan waarbij de tuinbouw de beste kansen heeft omdat ze veel hogere prijzen voor meststoffen kan betalen dan de akkerbouw of de energiesector. Er zijn daarbij ook constructievere kansen voor de tuinbouw omdat door de grotere financiële slagkracht ook grondstoffen bereikbaar zijn die veel voorbewerking of hoofdbewerking vragen.

Moeilijker is het nu al aan te geven welke grondstoffen voor de tuinbouw interessant zullen blijven. In elk geval zal er behoefte zijn aan grote organische stikstofbronnen. Als er daarnaast ook koolzuurgas gedoseerd wordt via een oxidatieve bioreactor, zal er een tweede stroom nodig zijn met een relatief hoog gehalte aan koolstof ten opzichte van de andere elementen. Voor stikstof zou gedacht kunnen worden aan deels gedigesteerde dunne mestfracties. Als koolstofbron kan gedacht worden aan riet en gras uit natuurgebieden

### 3 Combineren van inputs tot oplossingen

In Bijlage 2 wordt het voor dit project ontwikkelde "Mengmodel voor koolzuurgas en plantenvoeding" getoond. In dit hoofdstuk wordt het model in woorden beschreven. Tabel 3 geeft een overzicht van de aparte Tabellen binnen het "Mengmodel voor koolzuurgas en plantenvoeding" en de functie van die Tabellen. In de paragrafen hieronder wordt het principe verder beschreven.

Tabel 3

*De namen van de Tabellen binnen het "Mengmodel voor koolzuurgas en plantenvoeding" en een beschrijving van hun functie.*

Tabeltitel	Beschrijving van de functie
1. Basisdata organische restproducten	Grondstoffen invulvel = data van de grondstoffen
2. Mineraal potentie	De totale gemeten inhoud aan elementen en koolstof
3. Beschikbare mineralen	De beschikbare inhoud aan elementen en koolstof
4. Vraag vanuit het gewas	De vraag van een bepaald gewas naar elementen en koolstof
5. Berekening beste aanvoermengsel	Voor een vooraf ingesteld aantal dagen wordt met een "solver" functie berekend welk mengsel van beschikbare organische restproducten het beste voorziet in de aanvoer van alle elementen en koolzuurgas.
6. Transportbehoefte	Voor de uitgerekenende optimale combinatie van restproducten wordt uitgerekend hoeveel hiervan nodig is voor een vrij in te stellen areaal. Soms wordt meer van een reststof gevraagd dan er in Nederland aanwezig is. Het aantal transportbewegingen wordt uitgerekend voor een bepaalde grootte van de vrachtwagens.
7. Koolzuurgas transport	De met het transport samenhangende hoeveelheid koolzuurgas uitstoot wordt uitgerekend voor een in te stellen gemiddelde vervoersafstand en brandstofverbruik.

Tabel 3a-3d tonen een vereenvoudigd voorbeeld van het model. Tabel 3a berekent het voedingsaanbod vanuit drie verschillende restproducten. Tabel 3a toont eerst de, in literatuur gevonden, gehalten N, K en C in de drie verschillende partijen restproduct. Na enkele conversies worden de gehalten uitgedrukt in mol per ton droge stof. In het model wordt er met meer dan 3 elementen gerekend en kan er rekening gehouden worden met een minder dan totale beschikbaarheid van sommige elementen. Ook kunnen er meer dan drie restproducten tegelijk geëvalueerd worden.

Tabel 3a

*De gehalten N, K en C in leermeel, riet en digestaat, uitgedrukt in gewichtsprocenten van de droge stof en in mol per ton droge stof. De mol massa's zijn gebruikt voor de omrekening van gewicht naar mol.*

INPUT	Ton DS	N	K	C	N	K	C
		%w/w	%w/w	%w/w	mol/ton	mol/ton	mol/ton
Molmassa in g					14	39	12
Leermeel	1	10	2	30	7143	513	25000
Riet	1	0.5	0.5	45	357	128	37500
Digestaat	1	1	8	35	714	2051	29167

Tabel 3b berekent de vraag van een gewas naar N, K en C. In dit geval is tomaat als gewas gekozen.. Vanuit uit literatuur bekende waarden voor verdamping en opnameconcentratie wordt, na weer een aantal conversies, de opname van het gewas in mol/ha/d of kg/ha/d gevonden. Het model is zo opgezet dat de teelt voor allerlei gewassen desnoods per dag doorgerekend kan worden, omdat de vraag van een gewas sterk fluctueert met teelt, klimaat en teeltfase.

Tabel 3b

De opname van N, K en C door een tomatengewas in mol per ha per dag voor N en K en in kg per ha per dag voor koolstof (gemiddeld over de teeltduur). De opname van water en plantenvoeding komt uit voedingsonderzoek (De Kreij e.a., 1999).

Tomaat	Ton DS	N	K	C
		%w/w	%w/w	%w/w
Molmassa	g/mol	14	39	12
Opname	mmo/L	10	6	
Opname	L/m <sup>2</sup> /j	800	800	
Opname	mmol/m <sup>2</sup> /j	8000	4800	35
Teeltduur	d	360	360	360
Opname	mmol/m <sup>2</sup> /d	22	13	
Opname CO <sub>2</sub>	kg/m <sup>2</sup> /j			20
Opname C-CO <sub>2</sub>	kg/m <sup>2</sup> /j			5.5
Opname C-CO <sub>2</sub>	g/m <sup>2</sup> /d			15
Opname	mol/ha/d	222	133	
Opname	kg/ha/d			152

In Tabel 3c en 3d wordt de vraag van het gewas (uit Tabel 3b) gekoppeld aan een aanbod uit de drie restproducten. Hierbij kunnen de startgewichten in Tabel 3c voor elk restproduct onafhankelijk gewijzigd worden, net zolang tot in de onderregel van Tabel 3d voor N, K en C ongeveer dezelfde waarde verschijnt. Deze procedure om aanbod en vraag overeen te laten komen heet matching. In dit voorbeeld gebeurt het matchen door handmatig de juiste combinatie van hoeveelheden restproducten op te zoeken (itereren). In het model gebeurt dit automatisch met een functie die "Solver" heet.

Tabel 3c dient dus als input voor de te gebruiken hoeveelheden van de drie restproducten voor een in Tabel 3d te vinden aantal dagen. In het model kan het aantal dagen waarvoor voeding nodig is eerst worden gekozen als een te bereiken doel. In praktijk wordt ook zo gewerkt; met een gelijke input voor 7 of 14 dagen.

Tabel 3c

De optimale input in ton droge stof van leermeel, riet en digestaat om te voorzien in de behoefte van een tomatenteelt voor N, K en C in mol per ha voor 48 dagen (C ook in kg/ha).

INPUT	Ton DS	N	K	C	N	K	C	C
		%w/w	%w/w	%w/w	mol	mol	mol	Kg
Molmassa in g					14	39	12	
Leermeel	0.6	10	2	30	4286	308	15000	180
Riet	14	0.5	0.5	45	5000	1795	525000	6300
Digestaat	2	1	8	35	1429	4103	58333	700



In Tabel 3d tenslotte wordt het aantal dagen dat de in Tabel 3c gekozen mix van inputmaterialen bijdraagt aan de gemiddelde dagelijkse opname berekend uit de opname onderaan Tabel 3b. Nu is te zien dat leermeel vooral bijdraagt aan de stikstofvoeding, dat riet de grootste bijdrage levert aan de C voorziening, en dat digestaat het leeuwendeel van de K behoefte levert.

Tabel 3d

Het aantal dagen dat een in Tabel 3c gekozen gewicht van leermaal, riet of digestaat bijdraagt aan de plantenvoeding van een tomatengewas zoals getoond in Tabel 3b.

MATCHING		N	K	C
		dagen	dagen	dagen
Leermeel	dagen	19.3	2.3	1.2
Riet	dagen	22.5	13.5	41.6
Digestaat	dagen	6.4	30.8	4.6
Som	dagen	48.2	46.5	47.4

De oplossing in Tabel 3c is handmatig gevonden door steeds verschillende waarden in Tabel 3c in te vullen en dan op basis van Tabel 3d bij te sturen. In het model kan met 8 inputmaterialen en 9 elementen gewerkt worden. Op het oog optimaliseren is daarbij niet meer mogelijk. Met de "Solver" functie van Excel is de optimale mix uit te rekenen en kan het gewenste interval vooraf worden gekozen, bijvoorbeeld om de bioreactor per week te laten werken met stabiele waarden.

### 3.1 Aanbodmodule, basisinformatie van de inputs

Voor het aanbod zijn in beginsel alle organische materialen geschikt die jaarlijks met meer dan 200.000 ton FW (versgewicht) beschikbaar zijn (Bijlage 1). Deze richtwaarde is gebaseerd op de wens dat een bron minstens 1000 ha teelt van plantenvoeding kan voorzien.

#### Box 1. Berekening minimale omvang stofstromen.

Een serieuze bron zou elk jaar minstens 1000 ha tuinbouw van plantenvoeding te voorzien. In een vrij normaal organisch materiaal zit een gehalte 350 mol N per ton vers organisch materiaal. De opname door het gewas is 220 mol N per hectare per dag, uitgaande van tomaat, 800 L wateropname per m<sup>2</sup> per jaar en een plantopname van 10 mmol N per L. De plant neemt in een teeltseizoen van 360 dagen 79200 mol per hectare op (220 \* 360). Daar is dus 79200/350= 225 ton materiaal voor nodig. Voor duizend hectare is dus 225000 ton nodig. Omdat tomaat wel erg veel nitraat verbruikt is de grens op 200000 ton gezet.

Uiteraard is dit per teeltgewas, per uitgangsmateriaal en per element sterk verschillend. Toch is het nuttig een idee te hebben van welke stofstromen qua hoeveelheid wel en niet van belang kunnen zijn.

Van elk van deze materialen moet bekend zijn wat het drooggewicht en natgewicht is, wat het aandeel minerale stof en organische stof is, wat het gehalte aan koolstof in de organische stof is en wat de gehalten van de elementen in de droge stof zijn. Er wordt rekening gehouden met een onvolledige afbraak van het materiaal. Dat wil niet zeggen dat een oxidatieve bioreactor het materiaal niet totaal zou kunnen verteren als de resten bijvoorbeeld nogmaals zouden worden verkleind en meermaals door de reactor zouden gaan. Het is alleen zo dat bij een praktisch gebruik van een bioreactor, de reactor niet meer dan een bepaald volume slecht verteerbare rest mag bevatten om minimale doorlooptijd te behouden. In deze rest zitten vooral structureel ingebouwde elementen als N, S, P en Ca. Van K en Na wordt juist aangenomen dat ze geheel beschikbaar komen.

## 3.2 Vraagmodule, basisinformatie van gewas en teelt

Aan de vraagzijde kan gelukkig gebruik gemaakt worden van de per gewas gedetailleerde gegevens van plantopname (De Kreij *et al.* 1999; Straver *et al.* 1999; Van den Bos *et al.* 1999). Daarnaast is genoeg bekend van gewasverdamping om te weten wat de wateropname van de meeste gewassen is (Sonneveld and Voogt, 2009).

In de Tabel VRAAG in Bijlage 2 is voor tomaat ingevuld wat de plantopname concentratie per element is, hoeveel water de plant in teeltseizoen van bijna een jaar opneemt en hoelang het teeltseizoen is. Op basis van deze gegevens wordt berekend hoeveel mol van een element de plant per hectare per dag opneemt (voorbeeld in Box 2).

Voor koolzuurgas is een gelijksoortige berekening gemaakt maar dit keer niet in mol maar in kilogram CO<sub>2</sub>-equivalenten. Het werken met kilogram was noodzakelijk omdat de gebruikelijke dosering van koolzuurgas in de kas ook nog steeds gebeurt in kilogram per m<sup>2</sup>. Overigens is in het mengmodel de informatie op beide manieren beschikbaar voor alle elementen, inclusief koolstof.

### Box 2. Berekening plantopname (de VRAAG)

Voor tomaat geldt bijvoorbeeld voor nitraat een opnameconcentratie van 10 mmol/L en bij een wateropname van het gewas van 800 L/m<sup>2</sup>/jaar is dat 8 mol/m<sup>2</sup>/jaar. Dat is 80000 mol/ha/j oftewel 80000/360 = 220 mol/ha/d.

## 3.3 Balansmodule, afstemmen van aanbod en vraag

Omdat we het aanbod uitdrukken in mmol/ton (kg/ton voor koolzuurgas) en de vraag in mol/m<sup>2</sup>/dag, (gram/m<sup>2</sup>/dag voor koolzuurgas), kunnen we per element uitrekenen hoeveel dagen dit materiaal in de vraag voorziet. Hierbij is aangenomen dat de omzetting voldoende snel verloopt en dat de vraag het hele seizoen gemiddeld is. Er is dus nog geen sprake van dag-dynamiek.

## 3.4 Mengmodule, berekenen optimale input mengsel

In de mengmodule kan voor meerdere materialen worden ingevuld hoeveel ton in de reactor wordt ingebracht. Per materiaal wordt nu uitgerekend hoeveel van elk element vrijkomt. In de onderregel wordt ingevuld hoeveel uit de verschillende gebruikte materialen tegelijk vrijkomt, het totaal. Ook wordt aangegeven voor hoeveel dagen dit totaal toereikend is en kan worden opgegeven voor hoeveel dagen plantenvoeding inclusief koolzuurgas, gewenst is.

Met de "Solver" tool van Excel kan worden ingesteld dat een mengsel van de ingangsstoffen wordt gezocht dat zo goed mogelijk voor alle elementen inclusief koolstof uitkomt op het gewenste aantal dagen. Met randvoorwaarden kan bovendien per element worden ingesteld dat de geleverde oplossing niet meer dan een bepaalde tijd afwijkt van het gewenste aantal dagen.

Op deze manier kan desnoods dagelijks het mengsel worden bijgesteld, zodat ook het seizoensverloop en de juiste gewasstadia gevolgd worden.

## 3.5 De rol van slib

Het slib bestaat uit resten zand en klei en stabiele organische stoffen. Doordat ze langzamer afbreken dan de verblijftijd in de bioreactor, hopen restmaterialen zich op. Daarom is een schatting gemaakt van de hoeveelheid organische en minerale stof die per materiaal achterblijft. Omdat dit materiaal als slib vrijkomt en het te vervoeren volume moet worden berekend, wordt voorlopig aangenomen dat dit slib 10% vaste stof bevat.

## 3.6 Distributiemodules, transport en brandstofverbruik

Dit stuk staat in de spreadsheets en is onderdeel van het model maar de resultaten worden in hoofdstuk 5 apart uitgelegd en besproken. Hier wordt berekend hoeveel volume er aangevoerd moet worden en hoeveel volume er afgevoerd moet worden. Dit wordt berekend per hectare en voor een fictief areaal van 5000 hectare. Die 5000 hectare (met het hoge verbruik van tomaat) staat model voor de vraag van de hele Nederlandse glastuinbouw bij volledige omschakeling. Daarnaast wordt nog berekend hoeveel fossiele koolzuurgas uitstoot dit vervoer met zich mee zou brengen. Daarbij wordt dus verondersteld dat het vervoer uitsluitend fossiele brandstof verbruikt.



# 4 Pakket van Eisen

## 4.1 Eisen aan de inputs

### Stabiele gehalten

De input moet de verwachte hoeveelheid plantenvoeding en koolstof ook werkelijk bevatten. Dat is minder vanzelfsprekend dan het lijkt omdat veel organische restproducten enorm variëren in gehalten aan elementen. De oorzaken zijn seizoenseffecten, plaatseffecten, productie-effecten en weerseffecten.

- Seizoenseffecten spelen, omdat het om plantmateriaal gaat, altijd een rol. Dat geldt ook voor materiaal dat eerst is verteerd tot slib in de natuur of is veranderd door bewerkingen als composteren of vergisten. Seizoenseffecten zijn een mix van per stadium verschillende plantopnames, klimaat en groeisnelheidsverschillen.
- Plaatseffecten hebben te maken met verschillen in de bodem en in bemestingsverschillen. Hierdoor kunnen gehalten aan elementen per akker of zelfs stadstuin sterk verschillen.
- Productie-effecten hebben te maken met de manier waarop verschillende herkomsten gemengd worden en mogelijke verliezen aan elementen. De grootste verliezen zijn gasvormig en voor sommige materialen kunnen er ook verliezen zijn door spoelbewerkingen. De gasverliezen betreffen de koolstof die voor 90-100% wordt omgezet in circulair koolzuurgas; de stikstof die in allerlei vormen kan vervluchtigen ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ ), in teeltmatten tot wel 20% van de oorspronkelijke hoeveelheid; en ten laatste zwavel dat kan verdwijnen als  $\text{SO}_2$  en soms bij productiefouten als  $\text{H}_2\text{S}$ . De hoeveelheid zwavel die zo ontsnapt is niet goed bekend maar aangenomen wordt dat dit minder dan 5% is. De spoelverliezen zijn soms aanzienlijk en betreffen alle ionen, maar zeker de goed oplosbare ionen als  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ .
- Weerseffecten spelen indirect een rol via de groei zoals bijvoorbeeld bij regen een verdunning van de opnameconcentratie van planten.
- De informatie van de reactor inputs moet compleet zijn. Het is vaak nog een hele klus om voor elke stroom restmateriaal te achterhalen wat èn het versgewicht èn het drooggewicht èn het organische stofgehalte, èn het koolstofgehalte èn het gehalte aan mineralen is. Daarnaast zijn er hardnekkige misverstanden over de hoeveelheid materiaal die met composteren wordt verwerkt en de hoeveelheid materiaal die als compost vrij komt. De hoeveelheid na composteren is namelijk praktisch de helft van de hoeveelheid voor composteren.

### Vochtgehalte

Er wordt naar gestreefd het vochtgehalte van de ingangsstromen binnen bepaalde grenzen te houden in verband met de transport efficiëntie. Het zal duidelijk zijn dat het transporteren van dunne rundermest minder efficiënt is dan het transporteren van huidmeel, domweg omdat de elementen gehalten van huidmeel veel hoger liggen. Een voordeel van oxidatieve bioreactoren is dat de materialen niet vooraf gedroogd hoeven te worden zoals wel het geval is bij verbranding in kachels, ovens of ketels.

### Sporenelementen en metalen

De gehalten aan sporenelementen worden in de berekeningen in Bijlage 2 nog niet meegenomen omdat hierover weinig bekend is en omdat het toegestaan is sporenelementen als zout toe te voegen, zelfs in de biologische teelt. Wel is het raadzaam deze gehalten in de uitgangsmaterialen mee te meten en ervoor te zorgen dat er geen toxische overmaat wordt bereikt.

De zware metalen spelen in veel compost geen rol maar er zijn materialen zoals slib uit waterwegen die soms hun weg vinden naar de verwerkingsmixen. Het is daarom raadzaam per proces eenmalig te monitoren op de volgende metalen: Cr, Ni, Zn, Cu, Pb, Cd, Hg en As. Redenen zijn:

- Chroom en Nikkel (Cr en Ni) komen voor in stenige dus meestal buitenlandse bodems.
- Zink (Zn) komt voor in rivierbodems maar vaker nog in vervuilde grond van oude fabrieken.
- Koper (Cu) komt voor in dierlijke mest omdat koper gebruikt is als groeibevorderaar voor dieren.
- Lood en Cadmium (Pb en Cd) kwamen voor in benzine en autobanden en zijn, nog steeds, te verwachten in bermgrassen.
- Kwik (Hg) komt alleen voor als vervuiling uit inmiddels verboden industrieprocessen.
- Arseen (As) komt voor in bodems waarop vroeger arseen houdende middelen gebruikt zijn.

Alle metalen hechten zich gemakkelijk aan materialen met een negatieve oppervlakte lading zoals kleiplaatjes en organische stof en hopen zich bij uitspoelsituaties in de herkomstgebieden op in klei en organische stof.

## 4.2 Eisen aan de output van plantenvoeding en gas

Op de eisen aan de gehalten voor plantenvoeding wordt hier niet ingegaan (dat is in hoofdstuk 3 besproken), anders dan het voorkomen van problemen met sporenelementen en zware metalen.

Algemene eisen aan gassen voor tuinbouwkassen staan in Tabel 4 en in Bijlage 3. In Bijlage 3 staan ook de eisen die OCAP stelt aan gasproducten. Meer algemeen kan gesteld worden dat er eisen zijn aan vochtgehalte, stikstofoxiden, ammonia, zwaveloxiden, koolstofmonoxide en ethyleen. In alle gevallen zal het verloop van emissies over een jaar gevolgd moeten worden om effecten van het weer (druk, temperatuur, RV) maar vooral ook van fluctuaties in input materiaal te leren kennen.

### 4.2.1 Maximale gehalten voor gasvormige bijproducten

Tabel 4

Maximale voor de plant acceptabele concentraties in de kas per m<sup>3</sup> gestandaardiseerde lucht.

Verbinding	Max. concentratie in kas
<b>Zwavelverbindingen</b>	
SO <sub>2</sub>	90 µg/Nm <sup>3</sup>
Carbonylsulfide (COS)	4.2 µg/Nm <sup>3</sup>
Koolstofdissulfide (CS <sub>2</sub> ) *	0.20 µg/Nm <sup>3</sup>
Thioethers *	2.2 µg/Nm <sup>3</sup>
Waterstofsulfide	0.25 µg/Nm <sup>3</sup>
Mercaptanen	0.50 µg/Nm <sup>3</sup>
S-verbinding	0.070 x M µg/Nm <sup>3</sup>
<b>Stikstofverbindingen</b>	
NO <sub>x</sub>	1049 µg/Nm <sup>3</sup>
Ammoniak	0.15 µg/Nm <sup>3</sup>
Waterstofcyanide	0.60 µg/Nm <sup>3</sup>
<b>Chloorverbindingen</b>	
Waterstofchloride	47 µg/Nm <sup>3</sup>
Trichlooretheen *	0.015 µg/Nm <sup>3</sup>
Tetrachlooretheen *	0.015 µg/Nm <sup>3</sup>
Cl-verbinding	0.070 x M µg/Nm <sup>3</sup>
<b>Fluorverbindingen</b>	
F-verbinding	0.066 x M µg/Nm <sup>3</sup>
Waterstoffluoride	25 µg/Nm <sup>3</sup>
1,1,2-trichloor, 1,2,2-trifluorethaan *	0.021 µg/Nm <sup>3</sup>
<b>Koolwaterstoffen</b>	
Benzeen	87 µg/Nm <sup>3</sup>
Tolueen	103 µg/Nm <sup>3</sup>
Xyleen	118 µg/Nm <sup>3</sup>
Aromatische koolwaterstoffen	22 x M µg/Nm <sup>3</sup>
<b>Siliciumverbindingen</b>	
Siliciumdioxide	13 µg/Nm <sup>3</sup>
<b>Overige verbindingen</b>	
Koolmonoxide	625 µg/Nm <sup>3</sup>
Waterstof	536 µg/Nm <sup>3</sup>

NB Tabel 4 is overgenomen uit van Dijk, C.J., Dueck, T.A., and Burgers, W. 2009. Risico evaluatie toepassing Groen Gas in de Nederlandse Glastuinbouw. Nota 582.

**Watergehalte:**

Het vochtgehalte moet laag zijn, < 40 ppm. Het verwachte gehalte is echter 16-40 g/kg dus 16.000-40.000 ppm. Voor gebruik in leidingen moet dus stevig nabehandeld worden. Ook in de teelt zit men niet te wachten op extra vocht in de kas, al is de acceptabele ondergrens hier met 4000 ppm veel hoger. Toch zal het energieverbruik voor deze ontvochtiging zwaar meetellen (berekening in Box 3).

**Box 3. Energievraag bij ontvochtiging**

Stel dat bij een productie van 5000 ppm CO<sub>2</sub> 25000 ppm vocht meekomt. Per jaar wordt 20 kg/m<sup>2</sup> CO<sub>2</sub> gedoseerd dus zeg er is 4000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> reactor-lucht nodig. Dan moet er 4000 \* 25000 = 100 M mg/m<sup>2</sup> vocht verwijderd worden. Dat is 100 kg water. Het drogen van de lucht kost ongeveer 70 kJ/kg water (Mollier diagram 25 graden, 25 gr/kg). Dan kost het drogen 70 kJ/kg lucht en lucht weegt 1.25 kg/m<sup>3</sup>. Dus 4000\*1.25\*70 = 350 MJ. Bij een verbrandingswaarde van 32 MJ/m<sup>3</sup> gas kost dat dus 10 m<sup>3</sup> gas/m<sup>2</sup>.

Deze (slechte) efficiëntie is op te voeren door het koolzuurgasgehalte in de uitgaande stroom op te voeren. Op zich zou de reactor daar niet veel last van hebben tot een gehalte van wel 100.000 ppm koolzuurgas. Het probleem is echter dat de reactor dan niet meer voldoende koelt. Dit probleem is bij de bouwers van bioreactoren bekend en kan nauwkeurig berekend worden.

**Het gehalte aan NOx**

Het gehalte NOx moet onder de 1 ppm lucht blijven voor het gewas (Bijlage 3). Omdat het een oxidatieve bioreactor waarin bacterieel nitriet wordt omgezet in nitraat, lijkt het redelijk te verwachten dat er geen hoogenergetische verbindingen ontstaan als NO<sub>2</sub> en NO. Wel kan de efficiëntie van de reactor lijden aan verlies in de vorm van N<sub>2</sub>, maar dat is voor de plant weer geen probleem.

**Het gehalte aan NH3**

Het gehalte aan NH<sub>3</sub> moet voor het gewas onder de 0.2 ppm lucht blijven (Bijlage 3, waarin verschillende auteurs verschillende waarden noemen, mogelijk door verwarring tussen ppm en ppb). Voor de efficiëntie van de reactor is NH<sub>3</sub> verlies ook een belangrijk criterium. Het verlies moet namelijk onder de 5% blijven en het liefst niet optreden. Daarom is het monitoren en beheersen van de pH in de reactor van groot belang. Door de pH onder de 7.0 te houden, bij effectieve menging, is het verlies beperkt te houden. Een aanpassing van de reactor voor koolzuurgas dosering naar de kas is wellicht het plaatsen van een zuur ammonium afvangvat voor de afgassen met een terugvoer naar het reactorvat.

**Het gehalte aan SO2**

Dit gehalte moet voor de plant onder de 0.1 ppm lucht blijven (Bijlage 3). Omdat het een oxidatieve bioreactor is, bestaat zeker de kans dat SO<sub>2</sub> een van de reactieproducten is. Of dit een risico is dat het noodzaakt een apart filter te gebruiken moet uit metingen over een teeltseizoen blijken.

**Het gehalte aan H2S**

Dit zou in een oxidatieve reactor niet op mogen treden maar gezien de hoeveelheden sulfaat in de reactor is het belangrijk er wel op te monitoren tot er voldoende kennis is van de fluctuaties van een oxidatieve bioreactor. Het basisproces is trouwens bijzonder stabiel. Fluctuaties zullen vooral het gevolg zijn van veranderingen in de aangevoerde inputs.

**Het ethyleen-gehalte**

Het ethyleengehalte moet voor planten onder de 0.05 ppm lucht liggen (Bijlage 3). Ook hier geldt dat ethyleen (etheen) niet op zou mogen treden in oxidatieve omstandigheden. Net als bij H<sub>2</sub>S moet er wel op gemonitord worden tot er voldoende ervaring is met fluctuaties in de input.

**Gehalte aan PACs en VACs**

In rookgassen wordt enorm gemonitord op hoge temperatuur gassen als polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PACs) en de overlappende groep vluchtige koolwaterstoffen (VACs). Het ligt niet voor de hand dat deze in een oxidatieve bioreactor (door bacteriën bij kamertemperatuur) gevormd zullen worden.

### Gehalte aan alcoholen en alkyden

Bij vergisting (anaerobe bioreactoren) zijn deze producten vaak in hinderlijke gehalte aanwezig. Bij een normale werking van een oxidatieve bioreactor zouden deze stoffen niet voor mogen komen. Er is echter niet genoeg ervaring met oxidatieve bioreactoren om te kunnen zeggen dat dit (bij fluctuaties in de input) nooit voorkomt.

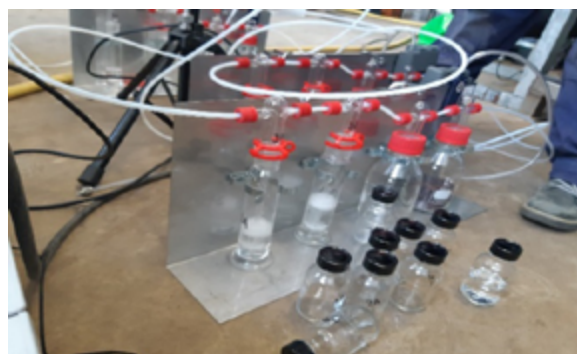
### Eenmalige meting aan een oxidatieve bioreactor

In 2022 is, na de nodige COVID gerelateerde vertraging, op 9 Mei bij Van Der Knaap Group in Honselersdijk, een uitgebreide gasmeting verricht door specialisten van het industriële lab DNV GL uit Groningen (<https://www.dnv.nl/>).

Als voorbereiding had Karel de Bruijn van Van Der Knaap het middelste vat van de Bioreactoropstelling afgedekt met plastic met daarin een doorvoer. Hierdoor werd verdunning van de afgassen door buitenlucht uitgesloten (Foto 1).



**Foto 1** Bemonsteren uit het middelste vat met hulpmiddelen opgesteld op het rechter vat.



**Foto 2 en 3** Een on site bepaling van NO, NO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> en rechts een pompstelling met wasflessen.



Er zijn zowel monsters genomen voor een Draeger systeem met gasbuisjes als gasmonsters voor latere verwerking met specialistische apparatuur zoals chromatografen en massaspectrometers. De Draeger buisjes krijgen een exact bepaald volume gas door specifieke chemicaliën die alleen reageren met het te meten gas en dat door bijvoorbeeld verkleuring zichtbaar maken. Hiermee kon van veel gassen eerst worden bepaald in welk meetgebied ze zaten (de buisjes zijn namelijk gemaakt om in een beperkte range nauwkeurig te meten) en daarna met grotere nauwkeurigheid hoeveel gas het betrof. Een ander deel van de gasmonsters werd met pompen met een nauwkeurig debiet langdurig door wasflessen geleid waarbij de te meten stoffen accumuleren in het waswater en later met apparatuur gemeten kon worden (Foto 2 en 3). Tenslotte zijn enkele gasdichte kunststofzakken met lucht uit de bioreactor gevuld en ook meegenomen voor latere analyse.

In Bijlage 5 staat het analyse-overzicht. Hier volstaat het op te merken dat veel componenten geen rol blijken te spelen. Dit is een gevolg van het werken met lage temperatuur biologische processen. Het koolzuurgasgehalte bedroeg 7350 ppm, wat goed overeenkomt met de al geschatte 6000 ppm voor de nu gebruikte input met een lage C/N verhouding. Het NH<sub>3</sub> gehalte is 0.38 ppm wat ruim binnen de grenzen valt. Wel zorgelijk en onverwacht is het NO<sub>x</sub> gehalte van 1516 ppb. In de kas mag dit voor roos niet boven de 40 ppb komen en voor potplanten niet boven de 200 ppb (Dieleman e.a., 2009). De verdunning bij doseren in de kas zal 10-30 maal zijn (van 7000 ppm naar 700-450 ppm), zodat het NO<sub>x</sub> gehalte in de kasaanvoer 200 tot 60 ppb kan zijn. Voor NO<sub>x</sub> zou dus na behandeld moeten worden. Wel verdient het aanbeveling de meting te herhalen met een controle op de gassen die voor beluchting de reactor binnengaan. Het is namelijk niet uitgesloten dat de bron van de NO<sub>x</sub> niet de reactor is.

### **Conclusie**

De bioreactorgassen moeten gecontroleerd worden op vocht, ammonia, etheen en mogelijk SO<sub>2</sub>. Daarnaast moet ervaring worden opgedaan met NO<sub>x</sub> en H<sub>2</sub>S door monitoring gedurende een seizoen, m.n. bij wisselingen in hoeveelheid of aard van de input. Een verschil in samenstelling van gras in het voorjaar of de herfst kan al vergaande invloed hebben. Het voorkomen van PACs en VACs is onwaarschijnlijk en kan worden uitgesloten met incidentele metingen. Voor de meeste gassen is het verstandig hier pas op te monitoren als uit andere metingen blijkt dat de bioreactor niet optimaal werkt. Zulke controlemetingen zijn bij voorkeur ORP (oxidatie-/reductie potentiaal) en zuurstofgehalte (allebei op minutenschaal) en pH, EC. Verder mogen er in de reactor geen minder reactieve plekken voorkomen i.e. de menging moet bijna perfect zijn.

#### **4.2.2 Benodigde verhoudingen plantenvoedingselementen**

In de plantenvoeding zijn 12 elementen noodzakelijk en wordt op nog 4 andere elementen gelet om risico's te beheersen. Bijlage 4 geeft een beeld van de gemiddelde waarden van tomaat, komkommer en roos voor deze elementen.

#### **4.2.3 Aanvoer concentratie koolzuurgas voor de kas**

De bioreactor produceert nu een afgas met 1655 ppm CO<sub>2</sub>. Dit kan worden opgevoerd tot 6000 ppm binnen het huidige concept door afdekken van de bovenkant. Of hogere gehalten mogelijk zijn vraagt verder onderzoek, waarbij koeling van de reactor een eerste stap kan zijn. Het maximale CO<sub>2</sub> gehalte is een belangrijk punt omdat een CO<sub>2</sub> kasaanvoer systeem voor zuivere CO<sub>2</sub> de luchtverdeling met kleinere buizen en een geringe pompcapaciteit mogelijk is. Voor rookgassen (9% CO<sub>2</sub>, dat is 112 g/m<sup>3</sup> bij 20 graden °C), moet al 330-370 m<sup>3</sup> per ha/h gedoseerd worden om 40-45 kg CO<sub>2</sub> /ha/u te doseren. Bij 6000 ppm zou dan 15 keer zoveel gedoseerd moeten worden waarmee de kosten voor de verdeling zowel qua stroom als qua verdeelsysteem gaan meetellen. Nu kan de bioreactor qua microbiologie best nog werken als de afgassen tot 10% CO<sub>2</sub> bevatten, dat stelt echter veel hogere eisen aan de procescontrole en aan het afvoeren van de geproduceerde warmte. Die warmte wordt nu weggekoeld door waterdamp, maar dat kan alleen met een grote luchtdoorvoer die de koolzuurgasconcentratie verlaagd. De vloeistof in de reactor moet in een ontwerp voor CO<sub>2</sub> coproductie dus gekoeld worden zonder verdamping van water in de afgassen.

#### 4.2.4 Overeenkomsten en verschillen met digestaatgassen

In dit verslag wordt ingegaan op oxidatieve bioreactoren. Omdat verwarring zou kunnen ontstaan met vergisting, en omdat over koolzuurgas uit vergisting al kennis beschikbaar is, volgt hier een korte beschrijving met betrekking tot koolzuurgas uit vergisting: Energetisch gezien zou op grote schaal geproduceerd biogas als brandstof kunnen dienen voor de WKK-installaties en verwarmingsketels in de Nederlandse glastuinbouw (van Dijk *et al.* 2009). Dit zijn gassen gewonnen uit vergisting, i.e. een reducerende bioreactor maar "nabehandeld" door verbranding, waarbij methaan omgezet is naar koolzuurgas. Indien deze gassen worden gebruikt voor CO<sub>2</sub> dosering dan vormen de volgende componenten een potentieel risico voor de kasgewassen: waterstoffluoride, zwaveldioxide, stikstofoxiden en benzeen. De componenten waterstofsulfide, ammoniak, methaan, etheen, toluen, xyleen, tri' en tetrachlooretheen en (form)aldehyde vormen volgens van Dijk e.a., 2009 op basis van de toenmalige inzichten geen potentieel risico voor kasgewassen. Van de overige stoffen was onvoldoende informatie beschikbaar om een uitspraak te doen over mogelijke risico's. Vrij naar: van Dijk, C.J., Dueck, T.A., and Burgers, W. 2009. Risico evaluatie toepassing Groen Gas in de Nederlandse Glastuinbouw. Nota 582.

Het koolzuurgas uit een anaerobe bioreactor is dus eerst als biogas gevormd onder reducerende omstandigheden, vervolgens verbrand en daarna pas bij de plant gekomen. Eventueel kunnen sporen van andere gassen die bij de reductie gevormd zijn meekomen (H<sub>2</sub>S, alcoholen, aldehyden). Deze gassen kunnen worden afgevangen met verschillende filters (Peeters *et al.* 2013).

In beide bioreactoren (oxidatieve en reductieve) is het primaire gas nagenoeg water verzadigd. In het geval van de oxidatieve reactor komt enorm veel energie vrij die in de vorm van waterdamp afgevoerd moet worden. De hoeveelheid kubieke meters lucht uit een oxidatieve reactor is veel hoger dan die uit een reductieve reactor omdat het oxidatieve proces veel zuurstof vraagt die door middel van het bruisen van lucht als kleine bellen wordt ingebracht (Box 4).

##### **Box 4. Liters lucht uit oxidatieve en bioreactoren en vergisters**

Uit een vergister komt 500 L methaan per kg DOM (geschat 250 m<sup>3</sup>/ton DS). Om dit te verbranden is nog eens 2500 m<sup>3</sup> lucht nodig dus er is 2750 m<sup>3</sup> lucht per ton DS nodig.

Voor de oxidatieve reactor in de huidige vorm is wel 100.000 m<sup>3</sup> lucht / ton DS gebruikt, dat is 40 keer zoveel. De berekening verloopt ruwweg: 1 ton DS levert 0.5 ton droge organische stof is ongeveer 250 kg koolstof. De koolstof is genoeg voor 800 kg koolzuurgas. In de bioreactor is maximaal 8000 mg/kg koolzuurgas te verwachten. Dat komt dus overeen met een verdunning van 100.000 keer of 100.000 m<sup>3</sup> lucht per ton DS.

Het is mogelijk het aantal m<sup>3</sup> nog te verlagen door de concentratie koolzuurgas te laten oplopen, maar die mogelijkheid is begrensd doordat de temperatuur van de bioreactor dan niet meer laag gehouden kan worden. De afgevoerde lucht is namelijk water verzadigd en voert zo een grote hoeveelheid warmte af. Als deze warmte op een andere manier gewonnen-/gebruikt kan worden, kan de oxidatieve bioreactor wel hogere concentraties koolzuurgas leveren c.q. een kleiner volume lucht gebruiken.

### 4.3 Eisen vanuit de techniek

#### 4.3.1 Omvang installatie

Op dit moment is een installatie van 10 m<sup>3</sup> nodig voor het bedienen van 1 ha. Dat betekent dat een bedrijf met 20 ha ruimte moet bieden voor 200 m<sup>3</sup>, een aanzienlijke maar niet onoverkomelijke vraag.

### 4.3.2 Beheer van de installatie

Een (oxidatieve) bioreactor moet gemonitord worden op nogal wat zaken (Brock 2017) waaronder: temperatuur, zuurgraad, zuurstofgehalte, aanvoersnelheid van de input, afvoersnelheid van slib en van voedingsoplossing. Om dit goed te doen is een professionele controle unit nodig met procesinstellingen en beveiligingen. Om de teler niet op te zadelen met het controleren van een ander proces dan de teelt, is er door Van Der Knaap Groep gekozen een deel van de procescontrole online te doen. Bijkomend voordeel voor de producent is dat de data opgeslagen kunnen worden voor latere vergelijkingen en analyses. Druk is ook van invloed op het procesverloop in bioreactoren, maar is bij het huidige ontwerp niet van toepassing.

Temperatuur is natuurlijk van belang voor de micro-organismen die een stabiele temperatuur van 30-40 graden behoeven. Het probleem bij oxidatieve bioreactoren is dat ze oxideren, en daarbij komt de gehele energie-inhoud van de verbranding vrij. Er moet dus vaak flink gekoeld worden en dat gebeurt door verdamping. Een oxidatieve bioreactor zal dus flink wat liters water gebruiken voor de koeling, water dat later weer stoot bij het gebruiken van het koolzuurgas (ordegrootte 100 L/m<sup>2</sup>, Box 3).

### 4.3.3 Bedrijfszekerheid van de installatie

Een oxidatieve bioreactor is verrassend stabiel als het proces eenmaal loopt. Wel is de werking afhankelijk van de input (feed). Uit de wereld van rioolzuiveringsinstallaties is wel bekend dat de bacteriën in de reactor gevoelig zijn voor gifstoffen in de input. De belangrijkste controles zijn dan ook de controles op de input. Op dit moment bestaat daarvoor nog geen certificatie. Als oxidatieve bioreactoren op grote schaal ingezet gaan worden is het preventief bemonsteren, testen en bewaren van input partijen enorm belangrijk. Het systeem voor de controle op productie en eigenschappen van de inputs kan mogelijk worden overgenomen van het RHP-systeem dat is ontwikkeld voor groeimedia.

Uiteraard is ook een ingangscntrole van de input nodig om de gehalten aan voedingsstoffen, balastzouten en koolstof te kennen. Dit is echter een functionele controle en geen veiligheidsissue.

Een tweede vorm van bedrijfszekerheid is de centrale rol van de verkoper van de installatie, Van der Knaap. Deze kan online het proces volgen en bij problemen ingrijpen. Ingrijpen kan in de vorm van een alarm, automatisch naar een veilige modus schakelen, telefonisch overleg. Maar ook ingrijpend door bijspringen met reserveoplossing, leveren van alternatieve input, herstarten met een verse bacteriekweek of zelfs het omwisselen van de installatie voor een reserve-installatie.

### 4.3.4 Energieverbruik van de installatie

De installatie verbruikt elektrische energie voor het bewegen van slib en oplossing maar vooral om lucht gelijkmatig door de vloeistof in de reactor te blazen. Deze luchtstroom is nodig om zowel voldoende zuurstof aan te voeren om de reactor oxidatief te houden als om warmte in de vorm van waterdamp af te voeren. Bij het tegelijk opwekken van koolzuurgas zal dit verbruik nog flink toenemen. Het huidige verbruik is in de orde van 0.5-0.85 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/j in gasequivalenten (ongeveer 5-8 kWh/m<sup>2</sup>/j).

### 4.3.5 Ophopen van slib (conversieresten)

Zoals gemeld in paragraaf 3.5, bestaat het slib uit stabiele organische stoffen maar ook uit minerale resten die ongewild met sommige organische stromen meekomen, denk aan zand en klei. Doordat de componenten van slib langzamer afbreken dan overeenkomt met de verblijftijd in de bioreactor, hoopt slib zich op. In het model is al een schatting gemaakt van de te verwachten hoeveelheid uit het proces te verwijderen slib, namelijk 5-15% van het aangevoerde volume, afhankelijk van de input. Om het te vervoeren volume slib te berekenen, is voorlopig aangenomen dat het te verwijderen slib 10% vaste stof bevat.



# 5 Distributie, omvang van aan- en afvoer

## 5.1 Transport volumes en gerelateerde koolzuurgas emissie

Uitgaande van de hoeveelheden materiaal die het model weergeeft voor 5000 ha tomaat, komen we voor een combinatie van champost en grasafval uit op een vervoersbehoefte van 50.000 vrachtwagenritten per jaar. Dit is een schatting die aan de hoge kant van het spectrum zit omdat:

- Uitgegaan is van alleen tomaat als het vragende gewas. Tomaat is een gewas met een zeer hoge bemestingsbehoefte.
- Uitgegaan is van 5000 ha in Nederland i.e. meer dan 60% van het huidige oppervlakte glastuinbouw. Zelfs al zou dit areaal ooit gehaald worden, dan nog zal een omschakeling zeer geleidelijk plaats vinden.
- Er is nu uitgegaan van een complete vervanging van elke vorm van bemesting en het vervangen van de gehele koolzuurgasbehoefte. Het lijkt op dit moment veel waarschijnlijker dat oxidatieve bioreactoren zullen worden ingezet voor de basisbehoefte van de gewassen (denk aan 50% van de plantenoeding en het koolzuurgas). De overige vraag zal juist sterk dynamisch van karakter zijn en leent zich meer voor een snel doseersysteem. Voor meststoffen is het nu al van de biologisch dynamische landbouw bekende bijmesten met rotsmeelsoorten een overweging. Voor koolzuurgas kan het huidige doseersysteem helpen om piekmomenten op te vangen.

De vrachtwagens in de berekening vervoeren 50 m<sup>3</sup> per rit van 2x100 km (een heenrit en een terugrit). Dit is een conservatieve schatting, zonder aanhangwagens. De rit is met 100 km wat langer dan nu nodig, er rekening mee houdend dat voor kasconcentratiegebieden de inputs van vrij ver moet komen door uitputting van geschikte inputs in de directe omgeving.

### Box 5. Brandstofverbruik en koolzuurgasuitstoot

Voor het gebruik van brandstof is in de berekening uitgegaan van een verbruik van 35 liter diesel op 100 kilometer en een koolzuurgasuitstoot van 2.6 kg fossiel koolzuurgas per liter diesel. Hiermee komt de uitstoot van koolzuurgas door de transportbewegingen op 8.9 kton koolzuurgas per jaar. De geproduceerde hoeveelheid koolzuurgas is 1 Mton koolzuurgas per jaar (500 ha met een verbruik van 20 kg/m<sup>2</sup>/j). Daarmee is de uitstoot  $8.9/1000 = 0.89\%$  van het geproduceerde circulaire koolzuurgas. Uiteraard kan op termijn ook vervoer geregeld worden zonder gebruik van fossiele brandstoffen.

## 5.2 Verschuivingen in de organische restproductenmarkt

Voor de gecombineerde productie van plantenvoeding en koolzuurgas is er in grote lijnen behoefte aan een stikstofbron, een kaliumbron en een koolstofbron.

**De stikstofbron** (huidmeel/leermeel) is nu nog een beperkt beschikbare bron met een zeer hoog stikstofgehalte met een hoge verteerbaarheid en een beperkte behoefte aan voorbewerking. Alternatieven met vergelijkbare eigenschappen zijn bloedmeel, verenmeel, hoornmeel, haarmeel, chitine (van schaaldieren als garnalen en krabben) en frass (schildresten van voor eiwit gekweekte insecten). Een tweede groep stikstofrijk materiaal zijn de dierlijke mesten (inclusief digestaten en composten met dierlijk materiaal). Een nadeel van de groep dierlijke mesten is dat de gehalten aan Na, Cl en P vaak te hoog zijn. Pas als de hiervoor genoemde bronnen met 5-15%w/w stikstof op zijn komen plantaardige alternatieven in zicht, te beginnen met plantenresten van leguminosen als wikke, soja en alfalfa (deze worden al als groeibevorderende toevoegingen voor paddenstoelen compost gebruikt).

**De kalibron** kan bestaan uit een plantmateriaal met een hoog aandeel blad (bladrijke composten) terwijl ook dierlijke mestproducten zorgen voor hoge kaliumgehalten. Daarnaast is het mogelijk kali in de vorm van gemalen steenzouten te gebruiken al is dit niet strikt genomen cyclisch.

**De koolstofbron** is min of meer het complement van de stikstof en kalibronnen: alle materialen met een hoge C/N verhouding, typisch de bladarme composten (vezelrijk gras, riet en houtachtig parkafval en snoeisels). Eventueel kan dit aangevuld worden met zaagsel of vermalen houtresten.

Zoals het mengmodel laat zien zijn er ook materialen die tegelijk N, K en C leveren. Een goed voorbeeld is champost. Het mengmodel laat duidelijk zien dat de vraag al bij 1000 hectaren de beschikbare hoeveelheid overschrijdt (er was in 2013 "maar" 780.000 ton/j vers beschikbaar; Tabel 1, in 2022 door een afnemend areaal nog 20-40% minder). Voor alle andere restmaterialen afgezien van stro geldt dat de beschikbare hoeveelheid niet voldoende is om zonder gebruik van andere materialen te voorzien in de gehele verwachte vraag van 5000 ha tomaat. Dit betekent dat altijd gebruik gemaakt zal moeten worden van mengsels van verschillende inputs. Op zich kunnen oxidatieve bioreactoren hier goed mee omgaan, mits de input door een seizoen heen constant gehouden kan worden qua samenstelling en qua voorbehandeling.

Omdat champost na de eerste 1000 hectaren niet meer kan voorzien in de behoefte zal een eindoplossing gebruik maken van zowel dierlijke resten en mestresten (voor de stikstof) als van vrij eenvoudige bladrijke composten als van niet voor ander gebruik geschikte vezels (fijne grasvezels, te vaak gerecycled papier en kartonpulp, zaagsel en spaanderafval). Elke stroom zal ongeveer 0.8 Mm<sup>3</sup> groot zijn, samen 2.4 Mm<sup>3</sup> (in het uiterste geval). Dat is veel, maar kleiner dan het totale aanbod aan agrarische restproducten van meer dan 10 Mm<sup>3</sup>/j.

Wel betekent de overgang naar een biobased economie dat de markt voor organische restproducten ingrijpend zal veranderen.

- a. Was de markt tot nu toe een overschotmarkt waarbij de inzamelaars meer verdienen aan het inzamelen dan aan het doorverkopen, nu ontstaan markten voor circulaire meststoffen en circulaire groeimedia, boven op de al bestaande markten voor biobrandstof, veevoer, stalstrooisel, grondverbeteraar, mestbron voor akkerbouw en groeimedium voor consumenten en landschapsinrichting.
- b. Hierbij blijft het meest hoogwaardige vezelmateriaal in de markt voor gebruik als groeimedium. Gebruik als groeimedium is voor de totale hoeveelheid aanbod geen bezwaar omdat dit een groeimedium na gebruik terugkomt, waarschijnlijk voor gebruik als bodemverbeteraar.
- c. De organische stof en de elementen die een oxidatieve bioreactor ingaan komen niet meer terug in bodem. Dit zou een marktverschuiving kunnen betekenen die ten koste gaat van de akkerbouw (deze kan niet op prijs concurreren met de glastuinbouw). De hoeveelheden die de akkerbouw nodig heeft, als organische stof (dus niet als meststof), zijn al hoger dan de circa 10 Mm<sup>3</sup> die nu beschikbaar is.
- d. Als de akkerbouw ook circulaire meststoffen wil gaan gebruiken, is er een acuut gebrek aan elementen. Om dat gat te dichten zouden alle dierlijke en plantaardige en menselijke resten terug de productie in moeten.

Er is dus behoefte aan overkoepelend inzicht over de omvang van deze stromen in Nederland en een visie op de verdeling van organische reststromen in een meer circulaire economie. Daarbij is het verstandig voor een evenwichtige inbreng van expertise vanuit akkerbouw, veeteelt en glastuinbouw te waken.

# 6 Conclusies

## 6.1 Conclusies

### 6.1.1 Technische haalbaarheid van de reactor

- Het is technisch mogelijk een oxidatieve bioreactor in te zetten voor het gelijktijdig produceren van een nutriëntenoplossing en het doseren van koolzuurgas.
  - Hierbij wordt gebruik gemaakt van 2-5 verschillende inputmaterialen. Deze kunnen het beste centraal bereid en gemengd worden tot één voldoende fijn en geconcentreerd product. Een teler kan dan met minimaal transport en opslag werken en tussentijdse aanpassingen kunnen door de aanbieder centraal gemakkelijker en veiliger gerealiseerd worden.
  - Het aantal te verwachten vervoersbewegingen zonder voorbereidingen als verkleinen en drogen is mogelijk met minder dan 100 vrachtwagen ritten per dag bij een hypothetisch areaal van 5000 ha tomaat.
  - De koolzuurgas uitstoot door het extra vervoer is met 8.9 kton 0.9 % van de 1.0 Mton opgewekt circulaire koolzuurgas bij een hypothetisch areaal van 5000 ha tomaat (en nog zonder verkleinen en drogen van de input). In 2019 was de totale CO<sub>2</sub> uitstoot van de glastuinbouw in Nederland 5.9 Mton (Energiemonitor, 2019).
- Oxidatieve bioreactoren zijn voldoende stabiel om standalone te draaien. Bioreactoren zijn een volwassen product met een hoge graad van beheersing.
- De grootste bron van verstoringen ligt in de input. Een ingangscntrole systeem op de input is belangrijk om een stabiele werking van de bioreactor te kunnen garanderen.
  - Controle moet gericht zijn op de gewenste output aan plantenvoeding en koolzuurgas.
  - Controle moet gericht zijn op het gezond houden van de microbiologie in de reactor.
- Het lijkt te voorzien dat de input, zodra deze complexer wordt en de volumes toenemen, beter geproduceerd kan worden op een centrale locatie door een gespecialiseerd bedrijf. De voordelen:
  - De verschillende reststromen kunnen ruim vooraf gemonsterd en getest worden.
  - De verschillende reststromen kunnen voorbereid worden voor bacteriële vertering door zeven, wassen, drogen, verkleinen, voorverteren, sporenelementen etc. .
  - De verschillende reststromen kunnen flexibel worden vermengd (geblend) op klant specificatie.
- In alle gevallen zal de oxidatieve bioreactor -zoals nu ook al gebeurt- gemonitord en bestuurd moeten worden door een externe gespecialiseerde partner. Voordelen zijn voldoende en deskundig toezicht, efficiënter omgaan met onderhoud, technische verbeteringen, datahandling en back-up mogelijkheden bij calamiteiten.

### 6.1.2 Beschikbaarheid van de inputs en maatschappelijke diensten

- De vraag naar input zou bij volledige overschakeling van de glastuinbouw naar koolzuurgas uit oxidatieve bioreactoren de markt voor organische reststoffen sterk beïnvloeden. De totale vraag zou 2.5 Mton versgewicht bedragen in een markt die nu met alle zeilen bij net 10 Mton versgewicht haalt. Daarbij wordt het materiaal nu al ingezet voor energieopwekking door vergisters, veevoer, stalstrooisel, groeimedia voor hobby en professionele markt, grondverbeteraar, meststof in de akkerbouw en grondstof voor paddenstoelenteelt.
  - In een beginfase zou de vraag naar bijvoorbeeld champost en gras gunstig kunnen uitpakken voor een hoogwaardiger gebruik van deze materialen.
  - Bij een verdere groei van de markt zouden ook veel andere materialen gebruikt gaan worden. Dit zou ten koste gaan van akkerbouwers die de minste financiële kracht hebben om een hogere prijs voor meststoffen en of organische stof te kunnen betalen.

- Mogelijk zou de overheid / het bedrijfsleven moeten proberen op voorhand te kiezen hoe met prijsmaatregelen het gebruik van de organisch reststoffen voor de maatschappij als geheel te optimaliseren. Aanbevolen wordt dit tegelijk uit voeren voor energieopwekking, veevoer, zowel de professionele als de hobbymarkt voor groeimedia, de markt voor organische meststoffen in de glastuinbouw, de markt voor bodem verbeterende middelen voor de volgrond, stalstrooisels en mogelijk de markt voor de paddenstoelenteelt. De verwachting is dat hier door verstandige cascadering per organische reststof meerwaarde is te realiseren.
- Het aanwenden van de meststoffen uit mestoverschotten lijkt in dit kader een waardevolle maatschappelijke dienst die de glastuinbouw kan leveren.
- Het gebruiken van de koolstof uit organische restmaterialen gaat soms ten koste van de behoefte van de akkerbouw aan organische stof. In het geval van mestoverschotten gaat het ook ten koste van de energie die met digesteren nog kan worden teruggewonnen (tenzij het koolzuurgas ontstaan bij verbranden van digestaatgassen nog een hergebruik in de teelt krijgt).

### 6.1.3 Energetische en koolzuurgasdoelstellingen

- Met het opwekken van tot 1.0 Mton koolzuurgas kunnen oxidatieve bioreactoren potentieel belangrijk bijdragen aan het zekerstellen van de koolzuurgasvoorziening van de glastuinbouw.
- Omdat het opwekken van 1.0 Mton koolzuurgas mogelijk lijkt, kunnen oxidatieve bioreactoren ook een bijdrage leveren aan het voorkomen van "zomerstook" waarmee in de zomer koolzuurgas en licht wordt geproduceerd maar de warmte niet nuttig kan worden ingezet.
- Met het opwekken van tot 1.0 Mton koolzuurgas kunnen oxidatieve bioreactoren belangrijk bijdragen aan het circulair maken van de koolzuurgasvoorziening van de glastuinbouw.
- Het energieverbruik van met name de luchtpomp die lucht door de bioreactor verdeelt is een punt van aandacht. Het verbruik is hoog en zal toenemen als tegelijk koolzuurgas wordt geproduceerd. Onderzocht moet worden of een efficiëntere manier van verdelen mogelijk is (nanobubble productie en het werken met hoger zuurstofgehalten) en of de warmte van de pomp nog verder benut kan worden.
- Een tweede reden om naar de luchtpomp in de bioreactor te kijken is dat de concentratie CO<sub>2</sub> in de afgassen nu relatief laag is (6000-8000 ppm). Om kosten van gasdistributiesystemen en gas doseerpompen in de kas laag te houden, zou een verhoging naar 7-10% CO<sub>2</sub> gunstig zijn.
- Bij een niveau van 7-10% CO<sub>2</sub> in de afgassen uit de reactor zal de bedrijfstemperatuur in het reactorvat veel te hoog worden. Er zal dus gekoeld moeten worden met een systeem dat de warmte naar buiten het reactorvat transporteert, liefst zonder dat er energie in de afgassen komt. Dit zou een warmtewisselaar over het reactorvat kunnen zijn. Hier is verder onderzoek nodig om een optimale oplossing te vinden. Het koelen van het reactorvat voorkomt ook dat een te hoog gehalte waterdamp de kas wordt ingeblazen (zie 6.1.4, laatste punt).

### 6.1.4 Veiligheid en samenstelling van de geproduceerde gassen

- Dit oriënterend onderzoek laat zien dat de te verwachten concentraties, afgezien van ammonia, en NO<sub>x</sub> geen plantkundige problemen zouden moeten opleveren. Wel is belangrijk beter inzicht te krijgen over de fluctuaties in de tijd per seizoen en per batch input en blijft het belangrijk de aannamen op basis van de literatuur te verifiëren met metingen.
- Ammonia productie zou met een strikte pH beheersing in de bioreactor beheersbaar moeten zijn. Dit moet wel met metingen onderbouwd en mogelijk ook bewaakt worden. Een andere methode is een gaswassing in een oplossing met lage pH te gebruiken om ammonia af te vangen.
- De NO<sub>x</sub> (1516 ppb) zou met nabehandeling verlaagd kunnen worden maar eerst moet de bron van de NO<sub>x</sub> met zekerheid vastgesteld worden, inclusief de mogelijke fluctuaties door de tijd.
- Eén zorgvuldig uitgevoerde controle is begin 2022 nog uitgevoerd en in dit verslag opgenomen.



- De met een oxidatieve bioreactor geproduceerde gassen zijn vrijwel waterverzadigd. Dat komt omdat de bioreactor veel warmte produceert, die moet worden afgevoerd. Het gaat om potentiaal 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> gasequivalenten (bij de beschreven tomatenteelt). Op zich zou deze warmte, in ieder geval deels, teruggewonnen en toegepast kunnen worden. Dat kan door condensatie van de geproduceerde gassen of, misschien eenvoudiger, door de bioreactor met een warmtewisselaar te koelen.
- Speciale aandacht moet uitgaan naar gasmetingen bij wisselingen in de aard of toevoersnelheid van inputs, dit omdat micro-organismen enige uren tot dagen nodig hebben zich te vermenigvuldigen om de aanvoersnelheid bij te houden.

### 6.1.5 Tot slot

In deze studie zijn de contouren geschetst bij volledige overschakeling: zo ver is het nog niet. Het ligt voor de hand dat oxidatieve bioreactoren ingezet gaan worden als een basissysteem waarmee 40-75% van de te verwachten vraag wordt gedekt, zowel voor plantenvoeding als voor koolzuurgas. De overige 25-60% zou dan moeten komen uit vaten met enkele meststoffen (dus niet-samengestelde meststoffen) dan wel andere koolzuurgasbronnen, waarmee fluctuaties in de vraag van het gewas gemakkelijk en zeer specifiek opgevangen kunnen worden.

## 6.2 Keuze gecombineerde of gescheiden bioreactoren

Voordelen van de decentrale unit zijn: Geen transport van verdunde oplossingen. Nadelen zijn het vervoer van organische reststoffen naar de reactor maar ook naar de verwerker voor verbouwingen.

Een centrale verwerking heeft als voordeel dat de nutriëntenoplossing verder geconcentreerd vervoerd kan worden (met kosten voor de verdere concentratie). Het aantal transportbewegingen zal aanzienlijk zijn: bij EC 10 zou dat gaan om 10 keer zoveel vrachtwagens als berekend voor de decentrale aanpak. Dat zou voor sommige tuinbouwconcentratiegebieden belastend kunnen worden.

Het centraal produceren en vervoeren van koolzuurgas is op landelijk niveau niet haalbaar. Wel zouden enkel fabrieken langs de OCAP-leidingen denkbaar zijn (Pals-Timmerse.a., 2016). OCAP zelf denkt aan regionale grid oplossingen en dat zou wel mogelijk zijn in combinatie met het verwerken van organische reststromen.



# Literatuur

Anonymous (2021).

Is er straks nog CO<sub>2</sub> voor de tuinbouw? *Vakblad voor de Bloemisterij*, 20-23.

Aust, M. O., Thiele-Bruhn, S., Eckhardt, K. U., & Leinweber, P. (2009).

Composition of organic matter in particle size fractionated pig slurry. *Bioresource technology*, 100(23), 5736-5743.

Bastein, T., Roelofs, E., Rietveld, E., Hoogendoorn, A., & en Milieu, O. M. V. I. (2013).

Kansen voor de circulaire economie in Nederland. Delft: TNO.

Blok, C.; Eveleens, B. (2016).

Organische reststromen. Geschiktheid voor potgrond mengsels. Vertrouwelijk; GTB-5100; 2016.p13

Blok, C., Boedijn, A., Brunsting, M., and Verkerke, W. (2020).

Indicatie: Nieuwe bronnen voor CO<sub>2</sub> vanuit dierlijke productiesystemen – technische en economische haalbaarheid. Indicatie.

Blok, C., Streminska, M., and Vermeulen, T. (2017a).

Ammonium conversion in liquid organic fertilisers. *Acta Horticulturae* 1168, 11-18.

Blok, C., Streminska, M., Vermeulen, T., and Klein, P. (2017b).

Organic fertilisers and nitrogen availability. *Acta Hort* 1168, 1-10.

Brock (2019).

Microorganisms. Harlow, UK: Pearson.

CBS, (2018).

Dierlijke mest en mineralen 1998-2018. 2018.

De Kreij, C., Voogt, W., Van Den Bos, A.L., and Baas, R. (1999).

Bemestings adviesbasis substraten. PBG, Naaldwijk, The Netherlands.

Dieleman, A., Zwinkels, J., De Gelder, A., Kuiper, I., De Zwart, F., van Dijk, C., and Dueck, T. (2007).

CO<sub>2</sub> bij paprika: meerwaarde en beperkingen. *Nota* 494.

Esmeijer, M., (1999).

CO<sub>2</sub> in greenhouse horticulture. Brochure of PBG.

Font-Palma, C. (2019).

Methods for the treatment of cattle manure—a review. *C—Journal of Carbon Research*, 5(2), 27

Greinert, A., Mrówczyńska, M., & Szefer, W. (2019).

The use of waste biomass from the wood industry and municipal sources for energy production. *Sustainability*, 11(11), 3083.

Koelemeijer, R., Hekkenberg, M., Peters, J., Ros, J., & Bosch, P. (2011).

Naar een schone economie in 2050: routes verkend. Hoe Nederland klimaatneutraal kan worden.

Koppejan, J., Elbersen, W., Meeusen, M., & Bindraban, P. (2009).

Beschikbaarheid van Nederlandse biomassa voor elektriciteit en warmte in 2020. Rapportage in opdracht van SenterNovem. Projectnr. 200809. SenterNovem

Leenstra, F., Vellinga, T., Neijenhuis, F., de Buissonjé, F., & Gollenbeek, L. (2019).

Mest: Een waardevolle grondstof. Wageningen UR Livestock Research.

Liang, S., & McDonald, A. G. (2014).

Chemical and thermal characterization of potato peel waste and its fermentation residue as potential resources for biofuel and bioproducts production. *Journal of agricultural and food chemistry*, 62(33), 8421-8429.

Living Lab, (2021).

Greenport Aalsmeer webinar: living lab biota mycelium.

Medema, D. (2020).

CO<sub>2</sub> voorziening. Presentatie van Glastuinbouw Nederland (22 januari 2020).

Ministerie van Economische Zaken (2015).

Biomassa 2030. Strategische visie voor de inzet van biomassa op weg naar, 2030.

Navarro *et al.* (1993).

Relationships Between Organic Matter And Carbon Contents Of Organic Wastes

Opure (2020).

Productie glastuinbouw-nutriënten uit mest [Online].

- Pals-Lammers, M.G., Holstein, J., van Dijk, C.J., and Dueck, T. (2016).  
 Advies voor kwaliteitsborging gasvormig CO<sub>2</sub> in voeding uit biomassavergisting. Meerlanden, OCAP en LTO Glaskracht.
- Peeters, S., Hart A., Schlatmann, S., Medema, D., Smits, J. (2013).  
 CO<sub>2</sub> uit biomassa. Quicksan (up-date). Productschap Tuinbouw, project 11.490.
- RVO, (2010).  
 Thermische verwerking champost, eindrapport. <https://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Thermische%20verwerking%20champost%20-%20Eindrapport%20-%202014%20juli%202008.pdf>
- RVO, (2013).  
 Rice Straw and Wheat Straw. Potential feedstock for the Biobased Economy. <https://english.rvo.nl/sites/default/files/2013/12/Straw%20report%20AgNL%20June%202013.pdf>
- RVO, (2013).  
 Bio energie input. [https://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Bio-energie%20-%20Input%20-%20Groente-,%20fruit-%20en%20tuinafval%20\(gft\).pdf](https://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Bio-energie%20-%20Input%20-%20Groente-,%20fruit-%20en%20tuinafval%20(gft).pdf)
- Schouten, C., and Wiebes (2020).  
 Kamerbrief CO<sub>2</sub> voorziening glastuinbouw. kamerbrief.
- Sleegers, J. (2020).  
 Is er straks nog CO<sub>2</sub> voor de tuinbouw? Vakblad Bloemisterij 11: 20 – 23.
- Sleegers, J. (2020).  
 Pilot moet CO<sub>2</sub>-voorziening glastuinbouw veilig stellen. Hortipoint Floribusiness.
- Sonneveld, C., and Voogt, W. (2009).  
 Plant Nutrition of Greenhouse Crops. Springer.
- Straver, N., De Kreij, C., and Verberkt, H. (1999).  
 Bemestingsadviesbasis potplanten.
- Strenger, B., and Elzenga, H. (2020). "Beschikbaarheid en toepassingsmogelijkheden van duurzame biomassa. Verslag van een zoektocht naar gedeelde feiten en opvattingen", Planbureau voor de Leefomgeving. PBL publicatie 4188.
- TNO (2013).  
 Biotische restromen in Nederland, TNO-rapport R10864.
- Van Den Bos, A.L., De Kreij, C., and Voogt, W. (1999).  
 Bemestings adviesbasis grond. PBG, Naaldwijk, The Netherlands.
- Van der Knaap (2021).  
<https://www.vanderknaap.info/nl/producten/organic-water-system-ows/276>
- van Dijk, C.J., Dueck, T.A., and Burgers, W. (2009).  
 Risico evaluatie toepassing Groen Gas in de Nederlandse Glastuinbouw. Nota 582.
- 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. Under review.
- Velden, N. van der, Smit, P. (2019).  
 Energiemonitor van de Nederlandse glastuinbouw 2018 Wage-ningen Economic Research, Nota 2019 – 111.
- Velden, N. van der, Smit, P. (2020).  
 Effect extra CO<sub>2</sub> inkoop op emissie van de glastuinbouw in 2030. Wageningen Economic Research, Nota 2020-005.
- Voogt, W. (2021).  
 We sorteren nu al voor op een circulaire tuinbouw. OG 5, 42-43



beschikbaarheid in NL (ton/jaar) nu ingezet voor	prijs	soortelijk gewicht	Droge stof (DS)*	vocht-gehalte*	organische stof		organische stof**	as gehalte**	C, droog en asvrij	C	Potentie CO2	CO2 potentie bij huidige beschikbaarheid	CO2 potentie bij huidige beschikbaarheid
					organische stof gehalte**	organische stof**							
[ton]	[€/ton]	[kg/ton FW]	[kg/ton FW]	[% w/w]	[% w/w]	[% w/w]	[kg/ton FW]	[% d.s]	[% w/w]	[kg/ton FW]	[kg/ton FW]	[kg]	[Mton]
stro	150	1000	850	15	90	765	10	49	375	1374	1511895000	1.5	
stalvloerbedekking, 2 <sup>e</sup> generatie biodiesel	-90	1000	975	3	96	936	4	43	402	1476	132818400	0.1	
diermeel	30	1000	644	65	65	419	35	40	167	614	314340693	0.3	
korrelmaisstengels en kolven	20	1000	802	88	91	730	9	43	314	1151	517807290	0.5	
aardappelstoomschillen	36	1000	570	84	91	519	8	43	223	818	323037715	0.3	
aardappelpersvezels	50	1000	436	78	95	414	5	40	166	607	303746667	0.3	
bierbostel	180		978	10	89	869	11	40	348	1275			
Bloedmeel DCM	50		974	10	69	674	31	40	270	989			
kippenmest	90		90	89	60	54	40	40	22	79			
Drijfmest vleesvarkens													
<b>totaal</b>	<b>61</b>	<b>24199000</b>	<b>8194</b>	<b>1029</b>	<b>1247</b>	<b>6282</b>	<b>463</b>	<b>716</b>	<b>44976</b>	<b>164911</b>	<b>6194527698</b>	<b>6.2</b>	

Tabel B1.1.1.b

Organische reststromen in Nederland als gebruikt in dit verslag.

	beschikbaarheid in NL (ton/jaar)										C/N
	[ton]	[kg/ton FW]	Ntot	Nmin	Norg	K	Na	Ca	Mg	P	
dunne rundermest	7400000	4.9	2.6	2.3	5.6	0.3			0.8	0.8	7.5
dunne varkensmest	8800000	7.2	4.2	3.0	6.0	0.3			1.1	1.8	4.7
pluimveemest & overig	1160000				5.3	0.3			1.3	3.4	5.1
GFT afval als compost	1297000	9.5	1.0	8.5	1.3	3.5		1.3	0.2	0.1	
champost	780000	5.8	0.3	5.5	7.2	0.3			1.4	1.6	21.0
plantresten tuinbouw	220000										
grasafval voorjaar	200000	4.7	1.9		11.5					3.3	
grasafval najaar	300000	7.4	2.9		6.9					2.4	
houtige biomassa uit fruitteelt en boomteelt	200000	2.0			0.5			1.0	0.5		
groenafval bebouwde omgeving	670000										
veilingafval	125000										
stro	1100000	10.0		10.0	17.9	0.5		4.0	0.8	0.8	33.0
diermeel	90000				1.3	2.3		357.0	2.5	200.0	
korrelmaaisstengels en kolven	512000				10.4	0.2		1.5	1.2	1.9	
aardappelstoomschillen	450000				24.8	1.3		0.9	1.0	2.5	
aardappelpersvezels	395000				18.0	0.5		1.4	0.7	0.9	
bierbostel	500000				0.6	0.5		4.0	2.1	5.3	
Bloedmeel DCM		101	2	100	37					9	5
kippenmest		17	4	13	43					14	20
Drijfmest vleesvarkens		7	4	3	6	0		1		2	5

beschikbaarheid in NL (ton/jaar)	Ntot [kg/ton FW]	Nmin [kg/ton FW]	Norg [kg/ton FW]	K [kg/ton FW]	Na [kg/ton FW]	Ca [kg/ton FW]	Mg [kg/ton FW]	P [kg/ton FW]	C/N
[ton]									
<b>totaal</b>	<b>24199000</b>								



Tabel B1.1.c

Organische reststromen in Nederland als gebruikt in dit verslag.

Bronnen	
dunne rundermest	Nutrinorm; Font-Palma, C. (2019). Methods for the treatment of cattle manure—a review. C—Journal of Carbon Research, 5(2), 27; TNO, 2013
dunne varkensmest	Nutrinorm; Aust, M. O., Thiele-Bruhn, S., Eckhardt, K. U., & Leinweber, P. (2009). Nutrinorm; Composition of organic matter in particle size fractionated pig slurry. Bioresource technology, 100(23), 5736-5743; TNO, 2013
pluimveemest & overig	Nutrinorm; RVO, 2010; TNO, 2013
GFT afval als compost	Nutrinorm; RVO
champost	Nutrinorm; RVO, 2010
plantresten tuinbouw	<a href="https://nutrinorm.nl/meststoffen/de-samenstelling-van-organische-meststoffen/">https://nutrinorm.nl/meststoffen/de-samenstelling-van-organische-meststoffen/</a>
grasafval voorjaar	Alterra rapport 2661
grasafval najaar	Alterra Rapport 2661: Blok, C.; Eveleens, B. Organische reststromen. Geschiktheid voor potgrond mengsels. Vertrouwelelijk; GTB-5100; 2016.p13
houtige biomassa uit fruitteelt en boomteelt	Koppejan, J., Elbersen, W., Meeusen, M., & Bindraban, P. (2009). Beschikbaarheid van Nederlandse biomassa voor elektriciteit en warmte in 2020. Rapportage in opdracht van SenterNovem. Projectnr. 200809. SenterNovem.; Greinert, A., Mrówczyńska, M., & Szefer, W. (2019). The use of waste biomass from the wood industry and municipal sources for energy production. Sustainability, 11(11), 3083.
groenafval bebouwde omgeving	
veilingafval	
stro	<a href="https://www.weidsebliek.nl/producten/bijproducten/ruwvoeders/stro-gerst/tarwe">https://www.weidsebliek.nl/producten/bijproducten/ruwvoeders/stro-gerst/tarwe</a> : RVO, 2013
diermeel	RVO, 2010
korrelmaaisstengels en kolven	<a href="https://www.weidsebliek.nl/producten/bijproducten/ruwvoeders/snijma%C3%AFs">https://www.weidsebliek.nl/producten/bijproducten/ruwvoeders/snijma%C3%AFs</a>
aardappelstoomschillen	Liang, S., & McDonald, A. G. (2014). Chemical and thermal characterization of potato peel waste and its fermentation residue as potential biofuel and bioproducts production. Journal of agricultural and food chemistry, 62(33), 8421-8429.
aardappelpersvezels	<a href="https://www.weidsebliek.nl/producten/bijproducten/ruwvoeders/aardappelen">https://www.weidsebliek.nl/producten/bijproducten/ruwvoeders/aardappelen</a> : Liang, S., & McDonald, A. G. (2014). Chemical and thermal characterization of potato peel waste and its fermentation residue as potential resources for biofuel and bioproducts production. Journal of agricultural and food chemistry, 62(33), 8421-8429.
bierbostel	<a href="https://www.weidsebliek.nl/producten/bijproducten/ruwvoeders/bierbostel">https://www.weidsebliek.nl/producten/bijproducten/ruwvoeders/bierbostel</a>

Bronnen	
Bloedmeel DCM	
kippenmest	
Drijfmest vleesvarkens	
	Font-Palma, C. (2019). Methods for the treatment of cattle manure—a review. C—Journal of Carbon Research, 5(2), 27
totaal	Aust, M. O., Thiele-Bruhn, S., Eckhardt, K. U., & Leinweber, P. (2009). Composition of organic matter in particle size fractionated pig slurry. Bioresource technology, 100(23), 5736-5743.

Tabel B1.2

Biotische reststromen in Nederland, TNO-rapport | TNO 2013, R10864.

Biotische reststroom	Nu ingezet voor ...	prijs/ton	Beschikbaarheid in NL (ton/jr a.r.) <sup>24</sup>	% H2O
Gemengd afval keuken & supermarkten <sup>25</sup>		-90	100.000	30%
Diermeel Cat 1 & Cat 2 <sup>26</sup>	-(verwerking i.v.m. risico prionen)	-90	90.000	10%
Huish. Afval (excl. GFT-afval) <sup>27, 28</sup>	4,4 Mton naar AVIs, metaalwinning, wegebouw, warmtenet <sup>29</sup>	-80	7.600.000	30%
RWZI zuiveringslib <sup>25</sup>	Biogas, warmte	-50	1.500.000	78%
Verenmeel <sup>28</sup>	Warmte	-50	37.000	5%
Veilingafval <sup>30</sup>	Compostering	-30	125.000	60%
Plantenresten tuinbouw <sup>31</sup>	Compostering	-30	220.000	60%
GFT-afval <sup>32</sup>	Compostering, vergisting <sup>33</sup>	-30	1.297.000	55%
Uienafval <sup>32</sup>	Vergisting	-15	60.000	86%
Pluimveemest & overig <sup>34</sup>	As grondstof kunstmest	-15	1.160.000	30%
Dunne rundermest <sup>34</sup>	Biogas, uitrijden naar P- en N-arme regio's	-15	7.400.000	90%
Dunne varkensmest <sup>34</sup>	Biogas, uitrijden naar P- en N-arme regio's	-15	8.800.000	90%
Champos <sup>31</sup>		-10	780.000	30%
Bieterblad <sup>35</sup>	-	0	3.000.000	87%
Visafval <sup>32</sup>	Nertsenvoer, vergisting t.b.v. biogas	0	76.000	75%
Aardappelloof <sup>36</sup>	-	0	1.756.700	75%
Biergist (nat) <sup>37</sup>	Veevoer	18	67.500	89%
Aardappelstoomschillen <sup>38</sup>	Veevoer	20	450.000	80%
Korrelmaaisstengels en -kolven <sup>39</sup>	Veevoer	30	512.000	65%
Aardappelpersvezels <sup>38</sup>	Veevoer	36	395.000	84%
Natte bietenperspulp <sup>38, 40</sup>	Veevoer, vergisting t.b.v. biogas	50	445.000	76%
Cacaodoppen <sup>41</sup>		50	66.000	15%
Bierbostel <sup>30</sup>	Veevoer, vergisting	50	500.000	78%
Stro (tarwe, gerst) <sup>30, 40</sup>	Stalvloerbedekking, 2 <sup>e</sup> generatie biodiesel	150	1.100.000 <sup>41</sup>	15%

Biotische reststroom	Nu ingezet voor ...	prijs/ton	Beschikbaarheid in NL (ton/jr a.r.)	% H2O
Graanbijkproducten <sup>42</sup>	Veevoer, tarwegries	210	250.000	13%
Droge bietenperspulp <sup>38, 40</sup>	Veevoer	240	310.000	10%
Raapzaadschroot <sup>42</sup>	Veevoer	300	1.105.000	13%
Zonnebloemschroot <sup>42</sup>	Veevoer	300	555.000	11%
Diermeel C3 en food <sup>26, 43</sup>	Huisdiervoer	300	300.000	5%
Frituurolie <sup>38, 40</sup>	Veevoer, 2G biodiesel	450	120.000	5%
Dierlijk vet C1 <sup>26</sup>	Vee- en huisdiervoer, 2G biodiesel	450	40.000	5%
Weipoeder <sup>42</sup>	Veevoer	500	93.000	5%
Sojaschroot <sup>42</sup>	Veevoer	505	2.390.000	5%
Dierlijk vet (cat3 + food) <sup>26</sup>	Vee- en huisdiervoer	550	200.000	6%
TOTAAL (ton/jr)			42.900.200	

Tabel 3-1: Overzicht van de 34 beschouwde reststromen uit de agro- en foodsector (gerangschikt naar oplopende indicatieve

NB: Voetnoot 34: De mesthoeveelheden zijn de getransporteerde hoeveelheden, niet de totaal geproduceerde hoeveelheden. De totale hoeveelheden zijn volgens CBS 2019 rep 63, 19 en 1.5 Mton voor dunne rundermest, dunne varkensmest en pluimveemest en overig.

### Tabel B1.3

Reststromen in de teelt en verwerking van consumptieaardappelen en hun huidige bestemming. <https://edepot.wur.nl/368097>. Reststromen consumptieaardappelen Januari 2016 S.R.M. Janssens en A.B. Smit.

Reststroom	Coëfficiënt (productie per ton of ha)	Nationale productie a)	Bestemming
Aardappelloof	3,5 ton per ha	220 kton d.s.	Blijft op land achter
Grondtarra op akkerbouwbedrijf			Blijft op bedrijf achter
Kriek, blauw, beschadigd			Veevoer, bio-vergisting
Stoomschillen	15 kg per 100 kg aardappelen	555 kton, waarvan 55% als veevoeder afgezet	Veevoer, bio-vergisting
Snippers	8 kg per 100 kg aardappelen	296 kton	Aardappelproducten, veevoer, co-vergisten
Zetmeel			Technische toepassingen, veevoer, co-vergisten
Voorgebakken aardappelproduct			Veevoer, co-vergisten
Grondtarra bij verwerker	7 kg per 100 kg aardappelen	259 kton	Retour landbouw of afvoeren
Afvalwater wasserij en processing	-	-	Waswater, oppervlaktewater
Zuiveringsslib	2,4 kg per 100 kg aardappelen	89 kton	Co-vergisten, anaerobe verwerking, meststoffen
Frituurvet	-	10 kton	Biodiesel, chemie

a) Uitgaande van 3,7 miljoen ton aardappelen.

## Bijlage 2 Modules voor aanbod, vraag en mengen van organische reststromen

In Excel is een rekentool opgesteld om uit te rekenen of en hoe gelijktijdig plantenvoeding en koolzuurgas geproduceerd kan worden in een oxidatieve bioreactor. Ook zijn benodigde volumes, transportbewegingen en gerelateerde koolzuurgasuitstoot bepaald. Een en ander wordt verder toegelicht in 8 Tabellen.

---

Tabel B2.1

*Legenda gebruikte celkleuren.*

Kopregels
In te vullen data
Berekende data
Doorverwijzing
Door Solver in te vullen

Tabel B2.2

Basisdata van geselecteerde organische reststromen zoals versgewicht, drooggewicht, vochtgehalte, mineraalgehalte, organische stofgehalte, koolstofgehalte van de organische stof, gehalte in equivalenten koolzuurgas en restgehalte bij oxidatieve microbiële vertering.

Code	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
Calculation	$\text{if}(A <= 0, B * ((C+D) / \text{if}(B <= 0, A * (100 - (C + D)) / (C + D)), A) (C + D)), B)$																			
Parameter	FW	DS	Vocht- gehalte	Vocht- gehalte	FW	DS	%DW	Prijs	Prijs	OM	DOM	Ash	C-gehalte	C	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	minera-	restant	
Unit	kg/ ton	kg/ ton	%-w/w	%-w/w	kg/ton	kg/ton	%w/w	FW	DW	w	kg/ton	%-w/ w	%w/w	FW	kg/ton	FW	mol/ton	FW	%	kgDS/ ton
Dunne rundermest	0	92	91	0	930	92	10%	-15	-152	60	55	40	50	28	101	2292	2292	90	5.5	
Drijfmest vleesvarkens	0	110	89	0	890	110	12%	-15	-121	60	66	40	40	26	97	2200	2200	90	6.6	
Kippendrijfmest	1020	148	86	7	1020	148	15%	-15	-103	64	95	36	40	38	139	3162	3162	90	9.5	
Kippenstrooisel-mest	600	428	29	1	600	428	71%	-15	-21	50	216	50	40	86	316	7187	7187	90	21.6	
GFT afval (compost)	700	0	13	0	700	609	87%	-30	-34	70	426	30	40	171	625	14210	14210	80	85.3	
Bloedmeel DCM	978	0	10	0	978	880	90%	100	111	89	783	11	40	313	1149	26113	26113	90	78.3	
Champost	0	350	65	0	650	350	54%	100	186	61	214	39	40	85	313	7117	7117	80	42.7	
Grasafval	0	150	85	0	850	150	18%	-1	-6	75	113	25	40	45	166	3767	3767	80	22.6	

**Tabel B2.3**

Totaal gehalte aan parameters en elementen van belang voor de plantenvoeding uit geselecteerde organische reststromen. Genoemd worden zuurgraad en zoutgehalte (respectievelijk pH en EC in het 1:1.5 extract); de macro-elementen kalium, natrium, calcium, magnesium, stikstof, chloor, zwavel en fosfor (K, Na, Ca, Mg, N-tot, Cl, S en P na totaal destructie); van stikstof wordt ook de verdeling van N-totaal in N-mineraal en N-organisch gegeven; het koolstofgehalte in mol/ton (als berekend volgens Tabel 2); de verhouding C:N voor N-totaal, N-mineraal en N-organisch (berekend als mol/mol verhouding).

Code	A		B		C		D		E		F		G			
Calculation	D/A		D/B		D/C		D/A		D/B		D/C		D/C			
Parameter	pH	EC	K	Na	Ca	Mg	N-tot	N-min	N-org	Cl	SO <sub>4</sub>	P	C	ber C/ Ntot	ber C/ Nmin	ber C/ Norg
Unit	-log[H <sup>+</sup> ]	mS/cm	mol/ton DW	mol/ton DW	mol/ton DW	mol/ton DW	mol/ton DW	mol/ton DW	mol/ton DW	mol/ton DW	mol/ton DW	mol/ton DW	mol/ton FW	ratio	ratio	ratio
Dunne rundermest	6.5	4.2	145	13	40	33	350	186	164	13	30	25	2292	6.5	12.3	13.9
Drijfmest vleesvarkens			154	13	40	37	514	300	214	13	26	58	2200	4.3	7.3	10.3
Kippendrijfmest			123	9		55	729	414	314		39	110	3162	4.3	7.6	10.1
Kippenstrooiselmest			442	33		186	2000	257	1744		157	360	7187	3.6	28.0	4.1
GFT afval (compost)			330	152	32	9	679	71	607	50	165	3	14210	20.9	198.9	23.4
Bloedmeel DCM			936	15	7	40	7221	114	7107	226	30	281	26113	3.6	228.5	3.7
Champost			185	15	120	60	414	21	393	15	239	51	7117	17.2	332.1	18.1
Grasafval			818	35	150	82	600	300	300	20	20	97	3767	6.3	12.6	12.6

Tabel B2.4

Koolstof en elementen van belang voor de plantenvoeding voor geselecteerde organische reststromen geschat op werkelijk vrijkomende hoeveelheid in een oxidatieve bioreactor. De elementen worden opgegeven als totaalanalyse voor kalium, natrium, minerale stikstof en chloor. De elementen worden opgegeven als totaalanalyse vermenigvuldigd met de verteringsgraad voor calcium, magnesium, totale stikstof en organische stikstof, zwavel, fosfor en koolstof.

Code	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Calculation	A/100*B															
% beschikbaar	90	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Parameter	Minera- lisatie	CO <sub>2</sub> potentie	CO <sub>2</sub> actueel	K	Na	Ca	Mg	N-tot	N-min	N-org	Cl	SO <sub>4</sub>	P	CO <sub>2</sub> - actueel	Restant input o.s	Restant mineraal
Unit	% mol/ton															
	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton	mol/ton
Dunne rundermest	90	2292	2063	145	13	36	29	315	186	148	13	27	23	91	5.5	55
Drijfmest vleesvarkens	90	2200	1980	154	13	36	33	463	300	193	13	23	52	87	6.6	66
Kippen-drijfmest	90	3162	2846	123	9	0	50	656	414	283	0	35	99	125	9.5	95
Kippen-strooiselmest	90	7187	6468	442	33	0	167	1800	257	1570	0	141	324	285	21.6	216
GFT afval (compost)	80	14210	11368	330	152	25	7	543	71	486	50	132	3	500	85.3	853
Bloedmeel DCM	90	26113	23501	936	15	6	36	6499	114	6396	226	27	253	1034	78.3	783
Champost	80	7117	5693	185	15	96	48	331	21	314	15	191	41	251	42.7	427
Grasafval	80	3767	3013	818	35	120	66	480	300	240	20	16	78	133	22.6	226



Tabel B2.5

Opname van elementen door een gekozen gewas (ronde tomaat in dit geval) in eenheden per hectare per dag. Uitgaande van de bekende gemiddelde plantopname in mmol/L voedingsoplossing en het bekende watergebruik van dit gewas in Nederland in een gebruikelijk teeltsysteem (800 L/m<sup>2</sup>/jaar), wordt een jaaropname per eenheid oppervlakte berekend. Met de bekende teeltduur wordt in enkele stappen een gemiddelde opname per hectare per dag berekend. Vervolgens wordt vanuit de bekende opname van koolzuurgas van dit gewas (20 kg/m<sup>2</sup>/jaar) berekend wat de koolzuurgasopname is in kilogram per hectare per jaar.

	Code	Formule	K	Na	Ca	Mg	N-tot	N- min	N-org	Cl	S	P	CO <sub>2</sub> actueel	Restant input o.s	Restant mineraal
Molmassa	A	g/mol	39	23	40	23	14	14	14	14	32	31	12		
Opname Plant voedingselement	B	mmol/L	6	1	4	2	10	10	10	1	3	1			
Opname Plant water	C	L/m <sup>2</sup> /j	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
Opname Plant voedingselement	D	mmol/m <sup>2</sup> /j	4800	800	3200	1600	8000	8000	8000	800	2400	800	35	0	0
Teeltduur	E	d	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360
Opname Plant voedingselement	F	mmol/m <sup>2</sup> /d	13	2	9	4	22	22	22	2	7	2		0	0
Opname CO <sub>2</sub>	G	kg/m <sup>2</sup> /j											20		
Opname C-CO <sub>2</sub>	H	kg/m <sup>2</sup> /j											5.5	C-CO2!!	
Opname C-CO <sub>2</sub>	I	g/m <sup>2</sup> /d											15	C-CO2!!	
Opname	J	mol/ha/d	133	22	89	44	222	222	222	22	67	22	12626		
Opname	K	kg/ha/d	5.2	0.5	3.6	1.0	3.1	3.1	3.1	0.0	2.1	0.7	556		
Opname	L	kg/ha/j	1872	184	1280	368	1120	1120	1120	0	768	248	200000		

Tabel B2.6

Aantal dagen dat een gespecificeerd gewicht van een van de organische reststromen kan voorzien in de plantbehoefte van één hectare van het gekozen gewas (tomaat in dit geval) voor elk vrijkomend element en voor de vrijkomende koolstof. Merk op dat het gewicht de geselecteerde organische reststromen vrij gekozen kan worden en dat onder elk element opgeteld wordt hoeveel van dat element in totaal vrij komt uit alle gekozen organische reststoffen (alles uitgedrukt in dagen dat voldaan wordt aan de vraag van een gewas). Onder de optelling staat een (instelbaar) doel, namelijk het aantal dagen dat ideaaliter voldaan wordt aan de behoefte van het gewas (per element, inclusief koolstof). Daaronder staat hoeveel bereikt doel en ideaal te bereiken doel van elkaar verschillen (steeds in dagen). In de volgende regels worden de afwijkingen gesommeerd. Deze som van de afwijkingen dient als doel voor een berekening door een "Solver". Deze reken tool zit standaard in Excel en minimaliseert de gesommeerde waarde door alle mogelijke variaties in te vullen voor gewichten van de geselecteerde organische reststromen. Daarbij kan de Solver rekening houden met vooraf opgegeven maximale over en onderschrijdingen van de ingestelde doelwaarden. De maximale overschrijding staat per element genoemd in de laatste regels van de tabel (weer in dagen).

Code	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	J
Calculation	VraagD	VraagE	VraagF	VraagG	VraagH	VraagI	VraagJ	VraagK	VraagL	VraagM	VraagN
	Input	K	Na	Ca	Mg	N-tot	N-org	Cl	SO4	P	CO <sub>2</sub> actueel
	ton FW	dagen	dagen	dagen	dagen	dagen	dagen	dagen	dagen	dagen	dagen
Dunne rundermest	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Drijfmest vleesvarkens	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Kippendrijfmest	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Kippenstrooiselmest	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
GFT afval (compost)	4.24	10.5	28.9	1.2	0.7	1.4	9.3	9.5	8.4	0.5	3.8
Bloedmeel DCM	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Champost	13.17	18.3	8.6	14.2	14.3	1.3	18.6	8.9	37.8	24.0	5.9
Grasafval	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Som	dagen	28.8	37.5	15.4	15.0	30.0	27.9	18.4	46.2	24.5	9.8
Doel	dagen	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Verschil	dagen	8.8	4.6	5.0	10.0					4.5	10.2
Som verschil	dagen										43.1
Max overschrijding	dagen	15	20	10	10	15	10	10	30	25	15
Max onderschrijding	dagen	10	15	5	5	5	10	15	10	5	2

Tabel B2.7

Te transporteren volumes en gewichten bij een bepaalde vraag naar inputmateriaal (in dit voorbeeld ongeveer 13 ton grasafval en 1 ton grasafval, nodig voor 1 ha tomaat voor een periode van 20 dagen), inclusief de volumes en gewichten voor afvoer van het onverteerde restant. Vervolgens wordt uitgerekend wat de behoefte zou zijn voor 5000 ha gedurende een teeltperiode van 360 dagen. Uitgaande van een volume van 50 m<sup>3</sup> per transport, wordt vervolgens het totaal aantal ritten voor aanvoer en afvoer berekend.

		teeltduur			aantal ha		aantal ritten				
		360	5000				50				
Input	ton FW	FW kg/m <sup>3</sup>	FW L	Restant mineraal kg FW/ton	Restant mineraal kg FW/batch	Restant mineraal L FW/batch	Totaal transport m <sup>3</sup> /batch	Totaal m <sup>3</sup> /ha/j	Totaal NL m <sup>3</sup> /j	Totaal NL Mm <sup>3</sup> /j	aantal ritten m <sup>3</sup> /rit
Dunne rundermest	0.00	930	0	55	0	0	0	0	0	0.0	
Drijfmest vleesvarkens	0.00	890	0	66	0	0	0	0	0	0.0	
Kippendrijfmest	0.00	1020	0	95	0	0	0	0	0	0.0	
Kippenstrooiselmest	0.00	600	0	216	0	0	0	0	0	0.0	
GFT afval (compost)	0.00	700	0	853	0	0	0	0	0	0.0	
Bloedmeel DCM	0.00	978	0	783	0	0	0	0	0	0.0	
Champost	13.26	650	20400	427	5662	5662	26	469	2345615	2.3	
Grasafval	0.84	850	992	226	191	191	1	21	106481	0.1	
<b>Totalen</b>			<b>21393</b>	<b>5853</b>	<b>5853</b>	<b>5853</b>	<b>27</b>	<b>490</b>	<b>2452096</b>	<b>2.5</b>	<b>49042</b>

Tabel B2.8

*Te rijden kilometers, diesilverbruik en gerelateerde koolzuurgasuitstoot voor het aantal ritten uitgerekend in Tabel 7 (49042 ritten), bij een ritlengte van 200 kilometer (100 heen en 100 terug), een diesilverbruik van 35 L per 100 km en een koolzuurgas uitstoot van 2.6 kg per liter diesel.*

		Ritlengte heen + weer		
Afstand	km	200	9808385	km
Diesilverbruik	km/L	2.9	3432935	L
Koolzuurgas/L	kg/L	2.6	8925630	kg CO <sub>2</sub>
			8.9	kton CO <sub>2</sub>

## Bijlage 3 Gaskwaliteiten

Tabel B3.1

Limietwaarden voor OCAP gas en voor Air liquide gas.

Component	Limietwaarden OCAP	Limietwaarden AL
H <sub>2</sub> O	40 ppm	
NO	2,5 ppm	
NO <sub>2</sub>	2,5 ppm	
H <sub>2</sub>	Noot 1	5000 ppm
Totaal koolwaterstoffen (incl. methanol)	1200 ppm	
Methaan (CH <sub>4</sub> )	Noot 1	80 ppm
Etheen (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	1 ppm	
Ethaan (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	Noot 1	10 ppm
Totaal aromatische koolwaterstoffen	0,1 ppm	
Totaal vluchtige organische stoffen (excl. methanol)	1,2 ppm	
H <sub>2</sub> S	5 ppm	0,5 ppm
Carbonyl sulfide	0,1 ppm	
Dimethyl sulfide	1,1 ppm	
CO	750 ppm	0,5 ppm
HCN	20 ppm	

Tabel B3.2

Plant gevoeligheidslimieten voor verschillende blootstellingstijden in delen per miljard (ppb) en in microgram per kubieke meter ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Tabel uit Esmeijer, 1999.

Gas	Acute		Chronic	
	ppb	$10^{-6}\text{g}/\text{m}^3$	ppb	$10^{-6}\text{g}/\text{m}^3$
O <sub>3</sub>	100	200	30	60
NO	1000	1250	250	313
NO <sub>2</sub>	600	1150	100	192
SO <sub>2</sub>	70	187	15	40
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	50	58	8	9.3

Tabel uit Esmeijer, 1999. NB: The MAC value for CO is 25 ppm or 29 mg/m<sup>3</sup> of air. This value applies to an eight hour working day. This means that personnel must not work/be present in areas where the CO concentration exceeds 25 ppm.

Tabel B3.3

Brander afgassamenstelling voor verschillende brandertypen in delen per miljoen (ppm) en in microgram per kubieke meter ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Tabel uit Esmeijer, 1999.

Flue gas component	Gas boiler standard (3% O <sub>2</sub> )	Gas boiler low NOx	CO <sub>2</sub> hot-air heater standard	CO <sub>2</sub> hot-air heater low NOx	H/P poor mixture, $\lambda=1.6$	H/P with flue gas purifier
CO <sub>2</sub> %	9-10.5	9-10.5	6-10	6-10	7-9.5	7-9.5
CO ppm	<1-50	0-5	60	10-20	5-2000	0.1-15 (1)
(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) ppm	0.2-0.5	0-0.2	0.6	0.6	15-60	0.1-0.7 (2)
NOx ppm	60-85	20-40	50-60	<10	100-650	8-25 (3)

(1) Alarm is usually set at 10-15 ppm

(2) Alarm is usually set at 0.7 ppm

(3) Alarm is usually set at 30 ppm

Tabel B3.4

Plant gevoeligheidslimieten en limieten voor doseergafgassamenstelling in delen per miljard respectievelijk miljoen (ppb, ppm) voor twee ventilatiefactoren (1 en 1.6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h). Alle waarden gelden voor de wintersituaties als het gewas het gevoeligst is. Tabel uit Esmeijer, 1999.

Flue gas component	Limit values in greenhouse air		Maximum acceptable concentration in flue gases in parts per million (ppm)		
	Micro(10 <sup>-6</sup> ) gram per m <sup>3</sup>	Parts per billion (ppb)	Air factor $\lambda=1$ CO <sub>2</sub> =11.7%	Air factor $\lambda=1.6$ CO <sub>2</sub> =7.0%	Grams per giga joule
NO	313	250	46	29	15.0
NO <sub>2</sub>	192	100	19	12	9.2
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	9.3	8	1.4	0.9	0.44
NH <sub>3</sub> *	150	200	41	26	7.3
O <sub>3</sub> *	60	30	1.3	0.8	0.66

\* May be released during flue gas purification, depending on the purification process

Tabel B3.5

*Plant gevoeligheidslimieten voor verschillende blootstellingstijden in delen per miljard (ppb). Data van het toenmalige Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek, IPO, en het Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, als afgeleide effectgrenswaarden. Anoniem 1999, als genoemd in Dieleman, A., Zwinkels, J., De Gelder, A., Kuiper, I., De Zwart, F., van Dijk, C., and Dueck, T. 2007. CO<sub>2</sub> bij paprika: meerwaarde en beperkingen. Nota 494.*

Gas	Acuut (ppb)	Chronisch (ppb)
Ozon (O <sub>3</sub> )	100	28
Etheen (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	50	8
Stikstofmonoxide (NO)	1000	250
Stikstofdioxide (NO <sub>2</sub> )	600	132
Zwavedioxide (SO <sub>2</sub> )	70	15
Ammoniak (NH <sub>3</sub> )	3300	197

Tabel B3.6

*Voorstel voor effectgrenswaarden (ppb) ter voorkoming van negatieve effecten op planten als gevolg van blootstelling aan NO<sub>x</sub> en etheen. Dieleman, A., Zwinkels, J., De Gelder, A., Kuiper, I., De Zwart, F., van Dijk, C., and Dueck, T. 2007. CO<sub>2</sub> bij paprika: meerwaarde en beperkingen. Nota 494.*

Gas	Concentratie (ppb)	Tijdsduur
Stikstofoxiden (NO <sub>x</sub> )	40	24-uur
	16	Jaar
Etheen (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	11	8 uur
	5	4 weken





## Bijlage 4 Voedingsrecepten komkommer, tomaat, roos.

Voorbeelden van voedingsrecepten voor verschillende gewassen (Kreij *et al.* 1999, Nutrient Solutions and Water Quality for Soilless Cultures).

Tabel B4.1

*Standaardvoedingsoplossingen en streefgehalten voor komkommer.*

Element	Standard nutrient solution		Target value in root environment
	Closed system	Open system	
EC, mS.cm <sup>-1</sup>	1.7	2.2	2.7
pH			5.2
NH <sub>4</sub> , mmol.l <sup>-1</sup>	1.0	1.25	0.1
K	6.5	8.0	8
Na			<8
Ca	2.75	4.0	6.5
Mg	1.0	1.375	3.0
NO <sub>3</sub>	11.75	16.0	18.0
Cl			<1.0
SO <sub>4</sub>	1.0	1.375	3.5
HCO <sub>3</sub>			<1.0
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1.25	1.25	0.9
Si*	0.75	0.75	0.6
Fe, μmol.l <sup>-1</sup>	15	15	25
Mn	10	10.0	7
Zn	5	5	7
B	25	25	50
Cu	0.75	0.75	1.5
Mo	0.5	0.5	0.5

\* Optional

**Tabel B4.2**

Standaardvoedingsoplossingen en streefgehalten voor tomaat.

Element	Standard nutrient solution		Target value in root environment
	Closed system	Open system	
EC, mS.cm <sup>-1</sup>	1.6	2.6	3.7
pH			5.5
NH <sub>4</sub> , mmol.l <sup>-1</sup>	1.0	1.2	0.1
K	6.5	9.5	8
Na			<8
Ca	2.75	5.4	10
Mg	1.0	2.4	4.5
NO <sub>3</sub>	10.75	16.0	23
Cl			<12
SO <sub>4</sub>	1.5	4.4	6.8
HCO <sub>3</sub>			<1
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1.25	1.5	1.0
Fe, μmol.l <sup>-1</sup>	15	15	25
Mn	10	10	7
Zn	4	5	7
B	20	30	50
Cu	0.75	0.75	0.7
Mo	0.5	0.5	0.5

**Tabel B4.3**

Standaardvoedingsoplossingen en streefgehalten voor roos.

Rose

Element	Standard nutrient solution		Target value in root environment
	Closed system	Open system	
EC, mS.cm <sup>-1</sup>	0.7	1.6	2.0
pH			5.5
NH <sub>4</sub> , mmol.l <sup>-1</sup>	0.8	1.0	0.1
K	2.2	4.5	5
Na			<6
Ca	0.8	3.25	5
Mg	0.6	1.5	2.5
NO <sub>3</sub>	4.3	11.25	12.5
Cl			<8
SO <sub>4</sub>	0.6	1.25	2.5
HCO <sub>3</sub>			<1
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.5	1.25	0.9
Fe, μmol.l <sup>-1</sup>	15	25	25
Mn	5	5	3.0
Zn	3	3.5	3.5
B	20	20	20
Cu	0.5	0.75	1.0
Mo	0.5	0.5	0.5

# Bijlage 5 Gasanalyses door DNV dd 2022 03 09

## Analyserapport

Pagina 1 van 3

Certificaatnummer: ENQTG-BIOCOMP-22-015

Opdrachtgever: Wageningen University & Research  
Droevendaalsesteeg 4  
6708 PB Wageningen

Locatie monstername: Van der Knaap  
Datum monstername: 2022-03-09  
Tijdstip monstername: 14:37 / 14:41  
Monstername door: M. Holwerda - DNV  
Cilindernummer: 5584 / Tedlarbag  
Overige informatie: -

Datum van onderzoek: 2022-03-10

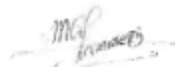
Wijze van onderzoek: Een gasmonster is middels GC/FID, GC/MS GC/TCD en GC/FPD geanalyseerd op de aanwezigheid van hoofdcomponenten, zwavelcomponenten, siloxanen, terpenen en organohalogenen.

Resultaat: De analysesresultaten zijn weergegeven op pagina 2 en 3 van dit certificaat.

Herleidbaarheid: De kwantitatieve metingen zijn uitgevoerd m.b.v. standaarden waarvan de herleidbaarheid naar (inter-) nationale standaarden is aangetoond.

Datum: 2022-04-01  
Naam: M. Holwerda  
Functie: Engineer Gas Services

Datum: 2022-04-01  
Naam: M.G. Lammers  
Functie: Senior Specialist Gas Analysis



**DNV Netherlands B.V.**  
Energieweg 17, 9743 AN, Groningen  
Postbus 2029, 9704 CA, Groningen  
Telefoon (050) 7009 700

[www.dnv.com](http://www.dnv.com)

Reproductie van het volledige certificaat is toegestaan. Gedeelten van het certificaat mogen slechts worden gereproduceerd na verkregen schriftelijke toestemming van het laboratorium van afgifte. Dit certificaat wordt verstrekt onder voorbehoud dat DNV Netherlands B.V. enigerlei aansprakelijkheid aanvaardt.

# Analyserapport

Pagina 2 van 3

Certificaatnummer: ENQTG-BIOCOMP-22-015

## Analyse hoofdcomponenten, conform ISO 6974

Waterstof	0.000	mol%
Zuurstof	19.860	mol%
Stikstof	79.405	mol%
Koolstofdioxide	0.735	mol%
Methaan	0.000	mol%
Koolmonoxide	0.000	mg/m <sup>3</sup>
Totaal van de componenten	100.000	mol%

## Berekeningen volgens ISO 6976 - 1995 (Tabel 3)

Calorische bovenwaarde	0.00	MJ/m <sup>3</sup>
Calorische onderwaarde	0.00	MJ/m <sup>3</sup>
Wobbe index	0.00	MJ/m <sup>3</sup>
Relatieve dichtheid	0.9986	-
Dichtheid	1.2912	kg/m <sup>3</sup>
Gehalte hogere koolwaterstoffen	0.0	mol% PE

## Zwavelcomponenten, conform ISO 6326

Waterstofdисульфide (H <sub>2</sub> S)	n.a.	ppm(mol)
Carbonylsulfide (COS)	n.a.	ppm(mol)
Methylmercaptaan (CH <sub>4</sub> S)	n.a.	ppm(mol)
Ethylmercaptaan (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S)	n.a.	ppm(mol)
Propylmercaptaan (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> S)	n.a.	ppm(mol)
Butylmercaptaan (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> S)	n.a.	ppm(mol)
Koolstofdисульфide (CS <sub>2</sub> )	n.a.	ppm(mol)
Dimethylsulfide (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S)	n.a.	ppm(mol)
Tetrahydrothiopheen (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> S)	n.a.	ppm(mol)
Zwavelgehalte anorganisch S	n.a.	mg S/m <sup>3</sup>
Zwavelgehalte organisch S	n.a.	mg S/m <sup>3</sup>
Totaal zwavelgehalte	n.a.	mg S/m <sup>3</sup>

*n.a.: Niet aantoonbaar of beneden detectielimiet van desbetreffende component.*

**DNV Netherlands B.V.**  
Energieweg 17, 9743 AN, Groningen  
Postbus 2029, 9704 CA, Groningen  
Telefoon (050) 7009 700

[www.dnv.com](http://www.dnv.com)

Reproductie van het volledige certificaat is toegestaan.  
Gedeelten van het certificaat mogen slechts worden  
gereproduceerd na verkregen schriftelijke toestemming van het  
laboratorium van afgifte. Dit certificaat wordt verstrekt onder  
voorbehoud dat DNV Netherlands B.V. enigertel  
aansprakelijkheid aanvaardt.

**Organohalogenen geanalyseerd middels GC/MS**

Chloor o.b.v. organochloorverbindingen	n.a.	mg Cl/m <sup>3</sup>
Fluor o.b.v. organofluorverbindingen	n.a.	mg F/m <sup>3</sup>

**Sporencomponenten middels GC/FID, GC/ELC en chemoluminescentie**

Koolmonoxide	<0.01	ppm(mol)
Distikstofmonoxide	72.28	ppm(mol)
		ppb(mol)
Methaan	<10	ppb(mol)
Ethaan	<10	ppb(mol)
Etheen	<10	ppb(mol)
Propaan	<10	ppb(mol)
Propeen	<10	ppb(mol)
Isobutaan	<10	ppb(mol)
n-Butaan	<10	ppb(mol)
Ethyn	<10	ppb(mol)
2,2-Dimethylpropaan	<10	ppb(mol)
1-Buteen	<10	ppb(mol)
Iso-Pentaan	<10	ppb(mol)
n-Pentaan	<10	ppb(mol)
Benzeen	<10	ppb(mol)
n-Hexaan	<10	ppb(mol)
Cyclohexane	<10	ppb(mol)
Methylcyclohexane	<10	ppb(mol)
Toluene	<10	ppb(mol)
NO	3.00	ppm(mol)
NOx	1.516	ppm(mol)

**Totaal natchemische analyse**

Ammoniak	0.38	ppm(mol)
Cyanide	<1	ppm(mol)
Fosfine	<0.1	ppm(mol)

*n.a.: Niet aantoonbaar of beneden detectielimiet van desbetreffende component.*

**DNV Netherlands B.V.**  
**Energieweg 17, 9743 AN, Groningen**  
**Postbus 2029, 9704 CA, Groningen**  
**Telefoon (050) 7009 700**

[www.dnv.com](http://www.dnv.com)

Reproductie van het volledige certificaat is toegestaan.  
 Gedeelten van het certificaat mogen slechts worden  
 gereproduceerd na verkregen schriftelijke toestemming van het  
 laboratorium van afgifte. Dit certificaat wordt verstrekt onder  
 voorbehoud dat DNV Netherlands B.V. enigerlei  
 aansprakelijkheid aanvaardt.





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](http://www.wur.nl/glastuinbouw)

Rapport WPR-1160

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.