



Circulariteit van reststroombenutting

Ontwikkeling van een Circularity Analysis Tool (CAT) om de circulariteit van biomassa toepassingen te vergelijken

Jan Broeze, Wolter Elbersen, Juliën Voogt en Han Soethoudt

OPENBAAR



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Circulariteit van reststroombenutting

Ontwikkeling van een Circularity Analysis Tool (CAT) om de circulariteit van biomassa toepassingen te vergelijken

Auteurs: Jan Broeze, Wolter Elbersen, Juliën Voogt en Han Soethoudt

Onder begeleiding van Pauline Buffing, Heleen van Rootselaar, Esther van Nes, Jessica Thio (LVVN)

Dit onderzoek is gesubsidieerd door en in opdracht van het Ministerie van Landbouw, natuur en voedselkwaliteit.

Wageningen Food & Biobased Research
Wageningen, september 2024

Openbaar

Rapport 2584

DOI: 10.18174/672425

Versie: Definitief

Reviewer: Heleen Stellingwerf en Heleen Ballemans

Goedgekeurd door: Jan Jetten

Gesubsidieerd en in opdracht van: het Ministerie van Landbouw, natuur en voedselkwaliteit

Dit rapport is: Openbaar

Het is de opdrachtgever toegestaan dit rapport integraal openbaar te maken en ter inzage te geven aan derden. Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen Food & Biobased Research is het niet toegestaan:

- a. dit door Wageningen Food & Biobased Research uitgebrachte rapport gedeeltelijk te publiceren of op andere wijze gedeeltelijk openbaar te maken;
- b. dit door Wageningen Food & Biobased Research uitgebrachte rapport, c.q. de naam van het rapport of Wageningen Food & Biobased Research, geheel of gedeeltelijk te doen gebruiken ten behoeve van het instellen van claims, voor het voeren van gerechtelijke procedures, voor reclame of antireclame en ten behoeve van werving in meer algemene zin;
- c. de naam van Wageningen Food & Biobased Research te gebruiken in andere zin dan als auteur van dit rapport.

Het onderzoek zoals beschreven in dit rapport is op objectieve wijze uitgevoerd door onderzoekers die onpartijdig zijn ten opzichte van de opdrachtgever(s) en sponsor(s). Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/672425> of op www.wur.nl/wfbr (onder WFBR publicaties).

© 2024 Wageningen Food & Biobased Research, instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research.

Postbus 17, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 00 84, E info.wfbr@wur.nl, www.wur.nl/wfbr. Wageningen Food & Biobased Research is onderdeel van Wageningen University & 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, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

Met betrekking tot de database agro-residuen en de berekeningen van circulariteitsscores kunnen vragen gericht worden aan:

wolter.elbersen@wur.nl

julien.voogt@wur.nl

jan.broeze@wur.nl

Inhoud

Samenvatting	4
English Abstract	6
1 Inleiding	8
2 Achtergrond: circulariteit van de inzet van agro-residuen	9
3 Een nieuwe methode om circulariteit van toepassingen van biograndstoffen vast te stellen	12
3.1 Waardering van componenten	13
3.2 Efficiëntie van de inzet van biomassacomponenten in een toepassing	14
3.3 Functionaliteit van componenten in eindproducten	14
3.4 Integrale weging van mate van circulariteit	16
3.5 Voorbeeld toepassing: rundveevoer	18
3.6 Samenstellingsgegevens van agro-residuen	19
3.7 Circulariteitsscores van verschillende benuttingsopties voor agro-residuen	20
4 Integrale duurzaamheidsafweging	21
5 Vergelijking tussen huidige en alternatieve toepassingen van agro-residuen	23
5.1 Casus 1: Vergelijking benuttingsmogelijkheden voor keukenafval	23
5.2 Casus 2: Vergelijking van benutting van bierbostel in voedsel in plaats van veevoer	24
5.3 Casus 3: Raffinage bietenblad in vergelijking met het op het land laten liggen	25
5.4 Casus 4: Toepassing paprika en tomatenplantenresten als isolatiemateriaal, persen met benutting van nutriënten en verbranden	26
5.5 Reflectie	26
6 Discussie en acties	27
6.1 Discussie	27
6.2 Acties	27
Literatuur	28
Annex 1 Database agro-residuen, samenstelling, toepassing(en) en omvang	30
Annex 2 Efficiency of biomass utilization in various applications	36
Annex 3 Schatters voor samenstelling gegevens en veevoederwaarden die ontbreken in de biomassa database	53

Samenvatting

Het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur (LVVN) wil toepassingen van agro-residuen die circulaire zijn dan de huidige toepassingen ondersteunen. Daarom is er behoefte aan een methode om de circulariteit van verschillende toepassingen van agro-residuen te kunnen vergelijken en te bepalen welke toepassing van een residu hoger scoort. Om te bepalen welke toepassing van biomassa/biogrondstof (meestal afval) een voorkeur genieten wordt vaak verwezen naar de Ladder van Moerman of de Ladder van Lansink of de principes van de Ellen McArthur Foundation. Ook de Sociaal-Economische Raad (SER) geeft voor biomassa wat richtlijnen. Deze methoden geven wel voorkeurstoepassingen aan maar houden geen rekening met de samenstelling van de biomassa en ook niet met de efficiëntie van de inzet van die biomassa voor verschillende toepassingen.

Dit rapport beschrijft een methode om de circulariteit van verschillende toepassingen van agro-residuen (of andere biomassa/biogrondstoffen stromen) te kwantificeren. Deze methode houdt er rekening mee dat biomassa/biogrondstoffen bestaan uit verschillende componenten, dat deze componenten verschillen in mate van schaarsheid en mate waarin het belangrijk is dat ze circulair worden benut. De methode houdt er ook rekening mee dat bepaalde toepassingen "circulaire" zijn dan andere toepassingen. Verder houdt de methode rekening met de efficiëntie waarmee de residuen ingezet worden. Om de circulaire score te berekenen is de Circularity Analysis Tool (CAT) ontwikkeld. De CAT bevat standaard verwerkingsroutes voor agro-residuen zoals inzet voor kippenvoer, varkensvoer, verbranding voor energieproductie, vergisting, inzet als materiaal, etc. De methode houdt rekening met de samenstelling, efficiëntie van omzetting en bevat een hiërarchie van toepassingen van meest (4) tot minst circulair (0). De methode vereist dat de samenstelling van de biomassa/biogrondstof bekend is, dus is er een database gemaakt van de samenstelling van meer dan 100 Nederlandse agro-residuen en afvallen.

Biomassa bestaat uit vezels, suikers, zetmeel, oliën en vetten, eiwit (stikstof), fosfaat en kalium. Voor sommige componenten is het belangrijker dat ze efficiënt worden benut en herbenut dan voor andere omdat ze schaars zijn, zoals voor P en in mindere mate voor K, of omdat ze per kg meer energie-inhoud of waarde hebben. Er is daarom een waardering gemaakt die dit weergeeft, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen de waardering voor eiwit, vezel, zetmeel, suiker en andere koolhydraten, vetten /oliën en nutriënten.

Tabel 1. Waardering van biomassacomponenten

Component	Eiwit	Vet / olie	Vezel	Zetmeel, suiker, andere koolhydraten	N	P	K
Waardering	4	2.2	1	1	6	9	3

Daarnaast is er een hiërarchie ontwikkeld die de mate van de functionaliteit van een toepassing aangeeft. Deze gaat er bijvoorbeeld van uit dat directe toepassing als voedsel hoger scoort dan voedselproductie via de toepassing als veevoer vanwege de (in)efficiëntie van de omzetting van vee. Toepassingen die de functionaliteit benutten en behouden (en dus opnieuw te gebruiken zijn) scoren hoger dan toepassingen die functionaliteit verminderen. Eindtoepassingen zoals energieproductie of toepassing als meststof of bodemverbeteraar scoren lager omdat die beter uitgesteld kunnen worden. Het resultaat is een functionaliteitsscore voor verschillende toepassingen van 4 tot 0. Deze scores kunnen per component verschillen.

Tabel 2. Functionaliteitsscore van biomassacomponenten in toepassingen

Score	Eiwit	Vet / olie	Vezel	Zetmeel, suiker, andere koolhydraten	N, P, K
4	Voedsel	Voedsel	Voedsel, Materiaal (macrostr. behouden)	Voedsel	Voedsel
3	Diervoer, Materiaal	Diervoer	Diervoer, Materiaal (macrostr. afgebroken)	Diervoer Materiaal	Diervoer
2	Chemicaliën, Bodem (N)	Chemicaliën, Transportbrandstof	Chemicaliën	Chemicaliën, Transportbrandstof	Meststof (bodem)
1	Energie	Energie	Energie, Bodemverbeteraar	Energie	
0	Storten, verbranden zonder energiebenutting, verlies naar omgeving				

NB. In het geval de keten tot het eindproduct bekend is (bijvoorbeeld voer voor legkippen leidt tot het voedselproduct eieren, mest en veren) wordt in de tool de efficiëntie tot dat eindproduct berekend, inclusief functionaliteitsscore voor voedsel.

De mate van circulariteit wordt berekend volgens de volgende formule:

$$Circulariteit \% = \frac{\sum_{toepassing j} \sum_{component i} (Gehalte_i \times Waardering_i \times Efficiëntie_{i,j} \times Functionaliteit_{i,j})}{\sum_{componenten i} (Gehalte_i \times Waardering_i \times 4)}$$

Deze formule drukt de mate van circulariteit uit als % t.o.v. de maximale score die mogelijk zou zijn. Dus toepassing op de hoogste functionaliteit (4) en met een efficiëntie van 100%.

De methode houdt dus rekening met de efficiëntie van de verwerking van de componenten, maar verdisconteert niet de eventuele verdere inputs (zoals kosten) of energie die daarbij nodig is. De circulariteitscore moet gezien worden als een nieuw aspect om mee te wegen bij het maken van een integrale duurzaamheidsafweging. Deze integrale afweging (zie ook Elbersen et al. 2022) omvat ook milieu impacts (biodiversiteit, bodemkwaliteit, broeikas effect, etc.) en socio-economische aspecten (economische haalbaarheid, toegevoegde waarde, werkgelegenheid, etc.). En aspecten relevant voor implementeerbaarheid zoals regels en wetten (zie voedselveiligheid, veiligheid voor de bodem), beschikbaarheid van technologie en kennis, financierbaarheid.

De methode is gebruikt om de circulariteitsscore te berekenen van 4 cases waarbij huidige inzet wordt vergeleken met een alternatieve toepassing. Bijvoorbeeld bietenblad voor onderwerken op het land (huidige benutting) versus het bioraffineren voor voedingseiwit waarna de residuen worden vergist (voor energieproductie) en het digestaat wordt benut voor bemesting. Deze score is hierbij 6% voor achterlaten op het land vs. 28% voor bioraffinage.

Samen met een database van Nederlandse agro-residuen, en indien voldoende data over de bestemming van agro-residuen van jaar op jaar te vinden is, zou het mogelijk moeten zijn om met de hier beschreven methode circulariteit van de inzet tussen verschillende jaren te monitoren. Deze mogelijkheid wordt in een volgende studie verkent.

Abstract

The Ministry of Agriculture, Fisheries, Food security and Nature wants to support applications of agro-residues that are more circular than current applications. There is therefore a need for a method to compare the circularity of different applications of agro-residues in order to determine which application of a residue scores higher. To decide on the preferred application of biomass residues and waste the so called "Moerman's Ladder" or "Lansik's ladder" or the principles of the Ellen McArthur Foundation are generally referred to. The Netherlands Social and Economic Council (SER) also provides some guidelines for biomass utilisation. These methods/reports indicate preferred applications, but do not take into account the composition of the biomass nor the efficiency of the use of that biomass for different applications.

This report describes a method to quantify the circularity of different applications of agro-residues. This method takes into account that biomass feedstocks consist of different components, that these components differ in their degree of scarcity and the extent to which it is important that they are used in a circular way. The method also takes into account that certain applications are more circular than other applications (some applications allow for re-use other don't). Furthermore, the method takes into account the efficiency with which the residues are used. The Circularity Analysis Tool (CAT) has been developed to calculate the circular score. The CAT contains standard processing routes for agro-residues such as use for chicken feed, pig feed, combustion for energy production, fermentation, use as material, etc. The method takes into account the composition, efficiency of conversion and contains a hierarchy of applications from most (4) to least circular (0). The method requires that the composition of the biomass/feedstock is known. Therefore, a database has been created of the composition (and current applications) of more than 100 Dutch agricultural residues and wastes.

Biomass consists of fibres, sugars, starch, oils and fats, protein, phosphate and potassium. For some components it is more important that they are used and reused efficiently than for others because they are scarce, such as for P and to a lesser extent for K, or because they have more energy content or value per kg. A rating has therefore been made that reflects this, with the rating being for fibre, starch, sugar and other carbohydrates and main nutrients.

Table 3. Valuation of biomass components

Component	Protein	Fat /oil	Vezel	Carbohydrates: starch, sugar	N	P	K
Valuation	4	2.2	1	1	6	9	3

In addition, a hierarchy has been developed that indicates the degree of functionality of an application. This assumes, for example, that direct application as food scores higher than food production via application as livestock feed due to the (in)efficiency of the conversion of livestock. Applications that utilize and maintain functionality (and can therefore be used again) score higher than applications that reduce functionality. End applications such as energy production or application as fertilizer or soil improver score lower because they can be better postponed. The result is a functionality score for different applications from 4 to 0. These scores can differ per component.

Table 4. Functionality score of biomass components in applications

Score	Protein	Fat / oil	Fibre	Starch, sugar, other carbohydrates	N, P, K
4	Food	Food	Food, Material (macrostr. maintained)	Food	Food
3	Animal feed, Material	Animal feed	Animal feed, Material (macrostr. broken down)	Animal feed, Material	Animal feed
2	Chemicals, To soil (N)	Chemicals, Transport fuels	Chemicals	Chemicals, Transport fuels	Fertilizer (to soil)
1	Energy	Energy	Energy, Soil enhancer	Energy	
0	Landfilling, incineration without energy utilization, loss to the environment				

NB. If the chain to the end product is known (for example, feed for laying hens leads to the food product eggs plus manure and feathers), the tool calculates the efficiency of that end product, including a functionality score for food and manure.

The degree of circularity is calculated according to the following formula:

$$\text{Degree of circularity} = \frac{\sum_{\text{Application } j} \sum_{\text{component } i} (\text{Content}_i \times \text{Valuation} \times \text{Efficiency}_{i,j} \times \text{Functionality}_{i,j})}{\sum_{\text{component } i} (\text{Content}_i \times \text{Valuation}_i \times 4)}$$

This formula expresses the degree of circularity as a percentage of the maximum possible score. The maximum score is the score when the biomass is applied at the highest functionality (4) and with an efficiency of 100%.

The method therefore takes into account the efficiency of the processing of the components, but does not take into account any further inputs or energy required. The circularity score should be seen as a new aspect to take into account when making an integrated assessment. This integrated consideration (see also Elbersen et al. 2022) also includes environmental impacts (biodiversity, soil quality, greenhouse effect, etc.) and socio-economic aspects (economic feasibility, added value, employment, etc.). And aspects relevant to “implementability” such as rules and laws (i.e. food safety, soil safety), availability of technology and knowledge, financing, etc.

The method was used to calculate the circularity score of 4 cases in which current use is compared with an alternative application. For example, beet leaves field residue is now ploughed under (current use) versus biorefining for food protein, after which the residues are used for biogas production (for energy) and the digestate is used for fertilization. This score is 6% for leaving on the land vs. 28% for biorefinery.

Together with a database of Dutch agro-residues and data on the destination of agro-residues, it should be possible to monitor circularity of use between different years using the method described here. This possibility will be explored in a subsequent study.

1 Inleiding

Het ontwikkelen van een circulaire economie wordt gezien als één van belangrijkste verduurzamingsstrategieën. In een circulaire economie worden grondstoffen efficiënt herbenut waardoor er uiteindelijk minder grondstoffen nodig zijn. Daardoor vermindert de afhankelijkheid van de winning en productie van nieuwe (fossiele) grondstoffen en materialen. Veel van de natuur- en milieuproblemen zijn in de kern te herleiden tot een verspillende omgang met grondstoffen (PBL, 2021). Het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit wil daarom toepassingen van agro-residuen die circulaire zijn dan de huidige toepassingen ondersteunen. Om dit te kunnen doen is er behoefte aan een methode om te beoordelen wat een meer circulaire toepassing is van agro-residuen.

In dit rapport richten wij ons op het ontwikkelen van een methode om circulariteit te kwantificeren om zo de meer circulaire toepassing van een agro-residu te onderscheiden.

Als afwegingkader wordt vaak gerefereerd aan de ladder van Moerman. Deze hanteert rigide regels (bijvoorbeeld "inzet in de bodem is hoogwaardiger dan inzet voor energieopwekking"). Echter, dit veronachtzaamt dat biomassa/biogrondstoffen bestaan uit verschillende componenten, die elk een verschillende waarde en efficiëntie in de toepassing hebben (bijvoorbeeld zetmeel heeft een hele lage waarde bij inzet voor de bodem, maar heeft een hoge waarde als voedsel of veevoer en kan ook heel efficiënt worden omgezet in energie). Dit rapport presenteert een afwegingskader dat rekening houdt met dergelijke nuances.

In een eerder rapport (Elbersen et al. 2022) is er op basis van de principes van de Ellen McArthur Foundation een methode beschreven om toepassingen van eenzelfde biomassasoort met elkaar te vergelijken. Er wordt hierbij vanuit gegaan dat er een hiërarchie is van toepassingen van meer naar minder circulair. Deze hiërarchie verschilt per component (vezel, eiwit, suikers, zetmeel, vetten, fosfaat, kalium, etc.) van de biomassa, en erkent dat de efficiëntie van de biomassa toepassing ook meegerekend moet worden. Om deze methode toe te passen is het nodig te weten wat de samenstelling van de biomassa is. Daarom is er een database opgezet die van de belangrijkste Nederlandse agro-residuen zowel de samenstelling als de huidige toepassingen weergeeft. In een volgend rapport wordt dezelfde methode gebruikt om te verkennen of en hoe het mogelijk zou zijn om de circulariteit van de benutting van agroresiduen van jaar op jaar te monitoren. Daarvoor zal data beschikbaar moeten zijn van de toepassing van agroresiduen van jaar tot jaar.

2 Achtergrond: circulariteit van de inzet van agro-residuen

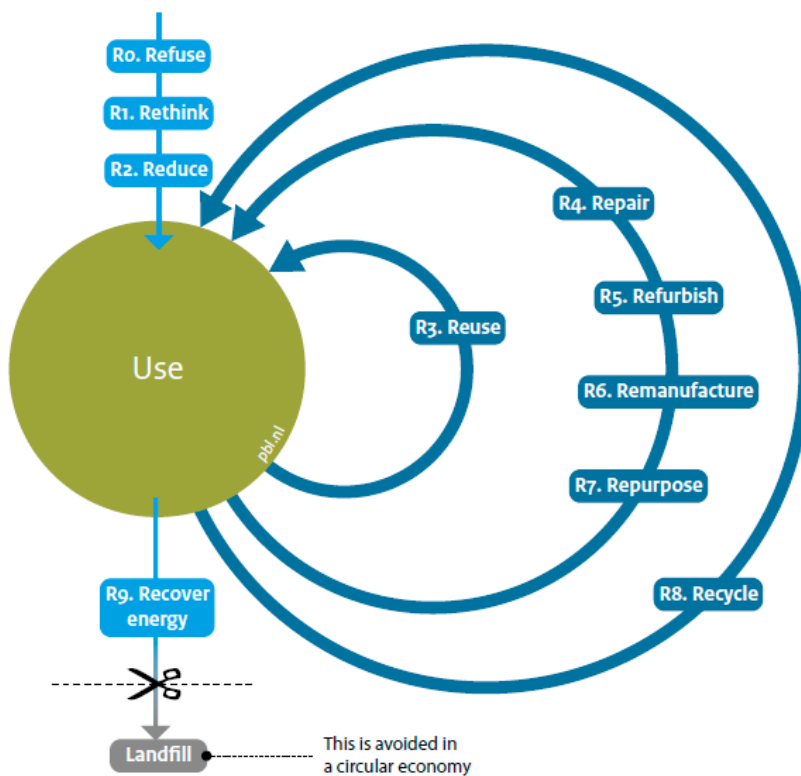
In een circulaire economie worden ketens zo ontworpen dat afval en vervuiling niet meer bestaan, producten en materialen in het systeem behouden blijven en natuurlijke systemen geregenereerd worden (naar de Ellen MacArthur Foundation).

Doel is dus om materialen zo waardevol mogelijk te gebruiken en te hergebruiken, dat betekent:

- Ontwerp productiesystemen zo dat er geen afval of vervuiling plaatsvindt.
- Houd producten en materialen zoveel mogelijk in gebruik. Dus lang benutten en herbenutten en zoveel mogelijk de functionaliteit van de biomassa behouden.
- Regeneer natuurlijke systemen. Dus productiesystemen in stand houden en verbeteren.

Voor het technische domein (niet biomassa materialen) heeft de Ellen MacArthur Foundation 9 strategieën gedefinieerd, gericht op het zo hoogwaardig mogelijk benutten van producten en materialen (Figuur 1), waardoor deze zo lang mogelijk in het systeem behouden blijven en dientengevolge de behoefte aan grondstoffen wordt verkleind.

Circular economy: more than recycling



Source: PBL

Figuur 1. R ladder met 9 strategieën van circulariteit (overgenomen van PBL 2018, p11)

Biomassa is anders

Biomassa is anders dan gewone grondstoffen (i.e. metalen, beton). Biomassa is van zichzelf in principe bijna geheel circulair. Immers, planten leggen CO₂ vast die bij benutting van de biomassa uiteindelijk weer CO₂ wordt bij afbraak of verbranding. Waarna CO₂ weer voor fotosynthese gebruikt kan worden. Dit kan eendeloos doorgaan. Echter, planten hebben meststoffen/nutriënten nodig, waaronder fosfaat en kalium, grondstoffen waarvan de makkelijk beschikbare, geconcentreerde voorraden uitgeput worden: ze worden verspreid in het ecosysteem. Verder is er bemesting nodig met stikstof, dat weliswaar net als CO₂ hernieuwbaar uit lucht te winnen is, waardoor het niet opraakt, maar waarvan de productie (vastlegging)

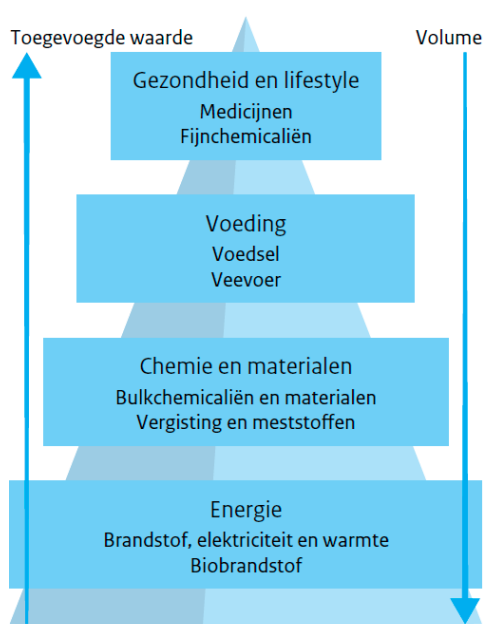
veel energie vergt en dus ook broeikasgasuitstoot in de vorm van CO₂ en N₂O (lachgas) veroorzaakt. Daarnaast is voor productie van biomassa land en water nodig, die vaak schaars zijn. Aanvoer van biomassa kost energie en brandstoffen, tijdens productie, verwerking en vervoer. Daarom is het waardevol om de gebruikswaarde van biomassa te maximaliseren, immers daardoor wordt de hoeveelheid benodigde gewassen of biomassa/biogrondstoffen geminimaliseerd. Dit wordt geïllustreerd door een voorbeeld waarin de impact van gangbare inzet van hout en rest- en afvalstromen, afgeleid, van hout, wordt vergeleken met een systeem waarin maximaal wordt gecascadeerd (Höglmeier et al., 2015). Verbeterde cascadering leidt in dit voorbeeld tot een vermindering van 14% van de totale behoefte aan nieuw hout en tot een verlaging van de totale broeikasgasuitstoot van 7%. Bij cascadering van biomassa wordt biomassa dus zoveel mogelijk meerdere keren gebruikt voor de eindtoepassing aan de beurt is. Dit bespaart grondstof / biomassa. Bij de toepassing van biomassa ter vervanging van niet hernieuwbare grondstoffen kan een aanzienlijke CO₂-reductie worden gerealiseerd (Min I&W, 2019, p9). Zie bijvoorbeeld staal of beton of de vervanging van fossiele grondstoffen. Dit is een andere overweging bij de duurzaamheidsanalyse van de inzet van biomassa/biogrondstoffen (zie Hoofdstuk 4).

De inzet van biomassa in een toepassing leidt over het algemeen tot verlaging van functionaliteit. Bij gebruik van hout voor meubels wordt de functionaliteit grotendeels behouden, maar slechts ongeveer 50% van het hout wordt meubel. Met andere woorden: de efficiëntie van de omzetting van hout in een meubel is ongeveer 50%. De rest is zaagsel of houtstukken die niet in meubels gebruikt kunnen worden. Deze bijproducten kunnen wel worden benut, maar op een lager niveau van functionaliteit (zie Spijker et al. 2020). Bij verwerking van hout tot spaanplaat materiaal kan het hout vollediger worden benut, maar wordt de macrostructuur afgebroken. Als de functionaliteit maximaal behouden blijft kan het product na de gebruikscyclus wederom zo functioneel mogelijk worden ingezet; wat leidt tot langdurige CO₂-vastlegging. In sommige toepassingen gaat de biomassa functionaliteit nagenoeg geheel verloren, zoals bij verbranding. Er wordt natuurlijk CO₂-uitstoot vermeden door vermijding van fossiel gebruik – dat is een andere dimensie van duurzaamheid (zie hoofdstuk 4). Mineralen in de as, zoals kalium of fosfaat, kunnen hergebruikt worden als meststof (veelal gebeurt dit nu niet). Ook bij veel andere toepassingen is er sprake van significant functionaliteit- en/of efficiëntieverlies, Bijvoorbeeld bij inzet van voedselreststromen voor veevoer worden de biomassa/biogrondstof componenten met een lagere efficiëntie (<1) weer omgezet tot voedsel (en mest). Ook bij terugbrengen naar de bodem komt de cascade aan zijn einde voor het grootste deel van de biomassacomponenten.

De principes van maximale behoud/benutting van functionaliteit en efficiëntie vormen ook de grondslag van de biomassa waarde-piramide en de ladder van Moerman (Figuur 2) en de daarop lijkende detaillering van de "R-strategie" (Figuur 1) voor biomassa (Figuur 3). Echter, de volgordelijkheid volgens deze principes is rigide, met een voorkeur voor het herinzetten van bijproducten als voedsel en veevoer, vervolgens als grondstof voor de industrie, dan als meststof of compost en dan voor energie, met als laatste optie storten/verbranden zonder enige energiebenutting. Dit veronachtzaamt dat de waarde in een toepassing kan verschillen per component van de biomassa. De mate van circulariteit van een benuttingsvorm dient daarom gemeten te worden op basis van de waarde van de componenten van de biomassa in de toepassing. Een afwegingskader daarvoor wordt in het volgende hoofdstuk gepresenteerd.

Vuistregels voor hoogwaardig hergebruik

Piramide van Waarde



Ladder van Moerman



Bron: PBL

Figuur 2. De biomassa waarde piramide en de ladder van Moerman geven vuistregels voor het beslissen over hoogwaardige toepassingen van biomassa (PBL 2016)

R5: het gebruiken van reststromen voor voedsel, veevoer, materiaal of meststof/compost, bijvoorbeeld door het gebruiken van broodresten om bier te brouwen.

R5.1 – Reststroom gebruiken als voedsel of diervoeder

R5.2 – Reststroom gebruiken als grondstoffen voor de industrie

R5.3 – Reststroom gebruiken als meststof of compost

R6: het gebruiken van reststromen voor energie, zoals vergisters en palletkachels die biotische reststromen (voornamelijk) omzetten in energie. Vergisters produceren ook meststoffen (*recycling*), maar omdat ze ontworpen zijn voor energieproductie hebben we ze ingedeeld bij recover.

Bij R5 en R6 is het van belang dat mineralen worden teruggebracht in de landbouw (als meststof of diervoeder) nadat de organische stoffen uit het product zijn gebruikt of omgezet.

Figuur 3. Specifieke sub- R-trappen voor biomassa (p25, PBL 2019)

3 Een nieuwe methode om circulariteit van toepassingen van biograndstoffen vast te stellen

Om de score per component van een biograndstof in een toepassing te beoordelen is een kwantitatief afwegingskader nodig dat de bijdrage per component voor het (re-)genereren van een nieuw eindproduct inschat. Om de circulaire score te berekenen is de Circularity Analysis Tool (CAT) ontwikkeld. Daarbij wordt gekeken naar componenten/macronutriënten – eiwitten, vetten/olie, koolhydraten (zetmeel en suiker) en vezels (te specificeren tot lignine, cellulose en hemicellulose), N, P, K, en eventueel specifieke moleculen zoals antioxidanten, pectine, kleurstoffen en geurstoffen.

De CAT adresseert waardering, efficiëntie en functionaliteit per component in een toepassing:

- **Waardering** (tussen 1 en 10): De waarde van biomassa-componenten verschilt. Bedenk bijvoorbeeld dat een gram fosfor (bronnen worden uitgeput, niet hernieuwbaar) een veel hogere waarde kan hebben voor een circulair systeem dan een gram zetmeel (hernieuwbaar). En aan eiwitgrondstoffen wordt een hogere waarde toegekend dan aan andere macronutriënten omdat het een essentiële bouwstof is, en omdat de productie stikstofbemesting vergt en grondstof-intensiever is (redenen achter de Nationale Eiwitstrategie).
- **Efficiëntie**: uitgedrukt als %. Inzet van biomassa resulteert vaak met een beperkte efficiëntie in een eindproduct. Bijvoorbeeld bij hergebruik van hout zijn er vaak zaag- en schaafresten die minder hoogwaardig worden ingezet (variërend van spaanplaat tot energie). Bij inzet als veevoer is de conversie-ratio van voer naar voedselproduct (vlees, ei, melk) veel kleiner dan 100%. Een kilo voer levert veel minder dan 1 kilo vlees omdat de dieren ook energie nodig hebben voor het onderhoud en de opbouw van hun lichaam. De efficiëntie kan verschillen tussen componenten en tussen specifieke toepassingen.
- **Functionaliteit** (van 4 tot 0): Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de verschillende (hergebruiks-)waarden van het product. Aan voedsel en onverwerkte materialen wordt de hoogste functionaliteitswaarde toegekend. Een voorbeeld hiervan is hout, dat de mogelijkheid biedt tot inzet in een soortgelijke toepassing bij hergebruik. Voor biobased toepassingen onderscheiden we de volgende niveaus in volgorde van aflopende functionaliteitswaarde (aan de hand van een voorbeeld voor houtvezelmaterialen):
 4. Macrostructuur behouden.
 3. Macrostructuur afgebroken maar deel functionaliteit behouden. Vezelstructuur behouden (zoals in papierpulp en Medium Density Fibreboard).
 2. Verdere afbraak tot kortere ketens, zoals suikers, ethanol en building blocks voor bijvoorbeeld bioplastics.
 1. Functie gaat (uiteindelijk) verloren. Eindtoepassingen, energie en bodem.
 0. Koolstof verloren, verdere inhoud stoffen verloren.

3.1 Waardering van componenten

Verschillende heuristieken kunnen worden gedefinieerd voor de vergelijking van de waarde van componenten ten opzichte van elkaar waarbij glucose een waarde van 1 heeft. Een eenduidige methode is niet mogelijk dus zijn verschillende overwegingen meegenomen en is er uiteindelijk een min of meer logisch getal gekozen die de verschillen weergeeft.

- Op basis van de verbrandingsenergie van componenten (ten opzichte van de verbrandingswaarde van glucosesuiker:
 - suiker, zetmeel, vezels en andere koolhydraten (verbrandingswaarde: 17 à 20 MJ/kg),
 - vet en olie (verbrandingswaarde : 37.4 MJ/kg): factor 2,2.
 - De verbrandingswaarde van eiwit is iets lager dan voor suiker, maar de waardering van eiwit is omwille van andere overwegingen veel hoger gekozen zie hieronder.
- Op basis van marktprijzen, bijvoorbeeld:
 - De marktprijs van olie (gemiddelde van palm, soja en rapzaad) ligt ruim 3 keer zo hoog als de prijs van suiker¹.
 - De marktprijs voor voedereiwit ligt ongeveer 4 keer zo hoog als die voor voederenergie (zetmeel)². Verder is de impact van eiwit eiwitproductie hoog daar de noodzaak om N vast te leggen wat energie koste en broeikasgas uitstoot meebrengt. Verder heeft verlies van N naar de omgeving een grote impact.
 - De verhouding voor marktprijzen voor kunstmest-componenten N, P en K ligt rond 2:3:1. Daarnaast wordt ook meegenomen dat P schaarser is dan K. N is niet schaars maar kost wel energie en vervuiling bij vastlegging. Er is gekozen voor een waardering van 9 voor P, 6 voor N en 3 voor K.
- Op basis van productiviteit van representatieve gewasteelten, bijvoorbeeld:
 - zetmeel- en eiwitopbrengst van zetmeelaardappelen ligt rond 8 ton resp. 1.4 ton per hectare per jaar,
 - suiker- en eiwitopbrengst van suikerbieten ligt rond 8 resp. 0.5 ton per hectare per jaar,
 - zetmeel- en eiwitopbrengst van een typisch "eiwitgewas", veldbonen, liggen beide rond 2 ton per hectare.
 - Als deze gewassen gelijk worden gewaardeerd, wordt op basis van deze verhoudingen eiwit ongeveer 10 keer zo hoog gewaardeerd als koolhydraten.

N.B. teelt van eiwitgewassen in Nederland is nog minder geoptimaliseerd dan de teelt van zetmeelaardappelen; daarom is deze verhouding wat groter dan 'redelijk'.

Op basis van deze overwegingen worden de volgende waarderingsgewichten aan macronutriënten toegekend:

- Koolhydraten: suikers, zetmeel, maar ook vezels hebben een waardering van 1.
- vetten en oliën: 2,2
- eiwitten: 4
- P = 9, N = 6 en K = 3

Andere componenten worden voorlopig op dezelfde waarde gewaardeerd als koolhydraten. De volgende mogelijke nuancerings zijn voorzien:

- biochemicalïen en biobrandstoffen waarden op hun verbrandingswarmte, bijvoorbeeld: voor biodiesel vergelijkbaar met vet en plantaardige olie (Fassinou, 2012), voor methaangas 35% hoger dan voor biodiesel³,
- mineralen: schaarste vergelijken met fossiele energiebronnen, gecombineerd met gewichtsaandeel in biomassa.

Op basis van de hierboven beschreven overwegingen gebruiken we de weegfactoren in de tabel hieronder. N wordt impliciet onder eiwit opgenomen (Eiwit = 6.25 * N-gehalte).

¹ gemiddelde over juli 2021 tot januari 2022, www.indexmundi.com, geraadpleegd op 28 februari 2022.

² <https://www.wur.nl/nl/landingspagina-redacteuren/nl/onderzoek-resultaten/onderzoeksinstituten/livestock-research/producten/voederwaardeprijzen-rundvee.htm>, geraadpleegd 20 september 2022.

³ https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

Tabel 5. Waardering van biomassacomponenten

Component	Eiwit	Vet / olie	Vezel	Zetmeel, suiker, andere koolhydraten	N	P	K
Waardering	4	2.2	1	1	6	9	3

3.2 Efficiëntie van de inzet van biomassacomponenten in een toepassing

De efficiëntie van inzet van een biomassa(residu)stroom voor productie van een nieuw eindproduct is procesafhankelijk. Gemiddelden voor de meest gangbare routes (diverse categorieën veehouderij, bioenergie routes, biologische afvalverwerkingsroutes en processen voor bioplastics) zijn beschreven in Annex 3. De verwerkingsroutes die zijn opgenomen in de CAT worden weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6. Verwerkingsroutes opgenomen in de Circularity Analysis Tool

Voedsel	Vergisten (nat)	Biodiesel
Melkkoe, geen vergister	Vergisten (droog)	Biochemicals via building block
Melkkoe met vergister	Vergisten (droog) en composteren	Biochemicals (direct)
Varken, geen vergister	Composteren	Inzet (direct) als materiaal
Varken met vergister	Achterlaten op het land	Eiwittraffinage
Vleeskuiken	Stalstrooisel	Rubisacoraffinage
Legkip	Verbranden	Persen tot materiaal en vergisten
Insecten naar voedsel	Verbranden en as als meststof	Persen tot brandstof en vergisten
Varkensvoer via insecten	Rendering biodiesel en diervoer	
Legkip via insecten	Rendering biodiesel en meststof	
Vleeskuiken via insecten	Rendering biodiesel en energie	

3.3 Functionaliteit van componenten in eindproducten

De functionaliteitswaarden moeten bepaald worden per component van de biomassa. Bijvoorbeeld vezels dragen niet sterk bij aan de functionaliteitswaarde van varkensvoer, maar kunnen heel functioneel zijn in een biobased toepassing. We gaan uit van de volgende principes:

- Directe toepassing als voedsel gaat boven voedselproductie via de toepassing als veevoer vanwege de (in)efficiëntie van de omzetting van vee.
- Toepassingen die de functionaliteit benutten en behouden (en dus weer te gebruiken zijn) gaan boven toepassingen die de functionaliteit verminderen.
- Eindtoepassingen zoals energieproductie of toepassingen in de bodem scoren lager omdat die beter uitgesteld kunnen worden.

Functionaliteit en rendement worden toegelicht in Tabel 7.

Tabel 7. Benadering van functionaliteit en rendement in diverse toepassingen

<i>Toepassing</i>	<i>Functionaliteit</i>	<i>Opmerking rendement</i>
Voedsel	alle componenten: 4	Er zijn vele routes van een biomassa-residu naar voedsel, waaronder directe inzet voor voedsel, via extractie van waardevolle ingrediënten en via veevoer. Het rendement varieert afhankelijk van de techniek. Voor veevoer zijn per diersoort efficiëntie-parameters te schatten.
Biobased materialen	behoud van materiaaleigenschappen (dus in tact houden van bijvoorbeeld hout, maar ook het behoud van vezels in papierrecycling): 4 macrostructuur afgebroken, vezels behouden (papier, MDF): 3 moleculen opgeknipt (zoals hydrolyse, omzetting tot brandstof of building block): 2 benutting waarbij de koolstof verloren gaat (energieproductie): 1	Afhankelijk van de situatie.
Biobased chemicaliën	moleculen worden opgeknipt: 2	Rendement hangt af van de omzettingroute, varieert daarbij ook tussen de macronutriënten.
Meststof en bodemverbeteraar	'Hergebruikspotentieel' wordt weergegeven door bestendigheid van de organische stof in de bodem. Andere componenten dan vezelfractie worden geacht amper bij te dragen aan totale bodem organische stofgehalte. Hoe groot de feitelijke bijdrage is, is onderwerp van lopend onderzoek.	Rendement kan voor bepaalde componenten (mineralen en vezelfractie) groter dan 1 zijn als deze de beperkende factor in teelt vormt; de extra gewasopbrengst, in droge stof gewicht, kan dan een veelvoud zijn van het gewicht van deze toegediende componenten.

Toepassing	Functionaliteit	Opmerking rendement
Voedsel	Alle componenten: 4	Er zijn vele routes van een biomassa-residu naar voedsel, waaronder directe inzet voor voedsel, via extractie van waardevolle ingrediënten en via veevoer. Het rendement varieert afhankelijk van de techniek. Voor veevoer zijn per diersoort efficiëntie-parameters te schatten.
Biobased materialen	Behoud van materiaaleigenschappen (dus in tact houden van bijvoorbeeld hout, maar ook het behoud van vezels in papierrecycling): 4 macrostructuur afgebroken, vezels behouden (papier, MDF): 3 moleculen opgeknipt (zoals hydrolyse, omzetting tot brandstof of building block): 2 benutting waarbij de koolstof verloren gaat (energieproductie): 1	Afhankelijk van de situatie.
Biobased chemicaliën	Moleculen worden opgeknipt: 2	Rendement hangt af van de omzettingroute, varieert daarbij ook tussen de macronutriënten.
Meststof en bodemverbeteraar	'Hergebruikspotentieel' wordt weergegeven door bestendigheid van de organische stof in de bodem. Andere componenten dan vezelfractie worden geacht amper bij te dragen aan totale bodem organische stofgehalte. Hoe groot de feitelijke bijdrage is, is onderwerp van lopend onderzoek.	Rendement kan voor bepaalde componenten (mineralen en vezelfractie) groter dan 1 zijn als deze de beperkende factor in teelt vormt; de extra gewasopbrengst, in droge stof gewicht, kan dan een veelvoud zijn van het gewicht van deze toegediende componenten.

Het resultaat is een score voor verschillende toepassingen van 4 tot 0. Deze scores kunnen per component verschillen. Zie Tabel 8 voor verdere uitwerking.

Tabel 8. Functionaliteitsscore van biomassacomponenten in toepassingen

Score	Eiwit	Vet / olie	Vezel	Zetmeel, suiker, andere koolhydraten	N, P, K
4	Voedsel	Voedsel	Voedsel, Materiaal (macrostr. behouden)	Voedsel	Voedsel
3	Diervoer, Materiaal	Diervoer	Diervoer, Materiaal (macrostr. afgebroken)	Diervoer Materiaal	Diervoer
2	Chemicaliën, Bodem (N)	Chemicaliën, Transportbrandstof	Chemicaliën	Chemicaliën, Transportbrandstof	Meststof (bodem)
1	Energie	Energie	Energie, Bodemverbeteraar	Energie	
0	Storten, verbranden zonder energiebenutting, verlies naar omgeving				

NB. In het geval de keten tot eindproduct bekend is (bijvoorbeeld voer voor legkippen leidt tot het voedselproduct eieren en mest en veren) wordt in de tool de efficiëntie tot dat eindproduct berekend, inclusief functionaliteitsscore voor voedsel.

3.4 Integrale weging van mate van circulariteit

Bij verwerking/toepassing van een reststroom worden veelal meerdere eindproducten geproduceerd. Enkele voorbeelden:

- Inzet als rundveevoer levert de volgende eindproducten op:
 - Voedsel (hoogste functionaliteit): melk en vlees (kalveren zijn een essentieel bijproduct van de melkveehouderij). Efficiënties zijn te bepalen op basis van veevoederwaarden:
 - eiwit van het voer wordt met een bepaalde efficiëntie omgezet in melk- en vleeseiwit;
 - energie uit het voer wordt gebruikt voor onderhoud van het dier en voor productie van de hiervoor genoemde eiwit plus vet in melk en vlees (gerekend wordt met Voeder Eenheid Melk, of VEM).
 - Mest:
 - stikstof;
 - stabiele vezelfracties; deze hebben een nuttige functie in de bodem. Bij toepassing van een vergister wordt een deel van de organische stof alsnog omgezet/afgebroken. Daarbij gaat ook een deel van de vezelfractie verloren, maar het grootste deel van de stabiele organische stof (het meest functioneel) in de bodem) blijft behouden;
 - andere mineralen/nutriënten.
- Idem bij inzet als varkens- of pluimveevoeder (met andere efficiënties).
- Vergisting voor biogasproductie:
 - energie: biogas gevormd uit eiwit, vetten en simpele koolhydraten;
 - mest: digestaat van co-vergisting kan worden ingezet als meststof, met waardevolle componenten:
 - stikstof (organisch gebonden en in de vorm van ammoniak) afkomstig van vooral het eiwit in het substraat.
 - resistente organische stof, waardevol voor het organische stofgehalte van de bodem (in de vergisting wordt een beperkt deel van de vezelfracties afgebroken).
 - andere mineralen van het substraat.
- Productie van bio-ethanol:
 - biobrandstof: in het fermentatieproces wordt bio-ethanol geproduceerd (omzetting van koolhydraten, eiwit en simpele koolhydraten);

- diervoer of eventueel bodemmeststof: het co-product is relatief rijk aan eiwit, vezels en mineralen.
- Productie van biochemicalïën via fermentatie:
 - bioplastics of andere waardevolle (building blocks) moleculen;
 - diervoer of evt. meststof, vergelijkbaar met de co-producten van biogas- of bio-ethanolproductie.
- (Her)gebruik van hout:
 - materiaal hout: een deel kan wederom als hout worden ingezet, met behoud van functionaliteit;
 - spaanderstukken of vezels voor bijvoorbeeld spaanplaat of papier op basis van zaagresten (met deels afgebroken functionaliteit van het hout);
 - stalstrooisel (indirect: meststof organische stof) of energietoepassing van zaagsel.

De mate van circulariteit wordt berekend volgens de volgende formule:

$$Circulariteit = \frac{\sum_{toepassing j} \sum_{component i} (Gehalte_i \times Waardering_i \times Efficiëntie_{i,j} \times Functionaliteit_{i,j})}{\sum_{componenten i} (Gehalte_i \times Waardering_i \times 4)}$$

waarin $Efficiëntie_{i,j}$ de efficiëntie van component i (bijvoorbeeld vet) in toepassing j (bijvoorbeeld voedsel) weergeeft per eenheid ingezette biomassa (in het voorbeeld: als veevoer voor melkvee). Deze opbrengsten worden geschat op basis van efficiëntie-/rendementsformules.

De deler in bovenstaande formule staat voor de maximale score die mogelijk zou zijn. Dus toepassing op de hoogste functionaliteit (4) en met een efficiëntie van 100%.

Omdat van elk omzettingsproces de efficiëntie kleiner is dan één, omdat bij afbraak van structuur of moleculen de functionaliteit wordt verlaagd en omdat in een verwerkingsproces geen eiwit wordt gevormd⁴, levert bovenstaande formule altijd een resultaat kleiner dan 1 of 100% op.

Het afwegingskader is uitgewerkt in een rekentool: de *Circularity Analysis Tool (CAT)*. De essentiële data voor deze tool – biomassasamenstelling, formules voor omzettingsefficiënties /-rendementen en functionaliteitswaarden – zijn in Annex 1 en Annex 2 van dit rapport uitgewerkt. Een voorbeeld wordt in de volgende paragraaf gepresenteerd.

⁴ Bij fermentatieve eiwitproductie wordt wel eiwit gevormd (bij toediening van ammoniak of andere stikstofbron); echter dit wordt gezien als productieproces. In samenhang hiermee kan de waardering van stikstof in meststof-residuen ook nog nader uitgewerkt worden. Goede argumentatie vergt nadere wetenschappelijk onderzoek.

3.5 Voorbeeld toepassing: rundveevoer

Bij toepassing van een residu­stroom als rundveevoer resulteert melk, vlees en mest (en leer). Onderstaande tabel beschrijft hoe de CAT de circulariteit van deze toepassing benadert. Zie ook uitwerking in 4 casussen in hoofdstuk 5.

	<i>product</i>	<i>uitleg van parameters</i>
Circulariteit _{rundveevoer} =	(melk	
	4	eiwitopbrengst in dit product
	x 4	<ul style="list-style-type: none"> • 4: waardering van eiwit t.o.v. koolhydraten
	x 0.22	<ul style="list-style-type: none"> • 4: functionaliteit van voedselingrediënt
	x Gehalte _{eiwit}	<ul style="list-style-type: none"> • 0.22: efficiëntie van voedereiwit tot melkeiwit • Gehalte_{eiwit}: eiwitgehalte van het diervoeder
	+ 1	suikeropbrengst in melk
	x 4	<ul style="list-style-type: none"> • 1: gewaardeerd als eenvoudige koolhydraten
	x (0.076	<ul style="list-style-type: none"> • 4: voedseltoepassing wordt gewaardeerd als 'hoog'
	x VEM	<ul style="list-style-type: none"> • 0.076: gemiddelde omzettingsefficiëntie voederenergie (VEM) naar suiker door melkvee
	- 0.075	<ul style="list-style-type: none"> • VEM: voedingsenergie in het voer dat beschikbaar is voor melkvee
	x Gehalte _{eiwit}	<ul style="list-style-type: none"> • - 0.075: energie aftrekken t.g.v. eiwitopbrengst • Gehalte_{eiwit}: eiwitgehalte van het voer
)	
	+ 2.2	vetopbrengst in melk
	x 4	<ul style="list-style-type: none"> • 2.2: waardering van vet t.o.v. koolhydraten
	x (0.057	<ul style="list-style-type: none"> • 4: voedseltoepassing wordt gewaardeerd als 'hoog'
	x VEM	<ul style="list-style-type: none"> • 0.057: gemiddelde omzettingsefficiëntie voederenergie (VEM) naar vet door melkvee
	- 0.056	<ul style="list-style-type: none"> • - 0.056: energie aftrekken t.g.v. eiwitopbrengst
	x Gehalte _{eiwit}	<ul style="list-style-type: none"> • Gehalte_{eiwit}: eiwitgehalte van het voer
)	
	vlees	
	+	eiwitopbrengst in dit product
	4	<ul style="list-style-type: none"> • 4: waardering van eiwit t.o.v. koolhydraten
	x 4	<ul style="list-style-type: none"> • 4: functionaliteit van voedsel-ingrediënt
	x 0.02	<ul style="list-style-type: none"> • 0.02: efficiëntie van voedereiwit tot melkeiwit
	x Gehalte _{eiwit}	<ul style="list-style-type: none"> • Gehalte_{eiwit}: eiwitgehalte van het diervoeder
	+ 2.2	vetopbrengst in melk
	x 4	<ul style="list-style-type: none"> • 2.2: waardering van vet t.o.v. koolhydraten
	x (0.0084	<ul style="list-style-type: none"> • 4: voedseltoepassing wordt gewaardeerd als 'hoog'
	x VEM	<ul style="list-style-type: none"> • 0.0084: gemiddelde omzettingsefficiëntie voederenergie (VEM) naar vet door melkvee
	- 0.0083	<ul style="list-style-type: none"> • - 0.0083: energie aftrekken t.g.v. eiwitopbrengst
	x Gehalte _{eiwit}	<ul style="list-style-type: none"> • Gehalte_{eiwit}: eiwitgehalte van het voer
)	
	mest	
	+	organische opbrengst in mest
	1	<ul style="list-style-type: none"> • 1: waarderingsfactor voor koolhydraten
	x (3 x 0.9	<ul style="list-style-type: none"> • functiewaarde 3: lignine is zeer stabiel in de bodem
	x Gehalte _{lignine}	<ul style="list-style-type: none"> • 0.9: koe verteert klein deel van lignine in voer
	+ 1 x 0.6	<ul style="list-style-type: none"> • Gehalte_{lignine}: ligninegehalte in het voer
	x Gehalte _{cellulose}	<ul style="list-style-type: none"> • functiewaarde 1: cellulose is minder stabiel in de bodem
	+ 1 x 0.3	<ul style="list-style-type: none"> • 0.6: koe verteert aanzienlijke fractie cellulose in voer
	x Gehalte _{Hemicellulose}	<ul style="list-style-type: none"> • Gehalte_{cellulose}: cellulosegehalte in voer • 1: hemicellulose heeft beperkte stabiliteit in de bodem
)	<ul style="list-style-type: none"> • 0.3: koe verteert grote fractie hemicellulose in voer • Gehalte_{Hemicellulose}: hemicellulose-inhoud in feed
) / (4	delen door de referentiewaarde (100% voedseltoepassing):
	x 4	<ul style="list-style-type: none"> • 4: waarderingsfactor voor eiwitten
	x Gehalte _{eiwit}	<ul style="list-style-type: none"> • 4: functionaliteit in voedsel (voor alle componenten gelijk)
	+ 2.2	<ul style="list-style-type: none"> • 2.2: waarderingsfactor voor vetten
	x 4	<ul style="list-style-type: none"> • 1: waarderingsfactor voor andere componenten
	x Gehalte _{vet}	
	+ 1	
	x 4	
	x (1 - Gehalte _{eiwit} - Gehalte _{vet})	

3.6 Samenstellingsgegevens van agro-residuen

Deze studie maakt gebruik van de biomassadatabase zoals beschreven in Soethoudt et al. (2024). De complete set met gehanteerde samenstellingsgegevens is weergegeven in Annex 1 van dit rapport.

De gegevens in de database zijn gebaseerd op:

- Informatie vergaard t.b.v. de (jaarlijkse) Monitor Voedselverspilling: de omvang van de reststromen/bijproducten uit de voedselindustrie en hun toepassing is in kaart gebracht.
- Cijfers over enkele specifieke stromen die nu als afval worden verwerkt, zoals GFT.
- Aangevuld met stromen die buiten deze kaders vallen (inclusief biomassastromen uit andere bronnen).

De (uit publiek toegankelijke datasets afgeleide) schattingen voor de samenstelling van reststromen in Soethoudt et al. (2024) worden representatief geacht voor de huidige stromen. Echter, de samenstellingsgegevens zijn veelal beperkt tot relevante componenten voor de gangbare toepassingen. Bijvoorbeeld voor de meeste gewasresten die achterblijven op het land zijn de gehalten voor macronutriënten niet gespecificeerd. Daarom zijn diverse aanvullingen afgeleid uit wetenschappelijke literatuur:

- Gewasresten:
 - Suiker- en zetmeelgehalte voor paprikagewasresten zijn geschat uit Hammond et al. (1983).
 - Voor suiker- en zetmeelgehalte van gewasresten van andere groenten zijn dezelfde waarden als voor paprika genomen.
 - Voor gewasresten van granen en maïs (aanname: tarwestro en maïs stengels) zijn waarden uit feedipedia.org overgenomen.
- Snoeiafval fruitteelt:
 - Zetmeel en suikergehalte geschat op basis van data van Naschitz et al. (2010); as-gehalte uit Garcia et al. (2017).
- Dierlijke producten:
 - Macro-nutriënt samenstellingen:
 - kadavers: Oberthür (2003),
 - ongeboren mest: op basis van waarden voor faeces: Geenen et al. (2007), Hilliard (1978/1979),
 - beenderen: Rieger et al. (2021),
 - bloed: Duarte et al. (1999),
 - ingewanden en organen: Maysonnave et al. (2020),
 - huiden van runderen: <https://assignmentpoint.com/histological-structure-cowhide/>,
 - vis-bijvangst: Petricorena (2014).
 - Fosforgehalte kadavers en slachtbijproducten: afgeleid van Bikker et al. (2013) en Sobol et al. (2022).
 - Fosforgehalte in melk: Koning et al. (2019).
 - Voor het kaliumgehalte zijn geen directe informatiebronnen gevonden. Als proxy wordt voor kadavers een typische waarde voor K-gehalte in het menselijke lichaam genomen (Navarro et al., 2003). Kalium zit vooral in spierweefsel, daarom wordt voor slachtbijproducten een wat lagere waarde aangenomen: 1 g per kg materiaal (op basis van nat gewicht).

Merk op dat een deel van de vastgestelde waarden zijn afgeleid van niet-Nederlandse producten. Het hemicellulose-, cellulose-, en lignine-gehalte is over het algemeen afgeleid van gehalten van celwandbepalingen op basis van de Van Soest methode. Met deze methode worden de gehalte aan Neutral Detergent Fibre (NDF), Acid Detergent Fibre (ADF), en Acid Detergent Lignin (ADL) bepaalt. De vezelsamenstelling kan als volgt worden berekend:

- Hemicellulose = NDF - ADF
- Cellulose = ADF - ADL
- Lignine = ADL

Alsnog ontbrekende samenstellingsgegevens zijn geschat door experts op basis van waarden voor soortgelijke stromen, bijvoorbeeld door gemiddelde waarden te nemen van residuen in dezelfde productcategorie. Die getallen zijn dus niet specifiek bepaald voor de specifieke residustroom. De genoemde aannames leiden tot beperkte onnauwkeurigheden.

3.7 Circulariteitsscores van verschillende benuttingsopties voor agro-residuen

Per toepassing kunnen de circulariteitsscores worden berekend. Let op: dit kan ook voor toepassingen die niet realistisch, praktisch onmogelijk of verboden zijn. Zoals in veel gevallen directe benutting als voedsel, directe inzet als materiaal, verbranding van heel natte stromen, en inzet van kadavers in de voedselketen.

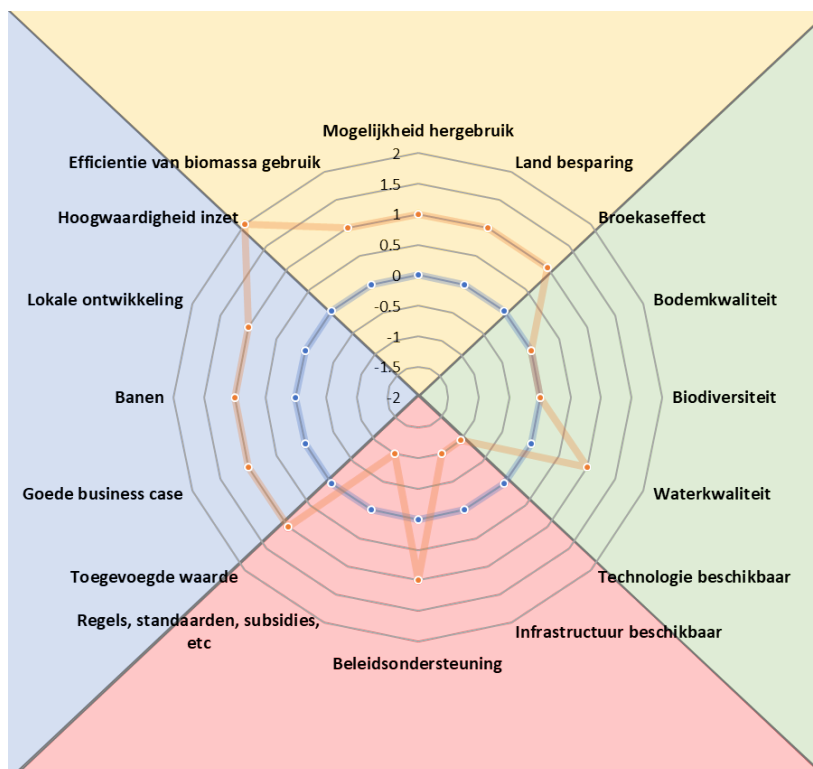
Vergisten voor energieproductie heeft meestal een hogere circulariteitsscore dan verbranden voor energieproductie, met uitzondering van houtachtige reststromen (zoals van fruitbomen). De belangrijkste reden hiervoor is dat nutriënten en een deel van de C als meststof benut worden voor de bodem.

4 Integrale duurzaamheidsafweging

Bij het verwaarden van biomassa (residuen) en afval is, zoals hierboven beschreven, efficiënte circulaire inzet belangrijk. Andere beoordelingsaspecten zullen echter ook meegewogen moeten worden. Figuur 4 presenteert een afwegingskader in de vorm van een spiderdiagram dat relatieve scores kan weergeven voor biomassatoepassingen (bijvoorbeeld nieuw vs. Huidige toepassing) (ref. Elbersen et al. 2022). Daarin zijn 4 duurzaamheidsdomeinen opgenomen waarbinnen scores voor meerdere indicatoren gegeven kunnen worden:

- **Socio-economische domein:** hier worden indicatoren opgenomen zoals de financiële haalbaarheid, toegevoegde waarde, banen, etc.
- **Milieu en Ecologische domein:** Hieronder vallen o.a. het broeikaseffect, effect op de bodem, luchtkwaliteit en waterkwaliteit.
- **Circulaire domein:** Hier vallen de bovengenoemde indicatoren per biomassacomponent: Benutting van de functionaliteit maal efficiëntie; herbruikbaarheid maal efficiëntie plus, indien relevant, het effect op landgebruik efficiëntie.
- **Implementatie-domein:** Hieronder vallen de aanwezigheid van regels zoals certificering, normen, subsidiesystemen, etc.; de aansluiting op beleid (nu en in de toekomst); de aanwezigheid van infrastructuur; en de beschikbaarheid van kennis en technologie.

Voor duurzaamheidsdomeinen Socio-Economische en Milieu zijn indicatoren wijd bekend; een weging tussen deze indicatoren kan aangepast worden aan de lokale prioriteiten. De Circulaire indicatoren zijn nog in ontwikkeling, maar het afwegingskader van voorgaand hoofdstuk geeft houvast om toepassingen van biomassa met elkaar te vergelijken. In het domein "Implementeerbaarheid" hebben overheden de meeste invloed. Regels kunnen aangepast worden, subsidies kunnen worden gegeven of ontwikkeling van kennis en techniek kan worden ondersteund. Het beschreven afwegingskader kan verder worden uitgewerkt tot een systeem dat past bij de lokale situatie. Hierbij kunnen de indicatoren specifieke gewingen krijgen die de lokale prioriteiten weergeven. Een voorbeeld van integrale duurzaamheidsafweging is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4. Spiderdiagram waarin de verschillende duurzaamheidscriteria voor toepassing van suikerbietblad voor eiwitraffinage zijn gescoord ten opzichte van de huidige toepassing, onderploegen (blauwe lijn).

In deze casus wordt bietenblad geoogst in plaats van achtergelaten op het veld. Eiwit wordt geraffineerd en de resten worden vergist voor energieproductie. Dit proces wordt door Cosun geïmplementeerd (www.cosunbeetcompany.nl) en o.a. door WFBR verder ontwikkeld voor ook andere groene reststromen. Het digestaat wordt teruggebracht naar het veld. De vergelijking is gescoord t.o.v. de bestaande situatie (dat is in dit geval: achterlaten op het land) door middel van expert judgement. (Ref. Elbersen et al. 2022).

5 Vergelijking tussen huidige en alternatieve toepassingen van agro-residuen

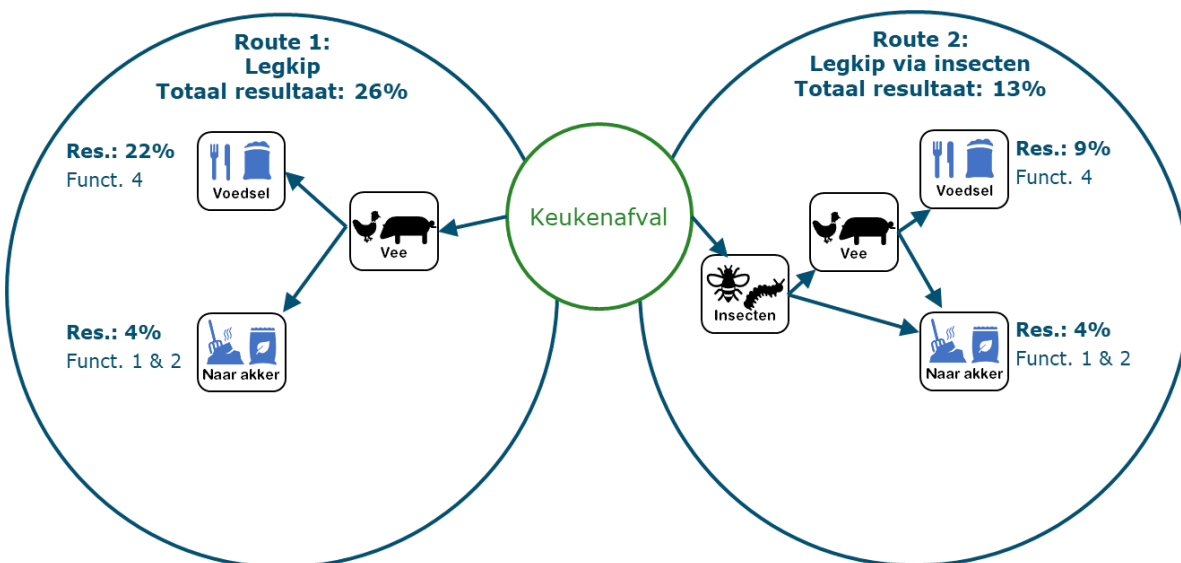
Hieronder wordt de circulariteitsscore van verschillende toepassingsmogelijkheden van een aantal reststromen vergeleken.

5.1 Casus 1: Vergelijking benuttingsmogelijkheden voor keukenafval

Keukenafval (gft-afval van huishoudens) wordt gangbaar verwerkt via een vergistings- en composteerproces tot compost. Verwacht wordt dat een hogere mate van circulariteit kan worden verkregen door het materiaal – eventueel via insecten – in te zetten als veevoer.

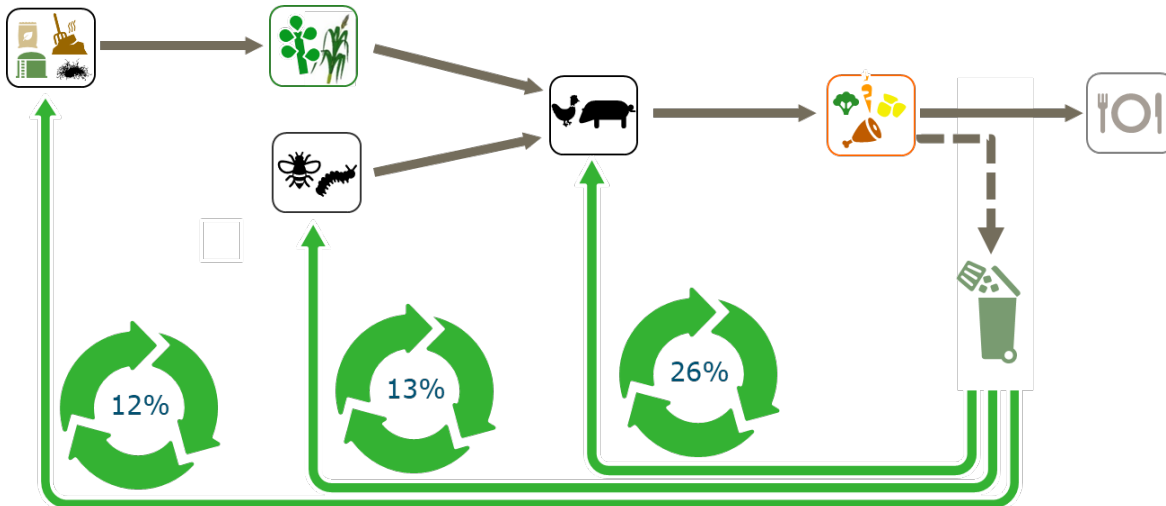
Op basis van samenstellingsgegevens van typisch/gemiddeld Europees voedselafval volgens IEA (2018) schat de CAT de mate van circulariteit voor genoemde routes als volgt:

- volledige inzet van het keukenafval als veevoer: via legkip 26% (Route 1 in Figuur 5), via varken 21%
- via insecten naar veevoer: via legkip 13% (Route 2 in Figuur 5), via varken 12%
- via vergisting (droog) naar biogas en meststof: 12%



Figuur 5. Vergelijking van de inzet van keukenafval als veevoer voor legkippen (links) en via insecten naar veevoer voor legkippen (rechts)

De hoogste mate van circulariteit wordt behaald door het keukenafval direct in te zetten als veevoer. De route via insecten naar veevoer heeft een lagere score, omdat er bij insecten een (rendements)verlies van de voedingscomponenten optreedt. De kortste route naar humane voeding heeft de hoogste mate van circulariteit (Figuur 6). Dit betreft een theoretisch berekening op basis van inhoudsstoffen, waarin praktische en veiligheidsaspecten niet worden meegenomen. Vanwege de aanwezigheid van niet-organische componenten (plastic, aardappelschilmesjes) of ziekteverwekkers is het bijvoorbeeld onmogelijk om het keukenafval direct in te zetten als veevoer (of te composteren). De route via insecten zou daar een mogelijke oplossing voor bieden. Het kweken van insecten en de opwerking tot veevoer wordt echter nog niet op grote schaal toegepast.

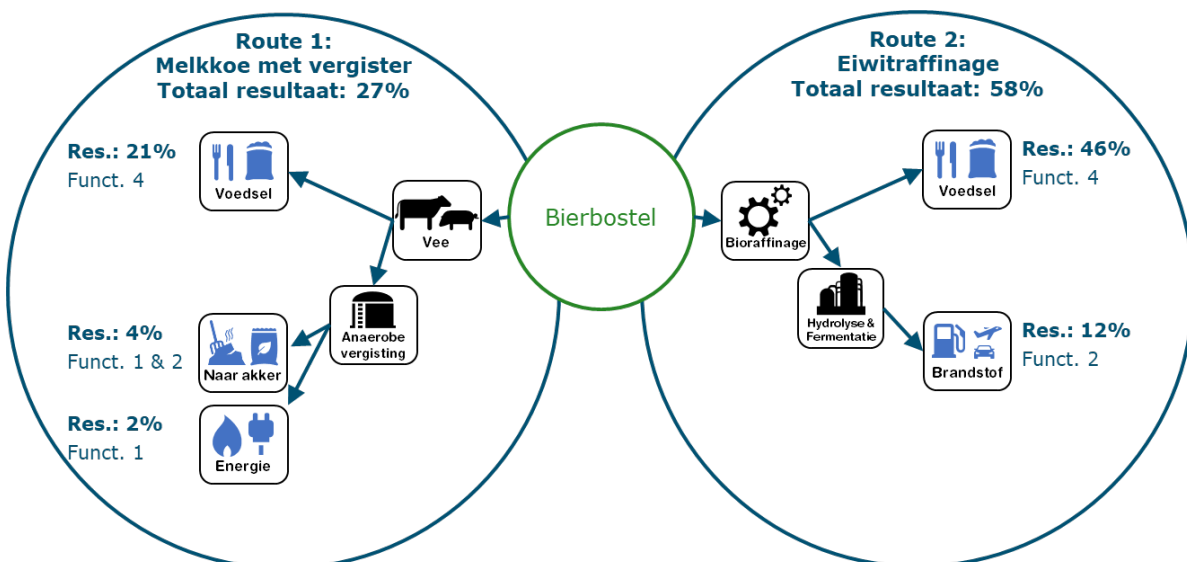


Figuur 6. Hoe korter de route, hoe hoger de mate van circulariteit

5.2 Casus 2: Vergelijking van benutting van bierbostel in voedsel in plaats van veevoer

Bierbostel uit de bierindustrie heeft een relatief hoog eiwit- en vezelgehalte en wordt gangbaar ingezet als veevoer (rundvee en varkens). Recentelijk zijn verschillende initiatieven gelanceerd waarin het volledige product, of een eiwit-isolaat, als voedsel ingrediënt wordt gepromoot. De CAT schat de mate van circulariteit voor verschillende de verschillende benuttingsvormen als volgt in:

- Volledige inzet in voeding: 100% circulair
- Eiwittraffinage ('eiwit-isolaat' met 80% van de eiwitten en suikers naar voedsel; het residu wordt ingezet voor bio-ethanol productie, met voorspelde rendementen uit Voogt et al. (2021)): 58% circulair (Route 2 in Figuur 7)
- Inzet als veevoer: voor melkvee 27% (Route 1 in Figuur 7), voor vleesvarkens: 23%



Figuur 7. Vergelijking van de inzet van bierbostel als voor melkvee (links) en eiwittraffinage en ethanol fermentatie (rechts)

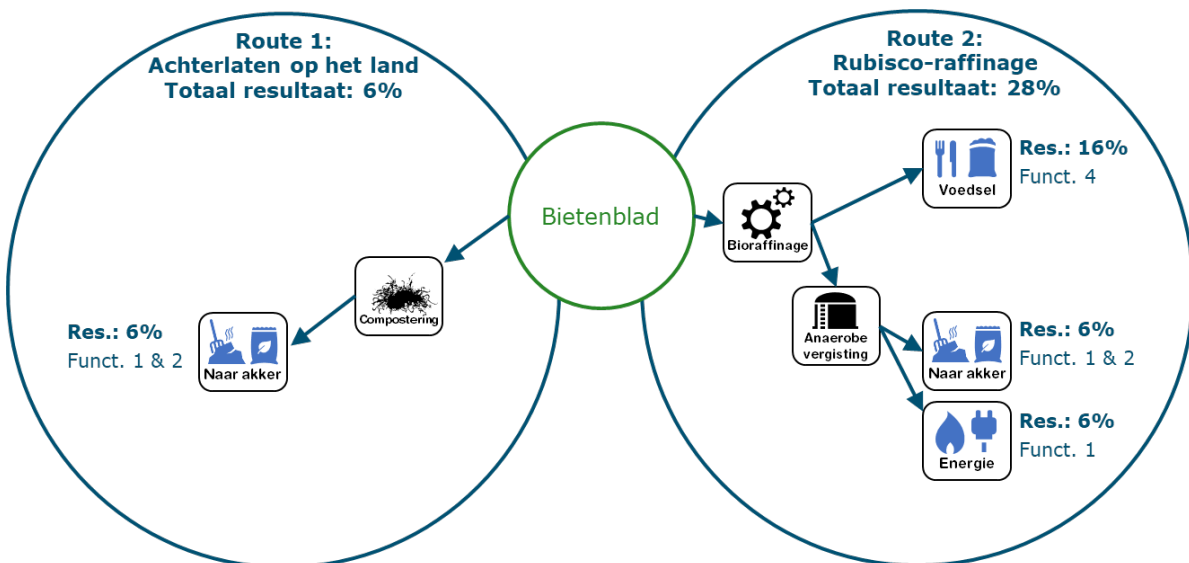
Van de directe routes naar humane voeding is de circulariteitscore hoger dan de route via vee. Door de consumptie van dierlijke eiwit te vervangen door plantaardige eiwit neemt de circulariteit toe.

In deze analyses is het van belang om de systeemgrenzen in acht te nemen. De circulariteitsanalyse is gericht op de benutting van een reststroom; indirecte effecten (zoals de vervanging van fossiele bronnen) vallen buiten de scope. Maar worden wel meegenomen bij de integrale analyse (zie Hoofdstuk 4). Hierdoor heeft de productie van ethanol, een biobrandstof, een relatief lage bijdrage aan de circulariteitscore.

5.3 Casus 3: Raffinage bietenblad in vergelijking met het op het land laten liggen

Een van de meest aansprekende ideeën voor 'nieuwe eiwitten' betreft de benutting van (eiwitrijke) plantenresten zoals bietenbladeren. Een vergelijking van verschillende circulaire opties:

- Eiwitraffinage (80% van de eiwitten en suikers naar voedsel; het residu voor bio-ethanol productie): 64% circulair
- Rubisco raffinage (30% van het eiwit wordt gewonnen voor voedselproductie; de rest wordt vergist voor biogas): 28% circulair (Route 2 in Figuur 8)
- Voeren aan melkvee, inclusief mestgisting: 28% circulair
- Co-vergisten (levert biogas en digestaat die ingezet wordt als meststof): 13% circulair
- Achterlaten op het land (levert resistente organische stof en nutriënten): 6% circulair (Route 1 in Figuur 8)



Figuur 8. Vergelijking van de inzet van bietenblad als compost (links) en Rubisco-raffinage en anaerobe vergisting (rechts)

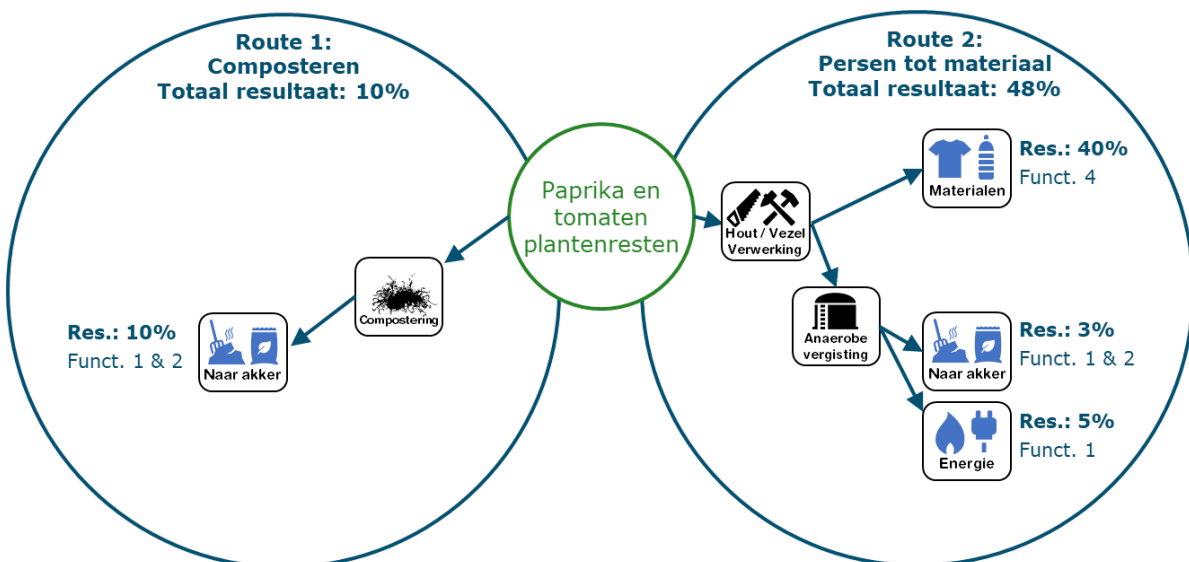
Ten opzichte van de eiwitraffinage en ethanol productie (zoals beschreven in casus 2) is de circulariteitsscore van de raffinage van het specifieke Rubisco-eiwit uit bietenblad veel lager, omdat de eiwitopbrengst lager is. In deze analyse wordt specifieke functionaliteit (zoals gelleringscapaciteit) en dus de toegevoegde waarde van componenten niet meegenomen.

Het is duidelijk dat de routes naar humane voeding hoger scoren dan vergisten of achterlaten op het land.

5.4 Casus 4: Toepassing paprika en tomatenplantenresten als isolatiemateriaal, persen met benutting van nutriënten en verbranden

De vezelfractie in paprika- en tomatenplantenresten kunnen hoogwaardiger worden benut in bijvoorbeeld isolatiematerialen. De circulariteitsscores van verschillende routes zijn door de CAT berekend:

- Route directe inzet als materiaal: 66% (kleiner dan 100% omdat in materiaaltoepassing vet en eiwit niet hoger gewaardeerd wordt dan andere componenten)
- Route persen, waarbij de vaste fractie wordt ingezet als materiaal; het perssap wordt vergist voor biogas (zoals omschreven door Blueterra, 2021⁵): 48% (lager dan eerstgenoemde route, maar persen kan nodig zijn om het materiaal beter houdbaar te maken. Daarnaast kan het na de gebruiksfase alsnog ingezet worden in verbranding) (Route 2 in Figuur 9)
- Route persen, waarbij de vaste fractie wordt ingezet als brandstof; het perssap net als in voorgaande route vergist voor biogas: 25%
- Route verbranden voor energieopwekking en as als meststof toepassen: 14%
- Route composteren: 10% (Route 1 in Figuur 9)



Figuur 9. Vergelijking van de inzet van vezelrijke plantenresten als compost (links) en isolatiemateriaal en anaerobe vergisting (rechts)

Uit de circulariteitsscores komt duidelijk naar voren dat de routes naar materialen hoger scoren. Uiteraard moet onderzocht worden wat er praktisch mogelijk en (economisch) haalbaar is.

5.5 Reflectie

In bovenstaande cases blijkt dat de vergelijking van circulariteitwaarden nuancering biedt ten opzichte van de vuistregels voor biomassa benutting van (Ladder van Moerman, waarde piramide, zie Figuur 2). De efficiëntie van de toepassing is ook heel relevant. Zie het effect van rendement bij verschillende technische routes (zie bijvoorbeeld verschillende eiwitextracties). Verder is het belangrijk om de samenstelling van biomassa / biograndstof mee te nemen.

⁵ Let op: de daarin genoemde schatting voor de biogasopbrengst uit het perssap is gecorrigeerd: Volgens het rapport wordt 85% van de daarin aanwezige organische stof omgezet in biogas (en dat is niet alleen methaan). Uitgaande van genoemde hoeveelheid organische stof, naar alle waarschijnlijkheid vooral koolhydraten en een klein beetje eiwit en vetten, zal de methaanopbrengst uit het perssap tussen 34 en 40 kg liggen, ofwel 50 tot 60 m³ methaan. Dat is vergelijkbaar met, en dus niet hoger dan, de in het rapport genoemde methaanpotentie van een ton gft.

6 Discussie en acties

6.1 Discussie

In dit rapport is een nieuwe tool voor het inschatten van de mate van circulariteit van de inzet van een biomassa-stroom gepresenteerd: de CAT. Deze methodologie biedt een nuancering t.o.v. van de rigide bestaande hiërarchie voor reststroombenutting en voegt de toepassing als substraat voor de bodem toe. In het bijzonder maakt de methodologie van de CAT onderscheid tussen de waarde van de componenten en de functionaliteit/rendement in een toepassing voor het opnieuw genereren van een consumentenproduct (bijv. voedsel, biobased product of energie). Kwantitatieve resultaten voor diverse voorbeelden laten zien dat volgordes van bestaande hiërarchieën veelal worden bevestigd. In de tool kunnen ook nieuwe of nog niet beschreven toepassingen worden toegevoegd of kunnen specifieke routes voor vergelijkbare eindproducten worden vergeleken (verschillende biogas productie systemen, andere diersoorten, etc).

Het is belangrijk te beseffen dat (eind)toepassingen met een lagere circulariteits-score zoals energieproductie en toepassing voor de bodem niet minder belangrijk of waardevol kunnen zijn. Vanuit circulariteits-oogpunt is het alleen beter om deze toepassing uit te stellen. De methode lijkt complex maar is redelijk gemakkelijk toe te passen doordat er gestandaardiseerde verwerkingsroutes zijn ontwikkeld en er een database is van de samenstelling van de meest relevante agro-residuen

6.2 Acties

De tool ondersteunt het inschatten van duurzaamheidsbijdrage van nieuwe verwerkingsroutes, zoals productie van insecten als veevoer. Echter, rendementparameters voor deze route zijn, net als andere 'nieuwe routes', gebaseerd op resultaten van een beperkt aantal experimentele uitkomsten (vaak nog niet geoptimaliseerd). Verder onderzoek van dergelijke verwaardingsopties zou o.a. gericht moeten worden op schattingen van grondstofrendementen in geoptimaliseerde systemen (zoals ook veelal in de intensieve veehouderij het geval is).

De tool kan daarnaast ook gebruikt worden om de mate van circulariteit van elke huidige reststroombenutting te kwantificeren; gecombineerd met de omvang per toepassing geeft dat een beeld van totale reststroombenutting. Samen met een database van Nederlandse agro-residuen, en indien voldoende data over de bestemming van agro-residuen van jaar op jaar te vinden is, zou het mogelijk moeten zijn om met de hier beschreven methode circulariteit van de inzet tussen verschillende jaren te monitoren.

Literatuur

- Aarts, H.F.M., Habekotte, B., van Keulen, H., 2000. Nitrogen (N) management in the 'De Marke' dairy farming system. *Nutr.Cycl. Agroecosyst.* 56, 231–240.
- Blueterra, 2021, Rapportage pilot kortcyclische biobrandstof uit tomatenstengels en bermgras, rapport, <https://blueterra.nl/wp-content/uploads/2021/11/20210929-Rapportage-pilot-kortcyclische-biobrandstof-uit-tomatenstengels-en-bermgras-openbaar.pdf>
- Boerderij (2020). 'Landbouw is per definitie niet circulair' www.boerderij.nl/Home/Achtergrond/2019/2/Landbouw-is-per-definitie-niet-circulair-395600E/ (6 juni 2020 geconsulteerd).
- BVOR. 2020. MARKTCIJFERS GRONDSTOFFEN UIT ORGANISCHE RESTSTROMEN IN 2019.
- CE-Delft. 2020. Bio-Scope. Toepassingen en beschikbaarheid van duurzame biomassa. februari 2020. Publicatienummer: 20.190186.017
- CLO. 2020. Land- en tuinbouw: ruimtelijke spreiding, grondgebruik en aantal bedrijven, 1980-2019. Compendium voor de Leefomgeving, <https://www.clo.nl/indicatoren/nl2119-agrarisch-grondgebruik-geraadpleegd-9-december-2020>.
- Conant, R.T., M.G. Ryan, G.I. Ågren, H.E. Birge, E.A. Davidson, P.E. Eliasson, S.E. Evans, S.D. Frey, C.P. Giardina, F.M. Hopkins, R. Hyvönen, M.U.F. Kirschbaum, J.M. Lavalley, J. Leifeld, W.J. Parton, J. Megan Steinweg, M.D. Wallenstein, J.Å. Martin Wetterstedt, M.A. Bradford (2011) Temperature and soil organic matter decomposition rates—Synthesis of current knowledge and a way forward, *Glob. Change Biol.*, 17 (11), pp. 3392-3404.
- Conijn, J.G. & J.P. Lesschen (2015) Soil organic matter in the Netherlands, Quantification of stocks and flows in the top soil, PRI report 619, Alterra report 2663, Wageningen UR, Wageningen.
- Cosun (2019) Cosun Magazine, December 2019.
- Dijk, W. van, A.M. van Dam, J.C. van Middelkoop, F.J. de Ruijter & K.B. Zwart (2005) Onderbouwing N-werkingscoëfficiënt overige organische meststoffen, Praktijkonderzoek Plant en Omgeving, PPO, rapport 343, Wageningen UR, Lelystad.
- Dungait, J.A., D.W. Hopkins, A.S. Gregory, A.P. Whitmore (2012) Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance, *Global Change Biology*, 18 (2012), pp. 1781-1796
- Elbersen, W., A. Schultze-Jena, S. van Berkum, J. Dengerink, A. Schultze-Jena, M. Naranjo-Barrantes & E. Obeng. 2022. Identifying and implementing circular applications of agri-residues. A circular evaluation framework for assessing impacts and circularity of different agri-residue applications. WFBR report 2247, DOI 10.18174/563389. Wageningen, The Netherlands.
- Fassinou, W.F. (2012) Higher heating value (HHV) of vegetable oils, fats and biodiesels evaluation based on their pure fatty acids' HHV, *Energy*, 45, pp. 798-805.
- Hindrichsen, I.K., Wettstein, H.-R., Machmüller, A., Kreuzer, M. (2006): Methane emission, nutrient degradation and nitrogen turnover in dairy cows and their slurry at different milk production scenarios with and without concentrate supplementation, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113 (1-4), pp. 150-161.
- Höglmeier, K., B. Steubing, G. Weber-Blaschke & K. Richter (2015) LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading use of wood, *Journal of Environmental Management* 152, pp. 158-170.
- IEA (2018) C.J. Banks, S. Heaven, Y. Zhang & U. Baier. Food waste digestion: Anaerobic Digestion of Food Waste for a Circular Economy, Murphy, J.D. (Ed.) IEA Bioenergy Task 37, 2018:12.
- Koopman, W. (2019) De ene organische stof is de andere niet, *Veeteelt*, November 1, 2019, pp. 6-9.
- Koppejan J, Elbersen W, Meeusen M, Bindraban P (2009). Beschikbaarheid van Nederlandse biomassa voor elektriciteit en warmte in 2020. Rapportage in opdracht van SenterNovem, <https://edepot.wur.nl/51989>.
- Min I&M (2019). Uitvoeringsprogramma Circulaire Economie 2019-2023.
- Oenema, J, van Ittersum M, van Keulen H (2012) Improving nitrogen management on grassland on commercial pilot dairy farms in the Netherlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 162, 116–126.
- Oldfield, E.E.; M.A. Bradford & S.A. Wood (2019) Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields, *Soil*, 5, 15–32.
- PBL (2016). VOEDSEL VOOR DE CIRCULAIRE ECONOMIE. PBL Policy Brief. PBL Planbureau voor de Leefomgeving. Den Haag, 2016. PBL-publicatienummer: 2145

- PBL (2018). Circular economy: what we want to know and can measure. Framework and baseline assessment for monitoring the progress of the circular economy in the Netherlands. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. The Hague, 2018. PBL publication number: 3217
- PBL (2021) Policy brief 'Mogelijke doelen voor een circulaire economie', PBL Planbureau voor de Leefomgeving. Den Haag, 2021. <http://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2021/07/14/policy-brief-pbl-mogelijke-doelen-circulaire-economie>
- Puttaso, A., P. Vityakon, P. Saenjan, V. Trelo-ges & G. Cadisch (2011) Relationship between residue quality, decomposition patterns, and soil organic matter accumulation in a tropical sandy soil after 13 years, *Nutr Cycl Agroecosyst* 89:159–174.
- Powell JM, Gourley CJP, Rotz CA, Weaver DM (2010) Nitrogen use efficiency: A potential performance indicator and policy tool for dairy farms. *Environmental Science & Policy* 13, 217–228.
- Ramírez, C.A. & E. Worrell (2006): Feeding fossil fuels to the soil. An analysis of energy embedded and technological learning in the fertilizer industry, *Resources, Conservation and Recycling* 46, pp. 75–93.
- RVO (2021) Mestbeleid 2019-2021, Tabel 9 Werkzame stikstof landbouwgrond, www.rvo.nl/onderwerpen/agrarisch-ondernemen/mest/tabellen, geraadpleegd 5 januari 2021.
- Schjøning, P; J.L. Jensen; S. Bruun; L.S. Jensen; B.T. Christensen; L.J. Munkholm; M. Oelofse; S. Baby & L. Knudsen (2018) The Role of Soil Organic Matter for Maintaining Crop Yields: Evidence for a Renewed Conceptual Basis, *Advances in Agronomy*, Volume 150, 35-79.
- Schmidt, M., Torn, M., Abiven, S. et al. (2011) Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49–56.
- Šebek, L.B.J. & E.H.M. Temme (2009): De humane eiwitbehoefte en eiwitconsumptie en de omzetting van plantaardig eiwit naar dierlijk eiwit, Animal Sciences Group van Wageningen UR, Rapport 232
- Shepon, A., G. Eshel, E. Noor and R. Milo (2016) *Environ. Res. Lett.* 11 105002
- Soethoudt, H., J. Voogt, W. Elbersen, J. Broeze (2024): Notitie - Opstellen van een database van Nederlandse agro-reststromen.
- Spijker, Joop, Wolter Elbersen, Iris Vural Gursel, Bas Lerink. 2020. Marktverkenning biomassa-reststromen hout uit landschap. Wageningen Environmental Research. Rapport 2991. 42 blz. (<https://research.wur.nl/en/publications/marktverkenning-biomassa-reststromen-hout-uit-landschap>)
- Velthof, G.L., T. Koeijer, J.J. Schröder, M. Timmerman, A. Hooijboer, J. Rozemeijer, C. van Bruggen & P. Groenendijk (2017). Effecten van het mestbeleid op landbouw en milieu. Beantwoording van de openstaande vragen in het kader van de evaluatie van de Meststoffenwet. Wageningen, Wageningen Environmental Research 2782.
- Voogt, J, W. Mulder & C. Safi (2021): Virtual Biorefinery, BRISK II deliverable 7.5.
- Wu-Haan, W., W.J. Powers, C.R. Angel, C.E. Hale & T.J. Applegate (2007) Nutrient Digestibility and Mass Balance in Laying Hens Fed a Commercial or Acidifying Diet, *Poultry Science* 86:684–690. <https://www.nutrinorm.nl/nl-nl/Paginas/Organische-meststoffen-De-samenstelling-van-organische-meststoffen.aspx>
- <https://www.cosunbeetcompany.nl/toepassingen/voeding/proteine>
- <https://www.nieuweoogst.nl/nieuws/2019/10/11/eiwit-uit-bietenblad-als-voedingsingredient>

Annex 1 Database agro-residuen, samenstelling, toepassing(en) en omvang

Oogstresten zijn niet verkoopbare producten die gangbaar op het veld achter blijven (bijvoorbeeld te kleine uien die op het land achterblijven of worden uitgesorteerd).

	Samenstelling														Toepassing(en)	Omvang	
	DS (g/kg)	As	Eiwit	Vet	Lign.	Cellul.	H-cell. (g/kg DS)	Zetm.	Suiker	Overig	N	P	K	2019		2021	
Oogstresten - Uien	118	134	135	25	14	94	7	0	275	316	22	3	16	Achterlaten op het land	15	17	
Oogstresten - Tomaten	63	90	164	47	58	69	70	14	450	37	26	5	42	Melkkoe	1	1	
Oogstresten - Winterpeen	112	91	82	16	25	85	72	122	344	162	13	3	28	Achterlaten op het land	4	4	
Oogstresten - Komkommers	58	102	156	20	29	102	27	173	391	0	25	6	39	Melkkoe	0	0	
Oogstresten - Paprika's	125	62	163	37	61	61	61	0	375	130	26	3	20	Melkkoe	1	1	
Oogstresten - Bos- en waspeen	100	70	200	0	16	65	37	122	344	145	13	3	28	Achterlaten op het land	1	1	
Oogstresten - Witte kool	105	116	181	35	22	102	40	0	200	305	29	4	33	Achterlaten op het land	1	1	
Oogstresten - Prei	100	97	165	24	17	154	41	50	400	52	26	4	32	Achterlaten op het land	1	1	
Oogstresten - Knolselderij	78	83	125	25	33	84	62	90	125	372	20	9	54	Achterlaten op het land	1	0	
Oogstresten - Ijsbergsla	140	0	164	50	91	137	28	0	0	530	38	6	56	Achterlaten op het land	1	1	
Oogstresten - Spinazie	94	186	256	37	80	132	158	32	49	70	41	6	62	Achterlaten op het land	1	1	
Oogstresten - Suikerbieten	260	190	41	5	4	84	76	0	600	0	7	2	8	Achterlaten op het land	41	41	
Oogstresten - Consumptieaardappelen	202	57	105	3	9	27	47	627	30	95	17	2	22	Achterlaten op het land	56	50	
Oogstresten - Zetmeelaardappelen	250	57	40	0	4	13	23	800	23	40	17	2	22	Achterlaten op het land	32	35	
Oogstresten - Pootaardappelen	202	57	105	3	9	27	47	627	30	95	17	2	22	Achterlaten op het land	23	23	
Oogstresten - Maïs, snijmaïs	320	48	83	30	17	178	165	369	13	97	15	2	14	Achterlaten op het land	77	80	
Oogstresten - Tarwe	867	51	23	4	8	25	15	653	7	214	4	1	7	Achterlaten op het land	28	23	
Oogstresten - Appel	157	23	26	19	30	88	54	36	642	82	4	1	8	Achterlaten op het land	2	2	
Oogstresten - Peer	165	24	16	15	40	117	72	0	558	158	3	0	1	Achterlaten op het land	2	2	

Gewasresten zijn niet-productdelen die gangbaar op het veld achter blijven maar mogelijk wel meegenomen zouden kunnen worden (zoals loof, stro, snoeihout).

	Samenstelling													Toepassing(en)	Omvang	
	DS (g/kg)	As	Eiwit	Vet	Lign.	Cellul.	H-cell.	Zetm.	Suiker	Overig	N	P	K		2019	2021
Gewasresten - Uien (loof)	333	109	131	22	73	203	76	133	7	387	27	4	43	Achterlaten op het land	36	40
Gewasresten - Tomaten	170	109	162	22	224	161	173	133	7	150	27	4	43	Composteren	18	17
Gewasresten - Winterpeen	101	82	99	22	45	317	45	133	7	390	27	4	43	Achterlaten op het land	14	15
Gewasresten - Komkommers (blad en stengels)	370	113	163	22	130	330	120	133	7	122	27	4	43	Composteren	13	13
Gewasresten - Paprika's	150	109	131	22	145	311	134	133	7	149	27	4	43	Composteren	28	28
Gewasresten - Bos- en waspeen	101	82	99	22	45	317	45	133	7	390	27	4	43	Achterlaten op het land	8	7
Gewasresten - Witte kool (bladeren)	100	158	131	22	45	215	47	133	7	383	21	4	44	Achterlaten op het land	6	5
Gewasresten - Prei (bladeren)	78	109	131	22	17	154	41	133	7	527	30	3	37	Achterlaten op het land	8	9
Gewasresten - Knolselderij	120	109	131	22	88	245	74	133	7	331	27	4	43	Achterlaten op het land	4	4
Gewasresten - Ijsbergsla (bladeren)	70	109	131	22	108	117	29	133	7	485	30	4	71	Achterlaten op het land	5	5
Gewasresten - Spinazie	61	109	131	22	88	245	74	133	7	331	35	6	69	Achterlaten op het land	3	4
Gewasresten - Suikerbieten (loof)	150	210	219	30	41	153	229	133	10	108	18	2	25	Achterlaten op het land	198	303
Gewasresten - Consumptieaardappelen (loof)	310	203	219	30	78	127	124	133	10	209	9	2	17	Achterlaten op het land	311	275
Gewasresten - Zetmeelaardappelen (loof)	310	203	219	30	78	127	124	133	7	219	9	2	17	Achterlaten op het land	142	156
Gewasresten - Pootaardappelen (loof)	110	203	219	30	78	127	124	133	7	219	23	2	17	Achterlaten op het land	46	45
Gewasresten - Mais, snijmais	281	49	68	18	53	381	193	117	207	0	7	2	25	Achterlaten op het land	60	59
Gewasresten - Tarwe (stro)	900	48	42	14	92	372	347	12	10	141	6	1	17	Achterlaten op het land	299	243
														Stalstrooisel	165	134
														Melkkoe	35	28
Gewasresten - Appel (snoeihout)	500	93	25	15	119	362	251	30	60	268	4	0	0	Verbranden	24	23
Gewasresten - Peer (snoeihout)	500	93	25	15	119	362	251	30	60	268	4	0	0	Verbranden	23	23

	Samenstelling													Toepassing(en)	Omvang	
	DS (g/kg)	As	Eiwit	Vet	Lign.	Cellul.	H-cell.	Zetm. (g/kg DS)	Suiker	Overig	N	P	K		2019	2021
Aardappelindustrie - Aardappelpersvezel	165	43	81	2	50	116	175	191	11	330	13	1	18	Melkkoe	48	50
Aardappelindustrie - Aardappelsnippers	212	31	69	2	3	9	5	621	10	251	0	2	12	Melkkoe	17	17
Aardappelindustrie - Aardappelstoomschillen	123	65	127	17	14	54	32	461	19	211	20	3	27	Melkkoe	74	73
Aardappelindustrie - Aardappelzetmeel	199	42	98	4	7	18	27	610	21	174	5	2	5	Varken	11	5
Aardappelindustrie - Voorgebakken frites	340	30	70	170	3	11	6	620	0	90	11	2	11	Varken	14	18
Sappenindustrie - Algemeen	120	17	33	8	0	0	0	0	892	50	5	0	0	Varken	20	21
Plant aardige olien - Schroot	885	75	447	18	43	127	70	60	85	74	72	10	20	Varken	960	973
														Melkkoe	711	720
														Legkip	373	378
														Vleeskuiken	619	627
Zuivelindustrie - Kaaswei	76	114	230	82	0	0	0	0	413	160	37	10	30	Varken	22	54
Maalindustrie - Maïs grits	894	26	104	46	9	105	327	363	20	0	17	10	30	Varken	2	2
Maalindustrie - Maïszemelgrint	894	26	104	46	9	105	327	363	20	0	17	5	0	Varken	63	63
Maalindustrie - Tarwegries	871	54	175	41	34	95	298	238	64	0	25	11	15	Varken	138	138
Zetmeelindustrie - Maisglutenvoer	410	91	264	0	10	107	175	133	36	183	42	16	26	Varken	65	57
Zetmeelindustrie - Tarwezetmeel	223	23	107	0	14	49	29	399	143	236	17	3	5	Varken	184	176
Suikerindustrie - Bietenperspulp	262	77	82	8	21	207	251	10	53	291	14	1	4	Melkkoe	176	193
Suikerindustrie - Bietenstaartjes	150	225	85	8	24	79	47	0	267	265	14	2	12	Melkkoe	15	15
Suikerindustrie - Chichorei perspulp	258	95	83	12	53	179	107	0	49	422	14	2	8	Melkkoe	7	8
Suikerindustrie - Melasse	520	250	82	1	0	1	0	0	600	66	13	0	29	Varken	121	119
Cacao-industrie - Cacaodoppen	850	113	183	57	196	206	160	81	4	0	29	2	33	Verbranden	76	101
														Achterlaten op het land	8	11
Alcoholproductie - Tarwegistconcentraat	262	68	313	51	17	58	35	14	128	316	50	10	19	Varken	167	160
Bierindustrie - Bierbostel	230	43	259	111	69	162	324	19	14	0	40	6	1	Melkkoe	159	139
Bierindustrie - Biergist en voerbier	156	70	496	28	3	10	6	100	29	258	0	9	12	Varken	5	7

	Samenstelling													Toepassing(en)	Omvang	
	DS (g/kg)	As	Eiwit	Vet	Lign.	Cellul.	H-cell.	Zetm.	Suiker	Overig	N	P	K		2019	2021
Supermarkten e.d. - GFT afval	120	82	118	22	29	96	58	172	268	156	19	0	0	Vergisten & composteren	7	7
Supermarkten e.d. - Brood e.d.	727	29	142	87	11	36	21	591	84	0	23	2	4	Varken	41	41
Restaurants e.d. - Frituurvet	950	0	0	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Biodiesel	35	35
Huishoudens - GFT afval	492	82	118	22	29	96	58	172	268	156	38	0	0	Vergisten & composteren	767	767
Huishoudens - Frituurvet	1000	0	0	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Biodiesel	20	20
Groothandels - Uien	118	134	135	25	14	94	7	0	275	316	22	3	16	Vergisten (nat)	14	14
Groothandels - Waspeen	100	70	200	0	16	65	37	122	344	145	13	3	28	Vergisten (nat)	2	2
Groothandels - Tomaten	63	90	164	47	58	69	70	14	450	37	26	5	42	Vergisten (nat)	1	1
Groothandels - Komkommer	58	102	156	20	29	102	27	173	391	0	25	6	39	Vergisten (nat)	0	0
Groothandels - Paprika	125	62	163	37	37	123	74	0	375	130	26	3	20	Vergisten (nat)	1	1
Groothandels - Winterpeen	112	91	82	16	25	85	72	122	344	162	13	3	28	Vergisten (nat)	1	1

	Samenstelling													Toepassing(en)	Omvang	
	DS (g/kg)	As	Eiwit	Vet	Lign.	Cellul.	H-cell.	Zetm.	Suiker	Overig	N	P	K		2019	2021
Veeteelt - Rundvee kadavers	370	135	492	357	0	0	0	0	0	16	79	14	2	Rendering (biodiesel, energie)	23	20
Veeteelt - Melk	137	51	248	358	0	0	0	0	336	7	40	8	2	Achterlaten op het land	15	15
Veeteelt - Schapen kadavers	359	159	460	351	0	0	0	0	0	31	74	14	2	Rendering (biodiesel, energie)	1	1
Veeteelt - Geiten kadavers	359	159	460	351	0	0	0	0	0	31	74	14	2	Rendering (biodiesel, energie)	0	1
Veeteelt - Kippen kadavers	427	96	471	415	0	0	0	0	0	19	75	14	2	Rendering (biodiesel, energie)	9	8
Veeteelt - Eieren	242	35	512	412	0	0	0	0	0	41	82	8	5	Rendering (biodiesel, energie)	0	0
Veeteelt - Kuikens	380	108	500	382	0	0	0	0	0	11	80	14	2	Varken	1	1
Veeteelt - Eierschalen	1000	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	Rendering (biodiesel, energie)	5	5
Veeteelt - Kippen algemeen	380	108	500	382	0	0	0	0	0	11	80	14	2	Rendering (biodiesel, energie)	3	3
Veeteelt - Varken kadavers	380	108	500	382	0	0	0	0	0	11	80	14	2	Rendering (biodiesel, energie)	13	12
Visserij - Bijvangst schol	264	156	618	92	0	0	0	0	0	135	99	14	2	Varken	3	4
														Composteren	2	2
Visserij - Bijvangst schar	264	156	618	92	0	0	0	0	0	135	99	14	2	Varken	3	3
														Composteren	2	2
Visserij - Bijvangst tong	264	156	618	92	0	0	0	0	0	135	99	14	2	Varken	0	0
														Composteren	0	0
Visserij - Bijvangst garnalen	264	156	618	92	0	0	0	0	0	135	99	14	2	Varken	4	4
														Composteren	3	3

	Samenstelling													Toepassing(en)	Omvang	
	DS (g/kg)	As	Eiwit	Vet	Lign.	Cellul.	H-cell.	Zetm. (g/kg DS)	Suiker	Overig	N	P	K		2019	2021
Slachterijen - Rundvee darmpakket	250	54	132	28	0	0	0	0	0	786	29	7	27	Vergisten (nat)	9	10
Slachterijen - Varken kadavers en mest	245	27	190	47	49	169	203	0	0	364	30	26	10	Vergisten (nat)	5	5
Slachterijen - Kalveren vet	960	0	16	979	0	0	0	0	0	5	3	1	2	Rendering (biodiesel, meststof)	19	18
Slachterijen - Kalveren mest	250	54	132	28	0	0	0	0	0	786	29	7	27	Vergisten (nat)	8	8
Slachterijen - Varken darmen	294	29	883	86	0	0	0	0	0	1	141	7	2	Varken	12	13
Slachterijen - Varken vet	923	0	31	961	0	0	0	0	0	8	5	1	2	Biodiesel	19	20
Slachterijen - Rundvee organen	249	54	741	200	0	0	0	0	0	6	119	7	2	Rendering (biodiesel, petfood)	1	1
Slachterijen - Rundvee bloed	191	32	906	12	0	0	0	0	0	50	145	7	2	Rendering (biodiesel, petfood)	3	3
Slachterijen - Rundvee huiden	360	14	917	56	0	0	0	0	0	14	147	7	2	Materiaal hergebruik	5	5
Slachterijen - Rundvee beenderen	750	533	467	0	0	0	0	0	0	0	75	80	2	Rendering (biodiesel, petfood)	37	41
Slachterijen - Rundvee poten	306	83	693	203	0	0	0	0	0	21	111	11	2	Rendering (biodiesel, energie)	4	2
Slachterijen - Kalveren dikke darm, bloed	243	31	894	49	0	0	0	0	0	26	143	7	2	Rendering (biodiesel, petfood)	22	21
Slachterijen - Kalveren huiden	360	14	917	56	0	0	0	0	0	14	147	7	2	Materiaal hergebruik	14	13
Pluimveeslachterijen - Kadavers en overig	427	96	471	415	0	0	0	0	0	19	75	14	2	Rendering (biodiesel, energie)	27	22
Pluimveeslachterijen - Mest	250	0	255	0	0	0	0	0	0	745	54	12	26	Rendering (biodiesel, energie)	2	1
Pluimveeslachterijen - Organen en ingewanden	272	42	812	143	0	0	0	0	0	3	130	7	2	Rendering (biodiesel, petfood)	21	17
Pluimveeslachterijen - Dikke darm en overig	230	43	696	261	0	0	0	0	0	0	111	7	2	Rendering (biodiesel, petfood)	24	20
Pluimveeslachterijen - Bloed	115	17	948	34	0	0	0	0	0	0	152	7	2	Rendering (biodiesel, petfood)	6	5
Pluimveeslachterijen - Veren	900	22	956	22	0	0	0	0	0	0	153	7	2	Rendering (biodiesel, petfood)	56	47
Visverwerking - Algemeen	197	260	535	131	0	0	0	0	0	74	86	14	2	Rendering (biodiesel, petfood)	8	8

Annex 2 Efficiency of biomass utilization in various applications

2.1 Use for food

All nutrients are available in the food product, the efficiency is equal to the fraction that is used.

2.2 Protein extraction combined with bioethanol production from residue

This pathway describes a wet extraction process as described by Voogt et al. (2021) for brewers' spent grain and palm kernel meal.

Table 1. Yields of protein extraction process, based on values presented by Voogt et al. (2021)

component	yield in protein powder	yield in residue (feed)	conversion ratio to ethanol
protein	80%	20%	
fat	0	100%	
sugar	80%		0.17
starch	0		0.87
fibres	0	100%	
ash	80%	20%	
other compounds			0.43

2.3 Rubisco protein extraction, digestion of residue

Protein yield was estimated from Cosun (2019), assuming beet leaves dry matter content around 11 to 12%, of which 25% protein: about 30% of the protein ends in the Rubisco extract.

2.4 Soil application

(this applies for direct application of a residue stream as well as for compost/manure/digestate and other streams that applied to the soil)

Applying biomass to soil contributes to soil organic matter ("soil carbon") and nutrients balance (N and minerals). "Efficiency" of applied biomass is expressed as the additional food production yield per unit material applied.

Circular contribution of nitrogen (N) when applied to soil

The percentage of utilized nitrogen from supplied organic material by crops varies amongst types of biomass supplied. Typical/average values for various manures and other organic materials are given by RVO (2021). For manure, RVO proposes different value amongst systems, manure fractions and soil types. The model, however requires fixed values, therefore we adopt average value per animal category:

- for dairy cattle manure: 50%
- for pig manure 70%
- for chicken manure 55%

For other organic matter the following utilization factors are used:

- for compost: 10% (RVO, 2021)
- for supplied plant residues: 35% (Van Dijk et al., 2005),
- for other organic 'fertilizers': 50% (RVO, 2021).

To estimate the protein production potential per kg nitrogen, we use the following arguments:

- Nitrogen is used as a building material for protein in the plant; typically 6.25kg protein per kg nitrogen.
- The ratio from plant protein to food protein is largely depending on the food conversion system. In The Netherlands, a large part of the produced crops is used as animal feed, with relatively low crop-to-food efficiency; net use/conversion for food is roughly estimated at 25%.

Consequently per kg utilized nitrogen about 1.6kg food protein is generated.

Altogether, the yield per kg nitrogen in a biomass applied to the soil is estimated at 1.6kg protein x the nitrogen utilization factor for the specific biomass type.

Remark: The crop and animal production systems generate other components next to protein. On the other hand, that also requires other inputs. Until better reasoning is available, we adopt above reasoning.

Circular contribution of phosphorus (P and K) when applied to soil

A similar reasoning as for N is not in place for P and K. Instead we can compare the value prices of these nutrients (in artificial fertilizers).

The prices of P and K are about 3/2 and 1/2 relative to the price of N⁶. The value of P and K are appreciated accordingly in the CAT.

For all organic sources the coefficient of action of P and K are estimated at 100%.

Circular contribution through soil organic matter

Like nutrients, organic matter is considered essential for soil quality/fertility. Organic matter decomposes, and is commonly replenished through crop residues left on the field or applied biomass (manure, compost or other spread biomass). On a global scale a positive relationship is found between soil organic matter content and crop yield (Oldfield et al., 2019). The actual critical contribution to production yield, however, is still subject of debate.

Soil organic matter contributes to the three soil fertility dimensions defined by Janssen (2002): the physical (structure, aeration, water retention, etc.), the biological (biomass, biodiversity, nutrient mineralization, and disease suppression), and the chemical (nutrient buffering and supply) dimensions.

With respect to the chemical dimension Schønning et al. (2018) derived from a set of experiments with variations of soil organic matter and N – on sandy arable soil that was fully fertilized with all other plant nutrients – and based on reflection on other publications that organic matter is not a limiting factor for achieving the maximum potential yield, but supports high productivity at lower-than-“optimum” N dosage levels. This confirms that the organic matter does not induce extra production but should be considered as a catalyst in uptake of the nutrient(s).

With respect to the physical and biological dimensions: the actual contribution by soil organic matter depends heavily on the specific situation: soil type (think of need of structure in clay soils), water supply and evaporation dynamics, etc. We reason that – as with the chemical dimension – also with respect to the other dimensions organic matter is an enabler that promotes productivity in sub-optimal conditions.

Since in practical agricultural production situations suboptimal conditions are very common, maintaining adequate levels of soil organic matter content is considered essential for maintaining productivity.

⁶ estimated from prices for a set of fertilizer type, average prices from January 2022 according to www.agrimatie.nl/agrimatieprijzen (visited March 2022).

Stable organic matter is considered to contribute most to the physical dimension, whereas more rapidly degradable components (like carbohydrates) contribute to soil life, which is essential for chemical and biological fertility dimensions.

Quantifying contribution to physical fertility dimension

Supply of organic material is required to compensate for the decomposition. The required rate of replenishment depends on the aspired soil organic matter content and the rate of decomposition. Highly degradable components decompose faster than persistent/recalcitrant components, consequently recalcitrant organic matter is more functional in the soil (although this hypothesis is disputed/refined by e.g. Schmidt et al., 2011 and Dungait et al., 2012). Polyphenols and complex carbohydrates like lignin are considered most persistent (see e.g. Puttaso et al., 2011).

The actual rate of degradation is not only determined by biomass chemical composition, but also biomass structure (accessibility) and environmental conditions (soil pH, temperature, physicochemical protection, etc.) (see e.g. Conant et al., 2011).

In the Netherlands, organic matter content of arable land varies from 1.5 to 15 (Koopman, 2019); Velthof et al. (2017) present an average around 4% (in the cultivation layer to 25cm depth).

With an average mass density of about 1800kg per m³ soil, the total average organic matter in the cultivation layer is estimated at 180 ton/ha. These values are in line with those presented by Conijn et al. (2015).

Annually 1 to 4% of the soil organic matter is decomposed⁷. Although degradation rates depend on specific condition – like intensity of soil processing and pH⁸ – a fixed value is needed in the CAT; we assume 1% for lignin and 4% for cellulose. Organic fertilizers with high content of other – less persistent – components have higher decomposition rates⁹. Consequently we could say that annually supplying 1.8 ton lignin or 7.2 ton cellulose is considered sufficient to maintain the level of soil organic matter.

High-yield (feed) crops in the Netherlands have typical dry matter yield between 8 and 18 ton/ha (average 12). Above and below ground Crop residues (of for example silage corn) are estimated around 20% of the crop yield. This will often be insufficient to maintain the soil organic matter content (remember that the crop residue will only be partly lignin). Therefore, farmers also apply other organic fertilizers.

From above data we deduce that producing 12 ton dry matter crop requires annual supply of 1.8 ton lignin, 7.2 ton cellulose or a combination of these. In other words, a ton lignin brings about 6.7 ton crop and a ton cellulose brings about 1.7 ton crop (dry matter). Since next to organic matter also other fertilizer components are essential for the production (like N, P and K, see above), the attributable productivity contribution is a fraction of the mentioned crop productivity. With lack of adequate rationale, this fraction is for the time being set to 50%.

Contribution to chemical and biological fertilizer dimensions

Especially the rapidly and medium degradable components contribute to nutrient supply and soil life. Nutrient supply is addressed above.

The actual quality of soil life is little affected by the composition of applied organic matter (Koopmans et al, 2019), and consequently is not further addressed in the CAT.

⁷ <https://www.koeienenkansen.nl/nl/mijnkringloopwijzer/KringloopWijzer-3/KringloopTIP/Bodemstructuur-verbeteren-door-meer-organische-stof-.htm>

⁸ <https://www.handboekbodembemesting.nl/nl/handboekbodembemesting/Handeling/Organische-stofbeheer/Functies-en-kwaliteiten-van-organische-stof/Voedsel-en-leefomgeving-voor-het-bodemleven.htm>,
<https://www.goedbodembeheer.nl/organische-stof>

⁹ <https://www.handboekbodembemesting.nl/nl/handboekbodembemesting/Handeling/Organische-stofbeheer/Functies-en-kwaliteiten-van-organische-stof/Bijdrage-aan-de-instandhouding-of-opbouw-van-bodem-organische-stof.htm>

2.5 Wet anaerobic digestion (provides bioenergy + fertilizers), including manure fermentation and co-fermentation

Bioenergy production

When available for the biomaterial: biomethane yield presented in literature

If not, the yield is estimated based on average from stoichiometric formulas and practically measured data (presented by Baserga, 1998), see Table 2.

The average between the measured and the higher theoretical maximum is used because it is expected that biogas technology has improved since the date of publication of 'typical measured data').

Heating value of methane is 50 MJ/kg

Contribution of complex carbohydrates depends on the degree of hydrolysis. This will be affected by pretreatment; in the calculator it is assumed that no hydrolysis (pre-)treatment is applied and consequently complex carbohydrates are not converted.

Table 2. Estimates for methane yield from macronutrients in a biomaterial

Category	methane yield			energy yield (kJ/kg)
	maximum yields based on stoichiometrics	typical measured data	value used in CAT	
simple carbohydrate	0.27 g/g	0.26 g/g	0.26 g/g	13 x 10 ³
fat/oil	0.72 g/g	0.56 g/g	0.60 g/g	30 x 10 ³
protein	0.34 g/g	0.33 g/g	0.33 g/g	16.5 x 10 ³

For materials with significant complex carbohydrates degradation, predicted biogas yield may be specified in the biomass properties table. Alternatively, estimates may be derived through a model that takes digestibility in consideration¹⁰.

In extended digestion processes, larger parts of the complex carbohydrates are digested, although contribution to biogas productivity may be limited due to acidification (as Molinuevo-Salces et al., 2013, demonstrate for retention times over 80 days).

Biomass organic matter yield in digestate

The high degree of conversion of simple carbohydrates, fat/oil and protein (Table 2) indicates that these will be largely degraded; cellulose, hemicellulose and lignin will be largely retained.

Nitrogen yield in digestate

The nitrogen loss during fermentation is neglected, as in manure regulations and in accounting directives (which also assume 100% nitrogen efficiency in (co-)digestion).

It is assumed that the nitrogen efficiency in the soil is equal to the efficiency for the applied manure.

The heuristics of contributions of organic matter and nitrogen to the soil are assumed comparable as the main substrate (manure type or organic matter).

¹⁰ see e.g. <https://www.lfl.bayern.de/iba/energie/031560/index.php> and Kool et al. (2005).

2.6 Dry anaerobic digestion

Dry anaerobic digestion generally delivers a lower methane yield than wet anaerobic digestion:

- Angelonidi et al. (2015) compared biogas yield of dry and wet digesters. Their results showed about 60% reduced methane yield per kg volatile solids.
Remark: the wet digesters considered in this study used substrates with higher biogas potencies, so the found differences are higher than they would be with equal substrates.
- Rocamora et al. (2020) show comparison of biogas yields for feedstocks treated by dry and wet digestion in various case studies. Methane yield per kg volatile solids was 0 to 50% lower in dry digestion compared to wet digestion.

Altogether we estimate biogas yield from dry digestion at 70% of wet digesters methane yield.

In systems considered, dry anaerobic digestion is followed by composting (see section 3.7). We assume that anaerobic digestion prior to composting results in equal organic matter degradation as in single composting.

2.7 Composting (fertilizer production)

Nutrients losses in composting

Nitrogen: At low nitrogen levels, the nitrogen is largely conserved in the material. At high nitrogen content (C:N < 20), nitrogen is partly lost (ammonia). In the model, we assume that the nitrogen content is low enough so that no nitrogen is lost.

Breakdown of carbohydrates and lipids

In composting processes, sugars and starches are the first to be broken down; this is also where the breakdown and fats begins. Then the complex carbohydrates come into play, lignin last. In intensively managed composting systems it is expected that fat content is reduced until few percent of the compost mass (Ruggieri et al., 2008, 2008a).

The rate of carbohydrate degradation depends on several factors (raw material composition, moisture content, particle size, porosity, aeration, temperature, etc.).

From various quantitative analyses of hemicellulose degradation, like Van Ginkel (1996) and López et al. (2021), it is concluded that in the composting processes, lignin is barely broken down and that over half of the cellulose and hemicellulose is broken down. Degradation products are partly again persistent molecules (according to the analyses by Van Ginkel the total volume of organic matter in the produced compost is substantially higher than the non-degraded lignin, cellulose and hemicellulose). Based on these findings we assume that simple carbohydrates, fat and proteins are completely broken down; half of the cellulose and hemicellulose is broken down and lignin is conserved.

Efficiency of nitrogen from compost in the soil

RVO (2021) mentions nitrogen coefficients of action for nitrogen in compost: 10%.

2.8 Use for biofuels, chemicals and plastics

Through fermentation and other conversion processes, nutrients can be converted to various biobased materials. We have estimated conversion parameters ("macronutrient conversion factors") based on stoichiometric analysis (chemical reaction equations) as presented by e.g. Linke et al. (2003) and various published experimental findings in Table 3.

Table 3. Macronutrient conversion factors, kg product per kg feedstock

(T: theoretical, potential yield derived from amongst others stoichiometrics; P: practical/typical values, or range of values, encountered in literature)

Product											
Macro-nutrient	Bio-ethanol (fermentation)	Bio-ethanol (BTL) (pyrolysis or Fisher Tropz)	Biodiesel (FAME)	Renewable diesel (HVO)	Fuel Oil (pyrolysis)	Bio-PE	Bio-PET (30%)	PEF	PHA/PHB	PLA	Starch polymers
Protein											
Fat/oil											
			1.0 (T) ¹²								
			0.73-								
			0.98 (P) ¹²								
Sugar	0.51 (T) ^{11,12}	0.27			0.25- 0.29 (P) ^{12,13}	0.20 ¹²	0.56 (T) ¹²	0.48 (T) ¹²	0.80 (T) ¹²		
	0.47 (P) ¹²						0.51- 0.55 (P) ¹²	0.40 (P) ¹²	0.67- 0.77 (P) ^{12,14}		
Starch	0.57 (T) ¹¹				0.20 (P) ¹²			0.31 (P) ¹²	0.60 (P) ¹⁴	1.0 (T) ¹²	
	0.42 (P) ¹⁴									1.0 (P) ¹²	
Cellulose	0.51- 0.57 (T) ^{12,15}	0.12									
	0.35- 0.38 (P) ¹²										
Hemicellulose	±0.4 (T)										
Lignin											

Remark: yields for bio-ethanol from (hemi)cellulose to bioethanol through fermentation are based on second generation technologies.

Based on above, combined with estimates from Bos & Sanders (2013), typical conversion yields are presented in Table 4.

¹¹ <https://www.eubia.org/cms/wiki-biomass/biofuels/bioethanol/>, accessed 7 December 2022; Duncan (2013).

¹² Nova institute, paper #8 on bio-based economy 2015-11. Definition, Calculation and Comparison of the "Biomass Utilization Efficiency (BUE)" of Various Bio-based Chemicals, Polymers and Fuels.

¹³ Lovett J., Bie F. Sustainable sourcing of feedstocks for bioplastics. Corbion, 2016

¹⁴ Biopolymers facts and statistics 2021. IfBB Institute for bioplastics and biocomposites

¹⁵ Sadhukhan, J., E. Martinez-Hernandez, M.A. Amezcua-Allieri, J. Aburto, J.A. Honorato S (2019) Economic and environmental impact evaluation of various biomass feedstock for bioethanol production and correlations to lignocellulosic composition, Bioresource Technology Reports, 7, 100230.

Table 4. Typical macronutrient conversion factors, kg product per kg feedstock

Product Macro-nutrient	Bio-ethanol (hydrolysis + fermentation)	Bio- ethanol	Biodiesel	Biochemicals via building blocks	Direct to chemicals, efficient pathway
Protein					0.4
Fat/oil			0.9		0.8
Sugar	0.5	0.27		0.3	0.7
Starch	0.5	0.27		0.3	0.7
Cellulose	0.4	0.12		0.2	0.45
Hemicellulose	0.3			0.15	0.35
Lignin				0.3	0.5

2.9 Combustion (including heat utilisation and possible use of nutrients in the ash as fertiliser)

Heat generation

The amount of heat that can in practical setting been generated is derived from either:

- LHV (lower heating value)
- if LHV value for a material is not available, it is estimated from HHV (higher heating value): $0.8 \times \text{LHV}$
- if both LHV and HHV are missing, the heating value is estimated from the biomass composition:

$$\text{heating value} = 39 * M_{\text{fat}} + 18 * (1 - M_{\text{fat}} - M_{\text{ash}}) \quad (\text{MJ/kg})$$

where M_{fat} and M_{ash} stand for the mass fraction fat and ash respectively.

The circularity value of heat generated of a biomass material is estimated as the ratio between the materials' heating value and the heating value of wood (17 MJ/kg).

Nutrients yield in ash

Nitrogen is lost during combustion.

Phosphorus is retained in the ash.

2.10 Use as animal feed: dairy cattle

When applying the material as feed dairy cattle, multiple products (for "circular routes") are produced (Figure 1):

- milk (food, containing part of protein and energy from the feed);
- meat (food: calves and older animals; again containing part of protein and energy from the feed);
- manure (containing organic matter, nitrogen and other nutrients): through fertilisation this induces growth of new plant materials which (with efficiency <1) ends as food product or biomaterial;
- energy (via optional manure digestion or co-digestion).

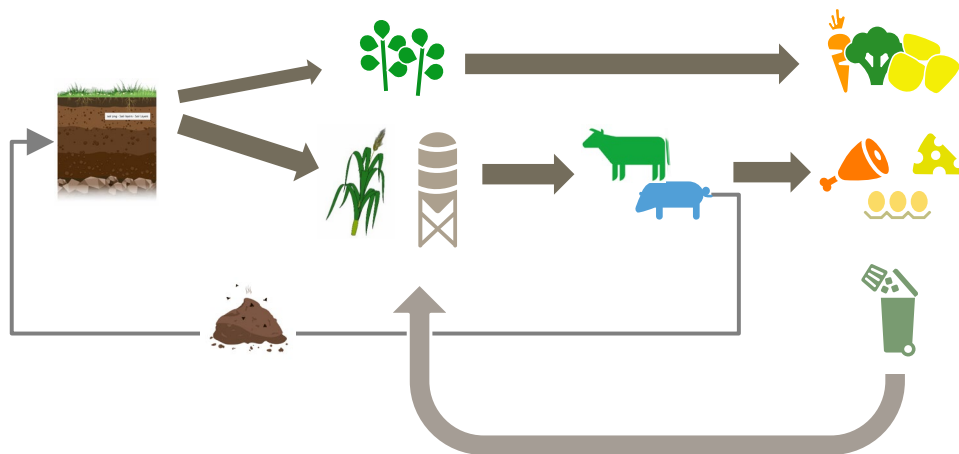


Figure 1. Applying a biomass residue as animal feed has various effects on food production: direct production of animal products and indirect effects due to the manure that results from the livestock production.

To estimate yields to milk and meat from animal feed, animal feeding values are used that have been mapped for many residue flows (CVB 2021 and Feedipedia.org). For missing values, estimators are formulated based on macro-nutrient composition.

Protein via cattle feed to food

Protein is converted back into a food protein with a certain efficiency. We estimate the efficiency towards food protein through two methods¹⁶:

1. Based on literature study: For dairy cattle, efficiencies of conversion from N in feed to N in milk are mentioned between 16 and 36% (Powell et al., 2010). For intensive production systems such as in the Netherlands, the efficiency is at the lower end of this range: Aarts et al. (2010) find values between 16 and 24%; if meat production is also included, N-efficiencies between 20% (for conventional commercial companies) to 25% (test farm De Marke, year with highest N-efficiency) are found. Oenema et al. (2012) measure efficiencies between 22 and 27% for companies participating in the "Cows and Opportunities" program.
2. Based on protein-efficiencies of animal feed: For 94 feed materials from the CVB Animal feed table 2021, a protein rating is available for all 4 animal species (cattle, fattening pigs, laying hens and broilers). For cattle, the average protein efficiency is around 40% (Spek, 2021). For a productive cow, slightly over 1/3 is for maintenance; in addition, maintenance is also necessary outside the lactation period and for bulls.

Both analyses point at an approximate conversion yield from protein in animal feed to food protein around 24%. The largest part is milk protein (we estimate at 22%); the remainder (2%) is meat protein.

¹⁶ The actual utilisation efficiency will depend strongly on the feeding ration and livestock management; however to come to unique values we must use some reference data.

Energy via cattle feed to food

In addition to protein, dairy cattle also produce fat and (milk) sugar. For cattle the indicator VEM is used to describe the digestible energy from feed. For a large number of common dairy feeds this indicator is reported by amongst others CVB (2021) and feedipedia.org.

The amount of energy required for the production of 3MJ milk has been estimated by ILVO (2011) at $460 \times (1/63\%) = 727$ VEM. As with protein, we estimate that 90% of the energy ends up in the milk. Based on a typical fat:sugar weight ratio of 3:4, we then estimate the fat and sugar production in milk:

$$3 \times 17 + 4 \times 37 = 51 + 148 = 199$$

$$M_{\text{fat,milk}} = (9/10) \times (3/(3 \times 17 + 4 \times 37)) \times ((3/727) \times \text{VEM} - 17 \times M_{\text{protein,total}})$$

$$M_{\text{sugar,milk}} = (9/10) \times (4/(3 \times 17 + 4 \times 37)) \times ((3/727) \times \text{VEM} - 17 \times M_{\text{protein,total}})$$

Part of the energy is also converted into a fat component in meat (growth of livestock):

$$M_{\text{fat,meat}} = (1/10) \times (3/(3 \times 17 + 4 \times 37) + (17 \times 4)/(37 \times (3 \times 17 + 4 \times 37))) \times ((3/727) \times \text{VEM} - 17 \times M_{\text{protein,total}})$$

Estimator for VEM:

$$\text{VEM} = \frac{6}{69} \times \left(1 + \frac{4}{10} \times \left(\frac{15,90 \times \text{RE} + 37,66 \times \text{RVET} + 13,81 \times \text{RC} + 14,64 \times \text{OK} - 0,63 \times \text{SUI}}{24,14 \times \text{VRE} + 36,57 \times (0,9 \times \text{RVET} - 2,5) + 20,92 \times \text{VRC} + 16,99 \times \text{VOK} - 0,63 \times \text{SUI}} - 0,57 \right) \right) \times 0,9752 \\ \times (15,90 \times \text{RE} + 37,66 \times \text{RVET} + 13,81 \times \text{RC} + 14,64 \times \text{OK} - 0,63 \times \text{SUI})$$

Yields to manure

Nitrogen: Nitrogen ends in manure in the form of indigestible forage proteins, proteins from the metabolism of rumen bacteria and in inorganic nitrogen molecules such as ammonia. About 2/3 of the nitrogen from the feed ends up in manure (Hindrichsen et al., 2006). Part of this disappears during storage, Dijkstra et al. (2018) mention 10% during 4 months of storage. From these figures we deduce that about 60% of the nitrogen in manure is applied as fertilizer.

Protein: Proteins in manure are foremost part of feces, hardly or not in the urine fraction. About half of the excreted nitrogen ends in the feces fraction and half in the urine fraction (Weiss et al., 2009). The fecal nitrogen is largely bound in protein/amino acids (Chen et al., 2003). Taking into consideration that a part of the ammonia evaporates leads to the conclusion that slightly over 50% of the nitrogen in the manure is bound in protein and amino acids, which is confirmed by average composition of dairy manure according to Eurolab¹⁷. Combined with the above described destination of nitrogen to manure we estimate the protein in manure to protein in feed ratio at 35%.

Fibres: In animal feed analysis, a distinction is made between crude fibre (RC) and digestible crude fibre (PRC; also indirectly indicated by VCRC x RC). The difference is the lignin plus the undegraded part of cellulose.

Actual estimates for fibre fractions are given by . Degradability for cellulose varies amongst forages from 25 to 90%, for hemicellulose between 16 and 90%, whereas lignin is not accessible.

Lignin is not or hardly broken down by the cow (Pigden & Heaney, 1969).

Cellulose and hemicellulose are partly broken down: we assume that values for horses can be used: the break down cellulose by 40% and hemicellulose by 50%¹⁸.

Simple carbohydrates:

Fat: Typical fatty acid content of dairy manure is around 10 g/l (Starmans et al., 2015). Assuming typical fat/fatty acid content of 40g per kg feed (ILVO, 2011), total annual feed intake 12 ton dm per year and manure production of 20 ton/year, the total actual fat consumption is estimated at 480kg/year whereas 200kg ends in manure. From these figures we estimate that 40% ends in manure.

¹⁷ <https://www.eurolab.nl/meststof-organisch-v.htm>

¹⁸ <http://www.voervergelijk.nl/informatie/69/energiebronnen-voor-paarden>

Biogas yield from optional (co-)digestion of manure

Equal methane yields from nutrients in the manure as for other biomaterials in wet digesters are assumed (see above).

Efficiency of nitrogen from cattle manure in the soil

RVO (2021) mentions nitrogen coefficients of action for different situations:

- cattle manure produced on the farm, farm with grazing: 45%
- cattle manure produced on the farm, farm without grazing: 60%
- cattle manure supplied from another farm: 60%

Because a large part of the livestock farmers use grazing, we estimate the average at 50%.

2.11 Use for animal feed: pigs

This valorisation pathway has the same characteristics as for dairy feed use, but with different details and some different sources of information.

Protein via animal feed for pigs to food

Spek (2021) estimates the protein yield for 94 feed materials from the CVB Animal Feed Table 2021 at 30%. However, only a limited part of the animal live weight is used for food.

The live weight to food yield is determined by two factors:

- The slaughter yield (live weight to carcass ratio): typically 70 to 80% (Bertol et al., 2015, Kuber et al., 2021).
- The carcass-to-food yield. A significant part is directly used for food (all values excluding bones):
 - "About 60% of the carcass weight of a pig is consumed as meat or as a meat product"¹⁹;
 - 70 to 75% of carcass weight ends in primal cuts according to data from Kuber et al., 2021;
 - around 83% is edible according to data presented by Hoste et al., 2004.

The differences between these values are likely related to fractions that are considered edible but in practice are not consumed as-is because of lacking direct market demand.

Part of the slaughter residues – typically 5% (Dobbelaere, 2017) – is used for food: gelatin, blood products, bone fats, tallow, lard, etc..

Altogether we estimate the total carcass-to-food yield around 75%.

Based on these values, we estimate the total average yield from live weight to food at 57%.

Assuming that the protein yield is comparable to the weight yield in slaughtering results in an estimate of total protein yield is $30\% \times 57\% = 17\%$.

¹⁹ <https://www.vlees.nl/faq/hoeveel-kilo-vlees-komt-er-varken/>

Energy of animal feed for pigs to food

Whereas for dairy cattle the nutritional energy content is described by the indicator VEM, for pigs the nutritional energy is expressed in NE2015.

Conversion of feed energy to animal weight is derived from CVB (2021). Average NE2015 requirement for the growth period of 25 to 130 kg for growing rate sows of 24.19 MJ/animal/d at a growth of 931 g/d. This means a nutritional energy requirement of 25.98 MJ per kg of growth (in terms of live pig weight).

Content of food protein and fat is derived from Szabó (2001): Per 100kg live weight (equivalent with carcass weight 75 to 80kg) the carcass contains about 12kg protein and 24kg fat. With the carcass-to-food ratio mentioned above (and taking into consideration that bones have low fat and protein content) we estimate the amount of edible protein and fat per 100kg live weight at 8 and 16kg respectively. Consequently the food produced per 25.98MJ feed NE2015 feed energy is estimated at $0.08 \times 17 + 0.16 \times 37 = 7.3$ MJ food nutritional energy.

In case NE2015 is not specified for a material, the following estimator is used:

$$\text{NE2015} = 11.7 \times \text{Protein} + 35.74 \times \text{Fat} + 14.14 \times \text{Starch} + 12.73 \times \text{Sugar} \\ + 10 \times \text{Other_carbohydrates}$$

where $\text{Other_carbohydrates} = \text{Total_carbohydrates} - \text{Starch} - \text{Sugar} - \text{Lignin} - \text{Cellulose} - \text{Hemicellulose}$

Yield of nutrients and organic matter from pigfeed to manure

As for dairy manure, part of the nutrients end in manure. For pigs the difference fraction between the utilized energy (according to above formula) and theoretical nutritional energy per macro-nutrient is considered retained, ending in manure.

For yield of N to manure we assume a comparable yield heuristic as for cattle manure: 80% of the (protein) nitrogen that is not converted to 'pig' ends in applied manure: $80\% \times (100\% - 30\%) = 56\%$.

Efficiency of nitrogen from pig manure in the soil

RVO (2021) reports coefficients of action for different situations:

- pig slurry manure on clay and peat: 60%
- pig slurry manure on sand and loess: 80%
- solid manure from pigs: 55%

Because a large part of pig farming uses slurry systems and is located in sandy areas but a substantial part of the manure is deposited on clay soils, we estimate the average coefficient of action at 70%.

2.12 Use for animal feed: laying hens

Protein via animal feed for laying hens to food

Wu-Haan et al. (2007) report an average return of 30%. This is the direct efficiency during the laying phase; the feed consumption by parents and the growing-up phase are not included, the same applies to the valorisation of culled chickens. These will reduce efficiency by several percents, consequently we estimate the protein efficiency for laying hens at 27%.

Energy via feed for laying hens to food

The energy that laying hens can be derived is expressed in the term OEIh ("organic energy laying hens"). (derived from Spek, 2021): OEIh ("organic energy laying hens") requirement:

$$435 \times 1.690.75 + 12.1 \times 54.3 = 1302 \text{ kJ/d}$$

Energy in egg production: 340 kJ/d

From the ratio of these figures follows a return of $340/1302 = 26\%$

For a large number of traditional chicken feedstocks, estimates for OEIh are given in feed nutritional tables (CVB, 2019). For missing values we have derived the following estimating formula:

$$\text{OEIh} = 18.03 \times \text{Protein} + 44.65 \times \text{Fat} + 17.32 \times (\text{Starch} + \text{Sugar})$$

Yield of nutrients and organic matter from chicken feed to manure

Same approach as for pig manure, based on above expression for OEIh.

Efficiency of nitrogen from laying hens manure in the soil

55% (RVO, 2021)

2.13 Use for animal feed: broiler chickens

Protein via animal feed for broiler chickens to food

Šebek et al. (2009) estimate the average protein conversion of broiler chickens (kg of feed protein per kg of protein consumed) from birth to consumer product at 4.3. This number does not include the protein requirement of dams (mother chicken). Assuming that the dams have a similar protein efficiency as laying hens, an average egg weight of 50g (of which 6g protein; requires 24g feed protein, see above) and 186g protein in the consumed part of the carcass results in $24/186 = 0.13$ g of additional feed protein per g consumed protein.

Total: 4.4 kg of feed protein per kg of protein consumed. In other words: per kg of feed protein, 0.23 kg of food protein is produced.

Energy through feed for broiler chickens to food

Nutritional energy of a feed material is expressed in OE_{vlk} (Organic Energy "vleeskuikens").

(derived from Spek, 2021):

- Energy in the produced chicken 0.468 MJ/animal/d
- OE_{vlk} requirement: 1.48 MJ/animal/d

From the ratio of these figures follows a return of $468/1480 = 32\%$

Energy capture includes all protein and fat (live weight, so including offal, feathers and other inedible parts. Details about which part of the proteins and fat end up in the residual flows are not available; therefore, we take the average fraction edible (46%) also for the energy: the net energy efficiency is estimated at $46\% \times 32\% = 24\%$.

For a large number of traditional chicken feedstocks, estimates for OE_{vlk} are given in feed nutritional tables (CVB, 2019). For missing values we have derived the following estimating formula:

$$OE_{lh} = 18.03 \times \text{Protein} + 38.83 \times \text{Fat} + 17.32 \times (\text{Starch} + \text{Sugar})$$

Yield of nutrients and organic matter from chicken feed to manure

Same approach as for pig manure, based on above expression for OE_{lh}.

Efficiency of nitrogen from broiler chicken manure in the soil

(see expression for laying hens; RVO does not distinguish between manure from broiler chickens and laying hens for the nitrogen utilisation efficiency)

2.14 Use for insects for food

(as for animal feed here we assume that the feedstock is used as part in an optimized feed formulation)

Typical yield for black soldier fly on food waste, based on results presented by (Ewald et al., 2020):

- In their trial with the highest yield, 170 mg dm substrate (20.7% protein, 20.5% fat, 48.4% carbohydrates and 10.4% ash) resulted in 59 mg dm larvae yield (27.9% protein, 40.7% fat).
- From this the protein conversion ratio is estimated at 47%, Taking into consideration that the substrates will not always have optimized composition, and results presented by Parodi et al. (2023) and Naser El Deen et al. (2023), we estimate average protein bioconversion efficiency at 40%.
- The fat yield is derived from the total energy conversion ratio. For that we estimate that 20% of the carbohydrates was non-digestible fibres. Consequently we estimate the energy conversion ratio at $59 \times (17 \times 0.279 + 37 \times 0.407) / (170 \times (17 \times 0.207 + 37 \times 0.205 + 18 \times 0.8 \times 0.484)) = 39\%$.

Yield of nutrients and organic matter from insects feed to frass

Nitrogen yield to frass is derived with the same heuristics as for livestock from protein conversion ratio.

2.15 Use for insects for feed

Conversion ratios from via insects, via livestock to food (milk, meat and eggs) and co-products are determined through combining conversion ratios for insects with conversion ratios for the livestock as presented above.

2.16 Use as material

When recycling material (think of used wood), a refining process is actually applied with different applications per flow:

- renewed wood
- sawdust (can be used, for example, for energy generation or as an addition in composting)
- residual wood (can be used for chipboard: material application with partly broken structure).

The efficiency per current may vary (depending on the quality and intended application).

2.17 Use for biochemical production via building block molecules

(with average efficiencies for different building blocks)

Predictive yields are based on stoichiometric conversion ratios for representative nutrient and biochemical molecules. We have slightly adapted these values based on practical yields presented in literature.

2.18 Biochemicals via pathways with direct exploitation of functionality in the molecules

Here, a similar approach is adopted as for the production pathways via platform molecules. These pathways have somewhat higher average yield because intermediate steps are skipped.

2.19 Biodiesel production (from used frying oil and animal and plant derived fats and oils)

Vegetable and animal oils and fats can be converted into (bio)diesel via esterification. The yield is estimated at 90% (zie Table 4).

The valuation weight is set equal to that for fat/oil because the heat of combustion is comparable.

The functionality of fuel is set to 2.

2.20 Rendering of animal-derived residual streams

Permitted route for Cat 1 material: rendering, conversion of fat into biodiesel, use of the meal for energy production (co-firing coal-fired power plants)

Permitted routes for Cat 2 equipment

- Biogas fermentation + marketing of digestate in agriculture (subject to post-processing)
- Rendering, conversion of fat into biodiesel, use of the meal as fertilizer
- Routes for cat 1 material

Efficiency of the rendering process (mass balance separation fat) is derived from Oberthür (2003): about 70% of the animal fat present is extracted. This fat is converted to biodiesel (as described above).

2.21 Literature for this Appendix

- Angelonidi, E. & S.R. Smith (2015) A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste, *Water Environ. J.*, 29, pp. 549-557, 10.1111/wej.12130
- Baserga U.,1998, *Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen*, FAT-Berichte Nr. 512
- Bertol, T.M. , E.A. Oliveira, A. Coldebella, V.L. Kowski, A.J. Scandolera & M.B. Warpechowski (2015): Meat quality and cut yield of pigs slaughtered over 100kg live weight, *Animal Science And Technology And Inspection Of Animal Products*, *Arq. Bras. Med. Fat. Zootec.* 67 (4), <https://dx.doi.org/10.1590/1678-4162-8113> .<https://doi-org.ezproxy.library.wur.nl/10.1590/1678-4162-8113><https://doi-org.ezproxy.library.wur.nl/10.1590/1678-4162-8113>
- Bos, H.L. & J.P.M. Sanders (2013) Raw material demand and sourcing options for the development of a bio-based chemical industry in Europe. Part 1: Estimation of maximum demand, *Biofuels*, *Bioprod. Bioref.* 7:246–259, DOI: 10.1002/bbb.1388.
- Chen, S., Liao, W., Liu, C., Wen, Z., Kincaid, R.L., Harrison, J.H., Elliott, D.C., Brown, M.D., Solana, A.E., Stevens, D.J. (2003) Value-Added Chemicals From Animal Manure. Northwest Bioproducts Research Institute, http://www.adktroutguide.com/files/Elliott_PNNL_value_from_manure.pdf (accessed 17 January 2022).
- Conant, R.T., M.G. Ryan, G.I. Ågren, H.E. Birge, E.A. Davidson, P.E. Eliasson, S.E. Evans, S.D. Frey, C.P. Giardina, F.M. Hopkins, R. Hyvönen, M.U.F. Kirschbaum, J.M. Lavalley, J. Leifeld, W.J. Parton, J. Megan Steinweg, M.D. Wallenstein, J.Å. Martin Wetterstedt, M.A. Bradford (2011) Temperature and soil organic matter decomposition rates—synthesis of current knowledge and a way forward, *Glob. Change Biol.*, 17 (11) pp. 3392-3404, doi-org.ezproxy.library.wur.nl/10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x
- Conijn, J.G. and J.P. Lesschen, 2015. Soil organic matter in the Netherlands; Quantification of stocks and flows in the top soil. Wageningen, the foundation Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek. Research Institute Praktijkonderzoek Plant & Omgeving / Plant Research International, Wageningen UR (University & Research), PRI report 619 / Alterra report 2663.
- CVB (2021): CVB Veevoedertabel 2021. Chemische samenstellingen en nutritionele waarden van voedermiddelen, CVB Diervoeding, www.cvbdiervoeding.nl.
- Dijkstra J, Bannink A, Bosma PM, Lantinga EA and Reijs JW (2018) Modeling the Effect of Nutritional Strategies for Dairy Cows on the Composition of Excreta Nitrogen. *Front. Sustain. Food Syst.* 2:63. doi: 10.3389/fsufs.2018.00063.
- Dobbelaere, D. (2017) Statistical overview of the animal by- products industry in the EU in 2016, EFPA Congress, Hamburg, 2.6.2017, <https://doczz.net/doc/7918602/statistical-overview-of-the-animal-by-products>.
- Duncan, J. (2003) Costs of biodiesel production, Energy Efficiency and Conservation Authority, New Zealand, https://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0305_Duncan_-_Cost-of-biodiesel-production.pdf.
- Dungait, J.A.J., D.W. Hopkins, A.S. Gregory & A.P. Whitmore (2012) Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance, *Global Change Biology* 18, 1781–1796, doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x
- Elbersen, W., A. Schultze-Jena, S. van Berkum, J. Dengerink, A. Schultze-Jena, M. Naranjo-Barrantes & E. Obeng. 2022. Identifying and implementing circular applications of agri-residues. A circular evaluation

framework for assessing impacts and circularity of different agri-residue applications. WFBR report 2247, DOI 10.18174/563389. Wageningen, The Netherlands.

Ewald, N., A. Vidakovic, M. Langeland, A. Kiessling, S. Sampels & C. Lalander (2020): Fatty acid composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) – Possibilities and limitations for modification through diet, *Waste Management* 102 (2020) 40–47, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.014>.

Hindrichsen, I.K., Wettstein, H.-R., Machmüller, A., Kreuzer, M. (2006) Methane emission, nutrient degradation and nitrogen turnover in dairy cows and their slurry at different milk production scenarios with and without concentrate supplementation, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113 (1-4), pp. 150-161.

Höglmeier, K., G. Weber-Blaschke & K. Richter (2013) Potentials for cascading of recovered wood from buildingdeconstruction—A case study for south-east Germany, *Resources, Conservation and Recycling* 78, pp. 81– 91

ILVO (2011) Melkveevoeding, Vlaamse overheid Departement Landbouw en Visserij ILVO, Mededeling 101.

Janssen, B.H. (2002) Organic Matter and Soil Fertility. Lecture Notes, Wageningen University, p. 248

Janssen, R.H., Vincken, J.-P., van den Broek, L.A.M., Fogliano, V., Lakemond, C.M.M., 2017. Nitrogen-to-Protein Conversion Factors for Three Edible Insects: *Tenebrio molitor*, *Alphitobius diaperinus*, and *Hermetia illucens*. *J. Agric. Food Chem.* 65, 2275–2278.

Kool, A., M. Timmerman, H. de Boer, H.-J. van Dooren, B. van Dun & M. Tijmensen (2005) Kennisbundeling co-vergisting (in Dutch), CLM report 621 - 2005.

Koopmans, C. & M. van Opheusden (2019) Organische stof in de Nederlandse bodem. Feiten en discussie in perspectief, Louis Bolk Instituut, Publicatienummer 2019-023 LbP.

Kuber, P. & S.M. Smith (2021) From pig to pork chop: how much meat to expect from a butcher hog. Supporting document for video with a description of live animal and carcass data, Washington State University Extension, <https://s3.wp.wsu.edu/uploads/sites/2049/2021/02/02.21PorkFabVideoDataFactSheet02.16.2021.pdf>.

Lesteur, M., V. Bellon-Maurel, C. Gonzalez, E. Latrille, J.M. Roger, G. Junqua, J.P. Steyer (2010): Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: a review, *Process Biochem.*, 45 (2010), pp. 431-440

Linke, B; M. Heiermann; P. Grundmann & Frank Hertwig: Grundlagen, Verfahren und Potenzial der Biogasgewinnung im Land Brandenburg. In: Leitfaden Biogas, pp. 10-23, 2003.

López M.J., Jurado M.M., López-González J.A., Estrella-González M.J., Martínez-Gallardo M.R., Toribio A., Suárez-Estrella F. (2021) Characterization of Thermophilic Lignocellulolytic Microorganisms in Composting. *Front Microbiol.* 2021 Aug 11;12:697480. doi: 10.3389/fmicb.2021.697480.

Molinuevo-Salces, B., Gómez, X., Morán, A., García-González, M.C. (2013) Anaerobic co-digestion of livestock and vegetable processing wastes: Fibre degradation and digestate stability, *Waste Management*, 33 (6), pp. 1332-1338, doi: 10.1016/j.wasman.2013.02.021

Naser El Deen S., van Rozen K., Elissen H., van Wikselaar P., Fodor I., van der Weide R., Hoek-van den Hil E.F., Rezaei Far A. & Veldkamp T. Bioconversion of Different Waste Streams of Animal and Vegetal Origin and Manure by Black Soldier Fly Larvae *Hermetia illucens* L. (Diptera: Stratiomyidae). *Insects*. 2023 Feb 17;14(2):204. doi: 10.3390/insects14020204. PMID: 36835773; PMCID: PMC9968099.

-
- Oenema, J, van Ittersum M, van Keulen H (2012) Improving nitrogen management on grassland on commercial pilot dairy farms in the Netherlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 162, 116–126.
- Oberthür, R.C. (2003) Rendering raw material from whole animal carcasses – chemical composition and yield of finished products (not published).
- Oldfield, E.E., M.A. Bradford & S.A. Wood (2019) Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields, *SOIL*, 5, 15–32.
- Parodi, A., I.J.M. De Boer, W.J.J. Gerrits, J.J.A. Van Loon, M.J.W. Heetkamp, J. Van Schelt, J.E. Bolhuis, H.H.E. Van Zanten (2020) Bioconversion efficiencies, greenhouse gas and ammonia emissions during black soldier fly rearing – a mass balance approach, *J. Clean. Prod.*, 271 (2020), Article 122488, 10.1016/j.jclepro.2020.122488
- Pigden W.J. & D.P. heaney (1969) Lignocellulose in Ruminant Nutrition In: G.J. Hajny & E.T. Reese (eds.) *Cellulases and Their Applications, Advances in Chemistry, Vol. 95*; American Chemical Society: Washington, DC, Chapter 15, pp. 245-261.
- Powell JM, Gourley CJP, Rotz CA, Weaver DM (2010) Nitrogen use efficiency: A potential performance indicator and policy tool for dairy farms. *Environmental Science & Policy* 13, 217–228.
- Puttaso, A., P. Vityakon, P. Saenjan, V. Trelo-ges & G. Cadisch (2011) Relationship between residue quality, decomposition patterns, and soil organic matter accumulation in a tropical sandy soil after 13 years, *Nutr Cycl Agroecosyst* 89:159–174, DOI 10.1007/s10705-010-9385-1
- RVO (2021) Mestbeleid 2019-2021, Tabel 9 Werkzame stikstof landbouwgrond, www.rvo.nl/onderwerpen/agrarisch-ondernemen/mest/tabellen, visited 5 January 2021.
- Rocamora, I., S.T. Wagland, R. Villa, E.W. Simpson, O. Fernández, Y. Bajón-Fernández (2020) Dry anaerobic digestion of organic waste: a review of operational parameters and their impact on process performance, *Bioresour. Technol.*, 299 (2020), Article 122681, 10.1016/j.biortech.2019.122681
- Ruggieri, L., A. Artola, T. Gea & A. Sánchez (2008) Biodegradation of animal fats in a co-composting process with wastewater sludge, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 62 (3), 297-303, <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.02.004>.
- Ruggieri, L., A. Artola, T. Gea & A. Sánchez (2008a) Influence of different co-substrates biochemical composition on raw sludge co-composting, *Biodegradation* 19:403–415, DOI 10.1007/s10532-007-9146-2
- Schjønning, P., J.L. Jensen, S. Bruun., L.S. Jensen, B.T. Christensen, L.J. Munkholm, M. Oelofse S. Baby, L. Knudsen. (2018) Chapter 2. The Role of Soil Organic Matter for Maintaining Crop Yields: Evidence for a Renewed Conceptual Basis, *Advances in Agronomy*, 150, pp. 35-79. doi: 10.1016/bs.agron.2018.03.001.
- Schmidt, M.W.I. et al. (2011) Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49–56.
- Šebek, L.B.J. & E.H.M. Temme (2009): Human protein requirements and protein consumption and the conversion of vegetable protein to animal protein, Animal Sciences Group of Wageningen UR, Report 232.
- Spek, W. 2021, Wageningen Livestock Research, personal communication on typical protein and energy efficiency of terrestrial animals, estimated from feeding values of a large set of feedstuffs based on CVB (2021).

-
- Van Dijk, W., A.M. van Dam, J.C. Middelkoop, F.J. de Ruijter & K.B. Zwart (2005) Onderbouwing N-werkingscoëfficiënt overige organische meststoffen, Wageningen UR Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Rapport PPO 343.
- Van Ginkel, J.T. (1996) Physical and biochemical processes in composting material, PhD thesis, Wageningen University, <https://edepot.wur.nl/210529>.
- Van Vuure, C.A. (2017): Possible uses of processed slaughter co-products, Co-product workshop 2017 Dublin, https://www.teagasc.ie/media/website/publications/2017/3-Possible_uses_of_Processed_Slaughter_Co-Products-Carine_van_Vuure.pdf
- Veeteelt (2019) De ene organische stof is de andere niet, <https://edepot.wur.nl/506163>.
- Velthof, G.L., T. de Koeijer, J.J. Schröder, M. Timmerman, A. Hooijboer, J. Rozemeijer, C. van Bruggen en P. Groenendijk (2017). Effecten van het mestbeleid op landbouw en milieu: Beantwoording van de ex-postvragen in het kader van de evaluatie van de Meststoffen-wet. Wageningen Environmental Research, Rapport 2782.
- Voogt, J, W. Mulder & C. Safi (2021): Virtual Biorefinery, BRISK II deliverable 7.5.
- Weiss, W.P., L.B. Willett, N.R. St-Pierre, D.C. Borger, T.R. McKelvey, D.J. Wyatt (2009) Varying forage type, metabolizable protein concentration, and carbohydrate source affects manure excretion, manure ammonia, and nitrogen metabolism of dairy cows, *Journal of Dairy Science* (92) 11, 5607-5619, <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2248>.
- Wu-Haan, W., W.J. Powers, C.R. Angel, C.E. Hale & T.J. Applegate (2007) Nutrient Digestibility and Mass Balance in Laying Hens Fed a Commercial or Acidifying Diet, *Poultry Science* 86:684–690.

Annex 3 Schatters voor samenstelling gegevens en veevoederwaarden die ontbreken in de biomassa database

3.1 VEM: energie voor melkvee

Brochure_Melkveevoeding_2011.pdf (ILVO, rundveeloket.be):

$$VEM_{O+P} = [(6,45 \times LG) + 1.265 + 442 \times Mm] \times [1 + 0,00165 \times (Mm - 15)]$$

waarin

LG = lichaamsgewicht van de koe, typisch 600kg?

Mm staat voor de dagelijkse melkgifte, gecorrigeerd tot "meetmelk": melk met een welbepaalde energie-inhoud (730 kcal). De omrekening gebeurt met de formule $Mm = [0,337 + (0,116 \times \% V) + (0,06 \times \% E)] \times M$. In deze formule staan % V en % E voor het percentage vet respectievelijk percentage eiwit; M staat voor de hoeveelheid melk.

Voorbeeld: 33,5 kg melk met 4,3 % vet en 3,6 % eiwit is 34,8 kg meetmelk.

Eén VEM komt overeen met 1,65 kcal. Om die reden bedraagt de behoefte voor de productie van 1 kg meetmelk $730/1,65 = 442$ VEM. Bovenstaande formule beschrijft correctie voor hoog-productieve koeien (die hebben een hoger VEM-behoefte per kg melk bij gelijk blijvende onderhoudsbehoefte.

Om 1 kg FPCM (Fat-Protein Correct Milk), melk met 4% vet en 3.3 % eiwit, voedingswaarde 730kcal=3056KJ) te maken, heeft een koe ongeveer 460 eenheden VEM nodig (<https://www.eurofins-agro.com/nl-nl/vem>); daar komt de energie voor onderhoud nog bij.

Verhouding tussen energie voor onderhoud en melk-energie volgens bovenstaande formule:

- energiebehoefte voor onderhoud (bij LG=600): $6,45 \times LG + 1265 = 3870 + 1265 = 5135$ VEM
- energiebehoefte voor melk (bij 20Mm per dag): $442 \times 20 = 8840$ VEM

Conclusie: 63% van de energie gaan naar melk.

Voedingswaarde voor inhoudsstoffen van melk:

- eiwit 17 MJ/kg 4000 kcal/kg
- vet 37 MJ/kg 9000 kcal/kg
- suikers 17 MJ/kg, 4020 kcal/kg

Voedingswaarde 1 liter meetmelk:

- eiwit (3,3%): $0,033 \times 17 = 0,561$ MJ ofwel $0,033 \times 4000 = 132$ kcal
- vet (4%): $0,04 \times 37 = 1,48$ MJ ofwel $0,04 \times 9000 = 360$ kcal
- dan blijft over $3,056 - 0,561 - 1,48 = 1,055$ MJ ofwel $730 - 132 - 360 = 238$ kcal over voor suiker, dat zou betekenen $1,055/17 = 6,3\%$ respectievelijk $238/4020 = 5,9\%$ suikers. Beetje aan de hoge kant, maar het kan.

Conclusie: gewichtsverhouding vet:suiker in meetmelk is ongeveer 2:3. Meestal blijkt het aandeel koolhydraten iets lager, wij nemen hier 3:4.

De hoeveelheid energie van de melk is dan (M_x staat voor massafractie van component x):

$$\begin{aligned} E_{\text{melk}} &= 17 \cdot M_{\text{eiwit}} + 37 \cdot M_{\text{vet}} + 17 \cdot M_{\text{suiker}} \\ &= 17 \cdot M_{\text{eiwit}} + 37 \cdot M_{\text{vet}} + 17 \cdot (4/3) \cdot M_{\text{vet}} \\ &= 17 \cdot M_{\text{eiwit}} + (179/3) \cdot M_{\text{vet}} \quad (\text{MJ}) \end{aligned}$$

Ofwel de massa vet

$$\begin{aligned} M_{\text{vet}} &= (3/179) \cdot (E_{\text{melk}} - 17 \cdot M_{\text{eiwit}}) \\ M_{\text{suiker}} &= (4/179) \cdot (E_{\text{melk}} - 17 \cdot M_{\text{eiwit}}) \end{aligned}$$

En aangezien de koe voor 3MJ melk $460 \cdot (1/63\%) = 727$ VEM nodig heeft, volgt

$$\begin{aligned} M_{\text{vet}} &= (3/179) \cdot ((3/727) \cdot \text{VEM} - 17 \cdot M_{\text{eiwit}}) \\ M_{\text{suiker}} &= (4/179) \cdot ((3/727) \cdot \text{VEM} - 17 \cdot M_{\text{eiwit}}) \end{aligned}$$

Bovenstaand moet nog gecorrigeerd worden voor toeslag voor groei (resulteert ook in vleesproductie).

Voorbeelden van behoeften

1. Koe: 630 kg, 3^e lactatie, 30 kg melk met 3,9% vet en 3,3% eiwit, geen gewichtsverandering, stalperiode, bindstal

	$Mm = 30 \text{ kg} \times [0,337 + (0,116 \times 3,9) + (0,06 \times 3,3)]$	= 29,6 kg
VEM _{onderhoud} :	$(6,45 \times 630) + 1.265$	= 5.329
VEM _{productie} :	$29,6 \times 442$	= 13.083
VEM _{totaal} :		= 18.412
VEM _{totaal} gecorrigeerd voor voedingsniveau:	$18.412 \times [1 + 0,00165 \times (29,6 - 15)]$	= 18.856

2. 2^e-kalfskoe, 600 kg, 17,5 kg melk met 4,5% vet en 3,6% eiwit, geen gewichtsverandering, stalperiode, bindstal

	$Mm = 17,5 \text{ kg} \times [0,337 + (0,116 \times 4,5) + (0,06 \times 3,6)]$	= 18,8kg
VEM _{onderhoud} :	$(6,45 \times 600) + 1.265$	= 5.135
VEM _{productie} :	$18,8 \times 442$	= 8.310
VEM _{O,P} gecorrigeerd voor voedingsniveau:	$13.445 \times [1 + 0,00165 \times (18,8 - 15)]$	= 13.530
Jeugdtoeslag:	330	
VEM _{totaal} :	$13.530 + 330$	= 13.860

De voorgestelde behoeftenormen gelden voor ideale omstandigheden met uitgebalanceerde rantsoenen.

Uit waarnemingen van het ILVO kunnen we afleiden dat het raadzaam is om koeien 5% boven de normen te voeden, als we de koeien op een constant gewicht willen houden.

3.2 Vertering door koeien

Het aandeel van de macronutriënten en vezelfracties die in de mest terecht komen zijn af te leiden uit verteringscoëfficiënten, zoals ook weergegeven in de CVB veevoedertabellen.

Voor herkauwers:

- VCRE: verteringscoëfficiënt voor ruw eiwit
- VCRVET: verteringscoëfficiënt voor ruw vet
- VCRC: verteringscoëfficiënt voor ruwe celstof. We schatten dat deze heel laag ligt voor lignine en hoog voor hemicellulose t.o.v. de gemiddelde waarde.
- VCOK: verteringscoëfficiënt voor overige koolhydraten
- VCOS: verteringscoëfficiënt voor totale organische stof (dat is met inbegrip voor de gemakkelijker afbreekbare macronutriënten).

De waarden verschillen tussen productgroepen; typische waarden: VCRE 50 tot 70%, VCRVET 50 tot 70% met uitschieters boven 90%, VCRC 60 tot 90% en VCOK schommelend rond 90% (op enkele uitzonderingen na).

3.3 Voor varkens

EW2015: energie-waarde

VC-RE: verteringscoëfficiënt ruw eiwit

3.4 Voor kippen

OEIp: Omzetbare energie leghennen

OEvlk: Omzetbare energie vleeskippen

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



Wageningen Food & Biobased Research
Bornse Weilanden 9
6708 WG Wageningen
E info.wfbr@wur.nl
wur.nl/wfbr

Rapport 2584

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

