

Bepaling milieu-impact van biobased bouwmaterialen op de schop

A photograph of a modern building with a curved facade made of wood and glass. The building is set against a blue sky and green trees. The text is overlaid on the image.

Knelpunten binnen de Nederlandse regelgeving omtrent de milieuprestatie van biobased materialen in de bouwsector

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	2
Executive summary	3
Abstract	4
Inleiding.....	5
Hoofdstuk 1: Koolstofopslag en teruggave aan atmosfeer	8
Opslag van koolstof.....	9
Uitstoot van koolstof	9
Hoofdstuk 2: LCA en bepalingmethode: werking en tekortkomingen huidige regelgeving	12
Oorsprong van de LCA:	12
Belangrijkste regelgeving biobased bouwmaterialen EN15804 + A2:	12
Milieu-impact berekeningen in de Bouwsector:	13
Tekortkomingen binnen de bepalingmethode voor biobased materialen	14
Circulair potentie in verhouding tot forfaitaire waarden	16
Verdere ontwikkeling van de LCA:	16
Hoofdstuk 3: Biobased materiaal: afvalstof of product?	19
Biobased materialen: Recycling en hergebruik.....	19
Biobased materialen: Afval zonder waarde	20
Hoofdstuk 4: Biobased LCA scores voor bijproduct of reststroom.....	23
Naamgeving en regels afvalstoffen binnen de bepalingmethode ..	24

Voorbeeld scenario's LCA biobased materiaal met verschillende forfaitaire waarden	24
Hoofdstuk 5: LCA score voor biogene koolstof opslag	29
Ecococon en Straw Blocks	30
Thermofloc & Isofloc.....	31
Biogeen koolstof aanpassingen in LCA regelgeving	31
Discussie & Conclusie	32
Referenties	34

Executive summary

- *De bouwsector is als een van de grootste vervuilers genoodzaakt om hun milieu impact zo snel mogelijk te verminderen.*
- *Biobased materialen hebben CO2 vastlegging, herbruikbaarheid, levensduur, lichte constructies en lokale productiemogelijkheid als voordeel tegenover conventionele bouwmaterialen. Daarnaast bieden ze voor de gezondheid en comfort van de mens ook voordelen.*
- *Het ontbreekt momenteel aan adequate regelgeving over de opslag van biogene koolstof en de positieve waarde van hergebruik/recycling van biobased materialen.*
- *Een potentiële oplossing voor het mee laten tellen van biogene koolstof opslag binnen LCA berekeningen is het invoeren van een wegingsfactor op basis van lengte van gebruik van een materiaal.*
- *Om onnodige verbranding van biobased materialen tegen te gaan is het van belang dat de allocatie van de omgevingsimpact in de vorm van GWP binnen LCA berekeningen voor zowel een nieuw product, een bijproduct of reststroom op de juiste manier plaatsvindt.*
- *Wanneer de recycling tekortkomingen van hout en andere biobased materialen aangepakt worden, kunnen deze in de toekomst van de bouwsector een grotere rol gaan spelen.*

Abstract

De bouwsector heeft een grote invloed op de klimaatverandering door het intensieve gebruik van materialen met een hoge milieu-impact. Biobased bouwmaterialen bieden voordelen zoals CO₂-opslag en gemak van hergebruik, maar deze voordelen worden nog niet volledig erkend in de regelgeving omtrent milieu-impact. De vraag is dan wat de knelpunten zijn kijkend naar de regelgeving rond de levenscycli van biobased materialen in de bouwsector? Twee discussiepunten zijn hier van belang: ten eerste wordt de langdurige opslag van CO₂ in biobased structuren niet meegenomen vanwege de terugkeer van biogene koolstof in de atmosfeer aan het einde van de levensduur. Dit negeert het potentieel van biobased materialen in de bouwsector met een levensduur van meer dan 100 jaar, mits goed onderhouden en behandeld. Ten tweede volstaat de regelgeving omtrent bijproducten en reststromen niet, waardoor biobased materialen soms een gunstige impactscore krijgen wanneer ze worden verbrand ten opzichte van recycling of hergebruik. Het is belangrijk om het loslaten van broeikasgassen door verbranding tegen te gaan en de opslag van biogene koolstof te bevorderen. Hoewel er nog beperkingen zijn, biedt biobased bouwen aanzienlijke milieuvordelen ten opzichte van de huidige bouwmethode. Om de CO₂-uitstoot te verminderen en een circulaire bouweconomie te realiseren, is het cruciaal om deze punten aan te pakken en de regelgeving aan te laten sluiten bij een duurzame toekomst. Naarmate we meer inzicht krijgen in de voordelen en levensduur van biobased materialen, zal het gebruik ervan naar verwachting toenemen in de bouwsector.



Inleiding

De bouwsector is op dit moment nog een van de sectoren die groot aandeel heeft als het gaat om klimaatimpact en het gebruik van grondstoffen (Kibert, 1994, 2007). Een van de impact categorieën waar de bouwsector hoog op scoort, is Global Warming Potential (GWP)/klimaatverandering (Kibert, 1994). Conventionele bouwmaterialen zoals beton en staal laten atmosferisch CO₂ vrijkomen tijdens het productieproces en hebben daarom vaak een hoog GWP. Overheden, wetenschappers en verschillende stakeholders binnen de bouwsector erkennen deze problemen binnen de industrie en zijn hard op zoek naar oplossingen die verhoogde CO₂-concentraties in onze atmosfeer tegen gaan. Een manier om deze verhoging van de CO₂-waarden te voorkomen, is het vervangen van conventionele bouwmaterialen door bouwmaterialen met een kleinere CO₂-impact. Biobased materialen kunnen hier een rol in vervullen, mits ze door de bouwsector en de nationale milieudatabase (NMD) op waarde geschat worden. Om de milieu impact van een gebouw te berekenen, wordt momenteel de bepalingmethode milieuprestatie gebouwen en GWW-werken gebruikt. Deze bepalingmethode gebruikt levenscyclus analyses (LCA's) die de volledige milieu-impact van bouwmaterialen in kaart brengen. Deze LCA's kunnen een belangrijke rol spelen in de verduurzaming van de bouwsector doordat ze een indicatie kunnen geven over welke bouwmaterialen een duurzame keuze zijn.

De stichting bouwkwaliteit (SBK) beheert de bepalingmethode en ook de NMD. In deze bepalingmethode zitten de levensfasen verdeeld in modules A tot D, A beschrijft de productie en installatie fase, B de gebruiksfase, en module C beschrijft de sloop en het verdere verwerkingsproces na gebruik. De module D beschrijft baten en lasten van recycling, hergebruik en energierugwinning na bijvoorbeeld

verbranding (Milieudatabase, 2020). Echter zijn de rekenregels van deze bepalingmethode en de EN15804+A2 nog onvoldoende afgestemd op de milieu-impact berekeningen van biobased materialen.

De term biobased bouwmaterialen omvat eigenlijk alles dat direct of indirect voortkomt uit biomassa. Dit kan uiteenlopen van hout tot aan bioplastics of producten uit schimmels. Biomassa die is ingebed in geologische formaties en/of fossielen worden hierbij wel uitgesloten (van den Oever, 2022). Biobased materialen kunnen gedurende de levensfase atmosferisch CO₂ opnemen en vastleggen in biogeen koolstof. Deze biogene koolstof kan dan in de vorm van biobased bouwmaterialen gebruikt worden in een bouwwerk. Deze CO₂ kan echter na vastlegging weer vrijkomen in de atmosfeer door onder andere verbranding of rotting. Dit kan uitgesteld worden door materialen meerdere malen te hergebruiken in een nieuwe productcyclus. Hierdoor kan de periode van vastlegging van CO₂ tot verder dan de nu veelal aangenomen 100 jaar uit de atmosfeer onttrokken worden. Hier is echter wel een verbetering van de recycling en hergebruik sector van biobased producten voor nodig, aangezien deze nu vaak na een enkel gebruik verbrand worden (Verlinden & Kanselaar, 2022). Het is ook van belang om de gebruikte biomassa (e.g. houtkap) terug te planten, aangezien de biomassa na gebruik in een bouwwerk geen CO₂ meer opneemt. Dit had het wel gedaan als het niet uit het milieu onttrokken was (Holmgren & FutureVistas, 2021).

Hoewel deze materialen dus een aantal voordelen bieden in het verduurzamingsproces van de bouwsector, zijn er nog een aantal knelpunten binnen de bepalingmethode van de NMD en LCA regelgeving. De vraag blijft echter wat deze knelpunten zijn en hoe ze er voor zorgen dat deze materialen nog niet veelvuldig gebruikt worden in de constructie sector? Die knelpunten worden hier besproken aan de hand van LCA literatuur en een aantal scenario berekeningen van bouwhout als biobased materiaal. De baten en

lasten in module D zullen doorgelicht worden in verhouding tot verschillen in de inputstromen in de A1-module, ofwel als reststroom, primair materiaal en/of bijproduct. Daarnaast zal van een viertal LCA's van biobased producten uit de bouwsector bekeken worden wat hun impact zou zijn als biogene koolstof meegerekend mag worden. Hierdoor zal een beter beeld gecreëerd worden van de weg die bewandeld dient te worden om het gebruik van biobased bouwmaterialen in de bouwsector te bevorderen.

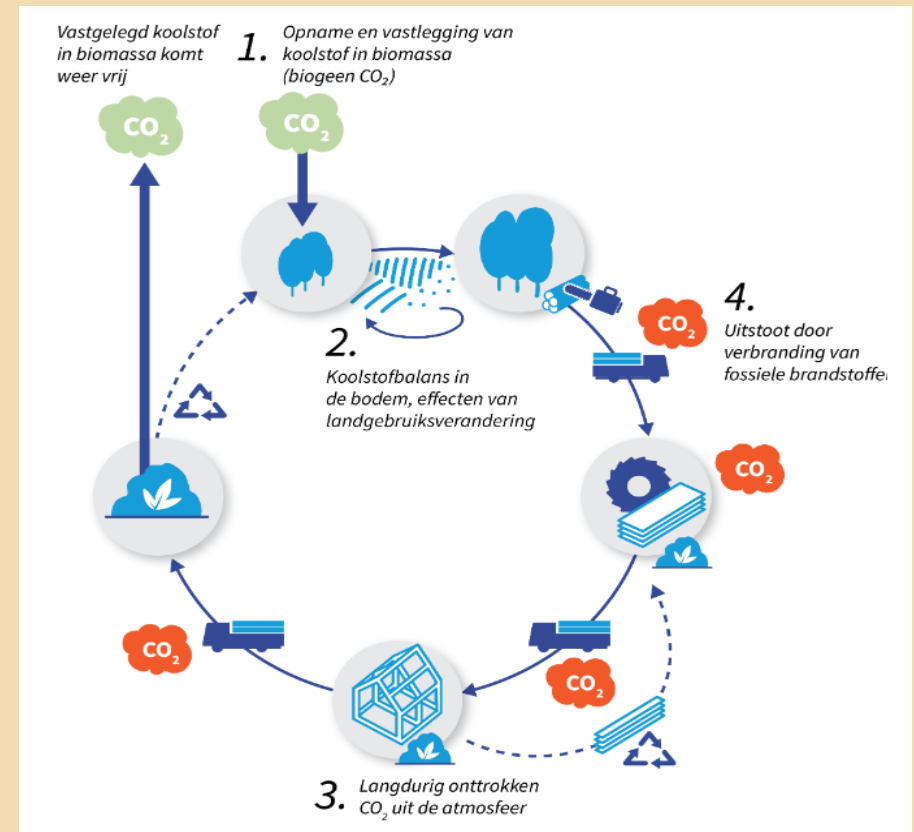


Koolstofopslag en teruggave aan de atmosfeer

Hoofdstuk 1: Koolstofopslag en teruggave aan atmosfeer

Alle vormen van vegetatie onttrekken CO₂ uit de atmosfeer en incorporeren dat in de structuren waaruit ze bestaan. Een van die structuren die gebruikt wordt in de bouwsector is hout. Deze vorm van biogene koolstof vastlegging kan in deze industrie dus een enorme bijdrage leveren aan het verminderen en stabiliseren van de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer. Zeker als je bedenkt dat de bouwsector wereldwijd 30% van de broeikasgassen uitstoot, 40% van de energie verbruikt en 30% van de globale materiële middelen verbruikt en terecht laat komen op vuilstort locaties (United Nations Environment Programme, 2009). Veel tegenstanders van dit concept van het vastleggen van CO₂ in de technosfeer, geven echter aan dat deze vorm van vastlegging slechts tijdelijk is en daarom niet meegenomen dient te worden in berekeningen van milieu-impact (Verlinden & Kanselaar, 2022). Er zijn echter genoeg voorbeelden uit de geschiedenis die laten zien dat dat niet het geval hoeft te zijn. In het dorp Altscherbitz in de buurt van Leipzig is een intacte houten constructie rond een put gevonden die uit 56000-4900BC stamt. Ook grotere constructies zoals de vijf verdiepingen hoge (32,45 meter) Horyuji tempel in Nara, Japan die al zeker 1400 jaar oud is, laten zien dat hout een lange levensduur kan hebben (Khatib, 2016). Desondanks dat de geschiedenis laat zien dat houtbouw met een lange levensduur mogelijk is wordt nu slechts 2% van alle nieuwbouw in Nederland met hout uitgevoerd (Bijleveld, 2021). Zeker als je meeneemt dat een kuub hout gemiddeld 1 ton CO₂ opslaat terwijl er bij de productie slechts gemiddeld 150 kilo CO₂ vrijkomt (BouwTotaal,

2021). Om het klimaatakkoord van Parijs te halen is Nederland verplicht om 160 miljoen ton CO₂ uitstoot te verminderen. Kijkend naar de impact van de hedendaagse bouwsector staat dit al gelijk aan deze volledige besparing (BouwTotaal, 2021). Het is dan de vraag hoe met biobased bouwmaterialen deze CO₂ impact vermindering beter plaats



kan vinden.

Figuur 1: koolstof in de keten van biobased bouwmaterialen (Bijleveld, 2021).

Opslag van koolstof

De impact van biobased materialen op het klimaat is onderdeel van een zeer complex systeem, doordat ze zowel in de groeifase CO₂ opnemen als in de gebruiksfase periodiek CO₂ vastleggen (figuur 1). De lengte van deze periode van gebruik en biogene vastlegging is afhankelijk van veel factoren, maar heeft de potentie om een grote impact te hebben op de verduurzaming van de bouwsector (Bijleveld, 2021). Houtgebruik in bouwconstructie blijkt in LCA berekeningen minder impact te hebben op klimaat, materiaalgebruik en ecosysteem kwaliteit dan een gebouw met overwegend betongebruik (Guardigli et al., 2011; Lin et al., 2023; Vogtländer et al., 2014). Toch zijn er niet alleen maar voordelen als je kijkt naar het gebruik van bijvoorbeeld hout als structureel bouw materiaal. Hout en andere biobased materialen zijn namelijk niet altijd voldoende lokaal aanwezig als je kijkt naar de behoeftes uit de bouwsector (Nossek et al., 2023).

Wereldwijd is slechts 31% van het totale landgebruik toegeschreven aan bosomgeving. Daar komt ook bij dat de vijf landen: Rusland, Brazilië, Canada, VS en China hier ongeveer de helft van innemen, 54 landen slechts 10% bos hebben en 10 landen geen bossen (*Global Forest Resources Assessment 2020*, 2020; Khatib, 2016). Als er dus geen lokale grondstoffen aanwezig zijn voor biobased bouwmaterialen zullen deze dus ergens anders gekapt, geoogst of in hoog tempo lokaal aangeplant moeten worden. Zeker omdat de grootste spelers in bosbouw momenteel erg te lijden hebben onder illegale houtkap, bosbranden en de hogere verdienmodellen van bijvoorbeeld olieplantages (*Global Forest Resources Assessment 2020*, 2020). Grootschalig houtgebruik zorgt wel voor een impact op de kwaliteit van ecosystemen en het is dus van belang dat ook regeneratief beleid op het gebied van bosbouw in stand wordt gehouden (Guardigli et al., 2011). Naast de impact van houtkap op een ecosysteem nemen deze bomen ook geen CO₂ meer op. Wanneer hiervoor geen compensatie

plaatsvindt in de vorm van aanplanting van nieuw bos, zorgt dit in de toekomst niet voor een afname van atmosferisch CO₂ (van der Lugt & Harsta, 2021).

Uitstoot van koolstof

Wanneer een biobased materiaal wordt geconsumeerd door bijvoorbeeld insecten of schimmels zal het vastgelegde CO₂ weer vrijkomen (Calovi & Rossi, 2023). Dit kan echter tegengegaan worden door hout of andere materialen chemisch of fysiek te bewerken waardoor de levensduur en daardoor de CO₂ opslag verlengd kan worden. Zeker in de houtbouw zijn hier verschillende manieren voor zoals, beitsen, verven of behandelen met olie of antischimmelmiddelen. Voor deze behandelmethoden zijn zelfs al duurzame en biologische middelen beschikbaar, zoals natuurlijke verf en oliën en polymeren (Cai et al., 2020; Calovi & Rossi, 2023; Teaca et al., 2019). Het gebruik van deze minder schadelijke behandelingsmethoden heeft de potentie om de hoeveelheid verontreinigd B en C hout dat momenteel slecht gerecycled kan worden in de toekomst te verminderen (van Bruggen & van der zwaag, 2017).

Een groot deel van de CO₂ die vrijkomt vanuit biomassa wordt echter niet veroorzaakt door rot of consumptie, maar door verbranding aan het einde van de levenscyclus (Bijleveld, 2022; van Bruggen & van der zwaag, 2017). Volgens de forfaitaire waarden die binnen de regels van de bepalingmethode van het NMD aangehouden worden is dit zelfs 80% van al het schone bouwhout (*Bepalingmethode*, 2022). Voor de Nederlandse afvalhout markt kwam dat in 2015 neer op circa 860 kton dat naar verbrandingsovens gaat (van Bruggen & van der zwaag, 2017).

Naast deze vormen van uitstoot van CO₂ door rotting of verbranding zal ook het transport van het biobased materiaal effect hebben op de

totale CO2 impact van een materiaal (figuur 1). Om deze totale impact van materialen te bepalen is regelgeving opgesteld in de vorm van Levenscyclus analyses. Voor de bouwsector is deze regelgeving uitgebreid om de milieu-impact van gebouwen in Nederland te bepalen door middel van de bepalingsmethode van de NMD (Milieudatabase, 2020). In het volgende hoofdstuk zullen deze regels en potentiële tekortkomingen voor biobased materialen in de bouwsector besproken worden.

Samenvatting:

Biobased bouwmaterialen, zoals hout, bieden een uitstekend perspectief voor de bouwsector om hun CO2 impact te verlagen. Zowel historische als moderne voorbeelden tonen aan dat houtbouw duurzaam is, maar uitdagingen zoals grondstof toevoer door duurzame bosbouw en het tegengaan van rotting en verbranding aan het einde van de levensfase moeten worden aangepakt. Om de milieu impact binnen de sector te verminderen is samenwerkingen op het gebied van regelgeving, gebruik en recycling omtrent biobased bouwmaterialen cruciaal.



LCA en bepalingmethode: werking en tekortkomingen huidige regelgeving

Hoofdstuk 2: LCA en bepalingmethode: werking en tekortkomingen huidige regelgeving

Biobased materialen hebben naast de CO2 vastlegging nog een aantal voordelige eigenschappen tegenover conventionele bouwmaterialen. Ze lenen zich in theorie bijvoorbeeld uitstekend voor hergebruik, waardoor de uiteindelijke levensduur ver opgerekt kan worden (Bijleveld, 2022; van der Lugt & Harsta, 2021). Daarnaast kunnen ze relatief makkelijk lokaal geproduceerd worden, waardoor minder grote transportafstanden nodig zijn dan bij conventionele materialen (Bijleveld, 2021; van der Burgh & Verspeek, 2016). Houtproducten en andere biobased materialen hebben naast fysiek gunstige eigenschappen ook een gunstig effect op menselijke gezondheid en comfort (Nossek et al., 2023). Door het gebruik van biobased materialen kunnen vaak lichtere constructies gemaakt worden die ook materiaal besparen (van der Burgh & Verspeek, 2016). Om verschillende materialen en hun voordelen te vergelijken is zowel op internationaal niveau (LCA) als in Nederland (Bepalingmethode NMD) een aantal raamwerken opgesteld. In dit hoofdstuk wordt besproken wat de regelgeving van deze LCA berekeningen en de bepalingmethode op het gebied van duurzaamheidsscores van biobased materialen inhouden en wat de unieke eigenschappen en mogelijke tekortkomingen van de methodes zijn.

Oorsprong van de LCA:

De eerste studies gerelateerd aan de impact van consumenten goederen op het klimaat dateren uit de jaren zestig en zeventig (Guinee et al., 2011). Door een gebrek aan een goed werkend raamwerk voor deze berekeningen werden ze vaak gebruikt voor marketingdoeleinden en waren onbetrouwbaar (Guinée et al., 1993). Het duurde dan ook tot zeker de jaren 90 voordat de gestandaardiseerde levenscyclusanalyses met behulp van handboeken en wetenschappelijke publicaties algemeen geaccepteerd werden (Fava, 1991; Guinee et al., 2011). De Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) begon met het vaststellen van richtlijnen rond 1993, wat uiteindelijk resulteerde in meerdere ISO (International Organisation for Standardization) en EN (Europese Norm) kwaliteitsstandaarden. De belangrijkste standaarden binnen de LCA en bepalingmethode zijn te vinden in bijlage 1.

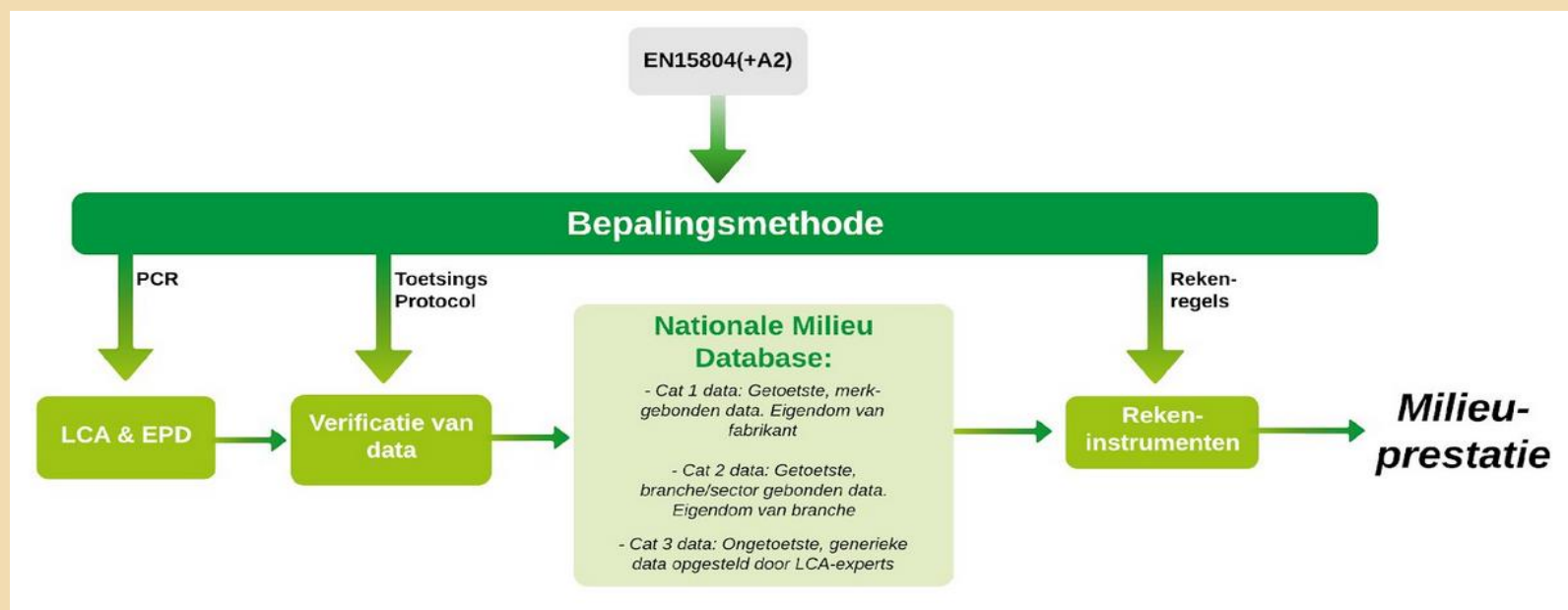
Belangrijkste regelgeving biobased bouwmaterialen EN15804 + A2:

Voor bouwproducten is de Europese norm EN 15804 + A2 een belangrijk document dat specifiek betrekking heeft op de milieu-informatie en impact. Het biedt een gestandaardiseerde methode om de milieuprestaties van bouwproducten gedurende hun hele levenscyclus te beoordelen en te rapporteren. Deze norm stelt richtlijnen vast voor het verzamelen, berekenen en presenteren van informatie over de milieu-impact, productie, transport, gebruik en verwijdering van bouwproducten. Het doel van deze norm is om transparante en vergelijkbare informatie te leveren aan professionals in de bouwsector, zodat zij tijdens het bouwproces weloverwogen keuzes kunnen maken met betrekking tot duurzaamheid en milieueffecten.

Een onderdeel hiervan is het gebruik van milieu impact categorieën die voor een materiaal aangeven waar de grootste invloed van de levenscyclus te vinden is. Om biogeen koolstof en andere impact categorieën wat tastbaarder te maken is het binnen de LCA gebruikelijk om deze hoeveelheid uit te drukken in de milieu-kosten indicator (MKI). Deze indicator wordt in euro's uitgedrukt om de impact van een product in termen van schaduwkosten die gemaakt moeten worden om milieuschade te voorkomen. Om de MKI te berekenen voor de verschillende eenheden binnen de impact categorieën zijn een aantal weegfactoren opgesteld in "Environmental Prices Handbook" van CE Delft (De Bruyn et al., 2010) en "toxiciteit heeft z'n prijs" van TNO (Boers, 2004). Voor de meest besproken MKI in dit rapport; biogeen koolstof, is deze wegingsfactor €0,05 per eenheid.

Milieu-impact berekeningen in de Bouwsector:

Ook in de bouwsector worden LCA's veelvuldig gebruikt om de milieu-impact van bouwmaterialen en gebouwen op het klimaat vast te stellen (Peñaloza et al., 2016). Echter zijn er een aantal eigenschappen van de bouwsector die de berekeningen van LCA's in deze sector nog ingewikkelder maken. Onder andere de relatief lange levensduur van gebouwen als geheel, maar de kortere levensduur van bepaalde losse componenten en het gebruik van veel verschillende materialen zorgen voor veel variabele en parameters (Buyle et al., 2013). Uit meerdere LCA's is gebleken dat de grootste impact (70-90%) op het klimaat veroorzaakt wordt door de gebruiksfase van gebouwen (Cabeza et al., 2014; Guardigli et al., 2011). De oorzaak hiervoor is echter voornamelijk terug te voeren tot verwarming en elektriciteitsgebruik van een gebouw. De duurzame energie transitie is echter al in volle



Figuur 2: Omschrijving van de opzet van de NMD en de milieuprestatie bouwen (Bepalingsmethode, 2022).

gang, waardoor het belang om de impact van de bouwmaterialen zelf zo laag mogelijk te houden toeneemt.

Dit gebeurt momenteel onder andere door het promoten van biobased bouwmaterialen, waarin houtbouw het grootste aandeel heeft (van der Lugt & Harsta, 2021). Naast dat het gebruik van deze materialen in de productiefase minder vervuilend is, bieden ze ook het voordeel van biogene koolstofopslag (Breton et al., 2018). Hiervoor is het echter wel van belang dat de levensduur van een biobased materiaal meegenomen wordt in milieu-impact berekeningen. Voor specifieke producten is hier vanuit de LCA methodiek de EPD (environmental Product Declaration) regelgeving opgezet in EN 15804+A2. Naast het gebruik van LCA berekeningen en EPD's in de bouwsector is de Nationale Milieudatabase (NMD) opgezet om de milieuprestatie van bouwwerken in Nederland eenduidig te kunnen berekenen (Milieudatabase, 2020).

De NMD bevat informatie over producten in de vorm van productkaarten die verwijzen naar milieuprofielen. Er zijn drie categorieën productinformatie opgenomen, waarbij de eerste twee categorieën worden getoetst volgens het NMD Toetsingsprotocol en de derde categorie niet. De eerste en tweede categorie worden aangeleverd door producenten en branches van bouwproducten en worden gebruikt om EPD's op te stellen, die geschikt zijn voor opname in de NMD. De NMD bevat ook een "process database", die een generieke basis vormt voor LCA-uitvoerders en opstellers van EPD's als er geen specifieke data beschikbaar is. De opzet van de NMD en de milieuprestatie bouwen is te zien in figuur 2. De bepalingmethode is een enorm handig handvat om de milieu-impact van een gebouw te bepalen. Toch zijn er voor biobased bouwmaterialen een aantal tekortkomingen in de regelgeving die de overgang naar een circulaire bouwsector tegenwerken.

Tekortkomingen binnen de bepalingmethode voor biobased materialen

Aangezien de bouwsector graag richting een meer circulair model wil en de milieu-impact wil verlagen is het van belang dat onder andere de CO₂-uitstoot omlaag gaat. Om dit voor elkaar te krijgen staat momenteel de regelgeving omtrent biobased materialen van de bepalingmethode ter discussie. De twee grootste knelpunten zijn het niet meenemen van milieu voordelen van langdurige biogene koolstof opslag en het niet positief waarderen van hergebruik of recycling van een materiaal (RVO, 2021; van der Lugt & Harsta, 2021; Verlinden & Kanselaar, 2022). Daarnaast wordt binnen de bepalingmethode methodiek vaak uitgegaan van een maximale levensduur voor woningen van 75 jaar en voor utiliteitsgebouwen van 50 jaar omdat de berekende levensduur niet verplicht meegenomen hoeft te worden (*Bepalingmethode*, 2022).

Biogene koolstof opslag en emissies vinden plaats op verschillende momenten in de levenscyclus, en dit zorgt er voor dat beargumenteerd kan worden dat de timing van deze uitwisseling van CO₂ met de omgeving meegenomen moet worden in LCA berekeningen (Helin et al., 2013; Peñaloza et al., 2016). Dit blijkt in de praktijk vaak lastig voor nieuw ontwikkelde biobased materialen omdat er soms geen data beschikbaar is over de levensduur van een materiaal of product. Hierdoor is de timing van uitstoot niet met zekerheid te voorspellen (Bijleveld, 2021). Momenteel wordt de methode om de CO₂-footprint van een gebouw of materiaal te bepalen vastgesteld in de Europese norm EN15804+A2. Hierin staat dat de hoeveelheid CO₂ die tijdens de eerste fase van de levenscyclus (module A in de LCA) opgenomen wordt mag worden gedeclareerd om het aandeel biogeen CO₂ inzichtelijk te maken. Echter moet er ook vanuit gegaan worden dat deze hoeveelheid koolstof aan het einde van de levensduur (module C in de LCA) weer vrij zal komen. Dit zorgt ervoor dat de netto biogene

koolstof hoeveelheid over de gehele levenscyclus dus nul blijft. Deze manier van biogene koolstof berekening wordt ook wel de “-1/+1 methode” en hecht dus geen waarde aan de periode waarin de koolstof uit de atmosfeer gevangen wordt. Ook als de koolstof semi permanent zou worden opgeslagen over een periode langer dan 100 jaar moet ook de uiteindelijke uitstoot weer meegenomen worden in de berekeningen (Bijleveld, 2021). Voor een bouwindustrie zonder hergebruik en recycling kan dit gezien worden als een logische regel omdat dit nu greenwashing tegen gaat. Als biogene koolstof opslag namelijk wel mee zou tellen zonder enig bewijs van opslagduur, zouden biobased materialen als extra materiaal toegevoegd kunnen worden als offset voor meer vervuilende materialen in een gebouw. Dit zorgt in dat geval alleen maar voor meer onnodig materiaalgebruik. Een aanpassing van deze rekenmethode is dus niet makkelijk opgesteld.

Naast de biogene koolstof opslag bieden biobased materialen nog een eigenschap waardoor ze voor het verduurzamen van de bouwindustrie een uitstekende oplossing zijn. Hergebruik en recycling van biobased materialen is in combinatie met zowel non toxische impregneer/behandel methoden en duurzaam productie goed in te bouwen in een circulair bouwmodel (Belzen, 2020; RVO, 2021; van der Lugt & Harsta, 2021). Om deze eigenschap met veel variabelen per product of materiaal vast te leggen zijn regels en randvoorwaarden nodig om de opslag van CO2 over een langere levensduur aantoonbaar te maken (Bijleveld, 2021). De link tussen levensduur, gebruiksfase en de huidige rekeninstrumenten binnen de LCA en NMD methodiek dient dan ook nog uitgewerkt te worden. Hierbij lijkt het logisch om dit te doen binnen het onderdeel waar de levensduur van een bouwwerk gedefinieerd wordt (Bijleveld, 2021). Kijkend naar de overgang naar een circulaire bouwindustrie zal er in de toekomst anders gekeken moeten worden naar wat er met een materiaal gebeurd als het in de einde levensfase terecht komt.

Een voorbeeld hiervan is dat binnen LCA berekeningen nu nog beter gescoord wordt op de verbranding van een product dan bij hergebruik van een product (Di Maria et al., 2018; Verhoeven, 2022). Dit werkt het potentieel hergebruik van biobased materialen tegen, dankzij de milieulast die hierdoor lager uitkomt door de CO2 die weer terug komt in de atmosfeer.

Op dit moment worden er binnen de bepalingmethode van de NMD forfaitaire standaard waarden voor het einde leven scenario gehanteerd die het makkelijk maken om verschillende producten te kunnen vergelijken als er geen data beschikbaar is. In tabel 1, is te zien dat deze forfaitaire waarden er van uit gaan dat schoon hout in 85% van de gevallen terecht komt in een verbrandingsovens (AVI) of stort. Slechts 15% wordt hergebruikt waardoor hout ten opzichte van beton en staal waar beide meer dan 90% procent hergebruik staat vastgesteld in de forfaitaire waarden. Hout dat verontreinigd is heeft zelfs helemaal geen mogelijkheid tot recycling of hergebruik opgenomen in de forfaitaire waarden.

Tabel 1: Forfaitaire waarden Beton, staal en hout (schoon) voor verwerkingsscenario's einde leven vanuit de Bepalingmethode (Milieudatabase, 2020).

Afvalstroom	Fractie laten zitten	Fractie stort	Fractie AVI	Fractie Recycling	Fractie hergebruik
Beton	0	1	0	99	0
Staal (constructie)	0	1	0	94	5
Hout (balk, plank schoon)	0	5	80	10	5

Deze forfaitaire waarden zijn over het algemeen gebaseerd op wetenschappelijke literatuur, internationale normen of expertreviews.

De forfaitaire waarden van biobased producten, maar ook van beton en staal staan echter wel ter discussie.

Circulair potentie in verhouding tot forfaitaire waarden

Deze discussie komt vooral voort uit het potentie voor zowel biobased als conventionele bouwmaterialen om gebruikt te worden in een circulaire economie. Voor biobased bouwmaterialen is momenteel vaak nog geen grootschalige recycling route, maar zoals in het rapport van Gemax & Rijkswaterstaat uit 2020 staat beschreven, zijn hier in de afgelopen jaren wel grote stappen in gemaakt. Vooral op het gebied van duurzame sloop en het hergebruiken en recyclen van B-hout kan tot 150.000 ton uitgespaard worden (Gemax & Rijkswaterstaat, 2020). Naast dat de forfaitaire waarden voor hout niet geheel realistisch zijn als gekeken wordt naar de toekomstvisie van de sector, zijn de huidige waarden voor beton ook in twijfel te trekken. In de praktijk komt het recyclen van beton namelijk vaak neer op het downcyclen naar minderwaardig aggregaat (Hu et al., 2012). Dit gerecycled aggregaat (RA) wordt voornamelijk gebruikt ter vervanging van natuurlijk aggregaat (NA) in de wegenbouw. De markt voor dit aggregaat is echter in Nederland grotendeels verzadigd, terwijl de hoeveelheid end of life beton in 2025 naar verwachting zal stijgen tot 22 miljoen ton (Di Maria et al., 2018; van der Wegen et al., 2013). Dit komt mede doordat in de wegenbouwsector het gebruik van RA laag is door onzekerheid over de eigenschappen en afkomst van de grondstof, wat kan resulteren in een slechtere prestaties (Fanijo et al., 2023).

De schattingen van de hoeveelheid hergebruikt beton van bouwafval in de EU variëren tussen de 50 en 90% (Colangelo et al., 2020; Grabiec et al., 2021). Hoewel dus ook in Europa wel gewerkt wordt aan het ontwerpen van recycling netwerken voor beton, is het hiervoor noodzakelijk om lokale verwerkingscentrales te bouwen om transport

afstand laag te houden (Steins et al., 2023). Deze recycling van oud beton in de productie van nieuw beton is echter energie intensief en resulteert niet altijd in de productie van nieuw hoogwaardig beton (Grabiec et al., 2021). Dit blijkt uit een eerdere voorspelling over de haalbaarheid van de technieken. Hieruit kwam naar voren dat het recyclen van RA in nieuw hoogwaardig beton alleen mogelijk zou zijn als de prijs lager is dan bij downcyclen voor de wegenbouw (Zhang et al., 2020). Dit laat duidelijk zien dat hoewel er een plek is voor beton in een circulaire economie, maar dat hier nog grote stappen in te zetten zijn. De verschillende scenario's die geschetst worden in de forfaitaire waarden voor hout en beton zijn daarom niet realistisch kijkend naar de huidige markt, milieu impact en potentie voor circulair gebruik.

Verdere ontwikkeling van de LCA:

De ontwikkeling van de LCA methodiek en regelgeving staat op dit moment niet stil. De ontwikkeling richting een duurzamere maatschappij waar circulariteit en het halen van klimaatdoelen centraal staan, zorgt ervoor dat deze doelen ook meegenomen worden in LCA regelgeving. Het ISO werkt op dit moment aan een aantal standaarden op dit gebied waaronder de *ISO 14068* die voor organisaties handvatten biedt op het gebied van het managen van broeikasgassen en het werken naar koolstofneutraliteit. Ook op het gebied van het invoeren en meten van circulaire processen binnen circulaire bedrijfsmodellen worden standaarden opgesteld in *ISO 59004*, *59010* en *59020*. Hoewel deze niet direct een effect hoeven te hebben op de LCA methodiek, kunnen ze wel een grote rol gaan spelen op het gebied van hergebruik van materialen.

Naast de reguliere LCA methode zijn er ook een aantal alternatieve LCA methodes in ontwikkeling die elk weer andere aspecten van een levenscyclus van een product meenemen. De Social Life Cycle Assessment (S-LCA) is een complementaire aanpak ten opzichte van de reguliere LCA die ook sociale of socio-economische impact van

producten en processen meeneemt in de eindevaluatie. Denk hierbij aan de impact op werknemers, gemeenschappen en mensenrechten (Lucchetti et al., 2018; Parent et al., 2013).

Bij het aanpassen van de regelgeving omtrent biogene CO2 opslag en verwerkingsroutes aan het einde van een levensduur, is het ook van belang dat de hoeveelheid biobased bouwproducten dat een productkaart krijgt binnen de NMD verhoogd wordt. Hierdoor zal het voor constructiebedrijven makkelijker worden om deze bouwmaterialen te gebruiken in (nieuw)bouwprojecten. Dan blijft daarna natuurlijk wel de vraag bestaan hoe deze biobased materialen aan het einde van de levensfase gecategoriseerd dienen te worden in een circulaire economie?

Samenvatting:

Biobased materialen hebben naast het vastleggen van CO2 nog andere voordelen ten opzichte van conventionele bouwmaterialen. Ze kunnen efficiënt hergebruikt worden, wat de levensduur verlengt, en lokaal geproduceerd worden, wat transportafstanden verkleint. Daarnaast dragen ze bij aan de gezondheid en het comfort van mensen en maken ze lichtere constructies mogelijk door materiaal besparing. Om de voordelen van materialen te beoordelen, zijn internationale methodes voor Levenscyclusanalyse (LCA) en Nederlandse methodes voor Milieuprestatieberekening in de bouwsector (NMD) ontwikkeld. Echter ontbreekt het in de regelgeving aan adequate overweging van de opslag van biogene koolstof en de positieve waarde van hergebruik/recycling van materialen. De LCA-methodologie kampt onder andere met uitdagingen bij het in kaart brengen van het tijdstip van CO2-uitwisseling en recycling van biobased materialen, wat de milieuvoetafdruk beïnvloedt. Huidige forfaitaire standaard waarden weerspiegelen ook niet volledig het toekomstige recyclingpotentieel van zowel biobased als conventionele bouwmaterialen. Het toenemende aantal biobased producten in de NMD kan hun gebruik in de bouw vergemakkelijken, maar het categoriseren van hun scenario's aan het einde van de levensduur in een circulaire economie blijft een uitdaging.

**Biobased materiaal:
afvalstof of product?**



Hoofdstuk 3: Biobased materiaal: afvalstof of product?

Wanneer biobased bouwmaterialen aan het einde van hun levensduur komen, hoeft dit in theorie nog niet te betekenen dat de CO₂ die opgeslagen is gelijk weer vrij hoeft te komen. Zeker door het toenemende gebrek aan grondstoffen in de bouwsector, is het daarom van belang dat hergebruik en recycling van deze materialen sterk gaat toenemen. Hierin zijn twee grote stromingen te herkennen. “Open-loop” en “Closed-loop” recycling, welke beide een andere supply chain structuur hebben voor hun grondstoffen. Men spreekt van closed-loop recycling wanneer een geproduceerd product weer volledig gerecycled kan worden in hetzelfde of vergelijkbaar product zonder dat kwaliteitsafname of afvalproductie optreedt. Bij open-loop recycling wordt een product omgezet in een nieuwe grondstof voor een materiaal of in een afvalstof. Vaak heeft het gebruikte materiaal in elke nieuwe levensfase een andere functie omdat het bijvoorbeeld in kwaliteit is afgenomen. Om deze materialen of afvalstoffen weer een nieuwe functie te geven zijn vaak processen zoals verhitting, verlijming of fysieke vervorming (e.g. versnipperen of persen) nodig waardoor de eigenschappen van het materiaal veranderen. Een goed voorbeeld hiervan waar een minderwaardige grondstof juist meer waard kan worden is de productie van Cross Laminated Timber (CLT), ofwel kruislaaghout uit kleinere stukken hout. Door kruislingse verlijming van deze kleinere stukken hout wordt het geheel veel sterker waardoor het voor meer functies gebruikt kan worden in de bouw. Open-loop recycling wordt ook vaak geassocieerd met kleinere afvalstromen die uit de recycling komen, zoals in de houtsector vaak spijkers,

schroeven en zaagafval. Deze kleinere afvalstromen weer economisch rendabel maken op grote schaal is nog steeds een uitdaging.

Biobased materialen: Recycling en hergebruik

Als we kijken naar het wereldwijde doel om atmosferisch CO₂ te verlagen, is het van belang om biobased producten zo lang mogelijk functioneel te houden. Dit aangezien ze langdurig koolstof vastleggen in hun fysieke structuren. In de houtsector wordt hier dan ook al op veel manieren onderzocht om producten of afvalstoffen zo veel mogelijk open-loop of closed-loop te recyclen. Bij hergebruik van hout en andere biobased materialen is het haalbaar om tot wel een vierde levensduur te geven aan een materiaal. Hierdoor blijft deze CO₂ veel langer vastgelegd dan nu wordt aangenomen binnen LCA berekeningen (Belzen, 2020). Ook is hout vaak uitstekend te repareren, zeker wanneer een product hiervoor ontworpen is. Hierdoor hoeft vaak niet een volledig product gerecycled te worden. De recyclingmogelijkheden van hout zijn momenteel grotendeels afhankelijk van de kwaliteit van het aangeleverde hout, maar ook van de waarde die het materiaal na een volgende verwerkingsfase zou hebben. In Nederland komen de grootste stromen van hout vanuit drie locaties: de milieustraat, slopers en vanuit bedrijfsafval. Voor afvalhout worden de volgende drie categorieën gebruikt:

- A-hout: Onbehandeld en schoon hout zonder gifstoffen. Recycling of hergebruik is hier goed mogelijk zowel in closed als open-loop.
- B-hout: Bewerkt hout met onder andere verf, lijm of lak. Recycling is vaak mogelijk in open-loop bijv. in spaanplaat of cross laminated timber (CLT) productie.
- C- hout: Hout dat is geïmpregneerd om de levensduur te verlengen. Dit hout bevat dus vaak giftige stoffen en kan daardoor slecht gerecycled worden en alleen in gespecialiseerde installaties verbrand worden.

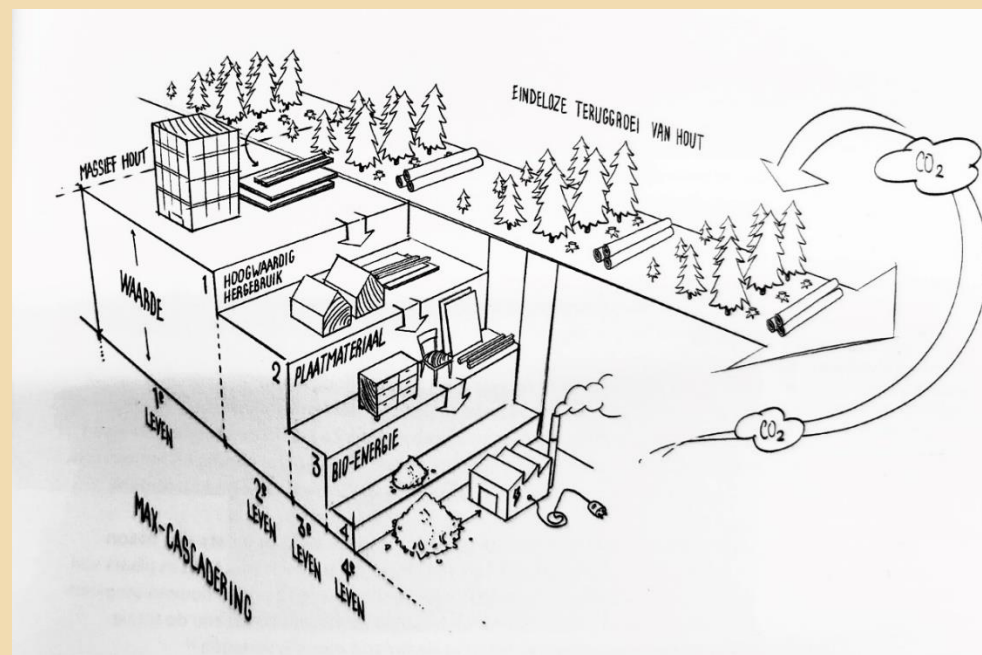
In Nederland is de hoeveelheid afvalhout zo'n 1,7 miljoen ton. Momenteel wordt slechts 560 kiloton afvalhout gerecycled, terwijl zeker 1180 kiloton gebruikt wordt in de energieopwekking. Hieronder valt ook een groot deel A- en B-hout, dat een hoge recycling potentie heeft. Ondanks dat dit fossiele brandstoffen uitspaart zorgt dit ook weer voor vrijkomen van meer atmosferisch CO₂ (Bijleveld, 2022). Om de hoeveelheid afvalhout die richting biomassacentrales gaat te verkleinen zijn een aantal veranderingen nodig die hergebruik of recyclen promoten:

- Verbeteren van gericht slopen, waardoor hout dat uit slooppanden komt makkelijker hergebruikt kan worden.
- Actief houtstromen stoppen die richting biomassacentrales gaan.
- Verbeteren van sorteerprocessen zowel op gespecialiseerde bedrijven als op de milieustraat, zodat een grotere fractie recyclebaar hout er uit gehaald wordt.
- Meer recyclebaar hout gebruiken in spaanplaten of geperste materialen zoals CLT.
- Nieuwe toepassingen vinden voor hout dat niet geschikt is voor huidige gerecyclede houtproducten.

A/B hout kan, wanneer slecht gesorteerd, toch nog vervuilingen bevatten die ongunstig zijn voor de processen die nodig zijn voor het produceren van deze bouwstoffen van houtvezels. Aangezien het uiteindelijke doel van biobased materiaalgebruik langdurige CO₂ opslag is, is het wel van belang dat wanneer de productie van deze bouwstoffen in bio raffinage bedrijven enkel hout gebruikt dat niet meer geschikt is voor hergebruik of recycling.

Naast hout zijn er ook veel andere biobased materialen die in de bouw gebruikt kunnen worden. Onder andere producten van groenafval of schimmelproducten die bijvoorbeeld dienen als isolatiemateriaal, leggen koolstof vast voor de levensduur van een gebouw. Over de

levensduur en recyclebaarheid van deze materialen is echter nog niet altijd data beschikbaar.



Figuur 3: Cascadering ofwel het hergebruiken van houtmateriaal in meerdere toepassingen voordat het voor energieopwekking gebruikt wordt en als CO₂ weer terugkomt in de atmosfeer. In de tijd van deze cascadering kunnen de bomen die in de eerste levensfase gebruikt zijn al enkele keren terug gegroeid zijn. (van der Lugt & Harsta, 2021)

Biobased materialen: Afval zonder waarde

De herbruikbaarheid van veel biobased materialen is in theorie ten opzichte van veel reguliere materialen relatief hoog. Dit blijkt in de praktijk niet volledig terug te komen. Hier zijn meerdere redenen voor waaronder verontreiniging, een lage restwaarde of simpelweg geen lokale mogelijkheid tot hergebruik of recycling. Als deze knelpunten in

de toekomst echter opgelost worden, blijft nog steeds de vraag over wanneer biobased materialen echt geen waarde meer hebben en dus de afvalfase is bereikt. Het belangrijkste aspect hierin is dat deze periode zo lang mogelijk uitgesteld moet worden om de hoeveelheid opgeslagen CO₂ in het materiaal zo lang mogelijk uit de atmosfeer te houden. Dit kan wanneer er genoeg mogelijkheden zijn voor materialen om in meerdere productcycli hergebruikt te worden tot zeker 4 levensduren (figuur 3) (van der Lugt & Harsta, 2021). Tijdens deze periode kan met herplanting van bossen zelfs nog meer biogeen koolstof vastgelegd worden.

Ook hoeft een biobased afvalproduct niet noodzakelijk verbrand te worden, er is ook nog de mogelijkheid tot langere koolstofopslag als een materiaal verder geen functie meer kan vervullen. Omdat biobased materialen een organische oorsprong hebben, zijn ze echter wel onderhevig aan natuurlijke ontbinding of vraat. Deze natuurlijke afbraak van biobased materialen zorgt ook voor een CO₂-uitstoot naar de atmosfeer. Om deze uitstoot tegen te gaan voor biobased materialen zou gekozen kunnen worden voor semi-permanente ondergrondse zuurstofarme opslag van de biogene koolstof in deze materialen. Op kleine schaal is deze methode van “wood harvesting and storage” al in gebruik, maar er zijn ook al plannen om dit op grote

schaal te implementeren (Zeng & Hausmann, 2022). Het is hier van belang dat het hout opgeslagen wordt op een locatie waar de ontbinding vertraagd wordt zoals op zuurstofarme locaties (onder water), extreme kou of extreme droogte (Zeng & Hausmann, 2022).

Naast deze zuurstofarme opslag van biobased materialen zouden ze ook chemisch omgezet kunnen worden in de bouwstoffen zoals cellulose, lignine en hemicellulose. Cellulose en cellulose derivaten kunnen onder andere gebruikt worden in isolatiemateriaal, coatings, optische films of als additieven in de farmaceutische en voedselsector (Figueiredo et al., 2010; Wang et al., 2011). Op dit moment wordt hier echter nog veelal gebruikgemaakt van nieuw hout omdat de kenmerken hiervan beter bekend zijn bij de producenten van deze nieuwe grondstoffen (Bijleveld, 2022).

Er zijn dus veel mogelijkheden voor biobased bouwmaterialen om meerdere levensfasen een functie te vervullen, wat resulteert in een enorm lange opslagperiode van biogene koolstof. Zeker als dit aangevuld wordt met opslag of chemische omzetting van biobased materialen die als afval geclassificeerd zijn. Het is dan de vraag of deze eigenschappen van biobased materialen ook te zien zijn in LCA scores van global warming potential (GWP).

Samenvatting:

De bouwsector is een grootproducent van afval dat momenteel nog vooral op stortplaatsen terecht komt. Het is dan ook van belang dat hergebruik en zowel open loop als closed loop recycling in deze sector snel gaat toenemen. Het toenemend gebruik van hout als grondstof kan hier aan bijdrage, aangezien hout tot wel vier levenscycli mee kan gaan. Dit heeft als bijkomstigheid dat de CO₂ opgeslagen in dit hout langer uit de atmosfeer onttrokken blijft. Hoewel dit niet altijd makkelijk is, door verontreinigingen in B en of C hout, zijn er zeker wel mogelijkheden om de hoeveelheid hout van deze categorieën te verminderen. Wanneer deze recycling tekortkomingen van hout en andere biobased materialen aangepakt worden, kunnen deze in de toekomst van de bouwsector een grote rol gaan spelen.

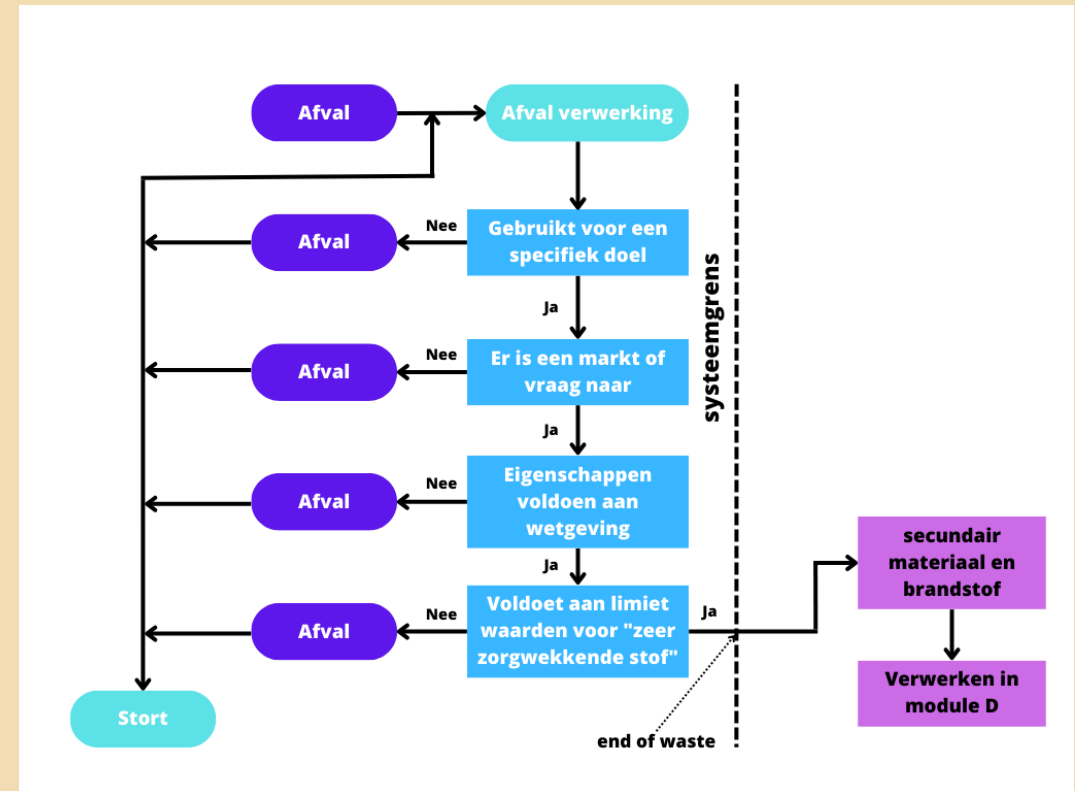
Biobased LCA scores voor bijproduct of reststroom



Hoofdstuk 4: Biobased LCA scores voor bijproduct of reststroom

Zowel bij de productiefase, gebruiksfase en end of life fase van een product kunnen afvalstromen ontstaan. Bij de productiefase is dit vaak materiaal dat tijdens het industrieel produceren van een bepaald product ook vrijkomt. Als dit materiaal ook een nieuwe functie met waarde kan voldoen wordt dit gezien als een "bijproduct". Hier zijn ook veel andere termen voor zoals, co-product, intermediair, nevenproduct of sub-product. Deze termen worden hier echter voor hetzelfde principe gebruikt. Als een afvalstof niet tijdens de productiefase vrijkomt, en niet aan de voorwaarden in figuur 4 voldoet valt het onder afval zonder waarde. Tijdens de gebruiksfase van een product kan ook slijtage optreden waardoor een product gerepareerd, vervangen of gerenoveerd dient te worden. Van deze processen komen ook verschillende afvalstromen vrij. De meeste afvalstromen komen vrij als een product of materiaal volledig in de end of life fase terechtkomt. Aangezien biobased materialen vaak goed te recyclen of hergebruiken zijn, is het van belang dat afvalstromen van deze materialen juist worden beoordeeld in een LCA. Als deze afvalvorm dan weer een waarde krijgt volgens de regels uit figuur 4, is de einde afval fase bereikt en valt dit product of materiaal onder de LCA regelgeving voor een reststroom.

Om te bepalen hoe biobased afvalstoffen volgens de huidige regels voor LCA berekeningen scoren, is hier het global warming potential (GWP) berekend voor een kuub bouwhout en zijn verschillende scenario's van forfaitaire waarden doorgerekend.



Figuur 4: Beslissingsboom voor einde afval fase van een product binnen LCA en bepalingsmethode berekeningen. Overgenomen en vertaald vanuit: NEN-En 15804_2012+A2_2019 .

Naamgeving en regels afvalstoffen binnen de bepalingsmethode

Omdat afvalstoffen van de ene productieketen in een andere keten nog een waarde kunnen hebben is er een distinctie in de aanpak van de allocatie van omgevings impacts binnen de LCA wanneer je praat over een product/materiaal, bijproduct of een reststroom. De definitie van een materiaal is dus binnen LCA en bepalingsmethode berekeningen van belang in de uiteindelijke milieu impact. In figuur 4 is een beslisboom te zien om te kijken wanneer een einde afvalfase voor een materiaal of bereikt is. Daarnaast is het binnen de regelgeving van LCA's en de bepalingsmethode van belang in welke fase van de levensduur een product zich bevindt of en hoeveel een bepaalde impact of baat van een materiaal mee mag tellen. Deze levensfasen zijn binnen de LCA methodiek verdeeld in de vier stadia (A1-3, A4-5 B1-7 en C1-4) en een module D. Binnen de bepalingsmethode wordt deze verdeling ook gebruikt op module B6 en B7 na zoals te zien is in figuur 5 (*Bepalingsmethode*, 2022). Module D is van groot belang voor de score van biobased materialen als bijproduct of reststroom. Binnen de LCA regels opgesteld in NEN-En 15804_2012+A2_2019 moeten alle gedeclareerde netto baten en lasten vanuit stromen die het end-of-waste stadium hebben bereikt, en daarna uit een productiesysteem verdwijnen, verwerkt worden in module D. Dit geldt echter niet voor producten die aangemerkt worden als bijproduct. Ook de vermeden impact van bijproducten dienen niet meegenomen te worden in module D. Voor materialen die gealloceerd kunnen worden als reststroom worden deze impacts niet meegenomen

Voorbeeld scenario's LCA biobased materiaal met verschillende forfaitaire waarden

Om inzichtelijk te krijgen wat de huidige LCA regelgeving voor effecten heeft op de GWP score van biobased materialen zijn hier een aantal



Figuur 5: Binnen de bepalingsmethode van de NMD worden de volgende vier stadia (A1-3, A4-5 B1-7 en C1-4) en een module D aangehouden tijdens de levensfasen van een product/materiaal.

voorbeeld scenario berekeningen gemaakt. Voor het biobased materiaal is gekozen voor een kuub gezaagd en gedroogd Hollands naaldhout (constructiehout; 515 kg/m³, vochtgehalte 12%) van Staatsbosbeheer (NMD v3.3). Wanneer uitgegaan wordt van de standaard forfaitaire waarden aan het einde leven van het materiaal (tabel 1), heeft deze hoeveelheid bouwhout een impact van 54,06 kg CO₂ equivalent (figuur 6). Voor een goede score is het van belang dat de CO₂ equivalent zo laag mogelijk is. In dit voorbeeld valt op dat de lage score grotendeels voortkomen uit de vermeden energieproductie (verbrandingsoven) met een negatieve score van -23,69 kg CO₂ eq, in module D. Deze situatie laat zien dat verbranding van een product dus kan bijdragen aan een positieve score binnen LCA berekeningen.

Met de toekomstvisie van de bouwsector om volledig circulair te worden is het daarom belangrijk om voor biobased bouwmaterialen te

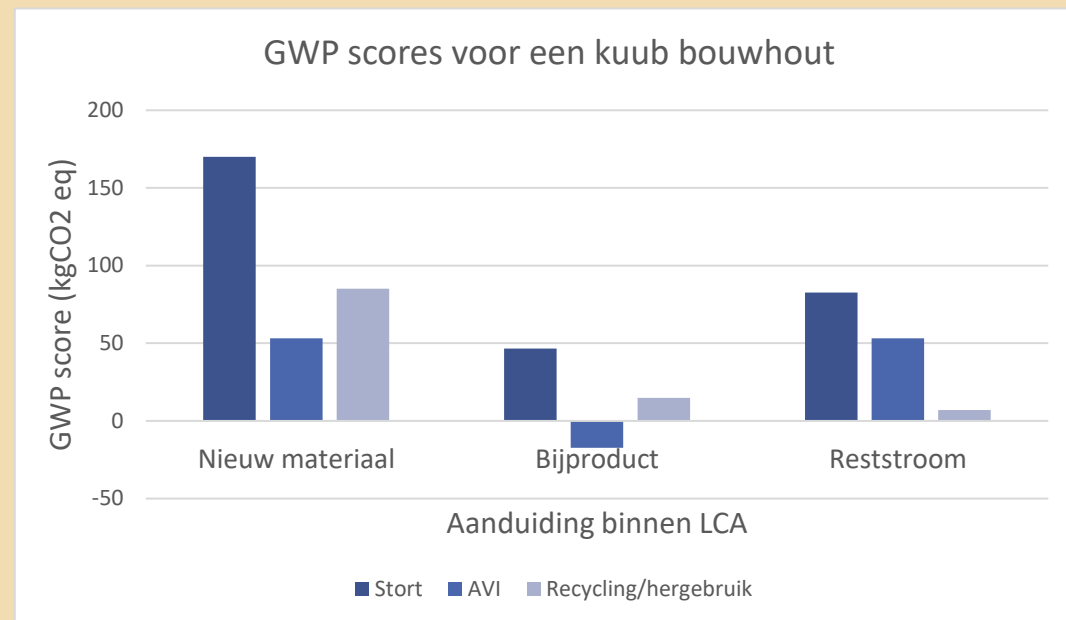
beoordelen hoe de LCA regelgeving aansluit bij het gebruik van materialen die al meerdere productcycli meegaan en dus niet verbrand worden. In tabel 2 zijn de GWP impact scores zichtbaar voor verschillende scenario's van zowel de benaming van een materiaal aan het begin van de levenscyclus en het einde levensduur scenario. Het gaat hier om bouwhout dat binnenkomt als nieuwe grondstof, bijproduct of als reststroom. Als reststroom is er vanuit gegaan dat het hout verspaand wordt. Aangezien bijproducten uit een eerder productieproces dienen te komen, wordt in deze voorbeeld berekeningen tien procent aangehouden van de GWP impact van een kuub hout als grondstof.



Figuur 6: GWP berekening voor een scenario van een kuub Hollands naaldhout, gezaagd, gedroogd, (=constructiehout; 515 kg/m³, vochtgehalte 12%) bij houthandel, Staatsbosbeheer(NMD v3.3), waarin de standaard forfaitaire waarden meegenomen worden voor de afval en recycling fase binnen module D. Hier wordt dus 5% gestort, 80 % verbrand in een AVI, 10% verspaand en 5% geschaafd en hergebruikt.

Bij de binnenkomst als reststroom is volgens de LCA regelgeving geen positieve GWP waarde meegenomen in stadium A1. Naast de drie verschillende vormen van hout als grondstof, zijn voor elk van deze scenario's drie scenario's van afval verwerking aan het einde van het leven doorgerekend. Hier is gekozen voor de scenario's stort, verbranding in een AVI, recycling en hergebruik. Recycling en hergebruik zijn samengevoegd omdat ze hetzelfde scoren. De volledige GWP berekeningen zijn te vinden in bijlage 2.

Een van de meest opvallende scores is de negatieve waarde die ontstaat bij een bijproduct dat aan het einde van het leven verbrand wordt (figuur 7 en tabel 2). Dit is te verklaren doordat slechts tien procent van de lasten van het originele materiaal meegenomen worden in module A en geen lasten meegenomen worden in module D. Daarnaast zijn door de energiebesparing die met verbranding gerekend mag worden de baten groter dan de lasten, waardoor een negatieve GWP score ontstaat. Kijkend naar de overgang naar een circulaire economie waar meer biobased materialen als bijproduct of als reststroom bestempeld zullen worden is het niet logisch dat verbranding en daarmee CO2 uitstoot een betere score oplevert dan hergebruik. Bij een reststroom is de score van recycling nu wel gunstiger dan bij verbranding omdat hier een negatieve waarde voor verlies van secundair materiaal gerekend mag worden. Om recycling en langer gebruik van bouwmaterialen te verhogen zou de regelgeving hier op in moeten spelen door deze vormen van end of waste een betere score te geven dan stort of AVI in de einde levensfase zowel als nieuw materiaal, bijproduct en als reststroom. Een van die oplossingen is het aanpassen van de LCA regelgeving omtrent biogene koolstofopslag ter compensatie.



Figuur 7: GWP scores voor verschillende scenario's van einde leven en naamgeving aan de start van de levenscyclus. Een lagere GWP score is gunstiger doordat de impact van de levenscyclus zo laag mogelijk dient te zijn.

Tabel 2: Voorbeeld scenario GWP (kg CO2 eq) berekeningen voor een kuub (m3) bouwhout met een gewicht van 515 kg.

Aanduiding binnen LCA	Primair of secundair product	Berekende hoeveelheid GWP in A1	Einde levensduur scenario	GWP(kg CO2 eq)	CO2 terug in atmosfeer
Nieuw product/materiaal/ grondstof	Primair	100%	Stort	$1.17 \cdot 10^2$	langzaam
			AVI	53.14	snel
			Recycling/hergebruik	85.23	nee
Bijproduct	Primair	10%	Stort	46.65	langzaam
			AVI	-17.33	snel
			Recycling/hergebruik	14.76	nee
Reststroom	Secundair	0%	Stort	82.75	langzaam
			AVI	53.14	snel
			Recycling/hergebruik	6.93	nee

Samenvatting:

Zowel bij de productiefase, gebruiksfase en end of life fase van een product kunnen afvalstromen ontstaan. Biobased materialen kunnen vaak ook als afvalstof uit een productieketen nog een tweede of derde levenscyclus ingaan als ze geupcycled worden. Hierom is het van belang dat de allocatie van de omgevings impact in de vorm van GWP binnen LCA berekeningen voor zowel een nieuw product, een bijproduct of reststroom op de juiste manier plaatsvindt. Binnen de huidige regelgeving blijkt dat niet in alle gevallen te gelden voor biobased producten. Wat opvalt is dat in bepaalde voorbeeld scenario's in figuur 6 zichtbaar is dat verbranding van een product beter scoort dan hergebruik of recycling van een biobased product. Om de CO2 uitstoot tegen te gaan is dit geen juiste oplossing.



Biobased LCA score voor biogene koolstof opslag

Hoofdstuk 5: LCA score voor biogene koolstof opslag

Om te kijken naar de huidige knelpunten binnen de LCA methode op het gebied van biobased bouwmaterialen worden hier een aantal voorbeeld LCA's uiteengezet. Dit hoofdstuk gaat in op mogelijke aanpassingen aan de LCA methodiek en de gevolgen op de milieu-impact ten opzichte van de huidige methodiek.

De eerste twee studies behandelen houten frames met stro vulling van Ecococoon en Straw Blocks System die dienen als constructief en isolatie element. Daarnaast worden ook twee LCA's besproken van thermisch isolatiemateriaal bestaand uit cellulose, dat in dakconstructies gespoten kan worden. Deze zijn van Thermofloc en Isofloc. In alle LCA's gaat het in feite om biobased isolatiematerialen die in verschillende eindproducten gebruikt worden. Deze biobased bouwmaterialen zijn in functie te vergelijken met conventionele isolatiematerialen als steenwol, glaswol of materialen op oliebasis.

Tabel 3: Waarden biogeen koolstof en scenario's MKI vanuit de LCA's van vier biobased producten.

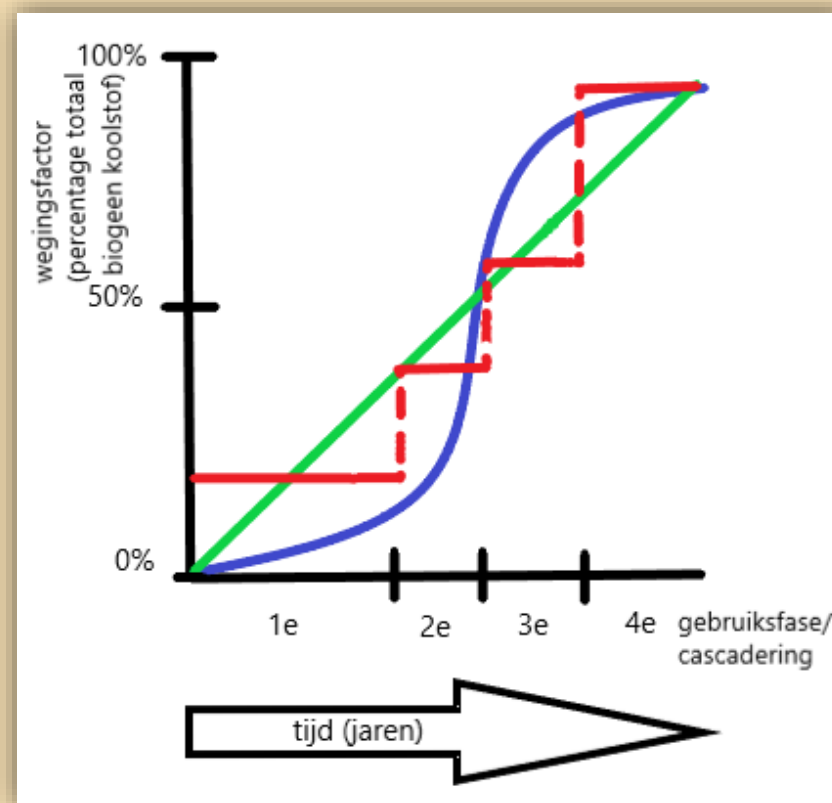
	Climate change-biogenic total (kg CO2-eq)	Milieu kosten indicator (MKI) weegfactor kg CO2-eq (€/eenheid)	MKI biogenic total (€)	Huidige MKI total product (€)	Biogeen koolstof opslag meegerekend in MKI (€)	Vershil MKI tussen wel of niet meerekenen biogeen koolstof (%)
Ecococoon	-4,01E+01	0,05	-2,00	3,22	1,22	-62,11
Straw Blocks System	-5,44E+01	0,05	-2,72	0,75	-1,97	-262,67
ISOFLOC	-1,45E+00	0,05	-0,0725	0,21	0,1375	-34,52
Thermofloc	-7,64E-01	0,05	-0,0382	0,23	0,1918	-16,61

Echter zijn biobased isolatiematerialen ten opzichte van deze conventionele materialen met name kijkende naar de toekomstige circulaire economie en duurzame bouw vaak een betere keuze. Het is daarom van belang dat LCA's ook een volledig beeld geven van de duurzaamheid en toekomstbestendigheid van een product.

Ecococon en Straw Blocks

Voor de houten frames met stro vulling van Ecococon en Straw Blocks System zijn twee LCA's beschikbaar. Binnen deze producten worden hout en stro gezien als biobased materialen die biogeen CO₂ kunnen opslaan. Binnen de LCA is dit aangegeven met "Climate change-biogenic total" in het onderdeel Life Cycle Impact Assessment waar dit wordt aangegeven in "kg CO₂ equivalent". Momenteel moet het totaal van Climate change-biogenic volgens EN15804+A2 nog gecorrigeerd worden naar 0 omdat er vanuit gegaan wordt dat biogene koolstof na een korte opslag duur daarna weer door verbranding of afbraak van materialen in de atmosfeer terecht komt. Hierdoor is er dus geen positief effect van biogene koolstofopslag zichtbaar binnen deze LCA berekeningen. Voor de Ecocococon en Straw Blocks System wand delen is respectievelijk $-4,01E+01$ en $-5,44E+01$ biogeen koolstof (kg CO₂-eq) opgeslagen. Hoewel deze waarden negatief zijn geeft dit binnen de LCA berekeningen aan dat dit effect positief is aangezien een lagere score in een impact categorie een positieve milieu-impact heeft.

Ecococon en Straw Blocks System scoorden respectievelijk een MKI score voor biogeen koolstof van -€2,00 en -€2,72 . Momenteel wordt deze biogene koolstof niet meegenomen binnen de totale MKI per product. Wanneer dit hypothetisch wel gedaan wordt krijgt bij een toevoeging van 100% van de waarde van de biogene koolstof MKI score, de totale MKI bij de Ecococon een 62% en bij de Straw Blocks System zelfs een 263% betere score (tabel 3)



Figuur 8: Voorbeeld met enkele opties van hoe de wegingsfactor voor de biogene koolstofopslag zou kunnen toenemen op basis van levensduur en in welke gebruikscyclus een product zit. (bron: eigen figuur)

Thermofloc & Isofloc

Thermofloc en Isofloc zijn beide isolatiematerialen gemaakt van cellulosevezels voor in muur- of dakconstructies. Cellulose is voor beide producten geproduceerd uit afvalpapier, dat volgens EN15804+A2 aangemerkt kan worden als einde afval op het moment dat het in de productiefaciliteit arriveert. Net als bij de stro frame LCA's is Climate change-biogenic volgens EN15804+A2 gecorrigeerd naar 0. Voor Thermofloc kwam dit neer op $-7,64E-01$ biogeen koolstof (kg CO₂-eq) en voor Isofloc op $-1,45E+00$. Wanneer deze biogene koolstof wel volledig meegerekend zou worden in de totale MKI per product zou dit voor Thermofloc een 16% betere en voor Isofloc een 34% betere score opleveren (tabel 3).

Biogeen koolstof aanpassingen in LCA regelgeving

De reden die vaak aangedragen wordt om de biogene koolstof niet mee te nemen is omdat de levensduur van biobased producten vaak nog niet bekend is en omdat slechts een klein deel van biobased materialen op dit moment pas gerecycled wordt. Echter zoals in figuur 3 te zien is kan een biobased product in meerdere toepassingen

hergebruikt worden, waardoor biogeen koolstof langere tijd wordt vastgelegd. Zeker als dit samenhangt met duurzaam bosbeheer is de hoeveelheid CO₂ die over meerdere gebruiksfasen uit de atmosfeer gehouden wordt aanzienlijk. Het is dan ook van belang om de duur van vastlegging van biogeen koolstof mee te nemen in de uiteindelijke MKI score. Een van de mogelijkheden hiervoor is om een weegfactor mee te nemen op basis van verwachte levensduur en in de hoeveelste gebruikscyclus een product zit. Deze factor bepaalt dan hoeveel procent van de totale biogene koolstofopslag meetelt in de totale MKI score. Hiermee is rekening gehouden met zowel de opslagtijd van de hoeveelheid CO₂, terwijl er tegelijkertijd ook gepromoot wordt om materialen zo lang mogelijk te hergebruiken. In figuur 8 zijn een aantal potentiële opties te zien van hoe een wegingsfactor bepaald zou kunnen worden. Dit zou een vaste waarde per gebruiksfase kunnen zijn zoals in de rode lijn is aangegeven, maar ook gradueel over tijd kunnen toenemen op basis van een vooraf opgestelde formule zoals de groen en blauwe lijn laat zien. Deze formule zou ook kunnen verschillen per materiaalgroep met andere eigenschappen zoals, potentiële levensduur of een score op het gebied van recyclebaarheid.

Samenvatting:

Er zijn al praktijkvoorbeelden van bouwmaterialen die biogeen koolstof voor een langere periode op kunnen slaan door hergebruik of upcycling. Deze opslag van biogene koolstof mag binnen de huidige regelgeving niet worden meegenomen in een waarde binnen LCA berekeningen. Deze regel komt voort uit de teruggave van biogeen koolstof aan de atmosfeer wanneer een biobased materiaal verbrand wordt aan het einde van de levensfase. Hierdoor mag in de praktijkvoorbeelden van zowel de cellulosevezel isolatie materialen en de houten frames met stro vulling biogene koolstof niet mee tellen in de totale MKI score. Wanneer hypothetisch deze waarden wel meegenomen worden is in tabel 3 te zien dat deze biobased bouwmaterialen tussen de 16 en 263% beter scoren op de MKI. Toch moet er ook realistisch gekeken worden naar het laten meetellen van biogeen koolstof, aangezien zelfs wanneer een biobased materiaal een aantal levenscycli heeft de biogene koolstof nog steeds terug kan komen in de atmosfeer. Om dit tegen te gaan zou ook een deel van de biogene koolstof mee kunnen tellen door middel van een wegingsfactor die hoger wordt na langer gebruik van een materiaal.

Discussie & Conclusie

De volledige bouwsector is een van de grootaandeelhouders als het gaat om klimaatimpact categorieën zoals energie en materiaalgebruik en de uitstoot van broeikasgassen. Dit vloeit voort uit het intensieve gebruik van materialen met een grote milieu-impact en lage herbruikbaarheid. De impact die bouwmaterialen hebben worden in Nederland vastgelegd in de NMD op basis van de bepalingmethode milieuprestatie bouwwerken. Biobased bouwmaterialen hebben ten opzichte van conventionele bouwmaterialen meerdere voordelen, zoals de vastlegging van atmosferisch CO₂ en relatief makkelijke lokale productie, assemblage en recycling mogelijkheden. Kijkend naar de gestelde doelen in het klimaatakkoord van Parijs, om de CO₂-uitstoot met 160 miljoen ton te verminderen, biedt het gebruik van deze biobased materialen een uitstekende oplossing voor deze sector. Toch worden biobased bouwmaterialen nog niet op grote schaal gebruikt. Een van de redenen hiervoor is dat de regelgeving van zowel de bepalingmethode en de achterliggende LCA's nog niet altijd aansluit op de voordelen die biobased materialen bieden ten opzichte van conventionele materialen.

De eigenschap van biobased bouwmaterialen om CO₂ te onttrekken uit de atmosfeer en voor een lange periode vast te leggen in biogeen koolstof is al geruime tijd bekend. Er zijn historische bouwwerken waarin hout als biobased materiaal, mits op de juiste manier behandeld voor een lange levensduur, honderden jaren CO₂ kan opslaan (Khatib, 2016; Teaca et al., 2019). Hier staat wel tegenover dat voor dat het produceren van deze biobased materialen op een duurzame regeneratieve manier plaats moeten vinden om atmosferische CO₂ uitstoot te verminderen (Bijleveld, 2021; Guardigli et al., 2011; van der Lugt & Harsta, 2021). Hiervoor is aansluitende regelgeving en infrastructuur nodig op het gebied van duurzame

bosbouw en het bevorderen van recycling in plaats van verbranding van biobased materialen aan het einde van de gebruiksfase (Bijleveld, 2021; van Bruggen & van der Zwaag, 2017; van der Lugt & Harsta, 2021).

Een deel van deze aanpassingen in regelgeving is te vinden in de huidige milieuprestatie berekeningen die gebruikt worden in de bouwsector. De rekenregels voor zowel de bepalingmethode van de NMD als die voor LCA berekeningen, zijn nu niet voldoende afgesteld op de promotie van het gebruik van biobased bouwmaterialen (Belzen, 2020; Bijleveld, 2021). Voor meer grootschalig gebruik van biobased materialen zijn drie grote knelpunten aan te wijzen binnen de huidige regels gerelateerd aan de milieu prestatie. Allereerst, mag biogeen koolstof op dit moment niet als waarde meegeteld worden binnen LCA berekeningen aangezien langdurige onttrekking van CO₂ uit de atmosfeer niet gegarandeerd kan worden (Milieudatabase, 2020; Pawelzik et al., 2013). Hoewel dit voor materialen met een korte levensduur een logische redenatie is, laten biobased materialen in de bouwsector zien dat deze relatief snelle uitstoot van CO₂ aan het einde van het leven niet vanzelfsprekend is. Zeker kijkend naar de potentie van deze materialen tot cascadering in meerdere gebruiksfasen kunnen ze tot wel 100 jaar en vier levensfasen CO₂ uit de atmosfeer houden (figuur 3) (van der Lugt & Harsta, 2021). Dit in vergelijking tot conventionele bouwmaterialen die geen biogeen koolstof vastleggen en in de einde levensfase slecht te recyclen of upcyclen zijn (Hu et al., 2012; van der Wegen et al., 2013). De kanttekening hierbij is echter wel dat de infrastructuur voor het recyclen van biobased materialen op dit moment nog minder ontwikkeld is dan voor conventionele bouwmaterialen (Gemax & Rijkswaterstaat, 2020). Dit wordt onder andere veroorzaakt door de relatief grote hoeveelheid verontreinigd B en C hout dat als afval bestempeld wordt (Bijleveld, 2022). Dit wordt onder andere veroorzaakt door een gebrek aan een verdienmodel voor afvalhout

aangezien verbranding vaak meer oplevert dan recycling (Bijleveld, 2022; van Bruggen & van der zwaag, 2017). Het meenemen van de waarde van biogeen koolstof binnen de LCA methodiek zou kunnen bijdragen aan het opwaarderen van deze biobased bouwmaterialen om circulair gebruik te bevorderen. Zoals te zien in tabel 3 is het dan voor sommige producten in theorie mogelijk om tot 263% beter te scoren dan in de huidige situatie.

Kijkend naar de uitgesproken doelen van de bouwsector en de Nederlandse overheid om in 2050 een circulaire bouweconomie te hebben (RVO, 2021; van der Lugt & Harsta, 2021) is er binnen de huidige regelgeving van de bepalingmethode nog een knelpunt aanwezig. Biobased materialen zoals hout hebben in de scores voor de verwerkingsscenario's aan het einde van een levensduur een enorm laag recycling potentieel ten opzichte van conventionele bouwmaterialen (tabel 1) (Milieudatabase, 2020). Zowel de toename in hergebruik van hout en andere biobased materialen als de verzadiging van de afzetmarkt van conventionele bouwmaterialen als beton, laten zien dat heroverweging van deze forfaitaire waarden kunnen bijdragen aan het realistisch maken van de scores voor biobased materialen (Bijleveld, 2022; Hu et al., 2012; van der Lugt & Harsta, 2021).

Het derde knelpunt ligt binnen de huidige regelgeving omtrent de aanduiding van een materiaal binnen LCA regelgeving. Voornamelijk als het gaat over afvalstoffen uit andere productieprocessen of van materialen aan het einde van een eerdere levensfase. Voor de benaming van een materiaal als grondstof, bijproduct of reststroom gelden namelijk andere regels binnen LCA's, waardoor dezelfde materialen een andere impact score kunnen hebben (figuur 7). Daarbij aansluitend heeft ook het scenario voor een materiaal aan het einde van de eerdere levensduur een andere milieu impact score. Hierin valt op dat zowel bij een nieuw materiaal als bij een bijproduct verbranding

van een materiaal een gunstigere score oplevert dan hergebruik of recycling van hetzelfde materiaal (tabel 2).

Kijkend naar de uitgesproken doelen van de bouwsector en de Nederlandse overheid om in 2050 een circulaire bouweconomie te hebben (RVO, 2021; van der Lugt & Harsta, 2021) is dit logischerwijs geen aansluitende regelgeving, omdat dit de uitstoot van CO2 kan bevorderen. Daarop aansluitend is het kijkend naar de tijdschaal die we hebben om de CO2 uitstoot van Nederland drastisch te verminderen, dan ook logisch om vanuit de NMD te focussen op regelgeving die het loslaten van broeikasgassen in de atmosfeer door verbranding tegen gaat en biogene koolstof opslag bevordert. Op dit moment lijken biobased bouwen dus in potentie behoorlijke milieuvordelen te bieden, maar is het werkelijke voordeel afhankelijk van veel factoren en sluit de regelgeving vanuit de NMD nog niet voldoende aan bij een circulaire bouwsector. Als we naar de toekomst kijken zullen de voordelen en levensduur van deze materialen steeds beter gekwantificeerd moeten worden. De hoop is dat het gebruik van biobased materialen ten opzichte van conventionele materialen in de bouwsector daardoor zal toenemen.

Referenties

- Belzen, T. van. (2020, December 4). *'Hout flink benadeeld in overheidseisen duurzaam bouwen.'*
<https://www.cobouw.nl/290962/forse-kritiek-op-weglaten-co2-opslag-in-milieuberekening-houten-huis>
- Bepalingsmethode. (2022). NMD.
<https://milieudatabase.nl/nl/milieuprestatie/bepalingsmethode/>
- Bijleveld, M. (2021). *Kennisnotitie biobased bouwen Zuid Holland*. CE Delft. https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/02/CEdelft_PZH_Biobased-bouwen_def.pdf
- Bijleveld, M. (2022). *Verwerkingsroutes van afvalhout-Mogelijkheden en milieukundige evaluatie middels mLCA*.
- Boers, J. (2004). *Toxiciteit heeft z'n prijs*. Rijkswaterstaat, TNO-MEP.
- BouwTotaal. (2021, May 5). *Veel rumoer rond CO2-opslag bij houtbouw*. BouwTotaal.
<https://www.bouwtotaal.nl/2021/05/veel-rumoer-rond-co2-opslag-bij-houtbouw/>
- Breton, C., Blanchet, P., Amor, B., Beauregard, R., & Chang, W.-S. (2018). Assessing the climate change impacts of biogenic carbon in buildings: A critical review of two main dynamic approaches. *Sustainability*, 10(6), 2020.
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 379–388.
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Cai, L., Lim, H., Nicholas, D. D., & Kim, Y. (2020). Bio-based preservative using methyl- β -cyclodextrin-essential oil complexes for wood protection. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 420–427.
- Calovi, M., & Rossi, S. (2023). From wood waste to wood protection: New application of black bio renewable water-based

- dispersions as pigment for bio-based wood paint. *Progress in Organic Coatings*, 180, 107577.
- Colangelo, F., Navarro, T. G., Farina, I., & Petrillo, A. (2020). Comparative LCA of concrete with recycled aggregates: A circular economy mindset in Europe. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(9), 1790–1804. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01798-6>
- De Bruyn, S. M., Korteland, M. H., Markowska, A. Z., Davidson, M. D., De Jong, F. L., Bles, M., & Sevenster, M. N. (2010). *Shadow prices handbook. Valuation and weighting of emissions and environmental impacts*.
- Di Maria, A., Eyckmans, J., & Van Acker, K. (2018). Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. *Waste Management*, 75, 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.028>
- Fanijo, E. O., Kolawole, J. T., Babafemi, A. J., & Liu, J. (2023). A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability. *Cleaner Materials*, 9, 100199. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100199>
- Fava, J. A. (1991). *A Technical Framework for Life-cycle Assessments: Workshop Report, August 18-23, 1990, Smugglers Notch, Vermont*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry.
- Figueiredo, J. A., Ismael, M. I., Anjo, C. M. S., & Duarte, A. P. (2010). Cellulose and Derivatives from Wood and Fibers as Renewable Sources of Raw-Materials. In A. P. Rauter, P. Vogel, & Y. Queneau (Eds.), *Carbohydrates in Sustainable Development I* (pp. 117–128). Springer. https://doi.org/10.1007/128_2010_88
- Gemax, & Rijkswaterstaat. (2020). *Meer hergebruik en recycling van afvalhout*. Gemax. <https://www.afvalcirculair.nl/onderwerpen/linkportaal/publicaties/downloads/downloads-diverse/hergebruik-recycling-afvalhout-plan-aanpak/>

- Global Forest Resources Assessment 2020*. (2020). FAO.
<https://doi.org/10.4060/ca8753en>
- Grabiec, A. M., Kim, J., Ubysz, A., & Bilbao, P. (2021). Some Remarks towards a Better Understanding of the Use of Concrete Recycled Aggregate: A Review. *Sustainability*, 13(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/su132313336>
- Guardigli, L., Monari, F., & Bragadin, M. A. (2011). Assessing Environmental Impact of Green Buildings through LCA Methods: A comparison between Reinforced Concrete and Wood Structures in the European Context. *Procedia Engineering*, 21, 1199–1206.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2131>
- Guinée, J. B., De Haes, H. U., & Huppes, G. (1993). Quantitative life cycle assessment of products: 1: Goal definition and inventory. *Journal of Cleaner Production*, 1(1), 3–13.
- Guinee, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011). *Life cycle assessment: Past, present, and future*. ACS Publications.
- Helin, T., Sokka, L., Soimakallio, S., Pingoud, K., & Pajula, T. (2013). Approaches for inclusion of forest carbon cycle in life cycle assessment—a review. *Gcb Bioenergy*, 5(5), 475–486.
- Holmgren, P., & FutureVistas, A. B. (2021). The forest carbon debt illusion. *Contrary to Common Views, Harvesting from Managed Forests Does Not Delay Climate Benefits*. Available Online at: <https://www.forestindustries.se/siteassets/Dokument/Rapporter/Report-the-Forest-Carbon-Debt-Illusion2.Pdf>.
- Hu, M., Di Maio, F., Lin, X., Van Roekel, E., & Milieutechniek, S. (2012). Fates of end-of-life concrete and their economic implications. *Proceedings of the 27th International Conference on Solid Waste Technology and Management*, 1–9.
- Khatib, J. (2016). *Sustainability of construction materials*. Woodhead Publishing.
- Kibert, C. J. (1994). Establishing principles and a model for sustainable construction. *Proceedings of the First International Conference on Sustainable Construction*, 6–9.

- Kibert, C. J. (2007). The next generation of sustainable construction. In *Building Research & Information* (Vol. 35, Issue 6, pp. 595–601). Taylor & Francis.
- Lin, C.-L., Chiang, W.-H., Weng, Y.-S., & Wu, H.-P. (2023). Assessing the anthropogenic carbon emission of wooden construction: An LCA study. *Building Research & Information*, 51(2), 138–157.
- Lucchetti, M. C., Arcese, G., Traverso, M., & Montauti, C. (2018). S-LCA applications: A case studies analysis. *E3S Web of Conferences*, 74, 10009.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187410009>
- Milieudatabase, S. N. (2020). *Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken*. Stichting Nationale Milieudatabase.
- Nossek, L., Bosch, S., & Peeters, T. (2023). *Een toekomstbestendige milieuprestatie gebouwen*. DGBC & Gideon.
<https://www.copper8.com/wp-content/uploads/2023/04/Position-Paper-Toekomstbestendige-Milieuprestatie-Gebouwen.pdf>
- Parent, J., Cucuzzella, C., & Revéret, J.-P. (2013). Revisiting the role of LCA and SLCA in the transition towards sustainable production and consumption. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(9), 1642–1652.
<https://doi.org/10.1007/s11367-012-0485-9>
- Peñaloza, D., Erlandsson, M., & Falk, A. (2016). Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings. *Construction and Building Materials*, 125, 219–226.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.041>
- RVO. (2021). *De circulaire bouweconomie*. Rijksdienst voor ondernemend nederland.
- Steins, J. J., Volk, R., Stallkamp, C., & Schultmann, F. (2023). Designing a new recycling network for post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) in Europe. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1196(1), 012058.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1196/1/012058>
- Teaca, C. A., Roșu, D., Mustață, F., Rusu, T., Roșu, L., Roșca, I., & Varganici, C.-D. (2019). Natural bio-based products for wood

- coating and protection against degradation: A review. *BioResources*, 14(2), 4873–4901.
- United Nations Environment Programme. (2009). *Buildings and Climate Change: Summary for Decision Makers*.
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/32152>
- van Bruggen, R., & van der zwaag, N. (2017). *Knelpuntanalyse houtrecycling*. Tauw.
- van den Oever, M. (2022). *Biobased in de NMD*. NMD.
<https://milieudatabase.nl/nl/actueel/nieuws/biobased-in-de-nmd/>
- van der Burgh, F., & Verspeek, S. (2016). *Bevorderen opname Biobased Bouw Producten in NMD als onderdeel van acties uit de Green Deal Biobased Bouwen*. Agrodome.
https://www.greendeals.nl/sites/default/files/downloads/20160613-Eindverslag-RVO-NMD_def.pdf
- van der Lugt, P., & Harsta, A. (2021). *De Houtbouw Revolutie -Op weg naar een circulaire toekomst*. Material District.
- van der Wegen, G., Hofstra, U., & Speerstra, J. (2013). Upgraded MSWI Bottom Ash as Aggregate in Concrete. *Waste and Biomass Valorization*, 4(4), 737–743.
<https://doi.org/10.1007/s12649-013-9255-6>
- Verhoeven, N. (2022, April 26). *Waardering van recycling, hergebruik en energieopwekking uit afval in LCA*. Cirkelstad.
<https://www.cirkelstad.nl/waardering-recycling-hergebruik-energieopwekking-afval-lca/>
- Verlinden, J., & Kanselaar, J. (2022). *Voorstel berekeningsmethodiek om koolstofvastlegging in biobased bouwmaterialen te kunnen waarderen*. Ministerie van Binnenlandse zaken en koninkrijksrelaties. <https://circulairebouweconomie.nl/wp-content/uploads/2023/01/Onderzoeksrapport-Koolstofvastlegging-biobased-materialen.pdf>
- Vogtländer, J. G., van der Velden, N. M., & van der Lugt, P. (2014). Carbon sequestration in LCA, a proposal for a new approach based on the global carbon cycle; cases on wood and on

bamboo. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 13–23.

Wang, X., Li, H., Cao, Y., & Tang, Q. (2011). Cellulose extraction from wood chip in an ionic liquid 1-allyl-3-methylimidazolium chloride (AmimCl). *Bioresource Technology*, 102(17), 7959–7965.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.064>

Zeng, N., & Hausmann, H. (2022). Wood Vault: Remove atmospheric CO₂ with trees, store wood for carbon sequestration for now and as biomass, bioenergy and carbon reserve for the future. *Carbon Balance and Management*, 17(1), 2.
<https://doi.org/10.1186/s13021-022-00202-0>

Zhang, C., Hu, M., Yang, X., Miranda-Xicotencatl, B., Sprecher, B., Di Maio, F., Zhong, X., & Tukker, A. (2020). Upgrading construction and demolition waste management from downcycling to recycling in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121718.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121718>

Bijlage

1: *Belangrijkste standaarden voor LCA en Bepalingsmethode en hun omschrijving:*

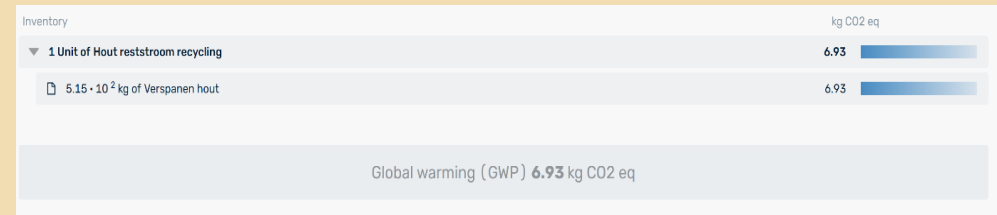
- ISO 14001: definieert de noodzakelijke criteria voor Environmental management systems (EMS). Zorgt er voor dat milieueffecten worden gemeten en verbeterd.
- ISO 14021: definieert hoe specifieke milieu claims moeten zijn en hoe ze moeten worden geformuleerd en gedocumenteerd.
- ISO 14040:2006: definieert de principes en het framework van de LCA methodiek.
- ISO 14044: definieert de specifieke benodigdheden en regels van de LCA methodiek.
- ISO 14067: definieert hoe carbon footprint van een product gekwantificeerd wordt tijdens een LCA.
- ISO 50001: Definieert energie management systemen.
- EN 15804: definieert de opzet van Environmental Product Declarations (EPD's) in de constructie industrie.
- EN 16760: definieert de vereisten voor het opstellen van LCA's voor biobased materialen die (voor een deel) bestaan uit biomassa, exclusief (dier)voedsel, en energie.

2: Figuren van de berekeningen van het GWP voor verschillende scenario's van afvalstromen en end of life scenario's.

Hout nieuw:



Hout reststroom:





Hout bijproduct:

