



Universiteit
Utrecht



HEDGEHOG
COMPANY

Biobased materialen in de bouw

Een review van de huidige
Milieuprestatie gebouwen



Zoë Tan

Abstract

De bepalingsmethode is de norm voor het vaststellen en weergeven van de milieuprestatie van bouwwerken. Vanuit de houtbouwindustrie is er ontevredenheid over de huidige bepalingsmethode. Hout zou worden achtergesteld in vergelijking met conventionele materialen zoals beton. Deze review focust op vier kritiekpunten. Ten eerste wordt biogeen koolstofopslag momenteel volgens de -1/+1 methode meegenomen in LCA's. Dit creëert inzage in de opname en uitstoot van koolstof, maar heeft geen invloed op de milieuprestatie. Van de vele methodes die te vinden zijn in de literatuur, lijkt de meest geschikte methode het meenemen van langdurige koolstofopslag (>100 jaar) als permanente opslag, geïntegreerd in de MPG-score. Ten tweede zijn de end-of-life aannames voor hout en beton discutabel. Het percentage recycling wordt onderschat voor hout. Bij beton wordt 99% recycling aangenomen, terwijl er grotendeels gedowncycled wordt. Als derde kritiekpunt wordt genoemd dat de levensduur van hout onderschat wordt of onvoldoende verkend is. Er is inderdaad minder informatie beschikbaar voor hout, maar de levensduur voorspellingen zijn ongeveer gelijk aan die van beton. Ten slotte verdiept deze review zich in de recyclingsmogelijkheden voor hout en beton. Daarbij blijkt dat er momenteel al veel hout recycled kan worden, er duidelijke verbeterpunten zijn waardoor dit aandeel nog kan toenemen, en er veelbelovende toekomstige recyclingsscenario's zijn. Voor beton blijkt dat het overgrotendeel momenteel gedowncycled wordt tot wegaggregaat. Desondanks zijn er wel innovaties die hoogwaardige betonrecycling mogelijk maken. In conclusie zal de bepalingsmethode aangepast moeten worden om de circulaire aspecten van hout naar voren te laten komen. Op deze manier kan houtbouw bijdragen aan een circulaire economie.

Layman's summary

De impact van een gebouw op het milieu wordt gemeten volgens de bepalingsmethode. De houtbouwindustrie heeft het idee dat ze benadeeld wordt ten opzichte van gebruikelijke materialen zoals beton. Deze review focust zich op de volgende punten:

- Bomen vangen CO₂ af uit de lucht en slaan dit op tijdens de levensduur van een product. Dit komt niet genoeg naar voren in de milieuprestatie. Het tellen van langdurige koolstofopslag (>100 jaar) als permanente opslag zou de milieuprestatie van biobased materialen ten goede komen.
- Er wordt nu aangenomen dat hout verbrandt wordt en biomassa energie vervangt. Hout wordt echter veel gerecycled, dit heeft een enorm gunstige invloed op de milieuprestatie.
- Over de levensduur van houten materialen is nog niet veel informatie beschikbaar. Dit is een belemmering voor de opgang van houtbouw.
- Hout wordt nu veel meer gerecycled dan aangenomen wordt, bovendien zijn er manieren om het op de korte- en lange termijn nog meer te recyclen. Beton wordt nu veel gerecycled naar een laagwaardig product, maar er zijn ook uitvindingen om beton hoogwaardig te recyclen.

Met voldoende aanpassingen van de bepalingsmethode kan een *level-playing field* gecreëerd worden. Hout kan dan een centrale rol spelen in de bouwsector en op die manier bijdragen aan een circulaire economie.



Inhoudsopgave

Inleiding	4
Koolstofopslag	9
End-of-Life aannames	16
Levensduur	21
Recyclingsmogelijkheden	28
Conclusie & aanbevelingen	35
Referenties.....	36



Inleiding

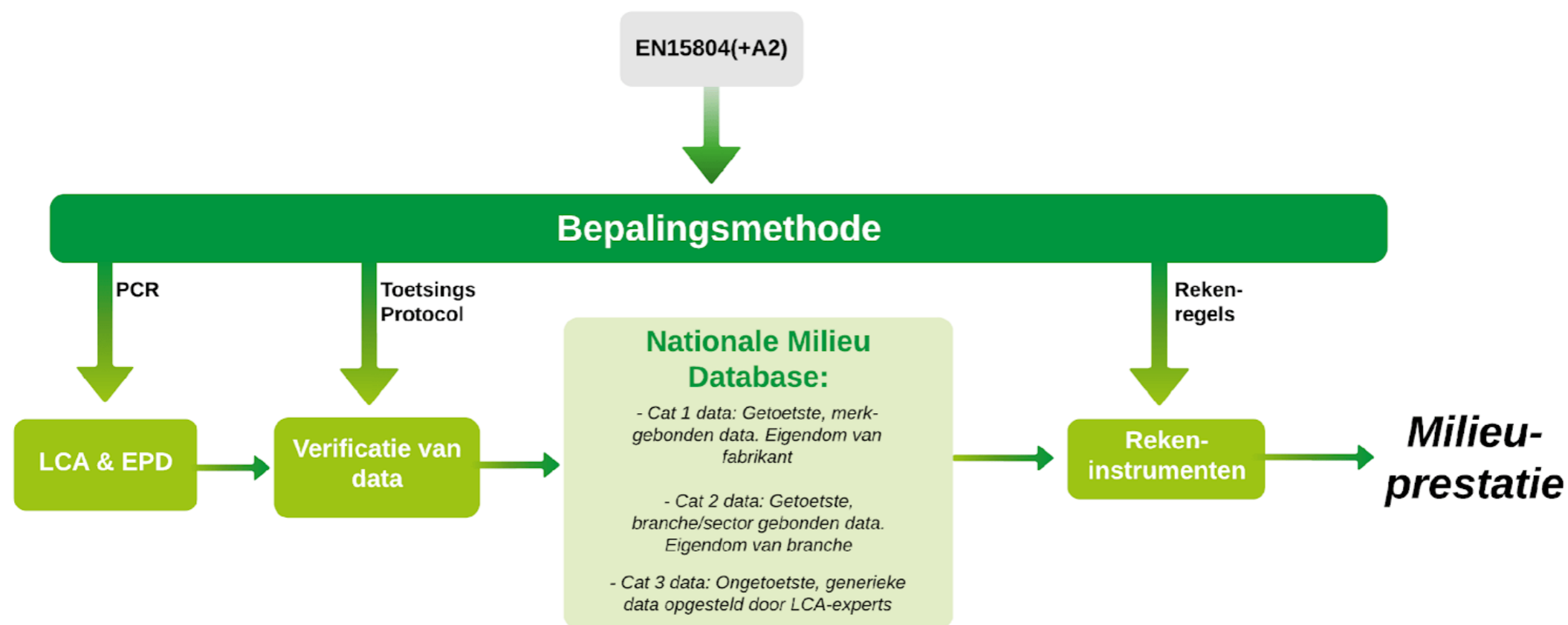
Biobased materialen zoals hout zijn een potentiële manier waarop bouw duurzaam, circulair en laag in emissies kan worden. De huidige Bepalingsmethode veroorzaakt vooral onbegrip bij houtbouwbedrijven, die vinden dat hout in de huidige berekening achtergesteld worden. In deze literatuur review zal ik een overzicht geven van welke aanpassingen voor een *level-playing field* zorgen voor alle materialen binnen de Nationale Milieudatabase. Deze literatuur review zal zich focussen op hout (CLT) als biobased materiaal en (gewapend) beton als conventioneel materiaal.

De Nederlandse overheid heeft zich voorgenomen om voor het jaar 2050 de emissies van broeikasgassen 95% terug te dringen in vergelijking met de emissies in 1990. Om dit te bereiken is er ten doel gesteld om in 2030 de emissies terug te dringen naar 49% (MEZK, 2019). Bovendien is er in het klimaatakkoord opgenomen dat de Nederlandse overheid in 2050 volledig circulair wil zijn. Dit doel valt te behalen door hergebruik, recyclen en efficiënt gebruik van grondstoffen uit duurzame bronnen.



De bouw is een sector waar veel grondstoffen worden gebruikt en veel emissies vrijkomen. Zo wordt er bij de productie van beton grote hoeveelheden water verbruikt, namelijk een biljoen liter drinkbaar water per jaar, wereldwijd (Mindess, 2019). Ook komen er grote hoeveelheden CO₂ vrij, 6-8% van de globale CO₂ commissies. In deze sector valt nog veel winst te behalen op het gebied van circulariteit, stikstofuitstoot, CO₂ uitstoot, zoetwatergebruik en gebruik van andere grondstoffen zoals kalksteen.

Bij de ontwikkeling van bouwprojecten wordt daarom de milieuprestatie gemeten aan de hand van de “Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken” (“Bepalingsmethode”). De bepalingmethode maakt gebruik van LCA's die de gehele levenscyclus van een bouw materiaal in beschouwing nemen door middel van vier modules. Module A betreft de productie- en bouw fase, Module B betreft de gebruiksfase en Module C de sloop- en verwerkingsfase. In Module D wordt de milieu-impact van opwerking en de voordelen van recycling, hergebruik en energierugwinning berekend. Deze module is controversieel maar een verplicht onderdeel van de Bepalingsmethode in Nederland (SND, 2020).



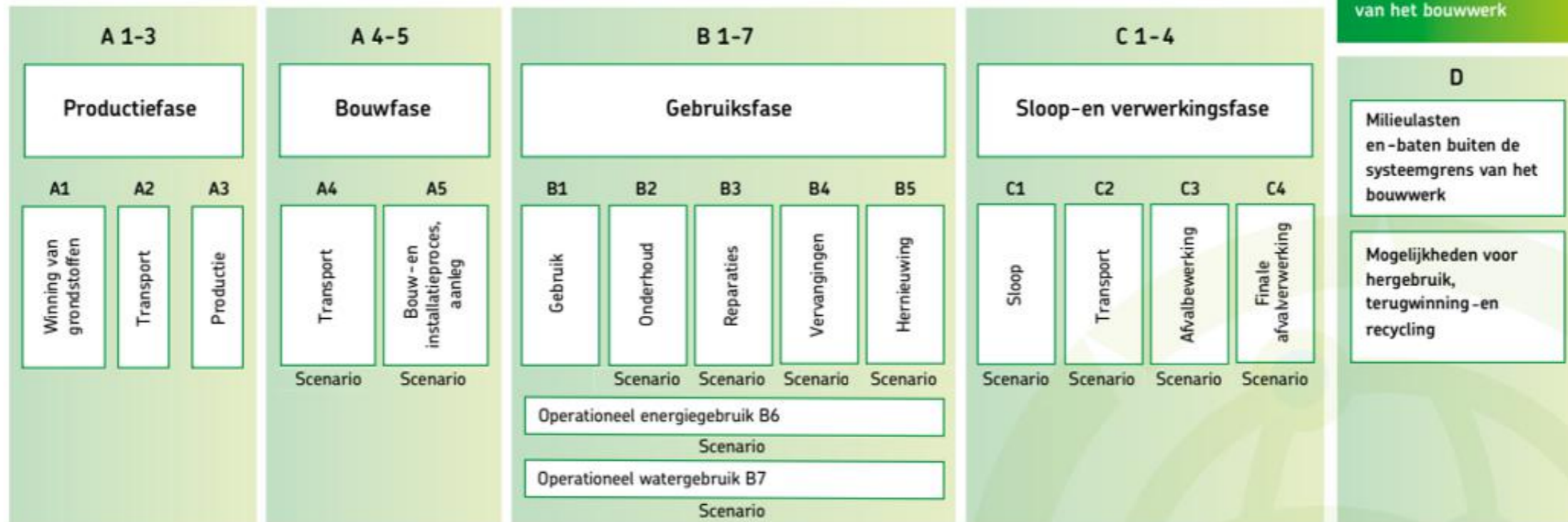
Figuur 1. Overzicht van de NL Bepalingsmethode.



Milieuprestatie bouwwerk

Informatie over de levenscyclus van het product in een bouwwerk

Aanvullende informatie buiten de levenscyclus van het bouwwerk



Figuur 2. Modulaire opbouw van de milieuprestatie bouwwerken.

De Bepalingsmethode

De Stichting Bouwkwiteit (SBK) beheert de Bepalingsmethode 'Milieuprestatie gebouwen en GWW-werken' en daarmee ook de Nationale Milieudatabase (NMD). De bepalingmethode 'Milieuprestatie gebouwen en GWW-werken' is een rekenmethode om de milieulast van gebouwen controleerbaar te bepalen. De impact van verschillende gebouwen kan hiermee worden vergeleken, om eventueel ook de milieuprestatie te verbeteren. De bepalingmethode is de basis geweest voor de Europese norm EN 15804, met een aantal aanpassingen. De methode omvat regels voor de methodiek van LCA's en EPDs, welke gebruikt worden om de lasten in verschillende

impactcategorieën te berekenen (figuur 1). Deze data wordt vervolgens getoetst aan de hand van een protocol dat ook beschreven wordt in de bepalingmethode. Pas dan wordt de milieudata opgenomen in de Nationale Milieudatabase (NMD).

De NMD bestaat uit productkaarten met daarop milieu-informatie vermeld in verschillende impactcategorieën en verdeeld in de modules A tot D. Ook andere informatie zoals levensduur en Milieukostenindicator (MKI) zijn beschikbaar. De productkaarten zijn onderverdeeld in drie categorieën. Categorie 1 omvat merkgebonden data van fabrikanten en toeleveranciers. Categorie 2 omvat merkloze data van groepen van fabrikanten

en/of toeleveranciers en branches. De productkaarten in deze twee categorieën worden getoetst door een onafhankelijke, gekwalificeerde derde partij volgens het NMD-Toetsingsprotocol. Categorie 3 bestaat uit merkloze data van Stichting Nationale Milieudatabase en is niet getoetst volgens het Toetsingsprotocol. De bepalingmethode kan aan de hand van rekenregels, opgesteld door de stichting NMD, omgezet worden in rekeninstrumenten. Uiteindelijk kan met deze rekeninstrumenten en de milieudata in de NMD kan de milieuprestatie van een gebouw worden bepaald.

Volgens de website van de Nationale Milieudatabase wordt met de bepalingmethode een gelijk speelveld gecreëerd voor alle betrokken partijen (SNM, z.d.). Desondanks is er recentelijk veel kritiek op de SBK en de NMD, vooral met betrekking tot de Milieuscore van innovatieve biobased materialen (van Belzen, 2020; van Belzen, 2021).

LCA-methode en modules

De milieuprestatie wordt berekend met behulp van een levenscyclusanalyse (LCA). In lijn met de EN 15804+A2 bestaat het profiel uit 19 impactcategorieën. Binnen een LCA moeten er 4 modules behandeld worden (figuur 2). Module A omvat de productie- en bouwfase. Module B betreft de gebruiksfase, dit is inclusief eventueel onderhoud en/of vervangingen van een gedeelte van het gebouw in kwestie. Hierbij is vervanging van het gebouw als geheel uitgesloten. Module C is de sloop- en verwerkingsfase. Module D omvat de mogelijkheden voor hergebruik.

Module D kent een aantal algemene beperkingen. Zo zijn de systeemgrenzen multi-interpretabel, daardoor kan eenzelfde impact bij module C of D worden ingedeeld, afhankelijk van de interpretatie. Ook gaat de berekeningsmethode uit van een *functional equivalence* voor het berekenen van de voorkomen impact, deze is echter niet zo eenvoudig te achterhalen. Bovendien kan een materiaal op verschillende manieren gerecycled worden en verschillende materialen vervangen. Uiteindelijk kunnen dus ook verschillende milieulasten worden voorkomen. Ook kan er bij een recyclingproces materiaal verloren gaan, dit zou gecorrigeerd kunnen worden met een *justified value correction* factor, maar dit is op dit moment niet het geval.

Naast deze algemene tekortkomingen worden de duurzame aspecten van hout als bouw materiaal niet meegenomen in de Bepalingmethode. De circulariteit en recyclingsmogelijkheden van hout komen niet naar voren in de Nationale Milieudatabase. Er wordt uitgegaan van een levensduur van 100 jaar, waarna het hout wordt verbrand. De verbranding wordt beoordeeld als vervanging van biomassa in plaats van vervanging van een mix van alle energiebronnen (zoals in de rest van Europa), wat leidt tot een 66% minder gunstige score voor hout (NIBE, 2019). Bovendien mag de tijdelijke opslag van CO₂ in hout niet meegenomen worden in LCA's.

Innovatie en de Bepalingmethode

Nieuwe bouwproducten en prototypes worden normaliter getest in een gebruikersomgeving. Om deze praktijktesten en demonstraties uit te voeren moet een bouw materiaal alle certificeringen hebben en opgenomen zijn in de NMD, ook al



bevindt het product zich nog in een ontwikkelingsstadium. In deze fase kunnen er nog verbeteringen, kostenverlaging, en productontwikkelingen plaatsvinden. Veel startups schalen nog op na dit stadium, waardoor een product efficiënter geproduceerd kan worden. Door in de ontwikkelingsfase een LCA uit te voeren op het product is de milieubelasting op de productkaart vaak hoger dan in de werkelijkheid. Bovendien is de levensduur van een innovatief materiaal onbekend en lastig te bepalen. De beschikbare data in de NMD is beperkt voor biobased materialen. Zo is er vaak geen categorie 1 productkaart beschikbaar en moet men uitgaan van een categorie 3 productkaart. Over de generieke data van categorie 3 wordt er een toeslag van 30% gerekend. CO₂-opslag in hout wordt bovendien niet meegerekend in de rekenmethodes. Ook worden er bij de module D (hergebruik) van hout geen recyclingsmogelijkheden aangegeven en wordt er uitgegaan van verbranding. Voor sommige biobased materialen zijn er zelfs geen categorie 3 productkaarten beschikbaar.

De belangrijkste kritiekpunten die naar voren kwamen uit de houtbouwindustrie zijn leidend geweest in de verdeling van de hoofdstukken. De artikelen van Climate Cleanup en TNO dienden als uitgangspunt voor het hoofdstuk *Koolstofopslag*. Gebaseerd hierop verdiepen we ons verder in de literatuur omtrent de EN normen en de methodes om koolstofopslag in de bepalingmethode te integreren. Voor de end-of-life aannames is er literatuur verwerkt over de verdeling van de forfaitaire waarden en studies naar de huidige afvalverwerking van hout en beton. Voor de levensduur starten we bij de EN normen die beschrijven hoe de levensduur bepaald kan worden. Vervolgens heb ik voorbeelden opgezocht van studies die aan deze richtlijnen voldeden. Ten slotte wordt de huidige informatie over levensduur

van hout en beton in de NMD opgezocht en beschreven. Voor het hoofdstuk *Recyclingsmogelijkheden* is opgezocht wat de knelpunten zijn voor houtrecycling. Ook is er verdere verdieping in wat de huidige en toekomstige mogelijkheden zijn voor recyclen van hout en beton.



Koolstofopslag



Biogeen koolstof

Biogeen koolstof is koolstof dat vastgelegd wordt in bomen of andere organismen door middel van fotosynthese. Op dit moment is er vastgelegd in de bepalingmethode dat de biogene koolstof niet in de MPG berekend en vermeld wordt (TNO, 2021). De biogene koolstof wordt wel berekend aan de hand van de -1/+1 methode. De informatie over biogene koolstof wordt berekend bij een LCA en is dus wel beschikbaar, maar niet inbegrepen in de MPG-score. De SBK volgt hiermee de Europese norm EN15804:A2 waarin is bepaald dat de tijdelijke opslag van CO₂ niet meegenomen wordt.

'The effect of temporary carbon storage and delayed emissions, i.e. the discounting of emissions and removals, shall not be included in the calculation of the GWP.' - EN15804:A2

Een aantal decennia geleden was dit een logische keuze, om een overdreven positieve invloed van hout bouw materiaal te voorkomen (Vogtlander *et al.*, 2013). Op dit moment resulteert dit helaas in een MPG score die onderdoet aan de daadwerkelijke

impact. In de Europese norm wordt er gesproken over tijdelijke koolstofopslag. De grens tussen tijdelijk (korte-termijn) en lange-termijn opslag ligt bij 100 jaar. Deze grens is in de politiek tot stand gekomen bij de opstelling van het Kyoto protocol en is vervolgens geadopteerd in LCA praktijken. In de huidige situatie is het opslaan van koolstof, tijdelijk of niet, een manier om koolstof uit de atmosfeer te halen en de Parijs doelen van 2050 te bereiken.

In de EN 16449 wordt de onderstaande formule beschreven voor het berekenen van biogeen koolstof in hout (Formule 1). De formule is gebaseerd op het atoomgewicht van koolstof (12) en koolstofdioxide (44). De *cf* standaardwaarde is 0,5 omdat hout naast 44% zuurstof en 6% waterstof 50% koolstof bevat. Met deze formule wordt de afgevangen CO₂ uit de atmosfeer beschreven. Uiteindelijk zal de koolstofopslag ook verwerkt moeten worden in de LCA of in de MPG-score.

	$P_{CO_2} = \frac{44}{12} \times cf \times \frac{\rho_w \times V_w}{1 + \frac{\omega}{100}}$	
P_{CO_2}	is the biogenic carbon oxidized as carbon dioxide emission from the product system into the atmosphere (e.g. energy use at the end-of-life) (kg);	
cf	is the carbon fraction of woody biomass (oven dry mass), 0,5 as the default value;	
ω	is the moisture content of the product (e.g. 12 (%));	
ρ_w	is the density of woody biomass of the product at that moisture content (kg/m ³);	
V_w	is the volume of the solid wood product at that moisture content (m ³).	

Formule 1. Koolstofdioxide wat vrijkomt bij de oxidatie van biogeen koolstof.



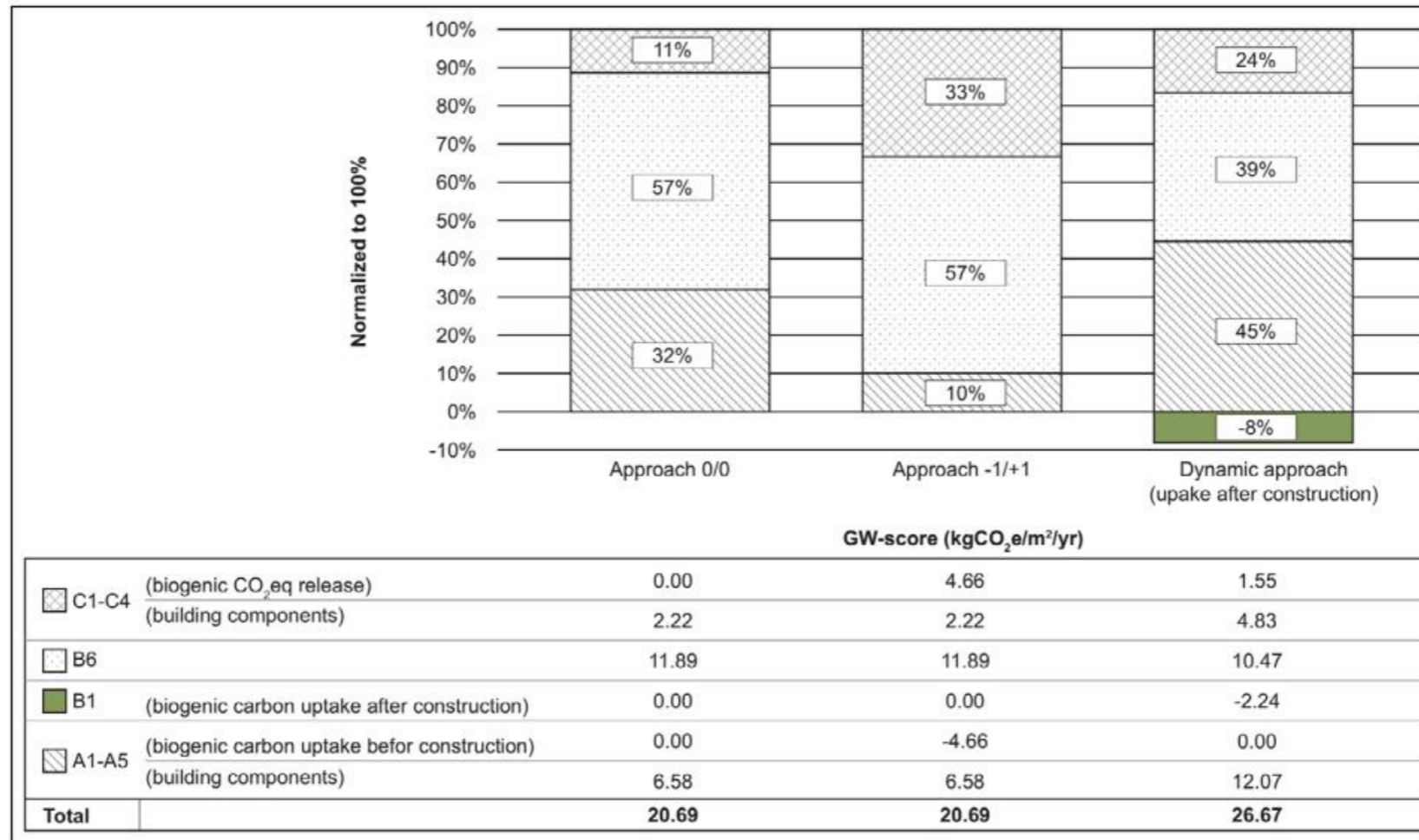
Er verschillende manieren om koolstofopslag binnen de LCA methode te betrekken. In een review geschreven door Hoxha *et al.* (2020) worden de meest voorkomende methodes vergeleken. De voor- en nadelen van de 0/0, -1/+1 en twee dynamische methodes worden uiteengezet en vergeleken aan de hand van een case study van een houten gebouw. De 0/0 methode houdt in dat er geen positieve impact gerekend wordt bij het produceren van biobased materialen en ook geen negatieve invloed door de uitstoot van de biogene koolstof. De -1/+1 methode houdt wel rekening met de opname en uitstoot van biogene koolstof. Deze methodes zouden uiteindelijk dezelfde balans moeten hebben voor biogeen koolstof, maar het voordeel van de -1/+1 methode is dat deze een overzicht geeft van alle biogene koolstof stromen. Hierbij is het belangrijk dat de LCA een volledige levenscyclus beschrijft en niet alleen de productiefase. Bij alleen de productiefase de -1/+1 methode gebruiken leidt tot een verkeerde positieve impact op het milieu. Wanneer de koolstofopslag met de 0/0 of -1/+1 methode meegenomen wordt in een LCA wordt er geen rekening gehouden met de invloed van het moment waarop koolstof vastgelegd of vrijgelaten wordt. Ook de tijd die nodig is om de biobased materialen te laten groeien tot hun *optimal rotation age* is niet meegenomen in deze methodes. Bij de dynamische methodes worden deze twee tijdsgebonden factoren wel inbegrepen in de LCA. Twee dynamische scenario's zijn mogelijk bij het berekenen van de biogene koolstofsekwestering. Bij het eerste scenario gaat men uit van sekwestratie van koolstof voor het biobased materiaal geoogst wordt. Bij het tweede scenario wordt koolstof opgeslagen tijdens het opnieuw groeien van dezelfde hoeveelheid biobased materialen als dat er geoogst is.

In de *case study* blijkt dat, zoals verwacht, de 0/0 en -1/+1 methode dezelfde impact hebben. In de productiefase is de CO₂

impact lager bij de -1/+1 methode omdat er koolstof wordt vastgelegd. In de end-of-lifefase is de CO₂ impact hoger bij de -1/+1 methode omdat er dan koolstof vrijkomt bij de verbranding van het biobased materiaal. Beide methodes hadden een totale score van 20.7 kg-CO₂ e/m²/yr. De dynamische methode, met koolstofopslag na de oogst van het biogene materiaal, kwam uit op een score van 26.67 kg-CO₂ e/m²/yr oftewel een score van 29% hoger dan bij de statische modellen. In figuur 3 kunnen we zien dat de impact in module A1-A5 bijna verdubbeld bij het dynamische model, volgens Hoxha *et al.* vooral dankzij het verwerken van houtrestanten in zagerijen. De koolstofopslag door de hergroeiing van het bos is weergegeven onder module B1. Doordat de *rotation period* 100 jaar duurt wordt alleen een gedeelte van de koolstof die in het gebouw zit opnieuw opgenomen door het bos. Bij het dynamisch model waar de opslag van koolstof in de bomen voor het oogsten plaatsvindt, daar is de biogene koolstofopslag veel hoger. Dit komt doordat de bomen de volledige *rotation period* doorlopen hebben. Hoxha *et al.* benoemen dat het dynamische model met koolstofopslag na het oogsten van de biobased materialen de voorkeur heeft omdat deze transparanter is. Bovendien wordt de tijdsfactor meegenomen bij het opnemen en uitstoten van broeikasgassen en geeft het model een betrouwbare afspiegeling van de biogene koolstofopslag in biobased materialen met een lange levensduur. Ook wordt bij de opslag na het oogsten duurzame bosbouw gestimuleerd.

In een rapport van de ASN Bank en Climate Cleanup (2021) wordt een andere aanpak voorgesteld. Hierbij wordt alleen gekeken naar de koolstof die opgeslagen wordt en niet naar verdere gevolgen binnen de scope van de LCA, zoals gedaan door Hoxha *et al.*. Het rapport redeneert dat de tijdsdimensie voor





Figuur 3. De Global Warming scores van een case study berekend met verschillende biogene koolstof modellen (Hoxha et al., 2020).

opslag van koolstof verschillend is van die van koolstof-stromen. Het integreren van biogene koolstofopslag in een LCA's *Global Warming scores* is dus gebaseerd op een denkfout. ASN Bank en Climate Cleanup stellen voor Construction Stored Carbon (CSC) de volgende formule voor:

Waarbij de $V \times \rho \times C/W$ de koolstof in de constructie beschrijft. Deze wordt vermenigvuldigd met de levensduur met een maximum van 100 jaar. Door de koolstofopslag per 100 jaar weer te geven is het gemakkelijk om de opslag te vergelijken tussen verschillende materialen, met zowel korte- als lange termijn koolstofopslag.

$$CSC = V \times \rho \times C/W \times \frac{L(max100)}{100}$$

V	Volume of material (product)	m ³
ρ	Density of material	kg/m ³
C/W	CO ₂ content per weight	kg CO ₂ / kg material
L(max100)	Lifespan (product or construction) with a maximum of 100	year
Σ€	Total project investment / portfolio value	€ (or other currency)

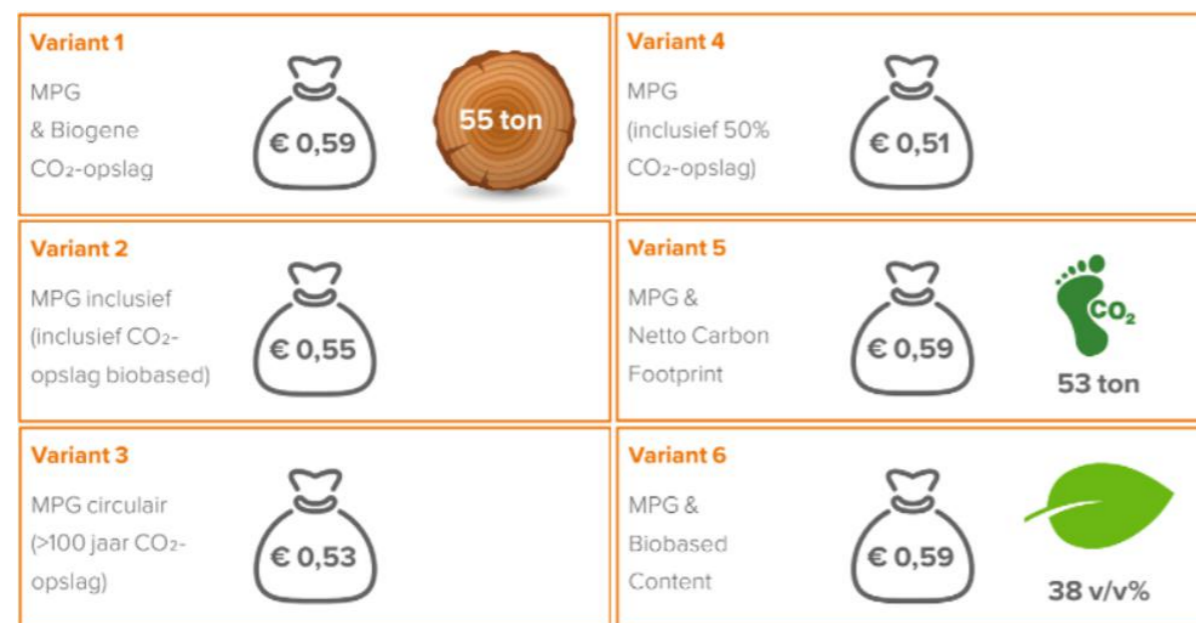
Formule 2. Construction Stored Carbon in kg CO₂ /100 years



Volgens het rapport is er een grote behoefte aan aparte vermelding van koolstofreductie en koolstofopslag. Wanneer deze nummers afgetrokken worden van uitstoot etc. bestaat er een kans op greenwashing. Bovendien noemt het rapport het argument dat de opslag van koolstof een andere eenheid heeft dan de *flow* van koolstofopname. Koolstofopname wordt bijvoorbeeld gemeten in ton/jaar, koolstofopslag is een opslag gedurende een bepaalde periode (ton gedurende x jaar). Logischerwijs kan men de getallen in verschillende eenheden niet van elkaar aftrekken.

Climate Cleanup heeft ook een gratis rekenhulp ([Excel-sheet](#)) beschikbaar gesteld, waarin biobased bouw-initiatieven zelf hun Carbon in Construction kunnen uitrekenen (in ton CO₂).

TNO en the Dutch Green Building Council hebben ook een document gepubliceerd ‘Waarderen van CO₂ prestaties van



Figuur 4. Varianten voor de telling en weergave van koolstofopslag, de weergegeven waardes zijn fictief en dienen alleen als voorbeeld (TNO, 2021)

biobased bouwen’ (2021). In hun rapport stellen ze 6 varianten voor (figuur 4) voor het duidelijk weergeven van CO₂ prestaties van bouwwerken. Bij de eerste variant wordt de MPG bepaalt volgens de huidige bepalingsmethode. Ook wordt de biogene koolstof naast de MPG score weergegeven in ton CO₂ per bouwwerk. Voordelen van deze variant zijn; de Bepalingsmethode hoeft niet aangepast te worden, biogeen koolstof moet bij elke LCA bepaald worden volgens EN 15804:A2, koolstofopslag kan worden gemonetariseerd. Nadelen zijn dat er een nieuwe database biobased materialen moet komen, er geen onderscheid is voor kort- of lang-cyclische opslag, en de biogeen koolstof wordt weergegeven in ton per gebouw. Dit kan een verkeerd beeld geven, maar het kan ook omgerekend worden naar m² bruto-vloeroppervlak.

Bij de tweede variant wordt de opgeslagen koolstof afgetrokken van de CO₂-uitstoot die vrijkomt van de productie. Hierdoor zorgt CO₂ opslag direct voor een lagere MPG-score. Voordelen van deze methode zijn dat het eenvoudig is en de tijdelijke koolstofopslag mee wordt geteld in de MPG. Nadelen zouden zijn dat de Bepalingsmethode moet worden aangepast en er een nieuwe database voor biobased producten nodig is.

Variant 3 gaat uit van circulair gebruik van biobased materialen. Hierbij wordt aangenomen dat CO₂ langer dan 100 jaar opgeslagen blijft in biobased materialen, waarbij deze materialen na hun eerste functie een tweede en/of derde leven krijgen. Voordelen bij variant 3 zou zijn dat de koolstofopslag in de MPG score zou geïntegreerd zijn en bouw met biobased materialen gestimuleerd wordt. Nadelen zijn dat de Bepalingsmethode of EN15804:A2 aangepast moet worden, de milieulast doorgeschoven wordt naar de toekomst, en de aanname van een



levensduur van 100+ jaar en recyclingsscenario's moeten aantoonbaar zijn.

Bij variant 4 wordt er sterk rekening gehouden met de tijdsfactor. De milieueffecten in de toekomst tellen minder zwaar mee, mede omdat ze minder zeker zijn. Module A, productie, wordt voor 100% meegenomen. Module B, gebruik, voor 75%. Module C en D, die 50-75 jaar in de toekomst liggen, worden voor 50% meegeteld. Bij deze variant wordt CO₂ opslag dus voor 50% meegerekend. De percentages kunnen natuurlijk hoger of lager zijn dan voorgesteld in dit voorbeeld. Deze variant heeft als voordeel dat het duurzame prestaties op korte termijn stimuleert en koolstofopslag voor 50% meeneemt in de MPG. Daartegenover staat dat er een wijziging in de Bepalingsmethode nodig is, er grote aannames gemaakt worden, de methode is minder inzichtelijk, en er moet worden afgeweken van de EN 15804. Bovendien worden alle toekomstige milieueffecten gehalveerd, niet alleen koolstofuitstoot, wat misleidend kan zijn.

Variant 5 houdt in dat er naast de normale MPG berekening ook de netto *carbon footprint* weergegeven wordt. Deze *carbon footprint* neemt mee; de CO₂-uitstoot van productie en de biogene koolstofopname van het gehele gebouw. Dit heeft als voordeel dat de Bepalingsmethode niet aangepast hoeft te worden, de CO₂ prestatie inzichtelijk wordt gemaakt en aansluit op de al bestaande CO₂ boekhouding-systemen. Nadelen zijn dat er geen inzicht is in de CO₂ prestatie per module en dat de netto *carbon footprint* weergegeven wordt in ton per gebouw. Dit kan een vertekend beeld geven, maar de netto *carbon footprint* kan ook omgerekend worden naar m² bruto vloeroppervlak.

De laatste variant, variant 6, geeft de MPG-score weer. Daarnaast wordt de biobased inhoud van het bouwwerk weergegeven. Dit wordt uitgedrukt in volume-percentages (v/v%) per gebouw. In de bouw worden doorgaans zware materialen gebruikt, bij een vergelijking gebaseerd op massa zouden biobased materialen zoals hout in het niet vallen. Deze methode heeft als voordeel dat de Bepalingsmethode niet aangepast hoeft te worden terwijl het biobased bouwen en materiaal-efficiëntie stimuleert. Het duidelijke nadeel van deze methode is dat er geen duidelijkheid is over de koolstofopslag, bovendien moet er worden omgerekend van massa naar volume.

Bij variant 2, 3 en 4 moeten de bepalingmethode en EN15804:A2 gewijzigd worden. Bij variant 2 en 4 zou het gaan om een significante wijziging. Bij variant 2 moet CO₂ in mindering worden gebracht van de CO₂-uitstoot van de productie- en gebruiksfase. Bij variant 4 moeten de weging van CO₂-uitstoot van module B, C en D worden aangepast. Bij variant 3 is een 'kleine' wijziging nodig van de EN 15804. Daarin staat een uitzonderingsclausule waarin expliciet wordt vermeld dat biogene koolstof niet meegenomen mag worden in de milieuprestatie. Bij de overige varianten wordt de biogene koolstof naast de MPG weergegeven en is een wijziging dus niet nodig. Echter, wanneer de biogene koolstof naast de MPG wordt weergegeven is er dus geen integratie met de MPG score.

Hoewel er wel degelijk formules zijn opgesteld die de opname van koolstof goed weergeven, zoals die door de ASN Bank en Climate Cleanup, is het nog discutabel hoe deze het best vermeld kan worden. De biogene koolstof kan in de MKI-score worden verwerkt, waardoor de opgeslagen CO₂ een directe positieve invloed heeft op de milieubelasting van een materiaal. Of de



biogene koolstof kan naast de MKI-score worden weergegeven. Hiermee wordt meer inzage gecreëerd, biogene koolstof komt immers uiteindelijk weer vrij in het milieu. Het nadeel van een separate weergave is dat het voordeel van opgeslagen koolstof minder duidelijk naar voren komt. Hetzelfde geldt voor varianten 4 en 5, waar de opgeslagen koolstof nog een stap verder van de MKI-score afstaat.

Bovendien blijkt het lastig om het (hypothetische) verminderde belang van de impact van koolstofuitstoot in de toekomst uit te drukken in een formule. De hoeveelheid uitgestoten CO₂ (bij bijv. verbranding) zal namelijk hetzelfde zijn als nu, dus zal een vermindering van Module C en D een overdreven positieve impact weergeven. Doch laat dit wel het belang zien van op dit moment CO₂ filteren uit de atmosfeer, nu we een opwarming van >2°C en een positieve feedbackloop nabij zijn.

Variant 3, MPG circulair (>100 jaar CO₂-opslag), laat het belang zien van koolstofopslag. Aan de voorwaarden kan worden voldaan, zo is een tweede/derde leven goed mogelijk voor houtproducten, zoals ook duidelijk wordt in *Recyclingsmogelijkheden*. Belangrijk is dat duurzaam geteeld hout evenveel CO₂ opneemt als dat het uitstoot door verbranding, in een relatief korte cyclus, bijvoorbeeld vergeleken met fossiele grondstoffen. Door veel hout te gebruiken (in de bouw) wordt er ook meer houtteelt gestimuleerd, waardoor koolstof opgeslagen wordt in deze geplante biobased grondstoffen. Ondertussen blijft het (hout)product voor een lange tijd zitten in een gebouw waardoor er bovendien koolstofopslag is in het gebouw.

Naast koolstofopslag in biobased materialen zijn er ook innovatieve betonproducten die koolstof opslaan. CarbiCrete, Blue Planet Ltd. en Solidia zijn voorbeelden hiervan. Deze gebruiken verschillende technieken, zo maakt CarbiCrete gebruik van staalslakken (*steel slag*) om koolstof vast te leggen in beton. Solidia vervangt kalksteen door *wollastonite*, waardoor er minder CO₂ vrijkomt. Blue Planet Ltd. gebruikt gerecycled beton om kalksteen te vervangen en CO₂ op te nemen in hun beton. Blue Planet wordt ook besproken onder *Recyclingsmogelijkheden*. Dit vastgelegde CO₂ komt niet vrij in de verwerkingsfase en mag daarom wel meegeteld worden in de LCA's.

Hout

- + vangt CO₂ op door te groeien
- + opslag wordt meegenomen door -1/+1 methode
- CO₂ komt ook weer vrij
- tijdelijke opslag niet duidelijk in MPG-score



Beton

- + slaat CO₂ permanent op
- + opgenomen in de MPG-score
- hoge CO₂ uitstoot bij productie



End-of-Life aannames



End of life Hout

De end-of-lifefase voor een materiaal is wanneer het zich aan het einde van de productlevenscyclus bevindt. Aan het einde van de productlevenscyclus, bijvoorbeeld bij de sloop van een gebouw, kan een product verwerkt worden als afval (*waste*), gerecycled of hergebruikt worden. Voor biobased materialen zijn de stappen in de end-of-lifefase nog onduidelijk. In dit stuk zal ik de verwerking van houtafval bespreken, omdat hierover het meest bekend is in vergelijking met andere biobased materialen.

Houtafval is onderverdeeld in drie categorieën, categorie A is schoon en onbehandeld hout, B is bewerkt hout dat geïmpregneerd is, en C is geïmpregneerd oftewel ‘verduurzaamd’ hout. Bij categorie A wordt er in de bepalingmethode uitgegaan van verbranding van 80-85% van het hout aan het einde van de levensduur, slechts 5-10% wordt gerecycled (tabel 1). Bij hout van categorie B en C wordt er uitgegaan van een

verbrandingspercentage van 90-95%, de rest gaat naar de stort. C-hout mag alleen in speciale verbrandingsinstallaties verwerkt worden. Dit komt doordat geïmpregneerd hout chemicaliën bevat die schadelijk zijn voor mensen en het milieu. Deze chemicaliën worden gebruikt om rot en insecten te bestrijden.

Gelukkig wordt uit beide verbrandingsscenario's, zowel voor A-, B- als C-hout, energie gewonnen. Dit moet momenteel genoteerd en berekend worden als energie die energie van biomassacentrales vervangt. Deze biomassacentrales verbranden groente-, fruit- en tuinafval, slachtafval, en papier en karton. Biomassa is goed voor 5% van de energie die we in Nederland gebruiken (van Poppel & Bol, 2020). Bij het opwekken van 1 gigajoule d.m.v. biomassa-verbranding komt 109 kg CO₂ equivalenten vrij. Dit is meer dan bij steenkool (97,5 kg), aardgas (56,6 kg) en aardolie (73,3 kilo). Toch waren wetenschappers van mening dat biomassaverbranding een duurzame energiebron is. De bomen die gekapt worden voor verbranding worden namelijk weer opnieuw geplant en slaan daardoor weer de CO₂ op die bij verbranding vrijkomt (zie *Biogeen koolstof*). De vraag is echter of dit niet te lang duurt om een globale opwarming van 2 graden te voorkomen. Het duurt namelijk een aantal decennia voordat bomen dezelfde hoeveelheid koolstof hebben opgeslagen die vrijkwam bij verbranding. Bovendien wordt hout ook geïmporteerd en getransporteerd over grote afstanden, voordat het wordt verbrand. Biomassa-energie is daarmee ook niet zo duurzaam als energie opgewekt uit wind of zonlicht. Vergeleken met fossiele brandstoffen komt er bij biomassaverbranding wel meer CO₂ vrij, hoewel dit wel weer weggevangen wordt op relatief korte termijn. Overigens is bij biodiesel (76,8 kilo), biogas uit rioolwaterzuiveringsinstallaties (84,2 kilo) en industrieel fermentatiegas (84,2 kilo) de CO₂ uitstoot beperkter. Door



houtverbranding als vervanging van biomassa-energie te tellen, bespaar je dus meer CO₂ uitstoot dan door hout als vervanging van de nationale energiemix te tellen (figuur 5). Deze telling lijkt misschien logisch omdat hout biomassa is, maar tegelijkertijd hoeft de hoeveelheid energie die opgewekt wordt door houtafval te verbranden niet meer opgewekt te worden door alle andere bronnen. Stel, je wekt 1 gigajoule energie op door houtafval te verbranden, dan hoeft het geheel van energiebronnen weer 1 gigajoule minder op te wekken. Daarmee bespaar je dus bij de gehele energiemix energie, in verhouding naar de nationale verdeling van energieopwekking. Op dit moment is het wel voordelig voor de milieuprestatie van hout, als er wordt uitgegaan van een besparing (biomassa)verbranding van houtafval. Voor een accurate score zou men echter uit moeten gaan van de vervanging van de nationale energiemix.

Voor categorie A- en B-hout zijn er echter manieren om te recycleren. In Nederland wordt jaarlijks 560 kton gebruikt voor

recycling en 1180 kton voor energieopwekking (Gemax, 2020). Vanuit o.a. de Rijksoverheid zijn er plannen om het aandeel van gerecycled hout (nu 32%) te verhogen (zie *Recyclingsmogelijkheden*).

Wanneer versnippering en recycling van hout vergeleken wordt met verbranding van hout lijkt het erop dat de verbranding voor minder emissies zorgt dan recycling (figuur 6). Hiervoor zijn twee redenen. Ten eerste is de vermeden impact laag, omdat hout vaak gerecycled wordt als houtsnippers (Bijleveld *et al.*, 2020). Houtsnippers hebben van zichzelf een lage milieubelasting, door dit product te vervangen wordt dus ook een lage milieubelasting vermeden. Ten tweede wordt de koolstofdioxide die vrijkomt bij houtverbranding niet meegerekend in de milieubelasting. Zoals besproken onder *Biogeen koolstof* is deze rekenmethode discutabel. Door hout te recycleren wordt voorkomen dat de koolstof direct in de atmosfeer terecht komt, helaas is dit dus niet duidelijk in een LCA. Bovendien zorgt het recycleren van hout ook

Tabel 1. Forfaitaire waarden voor verwerking-scenarios end-of-lifefase.

Stroom	Specificatie	% verlies	Verdeling over fracties [%]				
			Laten zitten	Stort	AVI	Recycling	Hergebruik
beton	o.a. elementen, metselwerk, gewapend beton		0	1	0	99	0
beton, cellenbeton	o.a. elementen, blokken		0	1	0	99	0
beton, heipalen, bebouwdeomgeving	heipalen bebouwde omgeving		80	1	0	19	0
beton, heipalen, vrijeruimte	heipalen vrije ruimte		0	1	0	99	0
hout, 'schoon'	bekisting		0	0	10	10	80
hout, 'schoon'	o.a. balken, planken		0	5	80	10	5
hout, 'schoon'	via restmateriaal		0	10	85	5	0
hout, verontreinigd	o.a. geschilderd, verduurzaamd		0	5	95	0	0
hout, verontreinigd	via restmateriaal		0	10	90	0	0

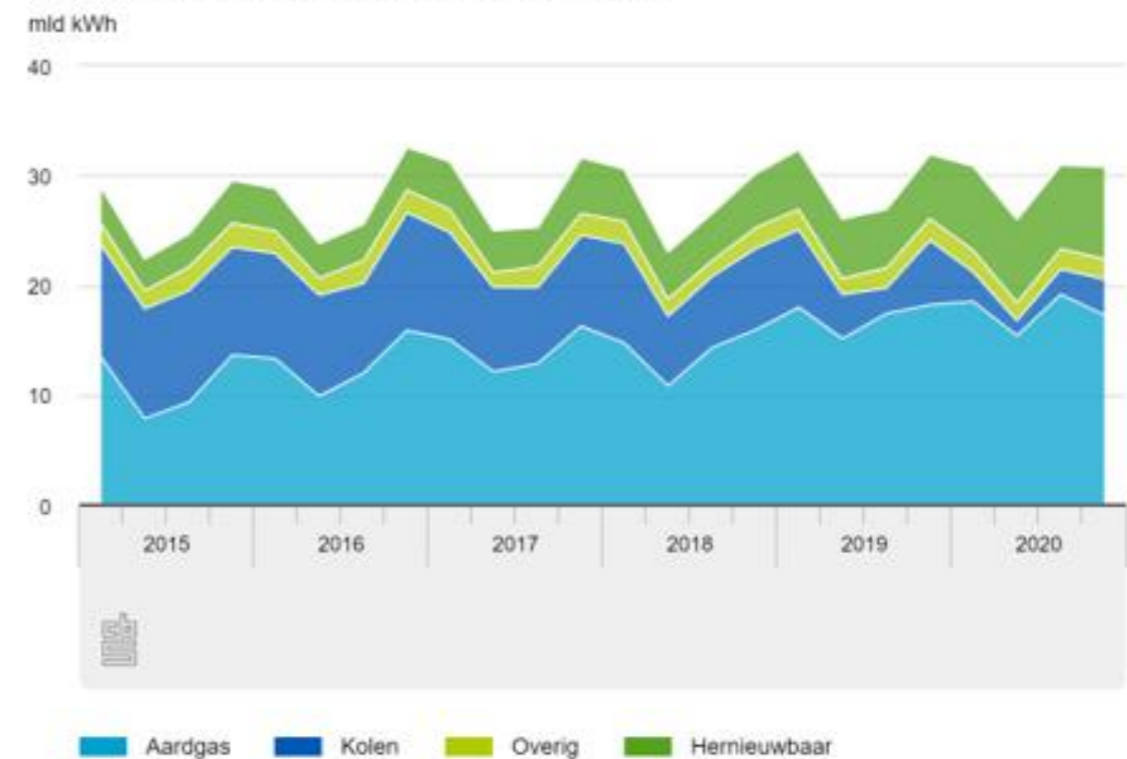


voor andere voordelige effecten die niet naar voren komen in de *Global Warming Potential*, bijvoorbeeld in de categorieën landgebruik en bosbouw.

Hout kan goed hergebruikt of gerecycled worden, zie *Recyclingsmogelijkheden*. Als dit niet meer kan, kan hout begraven worden waardoor de biogene koolstof via de aarde opgenomen zal worden in de koolstofcyclus. *Waste burial* kan de koolstofopslag verlengen tot wel 100-1000 jaar (Zeng, 2008). Een 5 hectare grote stortplaats kan 1 megaton CO₂ opslaan voor \$14/tCO₂. Dit maakt het opslaan van hout onder de grond tot een goedkope optie, vooral wanneer we de schaduwkosten van houtverbranding meenemen. Deze schaduwkosten zullen over 75 jaar nog hoger zijn, waardoor verbranding een steeds minder aantrekkelijke optie wordt.

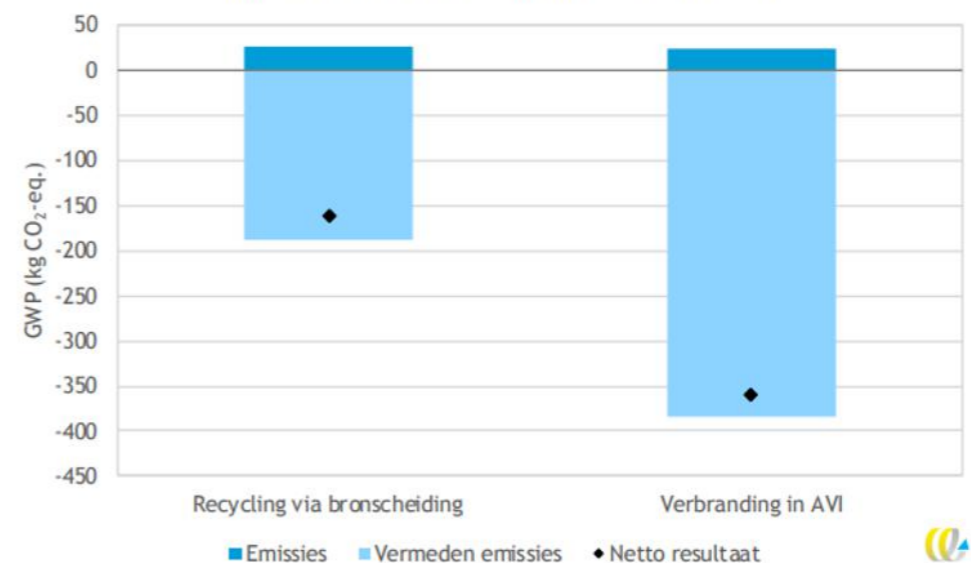
De forfaitaire waarden met hoge verbrandingspercentages worden door velen beschouwd als achterhaald, aangezien er een globale verschuiving richting een klimaatbewuste maatschappij onvermijdelijk lijkt. Zowel de Nederlandse overheid als grote corporaties zoals Shell hebben rechtszaken verloren waarbij besloten is dat zij hun CO₂ uitstoot moeten terugbrengen. Het is waarschijnlijk dat er over 75 jaar, wanneer een houten CLT-wand van nu op het einde van zijn levensduur is, een andere manier van afvalverwerking, zoals *waste burial*, de voorkeur heeft (Climate Cleanup & ASN Bank, 2021). De enige voorwaarde voor *waste burial*, is dat het hout niet geïmpregneerd is. De forfaitaire waarden van de NMD schatten de afvalscenario's van hout nadelig in. Niet alleen worden de huidige recyclingsmethodes niet gewaardeerd, scenario's over 75 jaar zullen drastisch anders zijn dan de huidige afvalverwerkingsscenario's. Het is van belang dat de waarden gereviseerd worden naar een meer accurate verdeling van verwerkingsscenario's. Dit zou een enorme positieve impact

Elektriciteitsproductie per type energiedrager



Figuur 5. Energiemix in Nederland.

Klimaatimpact verwerking houtafval (1 ton)



Figuur 6. Global Warming Potential van 1 ton houtafval verwerkt via recycling of via verbranding (Bijleveld et al., 2020)



hebben op de milieubelasting van hout, wat hout en andere biobased materialen tot aantrekkelijke alternatieven maakt.

De forfaitaire waarden voor verwerking-scenario's van beton geven aan dat 99% van sloopbeton gerecycled wordt, slechts 1% gaat naar de stort. Dit is een belangrijke reden waardoor de MKI-score van beton zo laag is. Door 99% te recyclen in Module D mag je de voorkomen impact door te recyclen wegstrepen tegen de productieimpact (zie *Recyclingsmogelijkheden*). Echter, deze recyclingsmogelijkheden zijn beperkt, en benaderen een verzadigde markt. De forfaitaire waarden voor beton zijn dus overdreven positief ingeschat.

De huidige forfaitaire waarden geven een onrealistisch beeld van zowel het end-of-lifescenario van hout als van beton. Om een vertekende perceptie van de duurzaamheid van deze materialen tegen te gaan zullen de forfaitaire waarden moeten worden aangepast.

Hout

- nu veel verbranding van houtafval
- direct uitstoot van vastgelegd CO₂
- + vervangt biomassa energie
- + lange termijn opslag CO₂ door *waste burial*



Beton

± 99% recycling, vooral downcycling



Levensduur



De levensduur- bepaling in ISO 15686

De levensduur van een materiaal of product wordt vermeld op de productkaarten in de Nationale Milieudatabase. De levensduur van een materiaal heeft vanzelfsprekend veel invloed op de duurzaamheid van het materiaal. Zo moet een onderdeel vervangen worden als de levensduur van dat onderdeel korter is dan dat van het gebouw. Dit wordt meegenomen in de berekening van Module B van de LCA. Ook kan een product in theorie vaker gerecycled worden wanneer de levensduur langer is.

De richtlijnen voor de bepaling van de levensduur staan vermeld in ISO 15686. In dit document wordt gesproken over de *Service Life Prediction* (SLP). Deze kan bestaan uit een studie op basis van 1) versnelde korte-termijn blootstelling, 2) extrapoleren van bestaande soortgelijke producten, 3) extrapoleren van

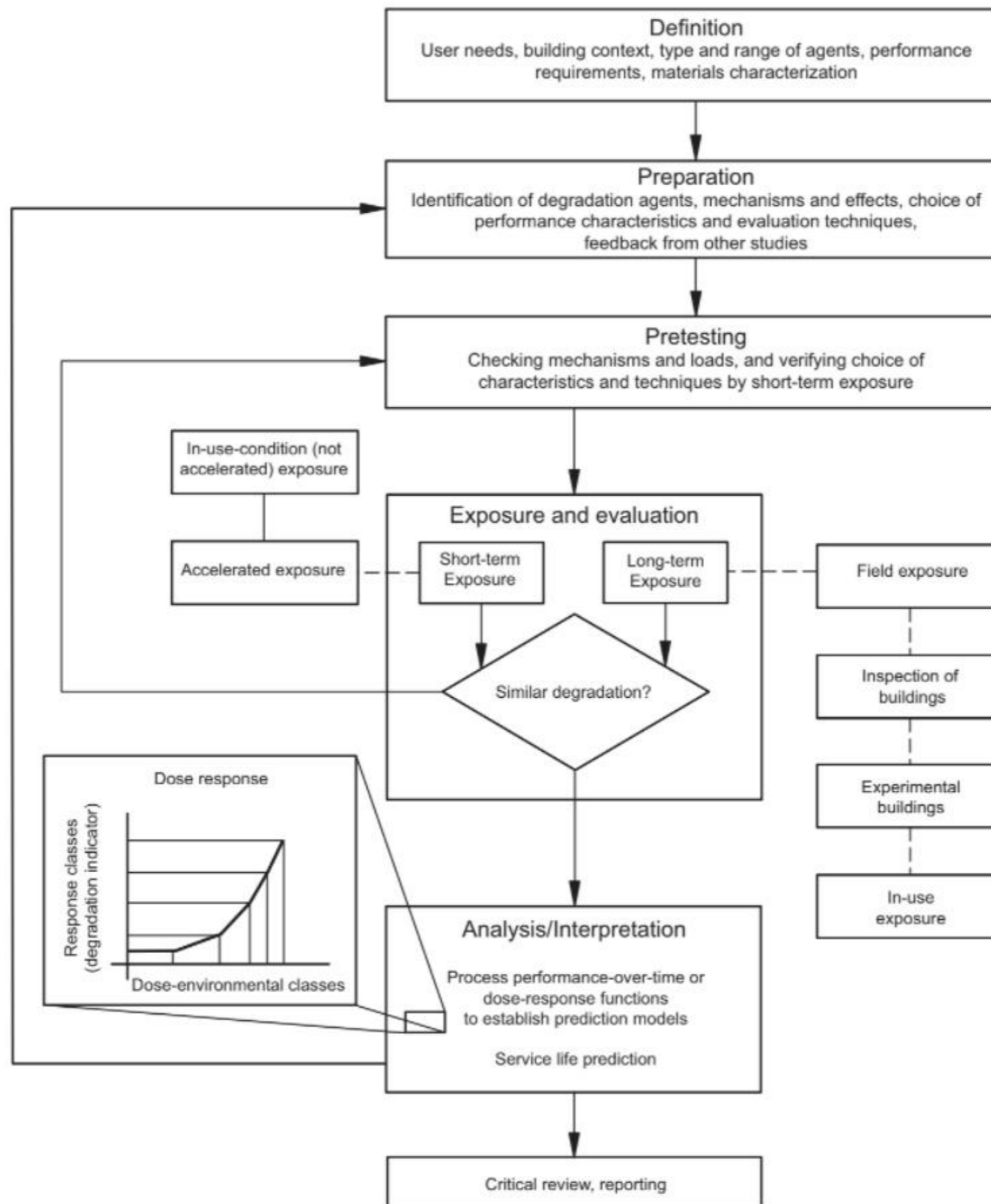
vergelijkbare gebruiksomgevingen of 4) extrapoleren van korte-termijn gebruikstesten. In figuur 7 zijn de stappen van de *Service Life Prediction* weergegeven.

Studies met de hierboven genoemde informatie kunnen bijdragen aan een inschatting van de levensduur van een materiaal of product. De geteste condities in een studie zijn vaak verschillend van *real-life* condities. Daarom zijn er in ISO 15686-8 een aantal factoren (tabel 2) opgesteld om te corrigeren voor verschillen tussen de omstandigheden beschreven in de studie en de verwachte omstandigheden. De onderstaande formule maakt gebruik van deze factoren en de *reference service life*. De *reference service life* is de levensduur zoals beschreven in de literatuur. De factoren zijn afhankelijk van de verwachte omstandigheden, ze kunnen variëren binnen de waardes die zijn beschreven in tabel 3. Deze tabel is gebaseerd op een voorbeeld met ramen. X_5 is hier de waarde waar 5% van de producten onder zal liggen, X_{50} is de waarde waar 50% onder en boven ligt, X_{95} is de waarde waar 5% boven zal liggen. De *reference service life* en de factoren worden gebruikt om de *estimated service life* (ESL) te berekenen.

$$ESL = RSL \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G$$

De wetenschappelijke studies naar de levensduur van materialen maken gebruik van verouderingstesten (*aging tests*). Deze testen kunnen zijn; klimaatkamers, blootstelling aan UV-radiatie, foto oxidatie, thermische oxidatie, water absorptie, microbiële en chemische degradatie en combinaties van deze methodes (Chang *et al.*, 2020). Na het ondergaan van dit soort testen vertonen materialen verslechtering van moleculair gewicht en





Figuur 7. Schematische weergave van de stappen in ISO 15686 voor de bepaling van een levensduur



Tabel 2. De factoren voor de formule voor de estimated service life (ESL).

Factor	Factor category	Condition	Factor value ϕ
A	Inherent performance level	Since particularly high demands are being made on material quality and a quality check will take place when receiving goods, this is assumed to give a 25 % longer service life than is currently the case with products on the market.	1,25
B	Design level	The design level is estimated to be equivalent to the average level.	1,0
C	Work execution level	Also here, the level is estimated to be equivalent to the average level.	1,0
D	Indoor environment	The indoor environment is not expected to be different from that for dwellings in general.	1,0
E	Outdoor environment	The climate is the same as that for the RSL.	1,0
F	Usage conditions	Here, also, the conditions are not expected to be different from those for dwellings in general	1,0
G	Maintenance level	The maintenance level is expected to be the same as the average for the RSL.	1,0

mechanische eigenschappen, scheuren, kleurverschillen, vervormingen etc. Bij polymeren (zoals cellulose) is het belangrijkste aspect van verval de afname in het moleculaire gewicht, door het breken van polymeren. Het verouderingsproces van polymeren is doorgaans minder complex dan dat van composietmaterialen (zoals CLT).

Naar de *durability* van CLT en andere biobased materialen zijn veel onderzoeken gedaan. De review van Chang *et al.* (2020) beschrijft een aantal belangrijke studies naar biobased materialen en geeft een overzicht van de meest voorkomende technieken en analyses. Een voorbeeld van een specifiek *durability* onderzoek is

dat van Wang *et al.* (2018) waarin de CLT bindingskwaliteit en *durability* gemeten wordt aan de hand van *block shear* en *delamination* testen. Twee soorten lijm worden getest, *polyurethane* (PUR) en *emulsion polymer isocyanate* (EPI). De studie focust dus op twee aspecten; de geschiktheid van deze twee bindingsmiddelen en de *durability* van de binding met CLT. Uit het onderzoek kwam onder andere dat de druk waarmee de lijm wordt aangebracht tot een significant verschil leidt in *durability* van het CLT. Bij lijm dat met een hoge druk wordt aangebracht wordt er minder delaminatie (loslaten van lagen composiet materiaal) van CLT waargenomen. De auteurs hypothetiseren dat dit het gevolg is van een diepere permeatie van de lijm in CLT



waardoor de ruimte tussen de houtlagen kleiner is en er minder houtoppervlakte blootgesteld wordt aan water.

Water en vocht is een van de belangrijkste factoren bij de veroudering van houtproducten zoals CLT. In een review door Udele *et al.* (2021) staat dat binnendringen van vocht in een materiaal kan leiden tot scheuren en verminderde mechanische eigenschappen. Bovendien kan een vochtgehalte van 30% of hoger leiden tot schimmel. De review zet uiteen hoe er tot op heden veel laboratorium-studies zijn gedaan waarbij de geteste condities te extreem zijn in vergelijking met de condities van de uiteindelijke bestemming van CLT. Ook zijn er studies waarbij CLT niet in het lab aan gesimuleerde condities wordt blootgesteld, maar waarbij het buiten in natuurlijke weercondities wordt geplaatst (Bobadilha *et al.*, 2021). Ook dit creëert te extreme omstandigheden, omdat CLT normaliter niet in directe regen en zon wordt geplaatst. Om tot realistische *Service life predictions* te komen, is er volgens Udele *et al.* meer onderzoek nodig met: 1) Methodes die gebruik maken van test-monsters op schaal en met elementen zoals ongelijmde randen. Om deze te testen zijn grote klimaatkamers nodig. 2) Simulaties van realistische vocht-cycli om verval te simuleren zonder het monster overmatig te bevochtigen. 3) Sterilisatie processen welke vervuilende funghi verwijderen, het houtmonster niet beïnvloeden en het vochtgehalte op het juiste niveau houden voor de te testen funghi. 4) Optimale temperatuur condities (23-30°C) in de klimaatkamer om de schimmelgroei gedurende de inoculatie te onderhouden. 5) Analyse-methodes die verder gaan dan massaverlies, zoals chemische tests en nondestructive imaging, om het verval vast te leggen. 6) Vochtvasthoudende condities zoals deze voorkomen in gebouwstructuren, met focus op de verbindingen tussen CLT.

Tabel 3. Grenswaarden voor de factoren voor de ESL formule.

Factor	Factor category	Directions	Conditions	Factor values		
				ϕ_{x5}	ϕ_{x50}	ϕ_{x95}
A	Inherent performance level	All	Good quality with normal variations	1,2	1,5	1,8
B	Design level	All	Good design without variations	—	1,2	—
C	Work execution level	All	Normal variations but bigger mistakes fixed	1,0	1,2	1,5
D	Indoor environment	S	Small risk of condensation	0,9	1,0	1,2
		W	Average risk of condensation	0,8	0,9	1,1
		N	High risk of condensation	0,7	0,8	0,95
		E	Average risk of condensation	0,8	0,9	1,1
E	Outdoor environment	S	Occasional fluctuations wet/dry	0,8	1,0	1,3
		W	Frequent fluctuations wet/dry	0,6	0,8	1,0
		N	Rain sheltered	1,0	1,2	1,5
		E	Occasional fluctuations wet/dry	0,8	1,0	1,3
F	Usage conditions	S	Rare access by children	0,8	1,0	1,2
		W	Frequent access by children	0,6	0,8	1,0
		N	Access by children at times	0,7	0,9	1,1
		E	Rare access by children	0,8	1,0	1,2
G	Maintenance level	All	Re-painting according to manager's assessment	0,9	1,0	1,1



Ook noemt het artikel dat een centraal datapunt met vrij uitwisseling van informatie tussen stakeholders essentieel is.

Ondertussen zijn er wel studies gedaan die de levensduur van CLT getest of aangenomen hebben. In een review waarin 9 artikel behandeld worden wordt de levensduur door alle artikelen op 50-60 jaar geschat (Cadorel & Crawford, 2018). Veel houtproducten zijn geïmpregneerd, oftewel resistent gemaakt tegen rot, schimmel, vraat, etc. Dit kan door middel van chemicaliën, verhitting en meer. Hierdoor is de levensduur van bewerkt hout vele malen langer dan wat hout van nature heeft (Ormondroyd *et al.*, 2015).

Een artikel door Friedrich (2018) heeft een andere aanpak. Deze methode voorspelt door middel van algoritmes de afname van de materiaalsterkte. De algoritmes konden correct de afname in sterkte voorspellen en kunnen met enige voorzichtigheid ook gebruikt worden om een voorspelling te maken van de nabije toekomst.

In de Nationale Milieudatabase staan momenteel meerdere productkaarten voor verschillende soorten Cross Laminated Timber. De NMD heeft zelf 8 productkaarten toegevoegd, van 3-tot 5-laagse wanden en vloeren. Bij deze categorie 3 (zie het hoofdstuk *De bepalingsmethode*) productkaarten is de levensduur 75 jaar of 1000 jaar. Voor CLT zijn er zes categorie 1 productkaarten beschikbaar. Deze productkaarten vermelden een levensduur van 100 jaar. Dit lijkt overeen te komen met bovengenoemde studies, of deze zelfs te overtreffen. Voor CLT en andere biobased producten is het belangrijk dat er meer categorie 1 productkaarten met een accurate levensduur beschikbaar zijn in

de NMD. Alleen zo kunnen ze een milieuscore krijgen die een realistische afspiegeling geeft van hun milieubelasting. Categorie 3 productkaarten zijn niet optimaal, vanwege de toeslag van 30%.

Voor beton is er veel meer informatie beschikbaar. Zo zijn de belangrijkste problemen voor de levensduur geïdentificeerd (Tang *et al.*, 2015). Een van deze problemen zijn alkali-aggregaat reacties, reacties tussen alkaliën in porie-oplossingen en sommige actieve chemicaliën van aggregaten. Deze reacties worden in verband gebracht met een hoog vochtgehalte, alkali-gehalte, poreusheid van het beton en temperatuur. Het tweede probleem is sulfaataantasting, dit zorgt voor expansie van het beton. Het uitzetten van beton komt door de reactie van sulfaat ionen met hydratatieproducten. Een van de meest problematische duurzaamheidskwesties is staal corrosie. Betonkwaliteit en dikte zijn essentieel voor de snelheid van de corrosie. Het laatste probleem dat besproken wordt, is bevriezen en ontdooien. Het verval dat hiermee gepaard gaat is in verband gebracht met de aanwezigheid van water, maar kan niet volledig worden verklaard door de uitzetting van water bij bevriezing.

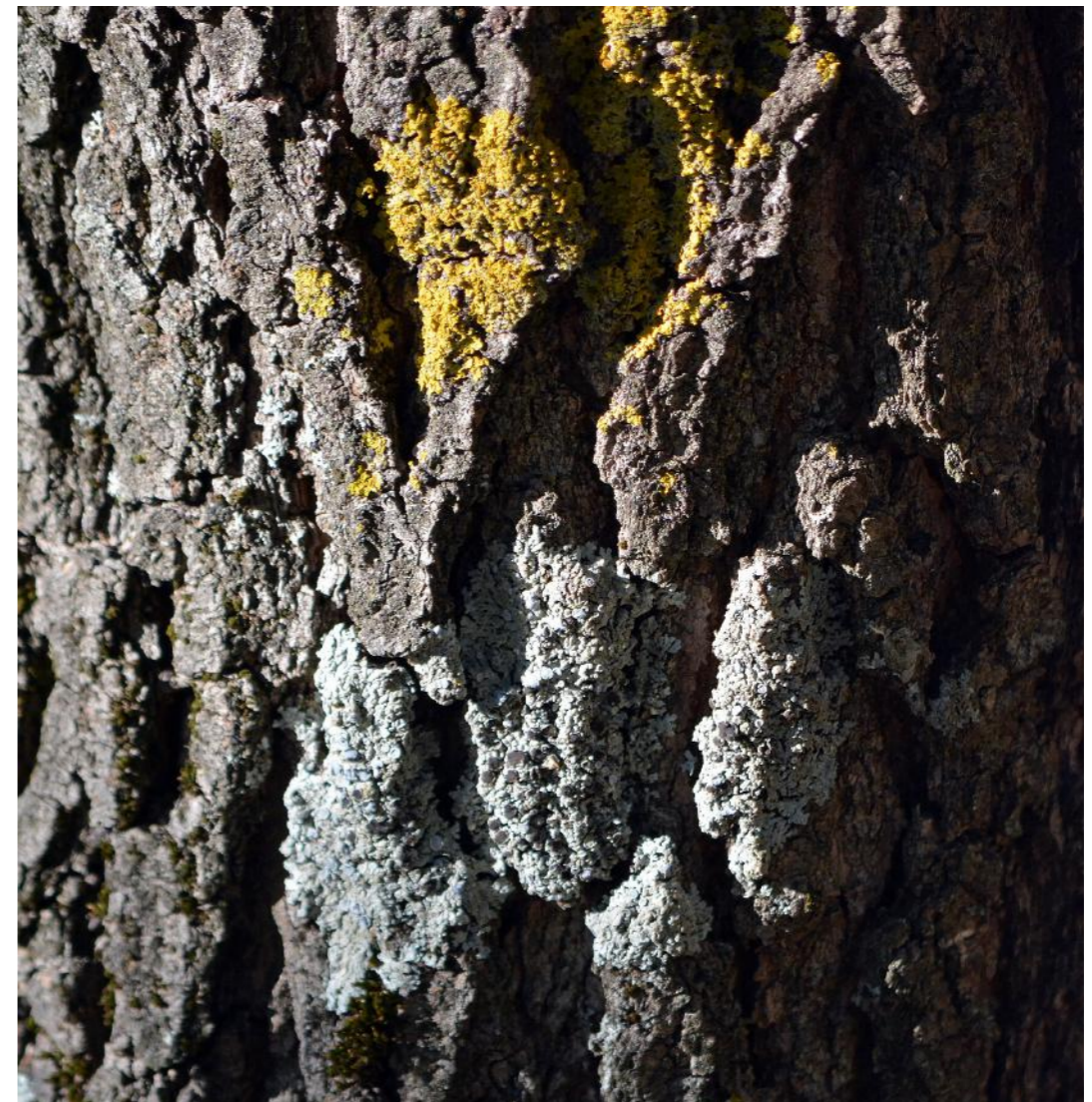
Er zijn analysetechnieken en oplossingen voor de bovengenoemde problemen onderzocht en een aantal innovaties zijn op de markt. De *Service life prediction* kan daarmee mogelijk verlengd worden. In het artikel door Tang *et al.* worden ook verschillende duurzaamheidsmodellen besproken die de *Service life prediction* kunnen maken, o.a. Life-365, DuraPGulf, LiPred en Life Prob.

Voor beton zijn er meer dan 300 productkaarten beschikbaar, voor een variatie aan elementen. Dit omvat betonnen vloeren,



funderingspalen, massieve wanden, balken etc. Alle categorieën zijn aanwezig. De categorie 1 kaarten geven doorgaans een levensduur van 100 jaar weer. Categorie 2 kaarten variëren qua levensduur tussen de 75 en 1000 jaar, net zoals categorie 3.

De levensduur van hout en beton is grotendeels gelijk volgens de productkaarten in de NMD. Met een levensduur van 100 jaar kunnen beide een volledige gebouwlevensduur blijven zitten in een constructie. Dit heeft een positief effect op de milieuscore, omdat de onderdelen niet vervangen hoeven te worden. Echter, doordat houten onderdelen zoals CLT een beperkt aantal productkaarten beschikbaar hebben, zal men in het algemeen gebruik maken van categorie 3 productkaarten. Een nieuw bedrijf met zijn eigen houten producten zal zelf moeten investeren in een LCA om een categorie 1 productkaart te krijgen. Zo niet zal een toeslag van 30% voor een nadelige milieuprestatie zorgen. Voor hout zijn er nog kleine stappen zoals deze nodig om het tot een even geschikt product te maken als beton. Daarom is het belangrijk om accurate productkaarten met een precieze levensduur beschikbaar te maken in de NMD.



Hout

- + levensduur van 50-75 jaar
- + problemen geïdentificeerd
- + kan geïmpregneerd worden
- gevoelig voor vocht en rot, insectenvraat



Beton

- + levensduur van 100 jaar
- + problemen geïdentificeerd
- gevoelig voor corrosie, alkali-aggregaat reacties, sulfaataantasting, vriezen/dooien



Recyclingsmogelijkheden



Recycling van hout

Doordat CLT een relatief nieuw materiaal is en de gebouwen waarin het verwerkt is nog niet vaak gesloopt worden, zijn de recyclingsmogelijkheden van CLT nog vrij onbekend. Desondanks is er wel informatie beschikbaar, zo is er restafval van de CLT-productie wat gerecycled kan worden. Wanneer de eerste gebouwen van CLT afgebroken zullen worden, over een aantal decennia, zijn er mogelijk meer en grootschalige recyclingsmogelijkheden op de markt.

Een cruciaal punt voor recyclen, is het verwijderen of uitsluiten van de biociden die momenteel nog gebruikt worden om CLT tegen rot en insecten te beschermen. Er zijn al studies zijn gedaan naar natuurlijke houtbeschermingsmiddelen zoals was, lijnolie etc. (van Dam & van den Oever, 2019) en sommige plantaardige wassen kunnen al commercieel gebruikt worden voor de impregnatie van hout. Ook kan hout behandeld worden met hoge temperaturen, esters, lignine etc. om schimmels, bacteriën en

water af te stoten. Een voorbeeld hiervan is Accoya-hout, gemaakt van snelgroeiende houtsoorten (FSC-gecertificeerd) en geacetyleerd zodat de celstructuur geen water meer opneemt (Accoya, 2020). Dit hout zwelt en krimpt minder, is niet gevoelig voor rot en insecten en kan 100% gerecycled worden. Voor het recyclen van schoon hout zijn er veel opties bekend, zo kan hout bewerkt worden tot meubels of andere gebruiksvoorwerpen, opnieuw gebruikt worden in de bouw, etc. Bovendien komen er steeds meer mogelijkheden bij.

Een vorig onderzoek (Gemax, 2020) heeft de meest veelbelovende punten van verbetering voor hout-recycling geanalyseerd. Het eerste punt is het optimaliseren van sloop en hergebruik, wat momenteel nog vaak snel en onzorgvuldig gebeurt. Betrokken partijen geven aan dat er veel herbruikbaar hout verloren gaat bij sloopwerkzaamheden, al zijn de exacte hoeveelheden onbekend. Er zijn al voorbeeldprojecten beschikbaar die hout zorgvuldig sloopten en geschikt maakten voor hergebruik. Ook zijn er partijen die zorgvuldige sloop graag willen toepassen, waardoor dit verbeterpunt goed haalbaar lijkt.

Als tweede wordt benoemd dat er veel hout uit de GWW (Grond, Weg, Waterbouw) nog niet hergebruikt wordt. Dit terwijl het stevig hout betreft, waarvan goed planken gemaakt kunnen worden. Ook voor dit potentiële hergebruik is er animo in de houtindustrie. Rijkswaterstaat voert een onderzoek uit waaruit moet blijken om hoeveel afvalhout het gaat en wat de mogelijkheden zijn om dit beter te benutten.

Momenteel wordt A- en B-hout al verwerkt in spaanplaat, vooral in Duitsland en België. Het verhogen van het aandeel gerecycled



hout in spaanplaat, kan 150.000 ton B-hout extra recycleren. Om dit plan te realiseren hoeft alleen één spaanplaat producent een investering te maken. Dit zou aantrekkelijker worden als er een afname is van subsidies voor bioenergie.

Presswood gebruikt hout voor productie van klossen voor pallets, dat zijn de houten onderdelen die de bovenste planken ondersteunen en verbinden met de onderkant. Twee andere bedrijven zijn ook van start gegaan met het verzamelen en opwerken van B-hout, om dit binnenkort aan te leveren bij een fabriek die het hout zal verwerken tot klossen. In eerste instantie richten de partijen zich op een volume van 50.000 ton B-hout.

Een nieuwe ontwikkeling is de productie van ECOR houtpanelen. Van verschillende grondstoffen gebaseerd op cellulose kunnen panelen gevormd worden, zonder lijm of bindmiddel. Met hitte en druk wordt een (maximaal) 2,5 mm dikke plaat gemaakt. De producent (Noble Environmental Technologies) is kleinschalig, en richt zich op 10.000 ton per jaar. Hij is erg geïnteresseerd in B-hout maar moet eerst onderzoeken welke potentie er ligt. Bovendien is er nog geen fabriek in Nederland. Dit alternatief is dan ook geen snelle oplossing, maar mogelijk een oplossing op lange termijn.

Als laatste noemt het onderzoek bioraffinage. Hierbij worden chemische of thermische processen gebruikt om fossiele brandstoffen te vervangen door biomassa. Dit alternatief is minder hoogwaardig dan de bovengenoemde mogelijkheden. Daartegenover staat dat het de potentie heeft om grote volumes (>100.00 ton) te verwerken en een oplossing biedt voor hout dat niet te recycleren is via de bovengenoemde opties. In Nederland is

er veel interesse in deze optie en er staat al een proeffabriek die draait met vers hout. Echter, door de grote volumes die met bioraffinage gepaard gaan kan er concurrentie ontstaan met hoogwaardige recycling.

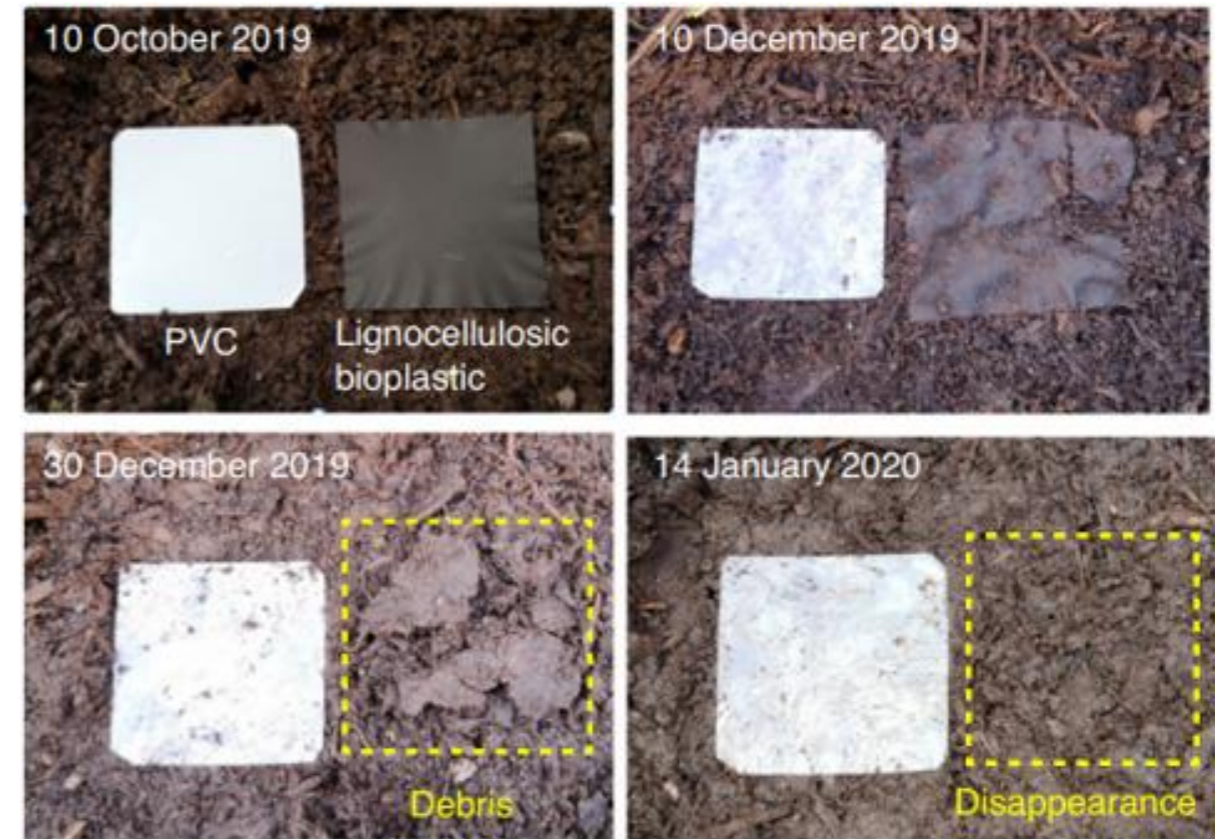
Alhoewel er al bedrijven zijn die zich met deze recyclingspaden bezig houden, zijn dit individuele spelers in een branche die nog in de kinderschoenen staan. Zodra er opschaling plaatsvindt kunnen er bedrijven ontstaan die zich richten op verwijderen van houtvervuiling (bijv. spijkers) waardoor dit efficiënter kan worden gedaan.

Op de lange termijn zijn er nog meer geavanceerde technieken beschikbaar, waardoor de mogelijkheden tot re- en upcyclen zullen blijven toenemen. Recentelijk publiceerde Xia *et al.* (2021) een innovatieve manier voor het recycleren van hout, namelijk voor het produceren van bioplastic. In het artikel wordt beschreven hoe men met behulp van de recyclebare oplosmiddelen diep eutectisch oplosmiddel (DES) en water, van hout een cellulose-lignine slurry maakt. Deze slurry wordt vervolgens uitgesmeerd tot vellen biologisch afbreekbaar, recyclebaar plastic. Volgens Xia *et al.* heeft het plastic een goede treksterkte (tensile strength) van 128 MPa, een uitstekende waterstabiliteit en thermale stabiliteit. De end-of-lifeplastics kunnen ook afgebroken worden met DES om vervolgens weer tot plastic gevormd te worden. Mocht er plastic in het milieu terecht komen, wordt het door micro-organismen volledig afgebroken binnen een tijdspanne van 3 maanden (figuur 8). Een cradle-to-gate LCA maakte duidelijk dat de milieubelasting van dit bioplastic veel lager is dan dat van twee veelvoorkomende plastics, acrylonitrilbutadienstyreen (ABS) en polyvinylfluoride (PVF).

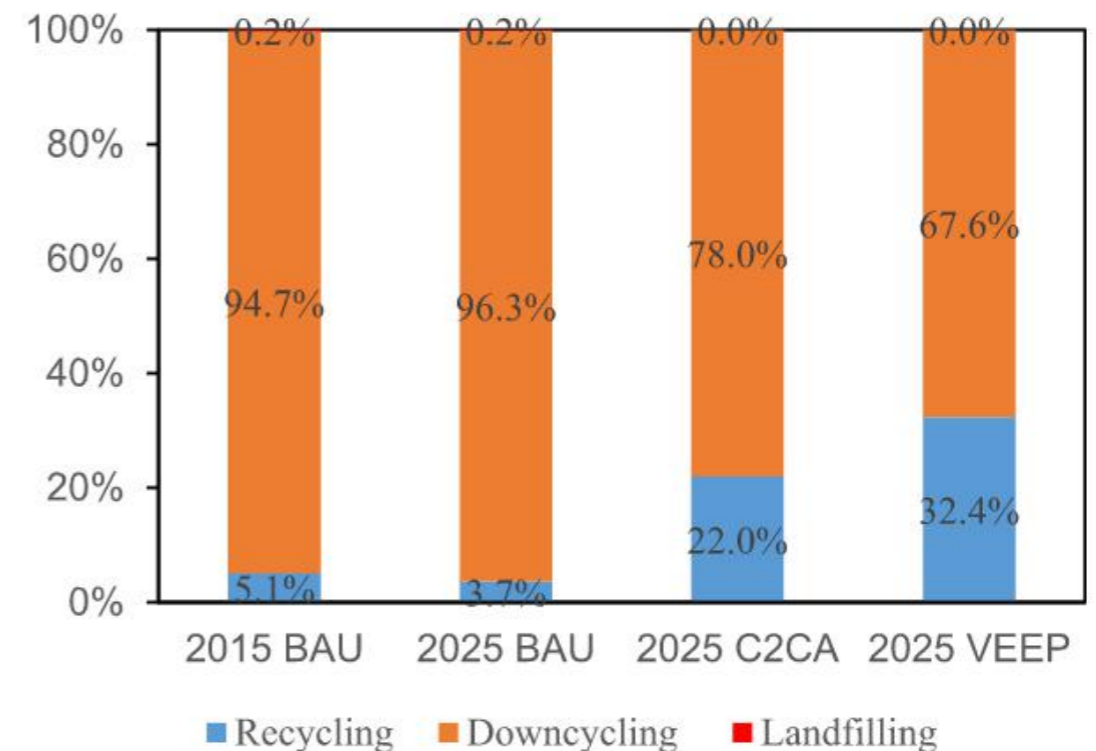


Echter, recycling van CLT houdt in dat het hout van de lijm gescheiden moet worden om beide componenten afzonderlijk te verwerken. Dit is mogelijk op microschaal, in laboratoria, maar nog niet voor grootschalig gebruik. Wel kan CLT versnipperd worden om vervolgens hergebruikt te worden als houtcomposietpanelen. Een voorwaarde hiervoor is dat eventuele metalen, zoals spijkers en frames, verwijderd worden evenals chemicaliën die gebruikt worden om het CLT waterbestendig te maken. Houtcomposietpanelen kunnen zijn, bijvoorbeeld, spaanplaten, houtgebonden panelen, en houtvezel isolatieplaten. De lijm, bijvoorbeeld PUR, wordt hierbij niet geactiveerd en dit is dus geen obstakel bij het versnipperen van het CLT. Hoewel deze manier van recycling beschreven kan worden als downcycling, is dit geen bezwaar voor het aanpassen van de forfaitaire waardes van de NMD.

Zo wordt beton volgens de NMD 99% gerecycled, slecht 1% gaat naar de stort. In praktijk bestaat het recyclen van beton uit het downcyclen naar aggregaat (DiMaria *et al.*, 2018). Dit recycled aggregaat (RA) wordt vervolgens gebruikt als basis voor wegen waar het natuurlijk aggregaat (NA) vervangt. De markt voor dit laagwaardige aggregaat is in Nederland al vrijwel verzadigd. Het is ook mogelijk om beton te recyclen op een manier dat het kan dienen als aggregaat voor structureel beton. Structureel beton draagt een belasting van de constructie waar het een dragend onderdeel van is. Wanneer het mogelijk is om beton op deze manier te recyclen, kan de materiaal cyclus zo goed als gesloten worden. RA van bouwafval kan verontreinigingen bevatten, zoals metaal, plastic en metselwerk. Verontreinigingen zoals deze kunnen zorgen voor een poreuzer materiaal, verminderde alkaliteit wat weer leidt tot corrosie van stalen elementen. Bovendien vermindert de druksterkte (*compressive strength*). Als



Figuur 8. PVC en cellulose-lignine bioplastic werden begraven onder 5 cm aarde, waarna de afbreekbaarheid werd gemeten.

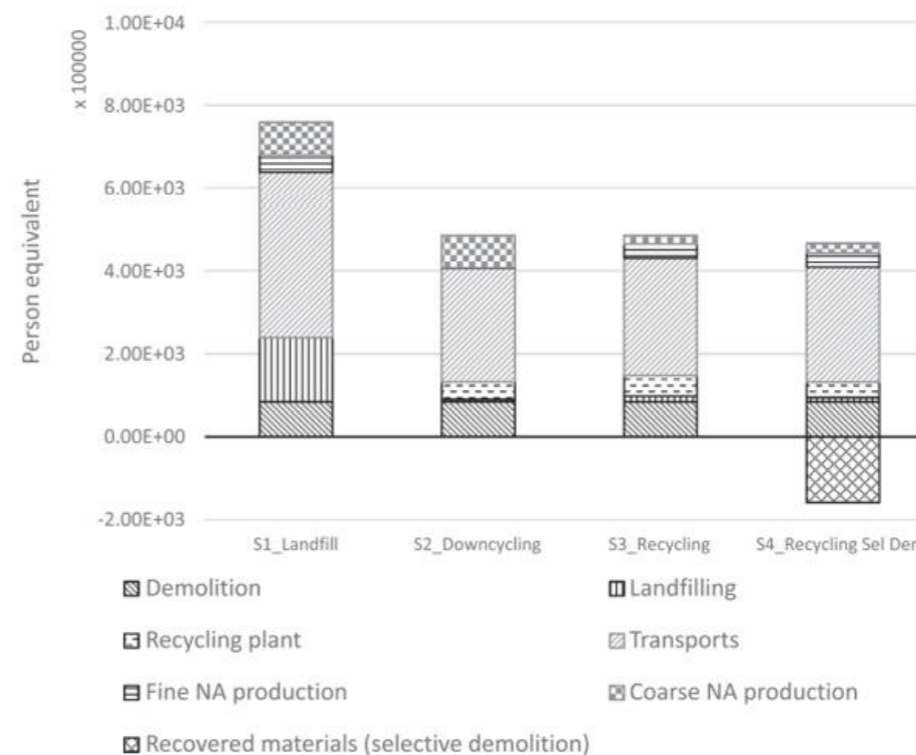


Figuur 9. Bestemming voor End of life beton in 2015 en 2025, voor de scenario's Business-as-usual (BAU) of VEPP

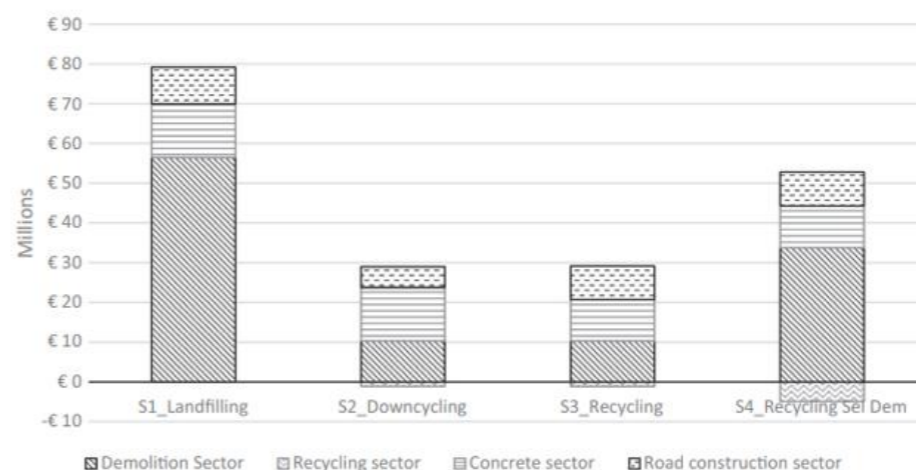


beton zorgvuldig gerecycled wordt kan het resulterende aggregaat goed dienen als vervanging van NA in structureel beton. De LCA door DiMaria *et al.* maakt duidelijk dat de milieubelasting van downcycling en recycling beton ongeveer hetzelfde is. Downcycling en recycling van beton naar wegbasis verlaagt de milieubelasting met 35.9% in vergelijking met het storten van beton. De processen van downcycling en recycling blijken dus niet veel te verschillen in milieubelasting (figuur 10). Ook de financiële kosten liggen dicht bij elkaar (figuur 11). Maar bij downcycling naar wegbasis aggregaat is er het probleem van een verzadigde markt. De hoeveelheid end-of-life beton wordt verwacht te stijgen van 10.5 miljoen ton in 2003 (Hofstra *et al.*, 2006) tot 22 miljoen ton in 2025. Er moet een alternatieve bestemming bedacht worden voor het overschot van 10 miljoen. De huidige methode om beton te recyclen is niet goedkoop genoeg om dit te stimuleren.

Alternatieve recyclingtechnieken zijn voorgesteld door twee EU-projecten; C2CA (*Concrete to Cement and Aggregates*) en VEEP (*Cost-Effective Recycling of C&DW in High Added Value Energy Efficient Prefabricated Concrete Components for Massive Retrofitting of our Built Environment*). Het project door C2CA heeft een *dry recovery* techniek met *real-time monitoring* ontwikkeld, welke gerecycled aggregaat opleveren dat geschikt is voor betonproductie. Het VEEP project ontwikkelde een techniek om fijn aggregaat (0-4 mm) verder te scheiden in gerecycled zand



Figuur 10. De milieubelasting voor de verschillende afvalverwerkingsscenario's, stort, downcyclen, recyclen en recyclen met selectieve sloop, weergegeven per processtap in person equivalent.



Figuur 11. Life Cycle Costing resultaten voor stort, downcyclen, recyclen en recyclen met selectieve sloop, in miljoenen euro's, per sector.

Share of EoL concrete treatment in the Netherlands.

	Downcycling for foundation	Downcycling for site elevation	Recycling for new concrete manufacturing
2015	76.1%	18.6%	5.3%
2025	67.6%	28.7%	3.7%

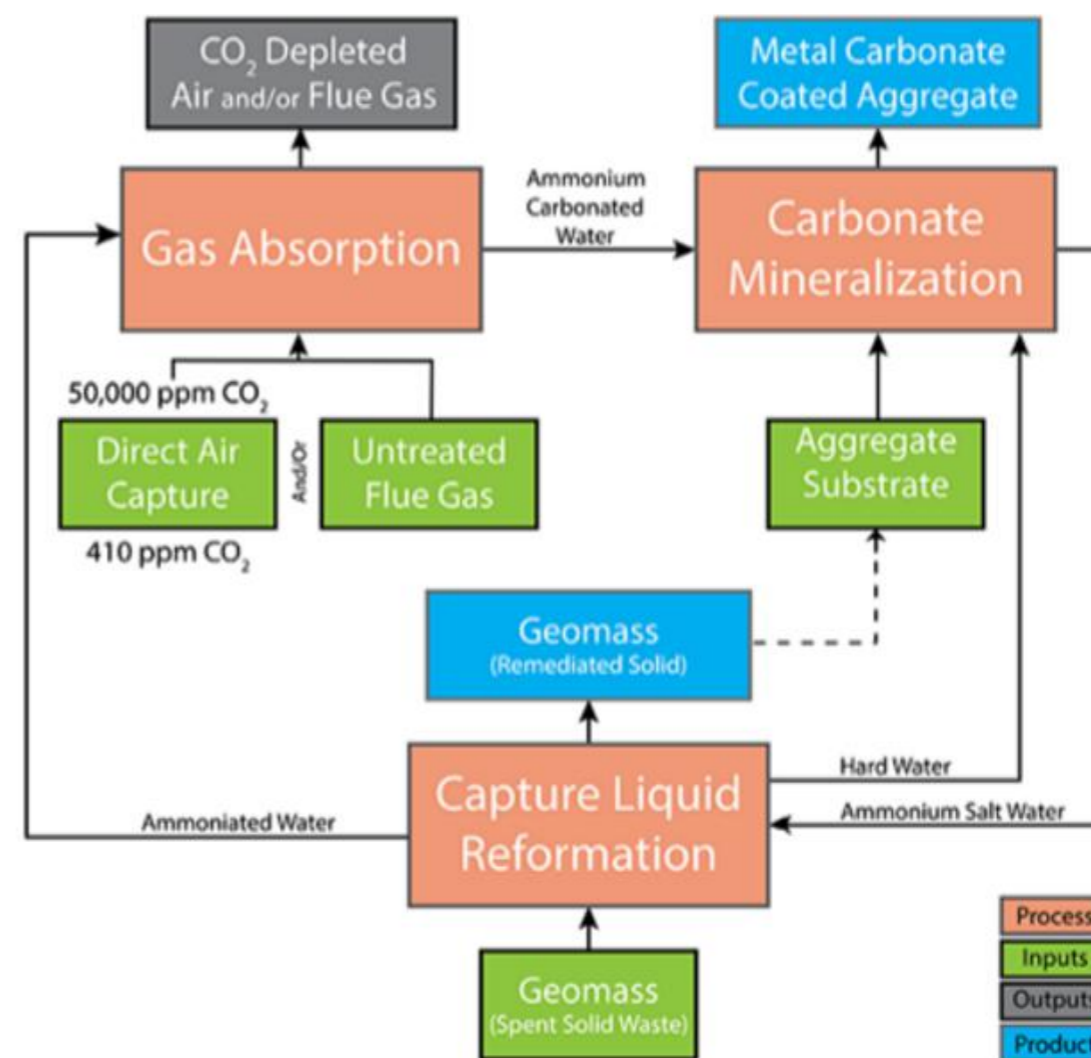


en cementvuller. Bij een voorspelling van de haalbaarheid van beide technieken bleek dat het aandeel van gerecycled beton niet zal toenemen wanneer de prijs van hoogwaardig recyclen hoger is dan dat van downcyclen (d.w.z. gebruik als wegbasis) (Zhang *et al.*, 2020). Bij C2CA, ligt de prijs lager, en stijgt het aandeel van gerecyclede massa naar 22%. Wanneer VEEP daarnaast gebruikt wordt om het zand te verfijnen stijgt het aandeel gerecyclede massa naar 32.4% (figuur 9).

Een andere, innovatieve manier van beton-recyclen wordt voorgesteld door Blue Planet Ltd. Zij gebruiken koolstofdioxide om carbonate rocks te vormen, deze vervangen het kalksteen dat normaal gesproken gebruikt wordt voor beton. Het bedrijf gebruikt een ge-ammonieerd water om CO₂-bevattende gassen om te zetten in carbonaat (figuur 12). Dat wordt gedaan door bijvoorbeeld rookgas (*flue gas*) dat vrijkomt bij cementproductie te gebruiken om ammonium water te carboneren. Het ammonium koolzuurhoudend water vormt vervolgens een laag carbonaat om fijn of grof aggregaat. Het water moet weer geladen worden met ammonium om dezelfde cyclus te doorlopen, hiervoor wordt Geomass gebruikt. Geomass is stenig afval dat beschikbare alkaliteit heeft, dit is nodig op het water weer ge-ammonieerd te maken. Blue Planet gebruikt voor Geomass vaak gerecycled beton. Geomass wordt vervolgens gebruikt als aggregaat waaromheen de carbonaat laag zich vormt. Met deze methode wordt er kalksteen vervangen, CO₂ vastgelegd en een hoogwaardig recyclingsalternatief gepresenteerd.

Alle bouwstenen voor een circulaire economie zijn al aanwezig. Zo zijn er manieren om het meerdere malen her te gebruiken en te recyclen. Hierdoor kan er optimaal gebruik worden gemaakt

van het hout voordat het verwerkt wordt als afval. In deze tijd houdt het ook koolstof vast. Bovendien zijn er belangrijke innovaties op het gebied van beton, waardoor ook deze optie minder schadelijke effecten heeft in productie en afvalverwerking. Hout zal een steeds belangrijkere rol moeten spelen in de bouw. We kunnen hier naartoe werken door het aandeel hout steeds te vergroten. In eerste instantie zal een



Figuur 12. Schematisch overzicht van carbonaat mineralisatie en CO₂ opname door Blue Planet Ltd.



combinatie van hout en (duurzaam) beton de meeste mogelijkheden bieden. Bijvoorbeeld met beton als fundatie in vochtige bodems. Op deze manier kunnen we met behulp van de bouwstenen die er al zijn toewerken naar een circulaire economie waar biobased bouwen centraal staat.

Hout

- + Nu: 32% recycling, vooral spaanplaat
- + korte termijn verbeterpunten zoals zorgvuldige sloop, hoger aandeel recycle-hout in spaanplaat
- + lange termijn mogelijkheden tot bioplastic



Beton

- + 99% recycling
- + aantal duurzame innovaties
- 95% downcycling tot wegaggregaat
- bijna verzadigde markt



Conclusie & aanbevelingen

Een *level-playing field* voor alle materialen is iets dat verkregen moet worden, en wat continue evaluatie vergt. De huidige regels en waarden in de Bepalingsmethode zijn deels gebaseerd op verjaarde gegevens en is toe aan vernieuwing. Zo is het recyclen van hout goed mogelijk wanneer het gaat om A/B hout, nationaal wordt er 32% gerecycled. Dat terwijl er volgens de forfaitaire waarden maar maximaal 10% van hout gerecycled wordt. Op basis van het huidige recyclingspercentage is het passend om de forfaitaire waarden voor A- en B-hout te veranderen naar een hoger aandeel recycling. Op basis van de veelbelovende studies naar (toekomstige) recyclingsmogelijkheden lijkt het ook passend om de forfaitaire waarden voor C-hout aan te passen. In de huidige situatie, vooral in contrast met de hoge recyclingswaarden voor beton (99%) leiden de forfaitaire waarden tot een achterstand voor hout. Dat terwijl het recyclen van beton neerkomt op 95% downcyclen naar wegaggregaat.

Er rest ook de taak om een geschikte manier te vinden waarop de biogene koolstofopslag kan worden weergegeven. Deze is in de huidige Bepalingsmethode opgenomen, maar is louter weergegeven naast de MKI-score. Dit is een begin, maar niet

direct bevorderlijk voor biobased materialen. Om het gebruik van biobased materialen te bevorderen zou de koolstofopslag geïntegreerd kunnen worden in de MPG-score. TNO en the Dutch Green Building Council hebben hiervoor een aantal manieren voorgesteld. Echter, voor deze voorstellen moet de Bepalingsmethode en EN15804 gewijzigd worden. Desondanks lijkt dit de meest geschikte optie, vooral variant 3. Bij variant 3 wordt de lange termijn koolstofopslag (>100 jaar) wél meegenomen in de MPG-score. Bovendien hoeft slechts één clause van de EN15804 gewijzigd te worden. Variant 4 verandert de weging van de verschillende modules. Deze variant zorgt echter voor een overdreven positieve score. Bij scenario's zoals verbranding komt veel CO₂ vrij en door dat te halveren is er weinig prikkeling voor het verbeteren van module D. Hetzelfde gaat op voor modules B en C.

De levensduur van biobased materialen, zoals CLT, is nog niet zo gedetailleerd opgenomen in de NMD als beton. De levensduur op de productkaarten in de NMD is voldoende om een volledige bouwcyclus te doorlopen. Hiermee heeft hout een *level-playing field* met beton wanneer er gebruik kan worden gemaakt van de productkaarten in de NMD.

Aanbevolen aanpassingen:

- Variant 3 (lange termijn opslag koolstof) voorgesteld door TNO voor koolstofopslag
- Forfaitaire waarden herevalueren, verbranding verminderen
- Recyclen van hout is een realistische optie, naar spaanplaat en meer



Referenties

van Belzen, T. (2020, 11 december). Hout flink benadeeld in overheidseisen duurzaam bouwen. *Cobouw.nl*. <https://www.cobouw.nl/duurzaamheid/nieuws/2020/12/forse-kritiek-op-weglaten-co2-opslag-in-milieuberekening-houten-huis-101290962>

van Belzen, T. (2021, 1 februari). Machtsstrijd achter schermen over cruciale Milieudatabase. *Cobouw.nl*. <https://www.cobouw.nl/duurzaamheid/nieuws/2021/01/forse-kritiek-op-nieuwe-opzet-milieudatabase-duurzame-bouwers-hebben-geen-stem-101292269>

Bobadilha, G. D. S., Stokes, C. E., Ohno, K. M., Kirker, G., Lopes, D. J. V., & Nejad, M. (2021). Physical, optical, and visual performance of coated cross-laminated timber during natural and artificial weathering. *Coatings*, 11(2), 252.

Cadorel, X. & Crawford, R. H. (2018). Life cycle analysis of cross laminated timber in buildings: a review. Rajagopalan, P (Ed.) 52nd International Conference of the Architectural Science Association 2018 - Engaging Architectural Science: Meeting the Challenges of Higher Density, pp.107-114. The Architectural Science Association and RMIT University.

CE Delft, Bijleveld, M., Beefting, M., Bruinsma, M., & Uijttewaal, M. (2021, maart). Klimaatimpact van afvalverwerkroutes in Nederland (20.190400.16). CE Delft. https://www.circulus-berkel.nl/upload/file/CE_Delft_190400_Klimaatimpact_afvalverwerkroutes_Nederland_Maart2021_DEF.pdf

Centraal Bureau voor de Statistiek. (2021, 4 maart). Elektriciteitsproductie stijgt in 2020 naar recordhoogte. <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2021/09/elektriciteitsproductie-stijgt-in-2020-naar-recordhoogte>

Chang, B. P., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2020). Studies on durability of sustainable biobased composites: a review. *RSC Advances*, 10(31), 17955-17999.

Climate Cleanup & ASN Bank. (2021). Construction Stored Carbon. <https://climatecleanup.org/constructionstoredcarbon/>

van Dam, J., & van den Oever, M. (2019). Catalogus biobased bouwmaterialen 2019: Het groene en circulaire bouwen. (Groene Grondstoffenreeks; No. 22). Wageningen Food & Biobased Research. <https://doi.org/10.18174/461687>

DiMaria, 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. doi:10.1016/j.wasman.2018.01.028

Duurzaamheid - Duurzaam bouw materiaal, Duurzaam hout. (2020, 26 juni). Accoya. <https://www.accoya.com/nl/duurzaamheid/>

Friedrich, D. (2018). An analytic algorithm-based method to assess the long term structural performance of wood-polymer composites. *Journal of Building Engineering*, 20, 367-376.

Gemax. (2020, april). Meer hergebruik en recycling van afvalhout. <https://www.afvalcirculair.nl/onderwerpen/linkportaal/publicaties/downloads/downloads-diverse/hergebruik-recycling-afvalhout-plan-aanpak/>

Hoxha, E., Passer, A., Saade, M. R. M., Trigaux, D., Shuttleworth, A., Pittau, F., Allacker, K., & Habert, G. (2020). Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. *Buildings and Cities*, 1(1), 504–524. <https://doi.org/10.5334/bc.46>



Ijeh, I. (2015, 28 oktober). Recycling timber: Wasting away. Building. <https://www.building.co.uk/focus/recycling-timber-wasting-away/5078393.article>

Mindess, S. (2019). Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (2de ed.). Elsevier Gezondheidszorg.

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2019, 21 augustus). Klimaatakkoord. Publicatie | <https://www.klimaatakkoord.nl/klimaatakkoord/documenten/publicaties/2019/06/28/klimaatakkoord>

NIBE. (2019, juni). Potentie van biobased materialen in de bouw. <https://circulairbouwconomie.nl/wp-content/uploads/2019/07/CBE-Eindrapportage-potentie-biobased-materialen-NIBE-juli-2019.pdf>

Ormondroyd, G., Spear, M., & Curling, S. (2015). Modified wood: review of efficacy and service life testing. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, 168(4), 187–203. <https://doi.org/10.1680/coma.14.00072>

van Poppel, J., & Bol, R. (2020, 31 augustus). Zonder biomassa haalt Nederland zijn klimaatdoelen niet. Hoe werkt het en hoe duurzaam is het? De Correspondent. <https://decorrespondent.nl/11466/zonder-biomassa-haalt-nederland-zijn-klimaatdoelen-niet-hoe-werkt-het-en-hoe-duurzaam-is-het/5791484190492-448cf73b>

Stichting Nationale Milieudatabase. (z.d.). Bepalingsmethode. Nationale Milieudatabase. Geraadpleegd op 8 oktober 2021, van <https://milieudatabase.nl/milieuprestatie/bepalingsmethode/>

Tang, S. W., Yao, Y., Andrade, C., & Li, Z. J. (2015). Recent durability studies on concrete structure. Cement and Concrete Research, 78, 143-154.

TNO, Fraanje, P., & Nijman, R. (2021, juli). Waarderen van CO2 prestaties van biobased bouwen (Nr. R10879). Dutch Green Building Council. <https://www.dgbc.nl/nieuws/dgbc-en-tno-publiceren-onderzoek-over-waarderen-van-co2-prestaties-van-biobased-materialen-6164>

TNO, Keijzer, E., Klerks, S., Van Leeuwen, S., Nijman, R., & Fraanje, P. (2021, maart). Een verkenning van het potentieel van tijdelijke CO2-opslag bij houtbouw (Nr. R10538). TNO. <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid:4a4d8913-6df7-4559-af9c-cd922cd44241>

Vogtländer, J. G., Van der Velden, N. M., & Van der Lugt, P. (2013). 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(1), 13–23. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0629-6>

Wang, J. B., Wei, P., Gao, Z., & Dai, C. (2018). The evaluation of panel bond quality and durability of hem-fir cross-laminated timber (CLT). European Journal of Wood and Wood Products, 76(3), 833-841.

Xia, Q., Chen, C., Yao, Y., Li, J., He, S., Zhou, Y., ... Hu, L. (2021). A strong, biodegradable and recyclable lignocellulosic bioplastic. Nature Sustainability, 4(7), 627–635. doi:10.1038/s41893-021-00702-w

Zeng, N. (2008). Carbon sequestration via wood burial. Carbon Balance and Management, 3(1). <https://doi.org/10.1186/1750-0680-3-1>

Zhang, C., Hu, M., Yang, X., Miranda-Xicotencatl, B., Sprecher, B., Di Maio, F., ... & Tukker, A. (2020). Upgrading construction and demolition waste management from downcycling to recycling in the Netherlands. Journal of Cleaner Production, 266, 121718.

Zhang, C., Hu, M., Yang, X., Miranda-Xicotencatl, B., Sprecher, B., Di Maio, F., ... & Tukker, A. (2020). Upgrading construction and demolition waste management from downcycling to recycling in the Netherlands. Journal of Cleaner Production, 266, 121718.

