

**Circular, Economy &
Environment**Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht**TNO-rapport****TNO 2021 R10538****Een verkenning van het potentieel van tijdelijke
CO₂-opslag bij houtbouw**

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56

Datum	25 maart 2021
Auteur(s)	Elisabeth Keijzer Stan Klerks Sanne van Leeuwen Rens Nijman Peter Fraanje
Aantal pagina's	24
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Intern
Projectnaam	Kennis Investerings Programma Hout in de bouw 2020
Projectnummers	060.42736 & 060.42779

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2020 TNO

Samenvatting

Hout staat als industrieel constructiemateriaal volop in de aandacht. In de Tweede Kamer is in 2019 een motie aangenomen waarin wordt opgeroepen te onderzoeken wat de bijdrage van grootschalige bouw in hout kan zijn om klimaatverandering te vertragen. Meer dan tweehonderd marktpartijen in de bouw hebben in 2020 een manifest ondertekend waarin wordt bepleit CO₂-opslag in biobased bouwmaterialen zoals hout op te nemen in de milieuprestatieberekeningen.

Door te bouwen in hout worden CO₂ emissies voor langere tijd uitgesteld. CO₂ is een broeikasgas en de wereldwijde uitstoot leidt tot ongewenste klimaatverandering. Hout uit duurzaam beheerd bos is aan te merken als een hernieuwbare grondstof die binnen een of twee generaties bijgroeit. Tijdens de groei van bomen wordt CO₂ uit de lucht opgenomen en koolstof vastgelegd in hout.

De tijdelijke opslag van koolstof in hout telt op dit moment niet mee bij de bepaling van de duurzaamheidsprestatie van gebouwen en bouwwerken. Het valt buiten de scope van de levenscyclusanalyse (LCA) die ten grondslag ligt aan de MPG (Milieu Prestatie Gebouwen) en de MKI (Milieu Kosten Indicator). Deze meetinstrumenten worden ingezet om duurzaam materiaalgebruik te bevorderen.

Op Europees niveau is besloten om biogeen koolstof uitgedrukt in kg CO₂ equivalenten expliciet zichtbaar te maken in LCA's. Per 1-1-2021 is dit ook doorgevoerd in de Nederlandse regelgeving. Het is een aparte milieu-effectcategorie in de EN 15804+A2, de Europese standaard voor LCA's van bouwproducten. Nederland gaat deze methode ook hanteren in de Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken. Deze declaratie betekent overigens nog niet dat het biogeen vastgelegde CO₂ meetelt in de MKI en MPG; daarvoor zou een wijziging in de Europese norm en de bepalingmethode nodig zijn.

In deze verkenning wordt geanalyseerd wat de gevolgen zouden zijn wanneer we de tijdelijke vastlegging van biogene koolstof wel zouden waarderen in de MPG-berekening. Het doel van het onderzoek is om te verkennen wat de gevolgen zijn van tijdelijke CO₂ opslag in houtbouw op de milieu-effectcategorie klimaatverandering (Global Warming Potential) in LCA berekeningen, door het uitvoeren van een indicatieve berekening voor een aantal specifieke situaties.

Er zijn meerdere modellen om het effect van tijdelijke CO₂ opslag te bepalen. Voor dit onderzoek is een model gehanteerd waarin het temporele aspect van CO₂ vastlegging geïntegreerd wordt in de gangbare LCA-methodiek. Uit de verkenning volgt (bij het gehanteerde model en bijbehorende uitgangspunten) dat als koolstofopslag in houtconstructies wel wordt meegerekend, er over een periode van 100 jaar netto de helft minder wordt bijgedragen aan klimaatverandering (GWP, in kg CO₂-emissie equivalenten), dan in het scenario waarbij tijdelijke CO₂ vastlegging niet wordt meegenomen. Uitgangspunten bij dit model zijn dat CO₂ over een langere periode geleidelijk wordt opgenomen uit de atmosfeer, dat het constructiehout een levensduur heeft van 60 jaar en dat het hout afkomstig is uit duurzaam beheerd bos.

Op basis van eerdergenoemd model is de impact op klimaatverandering in dit rapport berekend voor twee woningcasco's: in houtskeletbouw (HSB) en in kruislaaghout (CLT). Deze casco's zijn afgezet tegen een referentiecascos op basis van beton. Als de tijdelijke vastlegging van koolstof in hout wordt meegeteld, wordt de totale netto CO₂-emissie gerelateerd aan de productie van de houten woningcasco's veel lager. In het geval van CLT is de netto uitstoot van de productiefase in deze casus zelfs negatief: er wordt over 100 jaar meer CO₂ emissie uitgesteld dan dat er wordt uitgestoten bij de productie. Deze indicatieve analyse richt zich op de LCA-fasen A1 t/m A3 (productie). De constructie-, gebruiks- en einde levensduurfases zijn niet meegenomen in de indicatieve berekening. Gezien de doelstelling van dit onderzoek is alleen de milieu-effect-categorie 'bijdrage aan klimaatverandering' (Global Warming Potential) berekend. Voor de materialisatie van de casco's is uitgegaan van algemeen gebruikte referentiewoningen.

Een verdiepend vervolgonderzoek is wenselijk. Hierbij kan een volledige LCA en een MPG berekening worden gemaakt, zodat duidelijk wordt hoe de bijdrage aan klimaatverandering na karakterisatie en weging doorwerkt in de MPG of MKI-score. Ook dienen de HSB en CLT casco's te worden geoptimaliseerd voor duurzaam materiaalgebruik waarbij het streven is zoveel mogelijk in de NMD opgenomen cat.1 data te gebruiken.

Nader onderzoek is ook nodig om te bepalen of en hoe tijdelijke koolstofopslag kan worden meegenomen in de MKI/MPG. Dit onderzoek zal worden uitgevoerd door TNO in overleg met andere LCA-experts in Nederland, verenigd in de VLCA, de vereniging van LCA deskundigen. Ook zullen stakeholders worden betrokken zoals de stichting NMD, de Dutch Green Building Council en de Europese normcommissie. Voor een eventuele wijziging in de LCA methodiek is een breed draagvlak nodig, zowel op nationaal als op internationaal niveau.

De levenscyclusanalyse methode is ontwikkeld in een lineaire economie, waarbij producten aan het einde van de levensduur als afval vrijkomen. Nu Nederland en Europa op weg zijn naar een circulaire economie is het aan te bevelen scenario's voor hoogwaardig hergebruik te onderzoeken. Door hergebruik kunnen CO₂-emissies nog langer worden uitgesteld. In het vervolgonderzoek zal ook hier aandacht aan worden besteed.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1 Inleiding	5
1.1 Houtbouw & tijdelijke CO ₂ opslag	5
1.2 Doel van deze verkenning	6
2 Duurzaamheid, milieuprestatie en CO₂	7
2.1 Biogeen CO ₂ in de huidige LCA-methodiek	7
2.2 Modellen voor tijdelijke CO ₂ -opslag	8
2.3 Model om de biogene CO ₂ -opslag inzichtelijk te maken	9
3 Houtskeletbouw (HSB) en houtbouw met kruislaaghout (CLT)	11
3.1 HSB.....	11
3.2 CLT	12
4 Impactanalyse HSB en CLT casco's	13
4.1 Afbakening en opzet.....	13
4.2 Resultaat van de indicatieve impactanalyse	14
5 Conclusies en aanbevelingen	16
5.1 Conclusies van deze verkenning.....	16
5.2 Aanbevelingen voor nader onderzoek.....	17
Referenties	18
Ondertekening	20
BIJLAGE 1: Toelichting woningelementen voor impactanalyse	21

1 Inleiding

1.1 Houtbouw & tijdelijke CO₂ opslag

Houtbouw staat in Nederland volop in de belangstelling sinds de ‘herontdekking’ van kruislaaghout (CLT) als constructiemateriaal. Dit CLT-hout kan dankzij de massieve opbouw en grote afmetingen op constructieve wijze worden toegepast in casco’s voor woningen en flats. In Nederland is inmiddels ervaring opgedaan met CLT-hout in zowel grondgebonden woningen alsook in gestapelde bouw en utiliteitsbouw (INBO, 2021).

De gestapelde CLT-projecten in Amsterdam zoals Patch22, het Jakartahotel en de in aanbouw zijnde woontoren Haut springen in het oog. Verspreid over het land worden bovendien diverse woningbouwprojecten met CLT-hout gerealiseerd. Eind 2019 werd door Tegenlicht een uitzending gewijd aan de nieuwe trend om in hout te bouwen. CLT-hout wordt daarin het beton van de 21^{ste} eeuw genoemd (VPRO, 2019). In 2020 is een Manifest opgesteld en ondertekend door meer dan 200 marktpartijen waarin gepleit wordt voor het beter waarderen van biobased materialen in de meetinstrumenten voor duurzaamheid (VORM, 2020).

Hoogwaardig en langjarig houtgebruik in de bouw, bijvoorbeeld in constructies kan worden gezien als tijdelijke koolstofopslag. CO₂-emissies worden uitgesteld, waarmee - op grote schaal toegepast - een bijdrage geleverd kan worden aan de klimaatdoelstellingen van Parijs. Hout uit duurzaam beheerde bossen is aan te merken als een hernieuwbare grondstof, die binnen een of twee generaties bijgroeit. Bomen nemen CO₂ op uit de atmosfeer en leggen tijdens de groei koolstof vast in hout. Met een ruime meerderheid in de Tweede Kamer werd in het najaar van 2019 een motie van Jessica van Eijs (D66) aangenomen met het verzoek om in kaart te brengen wat de bijdrage van grootschalige bouw in hout kan zijn voor klimaatdoelstelling, het stikstofprobleem en het woningtekort (van Eijs, 2019).

Ook in de wetenschappelijke literatuur is tijdelijke koolstofopslag in hout een actueel thema. In (Hoxha, 2020) wordt een uitgebreid overzicht gegeven van de stand van de wetenschappelijke discussie.

In 2016 en 2019 hebben W/E adviseurs en NIBE onderzoek gedaan naar het potentieel van koolstofopslag in (biobased) houtskeletbouw woningen (HSB). Beide onderzoeken concluderen dat HSB woningbouw bij opschaling aanzienlijke klimaatwinst kan opleveren (W/E, 2016) (NIBE, 2019).

De milieu-impact van bouwmaterialen en bouwprojecten wordt berekend aan de hand van de levenscyclusanalyse-methode (LCA) op basis van de in Nederland vigerende Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken (NMD, 2020; hierna ‘de Bepalingsmethode’). Onderdeel hiervan is de bijdrage aan de klimaatverandering (Global Warming Potential; GWP), uitgedrukt in CO₂-equivalenten. De Bepalingsmethode is gebaseerd op de Europese standaard EN 15804+A2.

In de nieuwste versie van de EN 15804 (A2, 2019) is ‘klimaatverandering – biogeen’ een aparte impactcategorie geworden, hetgeen per 1-1-2021 ook is overgenomen in de Nederlandse Bepalingsmethode. Hiermee ontstaat de mogelijkheid om het

uitstellen van CO₂ uitstoot door tijdelijke vastlegging van koolstof in biobased producten als hout expliciet te onderscheiden. In de vigerende LCA-methode wordt dit tijdelijk vastgelegde koolstof nog niet meegerekend bij de milieueffectcategorie klimaatverandering. In deze verkenning wordt onderzocht hoe tijdelijk vastgelegde koolstof in houtbouw doorwerkt in LCA-berekeningen voor de milieu-effectcategorie klimaatverandering.

1.2 Doel van deze verkenning

Het doel van het onderzoek is om te verkennen wat de gevolgen zijn van tijdelijke CO₂ opslag in houtbouw op de milieu-effectcategorie klimaatverandering (GWP) in LCA berekeningen, door het uitvoeren van een indicatieve berekening voor een aantal specifieke situaties. Deze verkenning zal worden opgevolgd door een verdiepend onderzoek waarbij een volledige LCA wordt uitgevoerd en waarbij de materialisatie van de geanalyseerde gebouwen voor duurzaamheid wordt geoptimaliseerd.

In deze verkenning wordt eerst beknopt verslag gedaan van de huidige stand van zaken rondom (biogene) CO₂-vastlegging en temporele modellen voor LCA's voor bouwproducten. Vervolgens wordt één model toegepast voor een impactanalyse, om de effecten van een dergelijk model te illustreren. In deze verkenning zijn woningcasco's in HSB en in CLT met elkaar vergeleken en afgezet tegen een referentiecascos van beton. Binnen de gangbare LCA-kaders is de CO₂-prestatie van de casco-varianten bepaald. In een eerste scenario wordt de (tijdelijke) CO₂-vastlegging niet meegenomen (conform de geldende normen), in een tweede scenario wel (alternatief model).

De resultaten van deze eerste verkenning zijn eerder gepresenteerd tijdens het webinar over biobased bouwen '*Houtbouw van hype naar impact*' op 23 september 2020 tijdens de Dutch Green Building Week (TNO, 2020).

In hoofdstuk 2 wordt nader ingegaan op de LCA-methodiek en de Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken. Tevens wordt een model toegelicht waarin biogeen CO₂ in hout wordt meegerekend. In hoofdstuk 3 worden de twee geanalyseerde casco's beschreven: houtskeletbouw (HSB) en houtbouw met kruislaaghout (CLT). In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de impactanalyse voor de milieueffectcategorie klimaatverandering (GWP) weergegeven. In hoofdstuk 5 volgen de conclusies en worden de mogelijke stappen geschetst voor verdiepend vervolgonderzoek.

2 Duurzaamheid, milieuprestatie en CO₂

2.1 Biogeen CO₂ in de huidige LCA-methodiek

Een belangrijke aanleiding voor dit onderzoek is de toegenomen interesse in industriële houtbouw en de mogelijkheid om daarmee voor langere tijd koolstof vast te leggen. Koolstofopslag in bouw hout kan, mits toegepast op grote schaal, klimaatverandering als gevolg van het bouwen vertragen: CO₂-emissies worden voor langere tijd uitgesteld.

Tijdens de groei van bomen en planten zoals vlas en hennep wordt koolstof vastgelegd. Men spreekt hier van biogeen CO₂: in hout of andere biobased materialen opgeslagen koolstof. In de wetenschappelijke literatuur wordt een overzicht gegeven van de mogelijke opties om CO₂ opname, -opslag en -emissie van hout te meten en te waarderen in de levenscyclusanalyse methode (Hoxha et al., 2020) (Brandão et al., 2013).

Er zijn twee hoofdstromingen in de LCA-methodiek als het gaat om biogeen CO₂: de 0/0 methodiek en de -1/+1 methodiek. In Nederland was tot voor kort de 0/0 methodiek verplicht, waarbij biogeen CO₂ niet vermeld wordt omdat het netto-effect over de gehele levenscyclus 0 is; aan het einde van de levensduur komt het tijdelijk vastgelegde CO₂ alsnog vrij. In de -1/+1 LCA methode wordt de vastlegging van CO₂ expliciet zichtbaar gemaakt: tijdens de groei van bomen wordt er CO₂ vastgelegd (-1) en aan het einde van de levensduur komt het weer terug in de atmosfeer (+1). Per saldo maakt het over de voor klimaatverandering gehanteerde LCA standaardperiode van honderd jaar niet uit welke methode wordt gehanteerd.

Op Europees niveau is besloten om biogeen CO₂ expliciet zichtbaar te maken in LCA's, door het als een aparte milieu-effectcategorie op te nemen in de Europese norm voor LCA's van bouwproducten (EN15804 + A2, 2019). Hiermee is ook afgesproken om zowel in de grondstoffenfase (module A1) als in de eindelevensfase (module C & D) dit biogene CO₂ te benoemen. De Nederlandse Bepalingsmethode heeft deze declaratievorm per 1-1-2021 ook overgenomen. Hiermee wordt (tijdelijke) biogene CO₂-vastlegging expliciet inzichtelijk. Over 100 jaar bezien is het netto klimaateffect van biogeen vastgelegd koolstof overigens nog steeds nul, omdat er in de huidige LCA-systematiek van wordt uitgegaan dat het vastgelegde koolstof binnen honderd jaar weer vrijkomt als CO₂.

2.2 Modellen voor tijdelijke CO₂-opslag

Noch in de 0/0 methodiek, noch in de -1/+1 methodiek, bestaat de mogelijkheid om temporele aspecten zoals tijdelijke vastlegging en daarmee uitstel van CO₂-emissies mee te nemen. Het zijn statische bepalingmethoden. Een reden om tijdelijke CO₂-opslag toch mee te nemen in LCA-studies, kan zijn om beslissingen te steunen die op korte termijn kunnen bijdragen aan het vertragen van klimaatverandering. Ondertussen kan worden gewerkt aan technische oplossingen die er voor zorgen dat CO₂ nog langer blijft opgeslagen in hout, in het bijzonder door hergebruik van hout in nieuwe bouwwerken. Al in 2010 signaleert het Europese Institute for Environment and Sustainability de beperking van de statische LCA methode: *'Assigning a full GWP 100 factor to these emissions that happen in 80 years [of this example of a wooden house] would contradict the logic of the GWP 100 [method]' (ILCD, 2010).*

Zogeheten dynamische LCA-methodieken bieden wel ruimte om temporele aspecten mee te nemen (Levasseur, 2010). Er bestaat nog geen consensus over welke dynamische methode het meest geschikt is om tijdelijke CO₂ vastlegging te waarderen.

De meest eenvoudige vorm van een dynamische LCA, is om te focussen op de vastleggingsperiode van (biogeen) koolstof ('carbon storage'), waarbij vaak onderscheid gemaakt wordt in tijdelijke (<100 jaar) en permanente (>100 jaar) opslag van CO₂. Een voorbeeld van een methode die tijdelijke koolstofopslag meeneemt in reguliere LCA's, is de Britse PAS2050 (2011). De PAS2050 methodiek heeft als uitgangspunt dat voor elk jaar dat CO₂ wordt vastgelegd, de carbon footprint met 1/100 gecorrigeerd worden. Dit is in lijn met wat het ILCD voorstelt (ILCD, 2010). In een vervolgonderzoek zal een bredere analyse gemaakt worden van de verschillende beschikbare methoden.

Voor deze verkenning is een eigen methode bepaald, waarbij ook rekening wordt gehouden met het natuurlijk proces dat de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer over een periode van 100 jaar geen constante is, maar afneemt door opname van CO₂ door bomen en planten.

2.3 Model om de biogene CO₂-opslag inzichtelijk te maken

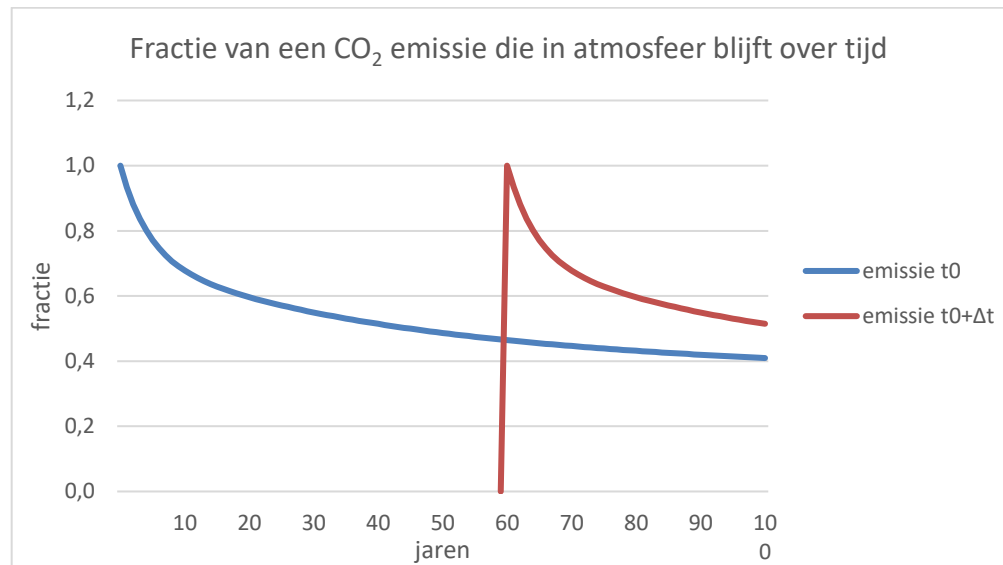
In deze verkenning is een dynamisch LCA-model opgezet om het effect van koolstofopslag in hout inzichtelijk te maken. Met dit model kan worden beschouwd hoeveel CO₂ er in de komende 100 jaar in de atmosfeer terecht komt wanneer er nu (t=0) een biobased bouwproduct (in dit geval hout) ingezet wordt, dat pas na een aantal decennia (bijv. t=60 jaar) wordt afgedankt en verbrandt. Dit kan vergeleken worden met een CO₂-emissie op t=0. Een biobased bouwproduct houdt gedurende zijn levensduur koolstof vast, en kan daarmee emissie van CO₂ uitstellen.

Onder andere Hoxha et al. (2020), Pittau et al. (2018) en Fouquet et al. (2018) wijzen er op dat niet alle biobased grondstoffen 'carbon neutral' zijn als je kijkt naar het moment van oogsten en groeiprocesen. Daarom is duurzaam bosbeheer een belangrijk uitgangspunt voor dit onderzoek. Alleen als de hoeveelheid koolstof opgeslagen in een productiebos van jaar-tot-jaar constant is of stijgt kan de koolstof in het hout gezien worden als een netto vastlegging van koolstof. Bij duurzaam bosbeheer zou dit altijd het geval moeten zijn.

De Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken schrijft voor om klimaatveranderingseffecten te berekenen aan de hand van de IPCC-methode met een tijdsperspectief van 100 jaar. Deze periode wordt in LCA's gehanteerd als de standaard (JRC, 2010; EPA, 2020). Voor het hier gepresenteerde model wordt ook uitgegaan van een periode van honderd jaar.

Bij de berekening van de relatieve bijdrage van CO₂-emissie door de tijd is de natuurlijke verwijdering van CO₂ uit de atmosfeer door interactie met oceanen en de biosfeer (bomen, planten) een relevante factor. Dit leidt tot een verschil in de aanwezigheid van CO₂ in de atmosfeer over een periode van 100 jaar, zoals weergegeven met de blauwe lijn in Figuur 1. De oppervlakte onder de blauwe lijn komt overeen met een bijdrage van 1 kg CO₂-eq (per kg CO₂ uitstoot) aan het broeikasgaseffect in de vigerende LCA-methodologie. Hierbij is de CO₂-emissie 1,0 op t=0, maar neemt af over de tijd als gevolg van opname van CO₂ uit de atmosfeer door planten. Het natuurlijk verloop van CO₂, de blauwe lijn, is gebaseerd op modellen van het IPCC (IPCC, 2013).

Wanneer tijdelijke CO₂ opslag wel mee wordt gerekend, door hout te beschouwen dat de komende 60 jaar in gebruik is en pas na die periode de CO₂ doet vrijkomen, bij verbranding, ontstaat er een ander beeld: de rode lijn in Figuur 1. Deze rode lijn is door TNO gemodelleerd naar het IPCC en brengt in beeld dat de emissie op t = 60 plaatsheeft. Met uitzondering van de verschuiving naar t = 60 is het verloop van beide lijnen gelijk. De oppervlakte onder deze rode lijn is in deze situatie de helft kleiner dan de oppervlakte onder de blauwe lijn: dat betekent dat er volgens dit model over 100 jaar netto de helft minder broeikasgevoel optreedt in het scenario met CO₂-vastlegging. Dat is een minder groot effect dan bijvoorbeeld met de ILCD-methode, die de periode van vastlegging beschouwt, wat in dit voorbeeld op 60 jaar /100 jaar = 60% CO₂-reductie zou uitkomen. De in deze verkenning gebruikte methode is wat conservatiever. Een uitgebreidere bespreking van methoden om CO₂ opslag en de bijbehorende bandbreedten mee te nemen zal plaatsvinden in vervolgonderzoek dat na deze verkenning wordt uitgevoerd.



Figuur 1: Fractie van CO₂ in de atmosfeer door emissie over 100 jaar, bij emissie op t=0 (blauwe lijn) en emissie op t=60 indien een koolstofhoudend product langer in gebruik wordt gehouden (rode lijn). De afbraak van CO₂ is gemodelleerd volgens IPCC, 2013 (table 8.SM.10).

Uit dit model komt naar voren dat tijdelijke koolstofopslag in producten wel degelijk effect heeft, ook wanneer er binnen een tijdsschaal van 100 jaar wordt gekeken. Dit betekent dat de bijdrage aan klimaatverandering van hout (en andere biobased producten) in de vigerende LCA standaard hoger wordt ingeschat doordat het effect van tijdelijke vastlegging niet wordt meegenomen. Als op basis van dit model de (tijdelijke) CO₂ vastlegging wel wordt meegerekend bij het bepalen van de klimaatimpact, dan wordt de CO₂ uitstoot als gevolg van productie van materialen verminderd met de CO₂ opslag. Daardoor zouden hout en andere biobased materialen gunstiger scoren op het milieu-effect klimaatverandering. Deze betere score werkt dan weer door in de meetinstrumenten voor duurzaamheid in Nederland: de MKI en MPG.

3 Houtskeletbouw (HSB) en houtbouw met kruislaaghout (CLT)

In deze verkenning worden twee bouwsystemen in hout doorgerekend: houtskeletbouw (HSB) en cross laminated timber (CLT).

3.1 HSB

Houtskeletbouw is een bouwsysteem van geprefabriceerde, al dan niet dragende constructieonderdelen. Dit bouwsysteem is samengesteld uit diverse materialen, waaronder ten minste hout en/of houten plaatmaterialen met een aandeel in de sterkte, stabiliteit en stijfheid, en producten om daarmee een al dan niet compleet en gebruiksklaar gebouw te realiseren. In Nederland gaat het in de regel om een bouwsysteem opgebouwd uit stijl- en regelwerk van hout. Deze HSB-elementen bestaan uit een raamwerk van dunne houten balken, die aan beide zijden worden versterkt met beplating en waartussen isolatiemateriaal wordt geplaatst.



Figuur 2: Houtskeletbouw

De buitengevel kan in principe van elk materiaal zijn; in Nederland wordt vaak voor baksteen gekozen. Het aandeel houtskeletbouw in de woningbouw wordt door Centrum Hout geschat op ongeveer 3% in Nederland. Het gaat om ruwweg 1.500 woningen per jaar (W/E, 2016). HSB-elementen worden ook vaak gecombineerd met andere bouwsystemen, bijvoorbeeld een onderbouw in kalkzandsteen of beton en een verdieping of zolder in hout (ISSO/CH, 2020).

3.2 CLT

CLT is een afkorting voor Cross Laminated Timber ofwel kruislaaghout. CLT is niet speciaal nieuw – een patent hierover dateert van 1923 – maar de opschaling van de industriële productie in Europa is dat wel. CLT bestaat uit ten minste drie kruislings ten opzichte van elkaar verlijmde lamellen, veelal samengesteld uit vurenhout. Door de kruislingse verlijming ‘werkt’ het hout nagenoeg niet meer en is het geschikt als constructiemateriaal voor dragende wanden en vloeren en kunnen grote overspanningen worden gerealiseerd.

CLT wordt geproduceerd uit vurenhout uit PEFC of FSC gecertificeerde bossen in plaatvorm bij een standaardbreedte van 3,50 m, een dikte tot 400 mm en een lengte van 6 tot 17,80 meter (Derix, 2020). CLT is te combineren met andere bouwmaterialen zoals beton en staal. De prefab CLT-panelen worden in de fabriek op maat gemaakt en direct op de bouwplaats geleverd en gemonteerd. Dat deze homogene elementen droog gemonteerd worden en mechanisch worden verbonden, maakt dat ze na einde economische levensduur eenvoudig opnieuw kunnen worden gebruikt. Verlijmde houten spanten worden in de praktijk na decennia dienst te hebben gedaan weer opnieuw ingezet (DGV, 2020).

In Nederland is bouwen met CLT relatief nieuw. Er zijn op het moment van schrijven enkele tientallen projecten in de woning- en utiliteitsbouw gerealiseerd en er staan nieuwe projecten op stapel (INBO,2021).



Figuur 3: CLT-kern van de Triodos Bank in Driebergen (JP v Eesteren)

4 Impactanalyse HSB en CLT casco's

4.1 Afbakening en opzet

Deze verkenning van de klimaatimpact van CO₂-opslag richt zich op het gebruik van CLT en HSB als constructief materiaal in een casco van een tussenwoning en een appartement. Uitgangspunt voor de bouwkundige opbouw van de casco's zijn de BENG referentiewoningen (DGMR, 2016). Voor deze analyse is uit praktische overwegingen gekozen voor dezelfde afmetingen van vloeren en dragende wanden. Voor de details wordt verwezen naar bijlage 1 van dit rapport.

Voor de houtconstructie is in deze analyse 60 jaar gekozen als levensduur. Voor de berekening van de CO₂ opslag is uitgegaan van vurenhout met een factor 0,45 kg C per kg hout (Woodenergy, 2017). In dit theoretische scenario wordt het casco daarna afgedankt en komt de CO₂ vrij. Andere scenario's en levensduren zijn hier natuurlijk ook denkbaar, maar deze zijn niet meegenomen in deze analyse.

Voor deze verkenning is een indicatieve LCA-analyse uitgevoerd, waarbij de principes van de Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken gevolgd zijn (NMD, 2020). In de analyse is alleen gekeken naar de grondstoffenwinning en productie van materialen (LCA module A1-A3), om het potentieel van CO₂ opslag zo scherp mogelijk in beeld te krijgen. Dit betekent dat overige levenscyclusfasen buiten beschouwing zijn gelaten, zoals bijvoorbeeld de constructiefase (A4-A5), de gebruiksfase (B) en de einde leven en recyclingfase (module C + D). Het verdient de vermelding dat in de einde levensduurfase van hout nog veranderingen in de koolstofbalans zullen optreden. Indien hout verbrand wordt aan het einde van de levensduur, zullen hierbij CO₂-emissies optreden tijdens de verbranding (module C3) én vermeden worden dankzij energierugwinning (module D). De End-of-life-fase (EoL) is bewust niet meegenomen in deze verkennende potentieelstudie omdat deze fase in het kader van de het streven naar een circulaire bouw aparte aandacht verdient, waarbij ook opties voor hoogwaardig hergebruik worden meegenomen.

Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van de standaard LCA-software SimaPro versie 9.0.0 en achtergronddata uit de Nationale Milieu Database versie 3.1. Er is gebruik gemaakt van categorie 3 data (dit zijn algemene milieudata uit de literatuur, cat.2 data zijn branchegemiddelden, terwijl cat.1 data direct afkomstig zijn van de producent/toeleverancier). Om de CO₂-emissies / carbon footprint te berekenen is de in SimaPro aanwezige LCIA-methode is gebruikt (NMD3.1 nov. 2019). Dit is niet exact dezelfde versie als de meest recente versie van de Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken 1.0, maar dat maakt voor de berekening van broeikasgasemissies volgens de klassieke set aan karakterisatiefactoren geen verschil. Andere milieueffecten dan CO₂ zijn voor deze verkenning niet beschouwd.

4.2 Resultaat van de indicatieve impactanalyse

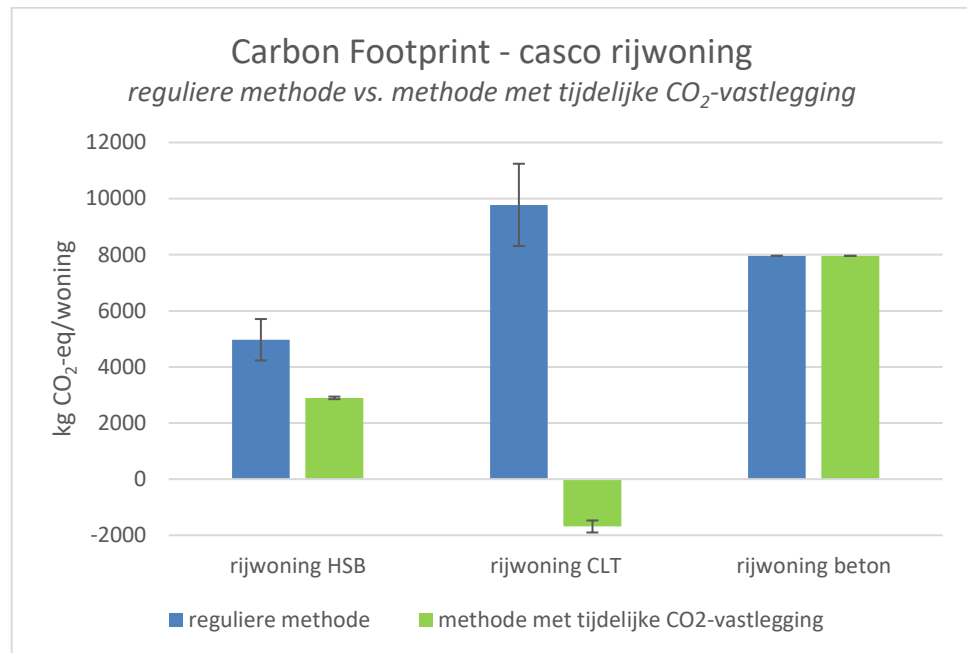
In Figuur 4 en Figuur 5 zijn de CO₂-emissies voor de LCA levensfasen A1-A3 van drie casco's van respectievelijk een rijwoning en appartementswoning weergegeven. De blauwe staafdiagrammen geven de CO₂-emissie in lijn met de Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken weer. De groene staafdiagrammen zijn het resultaat van een indicatieve berekening waarbij tijdelijke CO₂ opslag in hout wel wordt meegenomen, op basis van het model gepresenteerd in hoofdstuk 2. De foutbalken in de figuren geven hierbij de bandbreedte in materiaalgebruik aan (zie bijlage 1). Andere onzekerheden zijn buiten beschouwing gelaten in deze verkenning.

Wanneer wordt gerekend met de standaard LCA, zijn de CO₂-emissie equivalenten (ook wel carbon footprint genoemd) als gevolg van de productie van de rijwoning en de appartementswoning het laagst voor HSB. CLT heeft op basis van deze methode de hoogste carbon footprint, hoger ook dan het referentie casco o.b.v. beton.

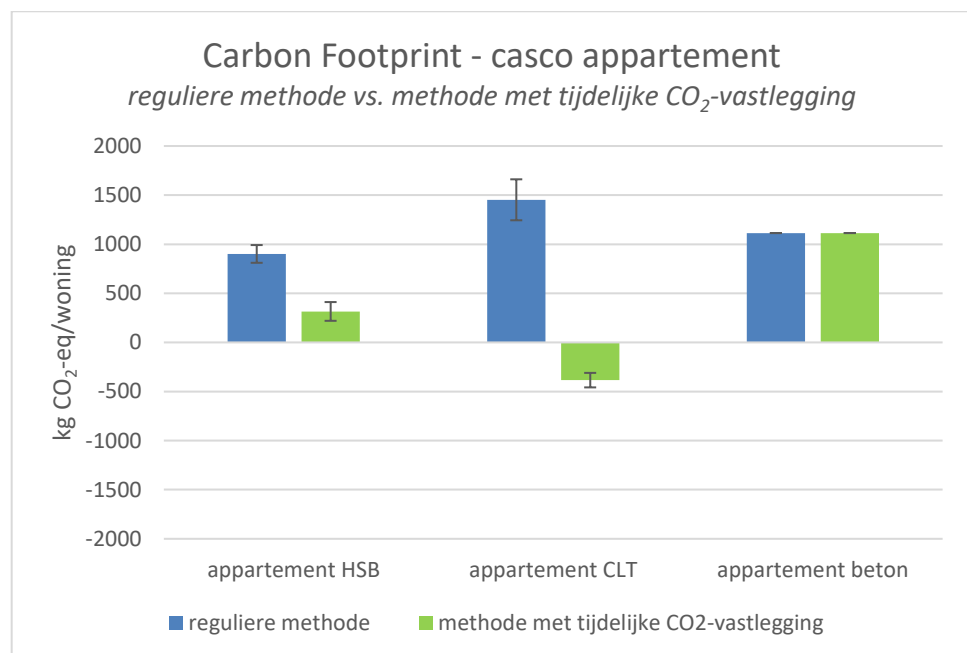
Indien tijdelijke CO₂ opslag wel meegerekend wordt op basis van de duur van de opslag, zoals in hoofdstuk 2 voorgesteld wordt, komt een duidelijk ander beeld naar voren (groene balken).

Zoals aan de groene balken te zien is in de figuren 4 en 5, is de carbon footprint van de standaardgebouwen uitgevoerd in HSB of CLT bij de berekening op basis van het model in hoofdstuk 2 lager dan die van de referentie: de CO₂-emissie door productie wordt verminderd met de tijdelijke CO₂ opslag in hout. In het geval van CLT is de netto carbon footprint zelfs negatief, doordat de koolstofopslag in het hout over honderd jaar gemeten groter is dan de emissie bij productie.

Afvalverwerking en recycling aan het einde van de levensduur zijn niet meegenomen in deze verkennende berekeningen. Over de gehele levenscyclus bezien zal de koolstofbalans nog wat anders uitvallen. De CO₂ uitstoot door verbranding met energierugwinning zal de bijdrage aan de milieu-effectcategorie klimaatverandering verhogen. Dit is in deze verkenning buiten beschouwing gelaten, om zo duidelijk mogelijk het verschil te laten zien van tijdelijke CO₂ opslag in hout op de korte termijn. In het kader van circulair bouwen en het vertragen van de klimaatverandering zijn scenario's voor hergebruik van constructiematerialen denkbaar en wenselijk, zodat CO₂-emissies nog langer worden uitgesteld.



Figuur 4: Indicatieve carbon footprint A1-A3 voor het casco van een rijwoning, op basis van de reguliere rekenmethode (NMD3.1 nov. 2019) en de alternatieve methode met tijdelijke CO₂-vastlegging. De foutbalken geven de bandbreedte aan qua verwacht materiaalgebruik.



Figuur 5: Indicatieve carbon footprint A1-A3 voor het casco van een appartement, op basis van de reguliere rekenmethode (NMD3.1 nov. 2019) en de alternatieve methode met tijdelijke CO₂-vastlegging. De foutbalken geven de bandbreedte aan qua verwacht materiaalgebruik.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies van deze verkenning

In deze verkenning is onderzocht in welke mate (tijdelijke) CO₂-vastlegging in houtbouw zou kunnen bijdragen aan de milieueffectcategorie klimaatverandering (GWP) als het wel in de levenscyclusanalyse meegenomen zou worden.

In Nederland is het sinds 1-1-2021 verplicht om biogeen CO₂ expliciet zichtbaar te maken in LCA's, door het als een aparte milieu-effectcategorie op te nemen. Dit gebeurt in navolging van de EN 15804+A2, de Europese norm voor LCA's van bouwproducten. Hiermee wordt inzichtelijk wat het belang is van (tijdelijke) biogene CO₂-vastlegging, maar dit komt (nog) niet tot uitdrukking in MKI- en MPG-berekeningen die langere periodes beschouwen dan alleen de productiefase.

Er zijn meerdere modellen om het effect van tijdelijke CO₂ opslag te bepalen. Voor dit onderzoek is een model gehanteerd waarin het temporele aspect van CO₂ vastlegging geïntegreerd wordt in de gangbare LCA-methodiek. Uit de verkenning volgt (bij het gehanteerde model en bijbehorende uitgangspunten) dat als koolstofopslag in houtconstructies wel wordt meegerekend, er over een periode van 100 jaar netto de helft minder wordt bijgedragen aan klimaatverandering (Global Warming Potential, in kg CO₂ emissie equivalenten), dan in het scenario waarbij tijdelijke CO₂-vastlegging niet wordt meegenomen. Uitgangspunten bij dit model zijn dat CO₂ over een langere periode geleidelijk wordt opgenomen uit de atmosfeer, dat het constructiehout een levensduur heeft van 60 jaar en dat het hout afkomstig is uit duurzaam beheerd bos.

Op basis van eerdergenoemd model is de impact op klimaatverandering uitgedrukt in kg CO₂ equivalenten in dit rapport berekend voor twee woningcasco's en woningtypen: in houtskeletbouw (HSB) en in kruislaaghout (CLT). Deze zijn afgezet tegen een referentiecascos van beton. Als de tijdelijke vastlegging van koolstof in hout wordt meegeteld, wordt de totale netto CO₂-emissie gerelateerd aan de productie van de houten woningcasco's veel lager. In het geval van CLT is de netto uitstoot van de productiefase in deze casus zelfs negatief: er wordt over 100 jaar meer CO₂-emissie uitgesteld dan dat er wordt uitgestoten bij de productie. Deze indicatieve analyse richt zich op de LCA-fasen A1 t/m A3 (productie). De constructie-, gebruiks- en einde levensduurfases zijn niet meegenomen. Gezien de doelstelling van dit onderzoek is alleen de milieu-effect-categorie 'bijdrage aan klimaatverandering' berekend. Voor de materialisatie van de casco's is uitgegaan van algemeen gebruikte referentiewoningen.

Natuurlijk heeft deze verkenning ook beperkingen die nader onderzoek noodzakelijk maken. Verschillende aannames en beperkingen zijn in het rapport genoemd. Er is op basis van een model inzichtelijk gemaakt hoe tijdelijke CO₂ opslag zou kunnen worden meegenomen in de LCA-methodiek. Er is een indicatieve analyse gemaakt van de klimaatimpact van de productiefase (A1-A3) voor een HSB en een CLT casco van een rijtjeswoning en een appartement. Voor het materiaalgebruik is uitgegaan van de afmetingen van standaard BENG-referentiewoningen waarbij dit voor HSB en CLT naar hout is omgerekend.

Voor de CO₂ opslag is gebruik gemaakt van een factor voor koolstofopslag in vurenhout. Verder is er geen uitgebreid literatuuronderzoek uitgevoerd naar modellen en andere methoden om CO₂ opslag mee te nemen.

Ondanks de genoemde aannames en beperkingen levert deze verkenning belangrijke inzichten. Enerzijds is aannemelijk gemaakt dat de integratie van tijdelijke koolstofopslag in de LCA-methode haalbaar is. Anderzijds is door de indicatieve LCA-berekeningen duidelijk geworden dat het al dan niet meerekenen van CO₂ opslag in hout een aanzienlijke invloed kan hebben op de milieu-effectcategorie klimaatverandering.

In de volgende paragraaf worden aanbevelingen gedaan voor een verdiepend en uitgebreid vervolgonderzoek.

5.2 Aanbevelingen voor nader onderzoek

Een verdiepend vervolgonderzoek is wenselijk. Hierbij kan een volledige LCA en een MPG berekening worden gemaakt, zodat duidelijk wordt hoe klimaatverandering (Global Warming Potential) na karakterisatie en weging doorwerkt in de MPG of MKI-score. Ook dienen de HSB en CLT casco's te worden geoptimaliseerd voor duurzaam materiaalgebruik waarbij het streven is zoveel mogelijk cat.1 data te gebruiken.

Nader onderzoek is ook nodig om te bepalen of en hoe tijdelijke koolstofopslag kan worden meegenomen in de MKI/MPG. Dit onderzoek zal worden uitgevoerd door TNO in overleg met andere LCA-experts in Nederland, verenigd in de VLCA, de vereniging van LCA deskundigen. Ook zullen stakeholders worden betrokken zoals de stichting NMD, de Dutch Green Building Council en de Europese normcommissie. Voor een eventuele wijziging in de methodiek is een breed draagvlak nodig, zowel op nationaal als op internationaal niveau.

De levenscyclusanalysemethode is ontwikkeld in een lineaire economie, waarbij producten aan het einde van de levensduur als afval vrijkomen. Nu Nederland en Europa op weg zijn naar een circulaire economie is het aan te bevelen scenario's voor hoogwaardig hergebruik te onderzoeken. Door hergebruik kunnen CO₂-emissies nog langer worden uitgesteld. In het vervolgonderzoek zal ook hier aandacht aan worden besteed.

Referenties

Brandao, M. et al. (2013): *'Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting'*; in: *Journal of Life Cycle Assessment 2013* (18); pp. 230-240.

Belzen, T. van (2020): *'Hout flink benadeeld in overheidseisen duurzaam bouwen'*; in: *Cobouw*, 4 december 2020.

BZK (2020): *'Voortgang circulair bouwen, beantwoording vragen, uitvoering moties'*; brief aan TK 29 september 2020.

DERIX (2020): *'CLT'* https://www.derix.de/data/DERIX_X_Lam_Brosch_NL_2019_03_WEB.pdf

DGMR (2016): *'Referentie gebouwen BENG (Bijna Energie Neutrale Gebouwen)'*; E.2015.1371.00.R0019; DGMR; Den Haag, 2016.

DGV (2020): *'Houten spanten opnieuw gebruikt'*; DeGrootVroomshoop; <https://degrootvroomshoop.nl/gelijmde-houtconstructies/hergebruik-houten-spanten/>

Eijs, J. van (2019): *Motie over houtbouw als mogelijkheid om klimaatverandering tegen te gaan* <https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/detail?id=2019Z20573&did=2019D43029>

EPA (2010): *'Understanding global warming potentials'*; Webartikel EPA 09-09-2020, www.epa.gov/qhgmissions/understanding-global-warming-potentials.

Fouquet, M. et al. (2015): *'Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: application to biogenic carbon and global warming assessment'*; in: *Buildings & Energy 90* 2015; pp.50-59.

Hoxha, E. (2020) et. al.: *'Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods'*; in: *Buildings and Cities*, 1(1), pp. 504–524.

ILCD (2010): *'International reference Life Cycle Data system (ILCD) - General guide for life cycle assessment Detailed guidance'*; European Commission; Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability; Publications Office of the European Union.

INBO (2021): *'Cross Laminated Timber - handleiding voor architecten en bouwkundigen'*; Amsterdam, 2021.

IPCC (2013) / Myhre, G., et al. (2013): *'Anthropogenic and Natural Radiative Forcing'*, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; in: Stocker, T.F.; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

ISSO/CH (2020): *'Handboek Houtskeletbouw'*; ISSO / Centrum Hout; herziene versie 2012; Rotterdam, 2020.

JRC (2010): '*Analysis of existing Environmental Impact Assessment Methodologies for use in Life Cycle Assessment*'; ILCD Handbook European Commission – JRC, Ispra, 2010.

LenteAkkoord (2020): '*Consultatie Verzamelversie wijziging Besluit Bouwwerken Leefomgeving*'; brief aan Min. BZK dd. 20 maart 2020 inzake aanscherping MPG

Levasseur, A. et. al. (2010): '*Considering time in LCA: dynamic LCA and its application to global warming impact assessments*'; in: Env. Sc. Technol. 44:3169-3174.

NIBE (2019): '*Potentie van biobased materialen in de bouw*'; NIBE Bussum, juli 2019.

NMD (2020): '*CO2 opname in bouwmaterialen*'; webartikel NMD 16-11-2020 <https://milieudatabase.nl/co2-opname-in-bouwmaterialen/>

NMD (2020): '*Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken 1.0*'; Stichting Nationale Milieu Database; Rijswijk, juli 2020.

PAS 2050 (2011): '*Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*'; BSI System.

Penaloza, Diego et. al. (2016): '*Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings*'; in: Construction & Buildings Materials 2016 (125); pp.219-226.

Pittau, F. et al. (2018): '*Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls*'; Building and Environment, 129, 117–129.

Telness, L.G.F. et al. (2017): '*Comparative assessment for biogenic carbon accounting methods in carbon footprint of products: a review study for construction materials based on forest products*'; iForest : Biogeosciences and Forestry, 10:815-823.

TNO (2020): Webinar Biobased '*Houtbouw van Hype naar Impact*'; Dutch Green Building Week; 23 september 2020. https://channel.royalcast.com/tnowebcasts/#!/tnowebcasts/20200923_1

VORM (2020): '*Manifest voor een eerlijk speelveld voor een duurzamer Nederland*'; Rotterdam, 2020. <https://vorm.nl/nieuws/manifest-ee-eerlijk-speelveld-voor-ee-duurzamer-nederland>

VPRO (2019): '*Houtbouwers*'; <https://www.vpro.nl/programmas/tegenlicht/kijk/afleveringen/2019-2020/houtbouwers.html>

W/E (2016): '*Klimaatwinst door bouwen in hout*'; W/E Adviseurs; Utrecht, 2016.

Woodenergy (2017): '*Standards & technical Specifications*'; www.woodenergie.ie .

Ondertekening

Delft/Utrecht, 25 maart 2021



dr. ir. Jan Harm Urbanus
Research Manager

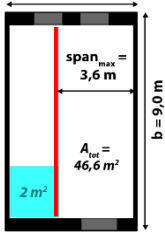
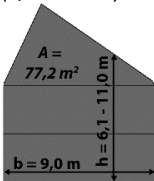


ir. Elisabeth Keijzer
Auteur

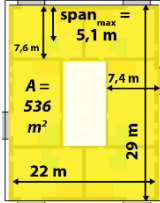
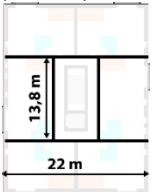
BIJLAGE 1: Toelichting woningelementen voor impactanalyse

In onderstaande tabellen zijn op basis van de BENG referentiewoningen twee scenario's uitgewerkt als basis voor de LCA-berekeningen HSB, CLT en beton. De BENG referentiegebouwen lijken overigens meer geschikt voor betonnen constructies dan houten constructies. Vanwege de verwachte ontwerpverschillen zijn voor HSB en CLT scenario's met een laag (1) en hoog (2) materiaalgebruik gedefinieerd. Dit is zowel gedaan voor een rijtjeswoning (woning S tussen) als een appartementswoning (woongebouw M). In de tabellen zijn de materialen en hoeveelheden aangegeven voor de verdiepingsvloeren en woning scheidende wanden. In het rapport is gewerkt met het gemiddelde en een foutbalk die de bandbreedte in materialisatie weergeeft.

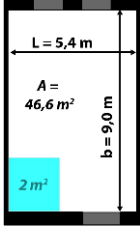
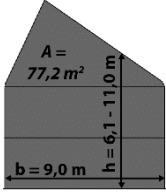
Tabel 1: Input data scenario 1 – Woning S tussen

Elementen	HSB	CLT	Beton
Verdiepingsvloer (x2 verdiepingen) $L = 5,4 \text{ m}$ 	Balklaag - Vuren 44 x 219, h.o.h. 488 $L = 5,4 \text{ m}$ (x20 pcs) $V = 1,0 \text{ m}^3$ (x2) Ondervloer Triplex/OSB 18mm $V = 0,83 \text{ m}^3$ (x2) Isolatie Minerale wol 80mm $V = 3,7 \text{ m}^3$ (x2) Plafond Gipskartonplaat 12,5mm $V = 0,58 \text{ m}^3$ (x2)	140 mm CLT - Vuren $V = 6,5 \text{ m}^3$ (x2) Drukvaste harde isolatie 50 mm (steenwol geperst) $V = 2,3 \text{ m}^3$ (x2) Gipsvezelplaat 12,5 mm $V = 0,58 \text{ m}^3$ (x2)	180 mm beton $V = 8,4 \text{ m}^3$ (x2)
wsw (dragend) (0,5 wand x2)  $h_{\text{gem}} = 8,6 \text{ m}$	Balklaag - Vuren 2 x 38 x 89 mm h.o.h. 400 $L = 8,6 \text{ m}$ (x23 pcs) $V = 1,3 \text{ m}^3$ (x1) Gipsvezelplaat 2 x 15 mm $V = 2,3 \text{ m}^3$ (x1) Minerale wol 2 x 90mm $V = 14 \text{ m}^3$ (x1)	2 x 80 mm CLT - Vuren $V = 12 \text{ m}^3$ (x1) Minerale wol 30 mm $V = 2,3 \text{ m}^3$ (x1) 2 x 12,5 mm gipsplaat $V = 1,9 \text{ m}^3$ (x1)	250 mm beton $V = 19 \text{ m}^3$ (x1)

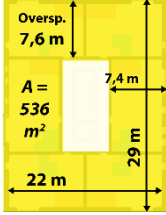
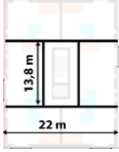
Tabel 2: Input data scenario 1 - Woongebouw M woningen

Elementen	HSB	CLT	Beton
<p>Vloeren, wsv (1 verdieping, / 6 woningen)</p> 	<p>69 x 269 h.o.h 305 – Vuren L = 7,5 (x235 pcs) V = 33 m³ (/6)</p> <p>24 mm triplex ondervloer V = 13 m³ (/6)</p> <p>Op de vloer 20 mm minerale wol steenwol geperst V = 11 m³ (/6)</p> <p>Plafond 2 x 15 mm gipsvezelplaat V = 16 m³ (/6)</p> <p>Isolatie Minerale wol 80 mm V = 43 m³ (/6)</p>	<p>200 mm CLT - Vuren V = 107 m³ (/6)</p> <p>Drukvaste harde isolatie 50 mm (steenwol geperst) V = 26,8 m³ (/6)</p> <p>Gipsvezelplaat 12,5 mm V = 6,7 m³ (/6)</p>	<p>210 mm beton V = 113 m³ (/6)</p> <p>25 mm isolatie (steenwol geperst) V = 13 m³ (/6)</p>
<p>Dragende wsv (h= 3,1 m)</p>  <p>Totale lengte = 72 m Totale oppervlakte = 223 m²</p>	<p>Balklaag - Vuren 2 x 38 x 89 mm h.o.h. 400 L = 3,1 m (x180 pcs) V = 3,8 m³ (/6)</p> <p>Gipsvezelplaat 2 x 15 mm V = 6,7 m³ (/6)</p> <p>Minerale wol 2 x 90mm V = 40 m³ (/6)</p>	<p>2 x 80 mm CLT - Vuren V = 36 m³ (/6)</p> <p>Minerale wol 30 mm V = 6,7 m³ (/6)</p> <p>2 x 12,5 mm gipsplaat V = 5,6 m³ (/6)</p>	<p>Beton 250 mm V = 56 m³ (/6)</p>

Tabel 3: Input data scenario 2 - Woning S tussen

Elementen	HSB	CLT	Beton
Verdiepingsvloer <i>(x2 verdiepingen)</i> 	Balklaag - Vuren 69 x 244, h.o.h. 305 L = 5,4 m (x30 pcs) V = 2,7 m³ (x2) Ondervloer Triplex/OSB 18mm V = 0,83 m³ (x2) Isolatie Minerale wol 80mm V = 3,7 m³ (x2) Plafond Gipskartonplaat 12,5mm V = 0,58 m³ (x2)	200 mm CLT - Vuren V = 9,3 m³ (x2) Drukvaste harde isolatie 50 mm (steenwol geperst) V = 2,3 m³ (x2) Gipsvezelplaat 12,5 mm V = 0,58 m³ (x2)	180 mm beton V = 8,4 m³ (x2)
wsw (dragend) <i>(0,5 wand x2)</i> 	Balklaag - Vuren 2 x 2 x 38 x 89 mm h.o.h. 600 L = 8,6 m (x16 pcs) V = 1,9 m³ (x1) Gipsvezelplaat 2 x 2 x 15 mm V = 4,6 m³ (x1) Minerale wol 2 x 90mm V = 14 m³ (x1)	2 x 100 mm CLT - Vuren V = 15 m³ (x1) Minerale wol 30 mm V = 2,3 m³ (x1) 2 x 2 x 12,5 mm gipsplaat V = 3,9 m³ (x1)	250 mm beton V = 19 m³ (x1)

Tabel 4: Input data scenario 2 - Woongebouw M woningen

Elementen	HSB	CLT	Beton
<p>Vloeren, wsw (1 verdieping, /6 woningen)</p> 	<p>Constructief 69 x 269 h.o.h 305 – Vuren L = 7,5 (x235 pcs) Extra volume oversp.: 200% V = 66 m³ (/6)</p> <p>24 mm triplex ondervloer V = 13 m³ (/6)</p> <p>Op de vloer 20 mm minerale wol steenwol geperst V = 11 m³ (/6)</p> <p>Plafond 2 x 15 mm gipsvezelplaat V = 16 m³ (/6)</p> <p>Isolatie Minerale wol 80 mm V = 43 m³ (/6)</p>	<p>280 mm CLT - Vuren V = 150 m³ (/6)</p> <p>Drukvastte harde isolatie 50 mm (steenwol geperst) V = 26,8 m³ (/6)</p> <p>Gipsvezelplaat 12,5 mm V = 6,7 m³ (/6)</p>	<p>210 mm beton V = 113 m³ (/6)</p> <p>25 mm isolatie (steenwol geperst) V = 13 m³ (/6)</p>
<p>Dragende wsw (1 verdieping: h= 3,1 m)</p>  <p>Totale lengte = 72 m</p> <p>Totale oppervlakte = 223 m²</p>	<p>Balklaag - Vuren 2 x 2 x 38 x 89 mm h.o.h. 600 L = 3,1 m (x120 pcs) V = 5,0 m³ (/6)</p> <p>Gipsvezelplaat 2 x 2 x 15 mm V = 13 m³ (/6)</p> <p>Minerale wol 2 x 90mm V = 40 m³ (/6)</p>	<p>2 x 100 mm CLT - Vuren V = 45 m³ (/6)</p> <p>Minerale wol 30 mm V = 6,7 m³ (/6)</p> <p>2 x 2 x 12,5 mm gipsplaat V = 11 m³ (/6)</p>	<p>Beton 250 mm V = 56 m³ (/6)</p>