

Eindrapportage

M1 – Circulaire Biobased Materialen

TNO 2023 R12767A – 8 mei 2024

M1 - Circulaire Biobased Materialen

Eindrapportage

Author(s)	N. te Duits, G. Gamarra Scavone, H. van de Minkelis, R. Bezemer en J. de Jong
Classification report	TNO Publiek
Summary	TNO Publiek
Number of copies	Number of copies
Number of copies	0

All rights reserved

No part of this publication may be reproduced and/or published by print, photoprint, microfilm or any other means without the previous written consent of TNO.

© 2024 TNO

Inhoud

Inhoud.....	3
1 Leeswijzer	4
2 Introductie.....	5
2.1. Aanleiding	5
2.2. Onderzoeksdoel.....	5
2.3. Specificatie emissiereductie.....	5
2.4. Beoogde resultaten.....	6
2.5. Partners	7
3 Onderzoeksopzet	8
4 Achtergrondinformatie hergebruik van hout.....	10
5 Resultaten.....	13
5.1. Aanvoer, scheiding, sortering (WP1)	13
5.1.1. Inschatting hoeveelheden (sloop)hout.....	13
5.1.2. Inzamelprotocol slopers.....	15
5.1.3. Inzamelprotocol milieustraat	22
5.2. Verwerking tot halffabricaat: imaging, selectie, sorteren en identificeren (WP2 & WP3) ..	26
5.2.1. Opzet verwerkingsstraat (flowcharts).....	26
5.2.2. Proef DZB Leiden	30
5.2.3. Scannen van hout en verwijderen ongewenste elementen	35
5.2.4. Brandklasse inlands hout.....	44
5.3. Opwerken tot producten voor de timmerindustrie (WP4)	47
5.3.1. Specificaties halffabricaten timmerindustrie.....	47
5.3.2. Vingerlassen.....	50
5.3.3. Voorbeelden van ‘opwerkingsketens’	53
5.4. Emissieberekeningen (WP5).....	62
5.4.1. Onderzoek Milieu-impact	62
6 Conclusies	68
7 Ondertekening.....	71

1 Leeswijzer

Dit onderzoekverslag bestaat uit zeven hoofdstukken, met als eerste hoofdstuk deze leeswijzer. In hoofdstuk 2 wordt een inleiding op het onderzoek gegeven met daarin de aanleiding, het onderzoeksdoel, de beoogde resultaten en de betrokken partners. Hoofdstuk 3 beschrijft de onderzoeksopzet, met hierin een uitgebreide toelichting van de verschillende onderzoeksactiviteiten per werkpakket. In hoofdstuk 4 wordt achtergrondinformatie over het hergebruik van hout gegeven. Het geeft inzicht in de state-of-the-art wat betreft het onderwerp. Hoofdstuk 5 schetst de resultaten van alle vijf werkpakketten, WP1 tot en met WP5. De werkpakketten volgen de gehele keten van inzameling en verwerking tot opwerking, om zo van afval- en inlands hout tot een hoogwaardig eindproduct te komen. Ten slotte vat hoofdstuk 6 de belangrijkste conclusies samen en bevat de aanbevelingen voor toekomstige onderzoek.

2 Introductie

2.1. Aanleiding

De vraag naar (circulaire) biobased grondstoffen voor de bouw stijgt sterk. Hout kan ingezet worden voor zowel constructieve als niet-constructieve toepassingen; andere biobased materialen hoofdzakelijk voor niet-constructieve toepassingen. Verwacht wordt dat het aanbod van hout de vraag niet structureel kan bijhouden: een bedreiging voor de ambitie om meer houtbouw en biobased materialen toe te passen. Om beter aan de vraag naar hout te kunnen voldoen, is het noodzakelijk om alternatieve bronnen van volhout te vinden. De prijsstijgingen van hout maken dat zulke alternatieven (ook financieel) steeds interessanter worden.

2.2. Onderzoeksdoel

Dit project is onderdeel van het kennis- en innovatieprogramma Emissieloos Bouwen. Hierin wordt een aanpak ontwikkeld die helpt om de uitstoot te verminderen van stikstof, CO₂ en fijnstof in de bouwsector. Het programma richt zich o.a. op het toepassen van lichtere en duurzame bouwmaterialen, prefab woningen, effectievere bouwlogistiek, digitalisering en inzet van emissieloze werktuigen op de bouwplaats zelf.

Specifiek onderzoekt dit deelconsortium hoe hout uit Nederlandse bossen, herbruikbaar A- en B-hout en andere biobased materialen op industriële wijze verwerkt kunnen worden tot grondstof voor nieuwe, hoogwaardige producten, tot o.a. CLT aan toe. In dit project zijn bedrijven betrokken uit de gehele keten, van aanvoer tot toepassing.

Gebruik van hout uit Nederlandse bossen levert een aanzienlijke besparing op in NO_x-emissies, omdat het een alternatief voor aanvoer uit het buitenland is. Hergebruik van A- en B-hout resulteert in reductie van CO₂-emissie, doordat het tot een bouwproduct met substantiële waarde wordt gemaakt in plaats van verbrand in een biomassacentrale.

2.3. Specificatie emissiereductie

Het beschikbaar maken van biobased materialen (met name hout) uit Nederland in een geschikte vorm voor toepassing in de bouw zal leiden tot vervanging van materialen die nu gebruikt worden. In constructieve toepassingen zal inlands en opgewaardeerd hout steenachtige materialen zoals beton kunnen vervangen. Voor niet-constructieve toepassing zullen hout en andere biobased materialen o.a. gips-, kalkzandsteen- en metalstud wanden kunnen vervangen. Dit leidt tot vermindering van de CO₂-emissie op diverse manieren:

- Toepassing van meer hout in de bouw leidt tot een grotere vraag naar hout, wat kan leiden tot een groter areaal aan bos voor productiehout, waardoor meer CO₂ vastgelegd wordt;
- In hout is veel CO₂ opgeslagen. Dat wordt niet meer aan de lucht afgegeven (bij verbranding in biomassacentrale), maar wordt na eventuele opwerking toegepast in de bouw, waardoor CO₂ langdurig opgeslagen blijft; hetzelfde geldt voor andere biobased materialen;
- Biobased grondstoffen (die bij de groei CO₂ hebben vastgelegd) zullen in toepassingen gebruikt worden waarvoor tot nu toe niet-biobased materialen gebruikt worden. Bij de winning en verwerking van de grondstoffen, bij de opwerking tot – vaak zware, steenachtige – bouwelementen en bij het vervoer komt veel CO₂ vrij. Toepassing van de lichtere biobased materialen (inclusief hergebruik) als bouwelementen kan daarom leiden tot reductie van de CO₂-emissie;

- Biobased bouwelementen kunnen gemakkelijker dan de huidige bouwelementen off-site (prefab) geproduceerd worden. Dat leidt tot reductie van het aantal vervoerbewegingen van materialen en van bouwvakkers, dus tot reductie van de CO₂-emissie;

Op in ieder geval twee manieren leidt toepassing van biobased materialen ook tot een reductie van NO_x-emissie:

- Off-site (prefab) productie van bouwelementen uit biobased materialen zal leiden tot minder gebruik van fossiele brandstoffen voor transport door minder transportbewegingen;
- Biobased bouwelementen zijn lichter dan de huidige – vaak zware, steenachtige – elementen, wat leidt tot minder gebruik van fossiele brandstoffen voor transport en voor bewegingen/logistiek op de bouwplaats.

De bijdrage aan NO_x-emissiereductie is lastig te kwantificeren naar emissies op de bouwplaats, want dit project betreft een volledige ketensamenwerking waar de bouwplaats een minimaal onderdeel van is. Het hoogwaardig hergebruiken van hout op grote schaal betekent eigenlijk het creëren van een nieuwe grondstof.

2.4. Beoogde resultaten

Het doel van het project is toepassing mogelijk maken van meer bio-based materialen in de bouw, in veel gevallen off-site te produceren (woon)modules. De nadruk ligt daarbij op gebruikt en inlands hout. Het project richtte zich oorspronkelijk op de gehele keten voor wat betreft opgewaardeerd en inlands hout en voor andere biobased materialen op de verwerking van de grondstof tot bouw materiaal. In de uitvoering bleek het opwaarderen van hout een zodanige inspanning te vragen, dat inzet van andere biobased materialen buiten beschouwing is gebleven. De oorspronkelijke beoogde uitkomsten van het project zijn:

- Inname- en scheidingsprotocol om geschikt gebruikt A-hout (niet-geïmpregneerd, ongelakt en onbehandeld hout) en B-hout (niet-geïmpregneerd, geschilderd/gelijmd/gelamineerd hout) te oogsten;
- Schatting van het jaarlijkse potentieel aan opgewaardeerd A- en B-hout en biobased constructief materiaal;
- Beschrijving van een proces en deelprocessen om uit A-, B- en inlands hout bruikbaar volhout te oogsten;
- Prototype van minimaal één machine die m.b.v. detectietechnieken bruikbare delen uit aangeleverd hout ‘snijdt’ of ‘zaagt’ (halffabrikaten), inclusief raming van kosten voor zo’n machine met te definiëren capaciteit;
- Specificaties van te produceren grondstoffen en halffabrikaten voor timmerindustrie, zodat verdere opwerking mogelijk is;
- Prototype van minimaal één machine die halffabrikaten sorteert op o.a. afmetingen en kwaliteit, inclusief raming van de kosten voor zo’n machine met te definiëren capaciteit;
- Prototype van minimaal één machine die halffabrikaten opwerkt tot producten die gebruikt kunnen worden in de timmerindustrie (o.a. vingerlassen, lamineren en CLT-productie), inclusief raming van kosten voor zo’n machine met te definiëren capaciteit;
- Resultaten van emissieberekeningen: effecten van de onderzochte toepassing van meer biobased materialen op emissies (m.n. NO_x en CO₂).

N.B. De drie genoemde prototypes van machines worden in dit project gezien als geïntegreerd in een verwerkingsstraat.

2.5. Partners

1. TNO (www.tno.nl), projectleiding, onderzoek en innovatie op het gebied van bouw, constructies en toepassingen van hout;
2. Hogeschool Amsterdam (HvA) <https://www.hva.nl/urban-technology/gedeelde-content/hoofddocentschappen/digital-production-research-group/team/team.html>;
3. Heko spanten (<https://www.hekospanten.nl/>), de specialist in het construeren, fabriceren en monteren van gelijmde dragende houtconstructies met ambitie om (ook) gerecycled hout te gebruiken;
4. Noordereng Groep (<https://noorderenggroep.eu/>), namens hen ABT, expert in engineering en procesdigitalisering;
5. Hedgehog Company (<https://hedgehogcompany.nl/>), duurzaamheidsberekening en optimalisering van producten en processen voor emissiereductie en -rapportage;
6. WEBO (<https://www.webo.nl/>), innovatieve timmerfabrikant van houten kozijnen en HSB elementen;
7. Helwig (<https://www.helwig.nl/>), partner voor bouwondernemingen en woningbouwverenigingen met moderne machines;
8. HVC (<https://www.hvcgroep.nl/>); in de bio-energiecentrale in Alkmaar wordt afvalhout verbrand dat niet meer hergebruikt of gerecycled kan worden; het percentage hout dat hergebruikt wordt, wil HVC door deelname aan dit project vergroten;
9. Woodjoint (<https://woodjoint.nl/>) staat voor circulair ondernemen en werkt mee aan het hergebruik van hout en houtproducten door het kwalitatief hoogwaardig lamineren en vingerlassen;
10. Staatsbosbeheer (SBB) <https://www.staatsbosbeheer.nl/zakendoen/inspirerende-voorbeelden/lumiere-cinema> zoekt naar toepassingen van hout uit Nederlandse bossen. Dit betreft toepassing van inlandse houtsoorten die nu nog niet toegepast worden, als bouw materiaal en voor een groot deel verbrand worden. Ook zoekt SBB naar de mogelijkheid om bestaande technieken te gebruiken om de producten de gewenste (tijdloze) uitstraling te geven.
11. A. van Liempd sloopbedrijven (<https://www.avanliempd.nl/>) staat voor duurzaam slopen en zoveel mogelijk hergebruik van bouwmaterialen.
12. Hooijer Renkum (<http://www.hooijer.nl>) voert o.a. grondwerk, sloopwerk en sanering uit en zet zich in voor maatschappelijk verantwoord ondernemen, waarvan circulair werken en hergebruik van materialen onderdeel is.
13. New Horizon Urban Mining B.V. (<http://www.newhorizon.nl>) voert demontage/sloop uit en past het geoogste hout zo waardevol mogelijk toe, waar mogelijk geschikt voor CLT-productie.
14. Boerboom Hout B.V. (<http://www.boerboom.nl>) gaat investeren in een CLT-fabriek in Nederland en onderzoekt met New Horizon hoe sloophout verwerkt kan worden in CLT-panelen. Boerboom werkt daarbij aan het technische opwerkingsproces, beproeving en marktonderzoek.
15. Renewi Nederland B.V. (<http://www.renewi.nl>) profileert zich als een toonaangevend waste-to-productbedrijf door bij te dragen aan een duurzame samenleving. Renewi richt zich exclusief op het verkrijgen van waarde uit afval in plaats van het te verbranden of storten.

3 Onderzoeksopzet

Dit project bestaat uit vijf verschillende werkpakketten. Deze worden hieronder toegelicht, inclusief het beoogde resultaat dat aansluit bij de onderzoeksactiviteiten uit het werkpakket. Kort is per werkpakket aangegeven op welke punten gedurende het project het oorspronkelijke plan is bijgesteld.

WP1 Aanvoer, scheiding, sortering (Hoofdstuk 5.1)

Als eerste stap worden de huidige logistieke processen voor aanvoer, scheiding en sortering beschreven en wordt onderzoek uitgevoerd hoe de processen te optimaliseren zijn. Met betrekking tot hergebruik van A- en B-hout is de eerste stap het scheiden bij de bron, bij gemeentewerven en door sloopbedrijven. Hier kan A-hout in zekere mate uniform en als redelijk 'ongeschonden' hout geoogst worden. Vervolgens zullen ook minder uniforme stapels hout (B-hout) aangepakt worden. Er zal een inname- en scheidingsprotocol voor A- en B-hout en ook voor ander biobased materiaal worden opgesteld.

Deliverable: innameprotocol en schatting van potentieel van jaarlijkse hoeveelheid opgewaardeerd A- en B-hout en biobased constructief materiaal.

Bijstellingen gedurende het project: andere biobased materialen zijn niet onderzocht.

WP2 Verwerking tot halffabricaat: imaging en selectie (Hoofdstuk 5.2)

Bestaande imaging- en andere detectietechnieken worden toegepast om te bepalen in hoeverre geschikt hout geselecteerd kan worden. Onderzocht wordt in hoeverre het mogelijk is om 'vervuiling' (zoals spijkers, verf en slechte delen) efficiënt te verwijderen en zo bruikbare delen te selecteren uit het aangeleverde hout. Dat leidt tot een procesbeschrijving. Op basis van een inventarisatie van bestaande machines (incl. prototypes) voor houtbewerking zal worden onderzocht welke eisen aan een machine voor detectie en zagen/snijden gesteld moeten worden, welke functionaliteiten nodig zijn en wat de kosten daarvoor zouden kunnen zijn.

Deliverable: prototype van machines die bruikbare delen uit aangeleverde hout 'snijden' of 'zagen' en raming van kosten voor machines met te definiëren capaciteit.

Bijstellingen gedurende het project: er is geen fysiek prototype ontwikkeld, omdat in de basis de betreffende machines beschikbaar zijn voor opname in een 'verwerkingsstraat'.

WP3 Sorteren en identificeren: specificaties van bruikbare delen (Hoofdstuk 5.2)

Onderzocht wordt hoe een machine het hout automatisch efficiënt kan sorteren, o.a. op afmetingen en kwaliteit. De daarvoor relevante parameters (zoals het vochtgehalte) worden vastgesteld. Het resultaat van de sortering moet zijn dat het hout in verschillende bruikbare categorieën wordt ingedeeld voor verdere verwerking.

Op basis van een inventarisatie van bestaande machines (incl. prototypes) zal worden onderzocht welke eisen aan een sorteermachine gesteld moeten worden, welke functionaliteiten nodig zijn en wat de kosten daarvoor zouden kunnen zijn.

Deliverable: prototype van machines die halffabricaat sorteren en raming van de kosten voor machines met te definiëren capaciteit.

Bijstellingen gedurende het project: er is geen fysiek prototype ontwikkeld, omdat automatische sortering pas onderzocht kan worden ná automatische herkenning van o.a. afmetingen en kwaliteit. Dat laatste blijkt een grotere onderzoeks- en ontwikkelinspanning te kosten dan in dit project was voorzien.

WP4 Opwerken tot producten timmerindustrie (Hoofdstuk 5.3)

Specificaties worden gedefinieerd van te produceren grondstoffen en halffabricaten voor timmerindustrie, zodat het 'fit' met de vragen van parametrisch ontwerp en verdere opwerking mogelijk is. Denk hierbij aan vingerlassen, lamineren en CLT-productie. Onderzocht zal worden welke eisen aan een machine gesteld moeten worden die halffabricaten opwerkt tot producten die gebruikt kunnen worden in de timmerindustrie (o.a. vingerlassen, lamineren en CLT-productie), welke functionaliteiten nodig zijn en wat de kosten daarvoor zouden kunnen zijn.

Deliverable: prototype van machines en raming van de kosten voor machines met te definiëren capaciteit.

Bijstellingen gedurende het project: er is geen fysiek prototype ontwikkeld, omdat in de basis de betreffende machines beschikbaar zijn voor opname in een 'verwerkingsstraat'.

WP5 Projectmanagement en emissieberekeningen (Hoofdstuk 5.4)

Algemeen projectmanagement is onderdeel van het project. Gedurende het gehele project wordt gewerkt aan het opstellen en verbeteren van NO_x- en CO₂-emissieberekeningen om de emissiebeperkingen te kwantificeren die behaald worden door toepassing van inlands hout en gebruikt A- en B-hout.

Deliverable:

1. financiële rapportage d.m.v. ingevulde formats van programma steering comité.
2. inhoudelijke rapportage (dit rapport): uitgevoerde onderzoeken, experimenten en verkenningen met statement met betrekking tot de emissiereductie van NO_x, CO₂ (en evt. fijnstof).

Bijstellingen gedurende het project: al vanaf het begin van het project is de nadruk gelegd op emissiereductie van NO_x, CO₂; er is niet aan fijnstof gewerkt.

4 Achtergrondinformatie hergebruik van hout

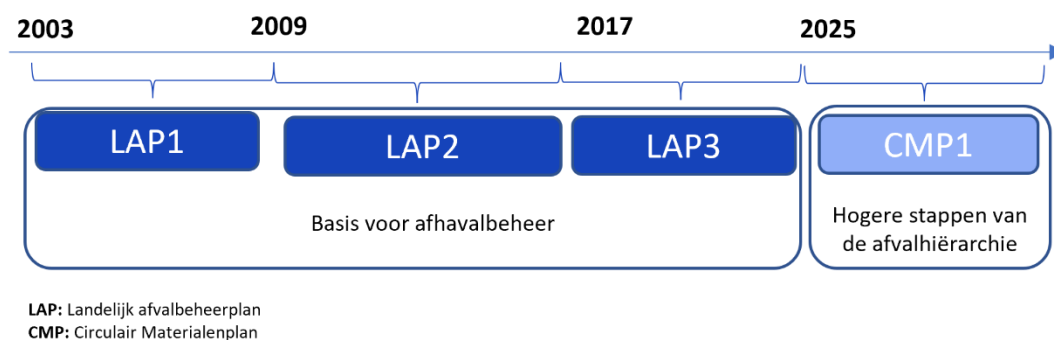
De Nederlandse afvalwet- en regelgeving maakt wat betreft hout onderscheid tussen rest- en afvalhout:

- **Resthout.** Hout dat vrijkomt bij de productie van producten in de houtverwerkende industrie (Leek et al., 2009).
- **Afvalhout.** Hout dat vrijkomt aan het einde van de levenscyclus van een houtproduct (Leek et al., 2009). Enkele primaire bronnen van gebruikt hout zijn bouw- & sloopafval, houten verpakkingen, gemeentelijk en huishoudelijk afval en afgedankt meubilair (Boosten et al., 2014). De markt voor afvalhout is complexer dan die voor resthout (Leek et al., 2009). De focus van dit onderzoek ligt op afvalhout.

Afvalhout is verder onder te verdelen in drie categorieën. Namelijk A-hout, B-hout en C-hout.

- **A-hout:** is schoon, ongeverfd en onbehandeld hout.
- **B-hout:** is verlijmd, geverfd of gelakt hout. Er wordt in de wet- en regelgeving geen onderscheid gemaakt tussen massief B-hout en residu of gelijmd B-hout.
- **C-hout:** geïmpregneerd of verduurzaamd hout. Dit hout is behandeld is met stoffen waardoor de levensduur wordt verlengd.

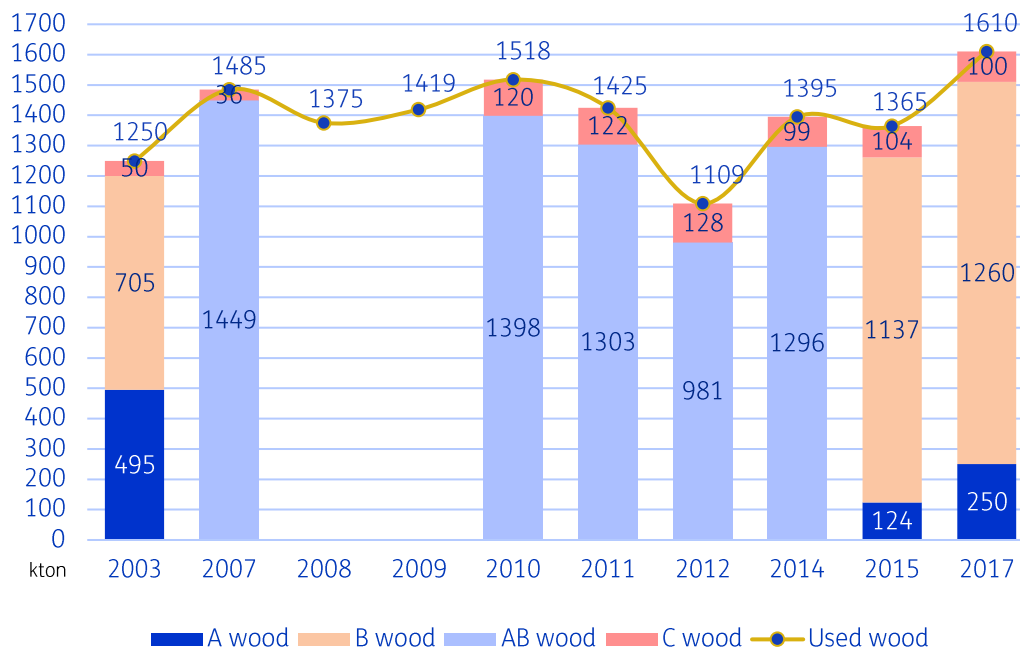
Het Nederlandse Landelijk Afvalplan (LAP) is de richtlijn voor het omgaan met afval in Nederland. In de afgelopen twee decennia zijn er verschillende ontwikkelingen geweest naar drie verschillende LAP's (zie Figuur 1). In het sectorplan hout wordt de wettelijke minimumstandaard voor verwerking van zowel A-, B- als C- hout beschreven. Deze minimumstandaard wordt voornamelijk gespecificeerd als 'andere nuttige toepassing'. Het kan hierbij gaan om o.a. hoofdgebruik als brandstof of het recyclen tot nieuw product (spaanplaat). De huidige regelgeving bepaalt dat gebruikt hout (het product of materiaal dat zijn levenscyclus heeft voltooid) als afval wordt beschouwd tot het moment van verdere verwerking (van Dam, 2013). In 2025 gaat de regelgeving over in het Circulaire Materialenplan (CMP1) waarin preventie en hergebruik in de richtlijnen zijn opgenomen (Rijkswaterstaat, z.d.).



Figuur 1, Tijdlijn van het Nederlandse beleid voor afvalpreventie en afvalbeheer

De inzameling van afvalhout varieert jaarlijks, zoals geïllustreerd in Figuur 2. De verdeling in aantallen is afhankelijk van de bronjaren van de publicaties waarop deze gegevens zijn gebaseerd. De meest recente cijfers over beschikbaar secundair hout in Nederland door de

jaren heen, komen uit een interne studie van TNO. A- en B-hout in Nederland leveren 1200-1500 kton op (2017), dat gedeeltelijk wordt hergebruikt (156-463 kton) of gebruikt voor energieopwekking (542-897 kton).



Figuur 2, ontwikkeling van het totaal van gebruikt hout in massa (kton) voor A-, B-, AB- en C-hout op de Nederlandse markt op basis van beschikbare gegevens voor 2003-2017.¹

Naast A- en B-hout richt dit onderzoek zich op palleshout, dit valt onder de categorie houten verpakkingen. Op hoofdlijnen kunnen twee typen pallets worden onderscheiden.

1. EPAL (European Pallet Association) or Europallets. Dit keurmerk wordt op pallets aangebracht om kwalitatief hoogwaardige pallets te garanderen (incl. rouleren). Een producent of reparateur mag dit keurmerk slechts na het verkrijgen van een licentie aanbrengen. Er zijn hiervan 14 verschillende typen pallets beschikbaar in diverse afmetingen. Europallets en blokpallets kunnen worden ingeleverd bij EPAL-leden tegen een vergoeding per pallet. Vervolgens worden de kapotte Europallets gerepareerd, mits er niet te veel beschadigingen zijn. Slechts een klein deel wordt verbrand. Bij het aanschaffen van Europallets zijn vervolgens verschillende opties mogelijk:²

- Nieuwe pallets: rechtstreeks uit de fabriek
- Eerste keuze pallets: slechts enkele keren gebruikt
- Tweede keuze pallets: meerdere keren gebruikt
- Gebruikte pallets: vaak gebruikt, maar kwaliteit nog steeds voldoende.

¹ Bronnen van 2003 (van Benthem et al., 2005); 2007 (Leek et al., 2009); 2008 (Boosten et al., 2014); 2009 (Boosten et al., 2014); 2010 (Boosten et al., 2014); 2011 (Boosten et al., 2014); 2012 (Boosten et al., 2014); 2014 (Tauw, 2017); 2015 (Tauw, 2017); 2017 (Tauw, 2017). De x-as is niet evenredig omdat er geen gegevens waren voor de jaren 2004-2006, 2013, 2016.

² 'Pallet reparatie', [Pallet reparatie | Hier vindt u meer info over het repareren van een Pallet \(epal.nl\)](https://www.epal.nl/pallet-reparatie), geraadpleegd 20 oktober 2023

2. Overige pallets (eenmalige pallets/ wegwerppallets): De tweede categorie zijn pallets zonder het EPAL keurmerk, in diverse afmetingen en types. In tegenstelling tot EPAL pallets, kunnen de onderdelen van wegwerppallets (planken en logs) niet onderling worden uitgewisseld bij herfabricage. Hiervoor zijn ze niet gecertificeerd. Dit maakt het hergebruiken ingewikkelder. Wat betreft hergebruik wordt een klein deel gerepareerd indien mogelijk, de overige pallets worden verpulverd. Met een magneet wordt het metaal verwijderd en de gefilterde houtsnippers worden veelal naar de verbranding gestuurd (en een enkele keer naar de spaanplaatindustrie). Er zijn op dit moment enkele initiatieven die zich focussen op recyclen van pallets om deze opnieuw inzetbaar te maken. Er zijn nog weinig tot geen initiatieven bekend die een hoogwaardigere toepassing voor het pallet hout op het oog hebben. Deze stroom van pallets (zonder EPAL keurmerk) is voornamelijk interessant voor dit onderzoek.

5 Resultaten

5.1. Aanvoer, scheiding, sortering (WP1)

Binnen dit werkpakket is er allereerst een schatting gemaakt van het potentieel van jaarlijkse hoeveelheid opgewaardeerd A- en B-hout en biobased constructief materiaal. Dit is op diverse manieren onderzocht, kwalitatief via milieustraten en kwantitatief voor sloopbedrijven. Daarnaast zijn de huidige logistieke processen voor aanvoer, scheiding en sortering beschreven en is onderzocht hoe de processen te optimaliseren zijn. Met betrekking tot hergebruik van A- en B-hout is de eerste stap het scheiden bij de bron, bij gemeentewerven en door sloopbedrijven. Er zou een inname- en scheidingsprotocol voor A- en B-hout worden opgesteld. De intentie was dat daarbij ook andere biobased materialen in dit project meegenomen zouden worden, maar dat is al vroeg in het project losgelaten gezien de grote behoefte aan voortgang m.b.t. hergebruik van hout.

5.1.1. Inschatting hoeveelheden (sloop)hout

Er is een inschatting gemaakt van de variërende hoeveelheden waarin verschillende soorten hout vrijkomen uit sloop. Hierbij is ook gekeken naar het deel dat al wordt hergebruikt in de huidige markt, het deel dat ongeschikt is en het deel dat vaak nog wordt weggegooid of verbrand, maar wel potentie heeft om te hergebruiken. Die laatste categorie is met name interessant omdat daarin potentie zit om extra hout uit de verbrandingsoven te houden en emissies te voorkomen.

Voor dit onderdeel zijn twee activiteiten ondernomen:

- A) Een literatuuronderzoek, met als resultaat het rapport “Bio-based materialen in de bouw: literatuuronderzoek naar houtbouw en benodigde volumes”³.
- B) Kennisuitwisseling met een onderzoek voor de provincie Zuid-Holland. Hierdoor was het mogelijk om uitgebreider onderzoek te doen. Via [deze link](#) is de rapportage van het onderzoek te lezen⁴. In [deel 1](#) van dit rapport is onder andere te lezen over de hoeveelheden B-hout die in Nederland jaarlijks gerecycled en verbrand worden, de redenen waarom dit gebeurt en wat ervoor nodig is om meer te hergebruiken.

5.1.1.1. Methode

- A) In het literatuuronderzoek zijn de ambities van overheid, provincies en gemeenten onderzocht als het gaat het gebruik van bio-based materialen in de bouw om bij te dragen aan de noodzakelijke woningbouw. Dat onderzoek richt zich primair op houtbouw. Hout wordt als bouw materiaal voor nieuwe huizen, hotels en kantoren steeds meer gebruikt en resulteert in een lagere CO₂-uitstoot in vergelijking met andere bouwmaterialen.
- B) In [hoofdstuk 8](#) (deel 2) van het rapport voor Zuid-Holland wordt de methode omschreven die is toegepast voor het gezamenlijke onderzoek (dit EB-project en het onderzoek bij de provincie Zuid-Holland). Hiernaar wordt verwezen voor een uitgebreide omschrijving. In het kort bestaat de methode uit twee onderdelen:
 - Interviews met slopers over vrijkomende materialen en hergebruik

³ TNO 2022 R12369, *Bio-based materialen in de bouw: literatuuronderzoek naar houtbouw en benodigde volumes*, 30 november 2022

⁴ Sloopcheck, *De herfabricage van sloophout in Zuid-Holland*, 1 februari 2023.

- Een data-analyse van gesloopte panden in 2017

TNO heeft het bedrijf Sloopcheck ingeschakeld voor deze en andere activiteiten die sloophout en sloop- en demontageprocessen betreffen. Dit gaat onder andere om het inzamelprotocol voor slopers, maar ook de proef bij de sociale werkplaats DZB in Leiden.

5.1.1.2. Resultaten

- A) Literatuuronderzoek: De resultaten uit de samenvatting van het rapport wordt hier overgenomen:

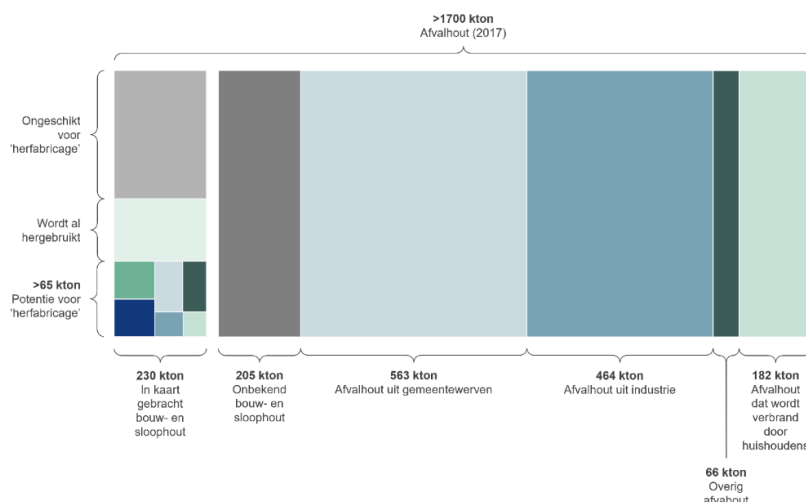
Wat is het aanbod van (primair) hout in Nederland?

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen het aanbod van primair hout in Nederland en wat er geïmporteerd wordt vanuit elders in Europa. Het aanbod van primair hout bedraagt circa 0,8 tot 1,2 *10⁶ m³. Ongeveer 90% van de houtvraag in Nederland is afkomstig uit import, waarvan 80% Europees hout. Daar er ongeveer 2,4*10⁶ m³ rondhout equivalent naar schatting is ingezet in 2015 voor woning- en utiliteitsbouw, zou dat betekenen dat 1,72*10⁶ m³ rondhout equivalent wordt geïmporteerd uit Europa.

Wat is het aanbod van secundair hout (vanuit sloop of productieafval) in Nederland?

Productie en verzamelen van A/B hout in Nederland levert 1200-1500 kton op. Hiervan wordt een deel (156-463 kton) hergebruikt en een deel (542-897 kton) gebruikt voor het opwekken van energie. Het is afhankelijk van de houtsoort wat de vertaling van kton in m³ betekend. De spreiding in aantallen ligt aan de bronjaartallen van de publicaties waar deze gegevens op gebaseerd zijn. Recente cijfers voor secundair hout en de verwerking daarvan zijn niet gevonden.

- B) De resultaten over de hoeveelheden sloophout zijn samengevat in een presentatie voor de leden uit het consortium van het EB-project⁵. Slide 5 tot en met 15 bevatten informatie over de hoeveelheden waarin verschillende soorten sloophout vrijkomen uit projecten waar slopers bij betrokken zijn. Hout dat vrijkomt uit kleine verbouwingen (zonder sloper), groot onderhoud (demontage door installateur) en hout uit andere bronnen naast sloop zijn hierin niet meegenomen. Slides 24 tot en met slide 29 bevatten aanvullende informatie over soorten sloophout. Figuur 3 hieronder geeft de belangrijkste resultaten weer.



Figuur 3, hoeveelheden afvalhout per categorie en uitsplitsing categorie bouw- en sloophout

⁵ Sloopcheck, [Bijlage 1_221011_presentatie hoeveelheden](#), 11 oktober 2022

5.1.1.3. Key take-away's

- Binnen de categorie “in kaart gebracht bouw- en sloophout” wordt naar inschatting al behoorlijk wat hergebruikt – een kwart ongeveer. Dit is een stuk meer dan momenteel wordt aangehouden als [forfaitaire waarden](#) door de NMD.
- Iets minder dan de helft is niet geschikt voor hergebruik. Belangrijkste redenen zijn dat het te stevig is bevestigd om op een economische manier los te krijgen, dat de afmetingen te klein zijn of dat het hout is aangetast door rot of chemicaliën voor verduurzaming.
- Ongeveer een derde is goed te hergebruiken terwijl dit nog niet gebeurt. Het gaat op zijn minst om 65 kton per jaar. Dit betreft voornamelijk balken, planken en kozijnen (slide 13).
- Buiten de categorie sloophout is er potentieel nog veel meer hout met potentie om hoogwaardiger te hergebruiken. Het hout dat goed in kaart is gebracht is namelijk minder dan 14% van al het gebruikte hout dat jaarlijks uit Nederland vrijkomt.

5.1.2. Inzamelprotocol slopers

Balken & planken, deuren, kozijnen waren de gebruikte houtstromen uit sloop waarvan het grootste deel herbruikbaar is, zoals is gebleken uit de analyse uit hoofdstuk 5.1.1. Een vierde houtstroom met potentie voor meer hergebruik zijn houten pallets. Omdat Sloopcheck zich richt op sloophout, is hier nog weinig onderzoek naar uitgevoerd. Er zijn casestudies gedaan om in kaart te brengen hoe het meest efficiënte proces voor demontage eruit ziet ten opzichte van het proces van reguliere sloop, waarbij hout niet wordt hergebruikt. Die case studies hadden betrekking tot houten balklagen (balken & planken) en kozijnen. Die twee stromen komen in dit hoofdstuk aan bod (figuur 4).



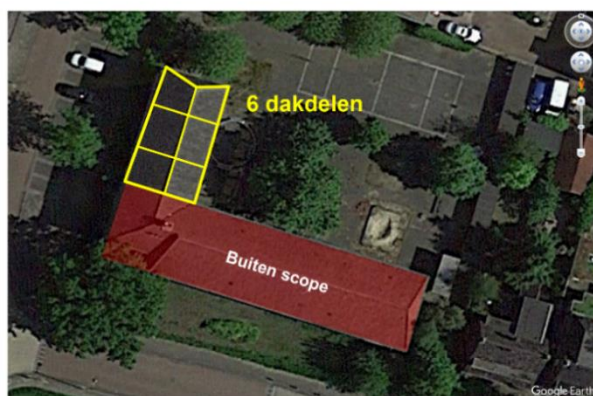
Figuur 4, case studies slopers houten balken en (binnen)kozijnen

5.1.2.1. Methode

Voor de casestudies voor balklagen en (binnen)kozijnen is dezelfde methode toegepast. Die is hieronder omschreven:

- **Concept hergebruikproces op basis van achtergrondkennis.** Voorafgaand aan de casestudies is voor verschillende materiaalstromen een globaal stappenplan opgesteld dat doorlopen moet worden bij hergebruik. Hierbij is alvast nagedacht over mogelijke obstakels.
- **Praktijktesten.** Bij twee slopers in het consortium, Hooijer Renkum en A van Liempd, is een sloopproject uitgekozen waarbij hout vrijkwam. Hieronder zijn deze projecten in meer detail toegelicht. Bij die projecten zijn speciale maatregelen getroffen om een dag(deel) lang mee te lopen, te experimenteren en data te verzamelen. Telkens zijn er foto's en filmpjes gemaakt en is met een stopwatch bijgehouden hoelang verschillende onderdelen van het proces duren.
- **Data verwerken in een processchema.** Sloopcheck heeft een tool ontwikkeld om processen inzichtelijk te maken. Voor beide casestudies zijn het proces en de bijbehorende kengetallen hierin vastgelegd. Dit betreft de verschillende handelingen, keuzes voor zowel hergebruik als reguliere sloop en de punten in het hergebruikproces waar materiaal uitvalt.
- **Nabespreken.** De uitgewerkte processen zijn nabesproken met slopers om op te halen wat de belangrijkste bottlenecks zijn en of hergebruik rendabel genoeg is.

Hooijer Renkum – balklagen. In Veenendaal is door Hooijer Renkum een school gesloopt. Daarbij is de demontage van het houten dak onderzocht. Daarnaast is het hout naar een externe locatie gebracht waar het hout is gesorteerd om te ondervinden wat de verschillende kwaliteiten waren die de oogst heeft opgebracht en hoe het scheiden in zijn werk gaat. “Bijlage 2_221024_praktijktest_Hooijer Renkum”⁶ bevat een werkdocument met een omschrijving van het experiment (figuur 5).



Uitvoerder: Hooijer Renkum
Locatie: Patrimoniumlaan 128, Veenendaal
Omschrijving: school, twee vleugels, genoeg ruimte op het schoolplein

Figuur 5, case study school Veenendaal met Hooijer Renkum

⁶ Sloopcheck, [Bijlage 2_221024_praktijktest_Hooijer Renkum.pdf](#), 24 oktober 2022

A van Liempd – binnenkozijnen. In Bergen op Zoom is door A van Liempd een flat gesloopt (figuur 6). Als onderdeel daarvan zijn veel binnen kozijnen verwijderd die vervolgens zijn verzaagd om opnieuw te worden toegepast als balkonbalustrade in een ander project van dezelfde woningcorporatie. Tijdens het werkbezoek is alleen naar demontage gekeken – het materiaal is op een ander moment afgevoerd. Wel is tijdens de nabespreking aandacht besteed aan de benodigde stappen om het product op te werken tot nieuw product. De resultaten volgen in paragraaf 5.1.2.2.



Uitvoerder: A van Liempd
Locatie: Borgvlietsdreef 152 – 990, 'Scheldeflat'
Omschrijving: demontage van binnenkozijnen die woningen scheiden van galerij

Figuur 6, case study Scheldeflat met A. van Liempd

5.1.2.2. Resultaten

De resultaten zijn gepresenteerd aan het projectconsortium. Dit betreft de volgende documenten:

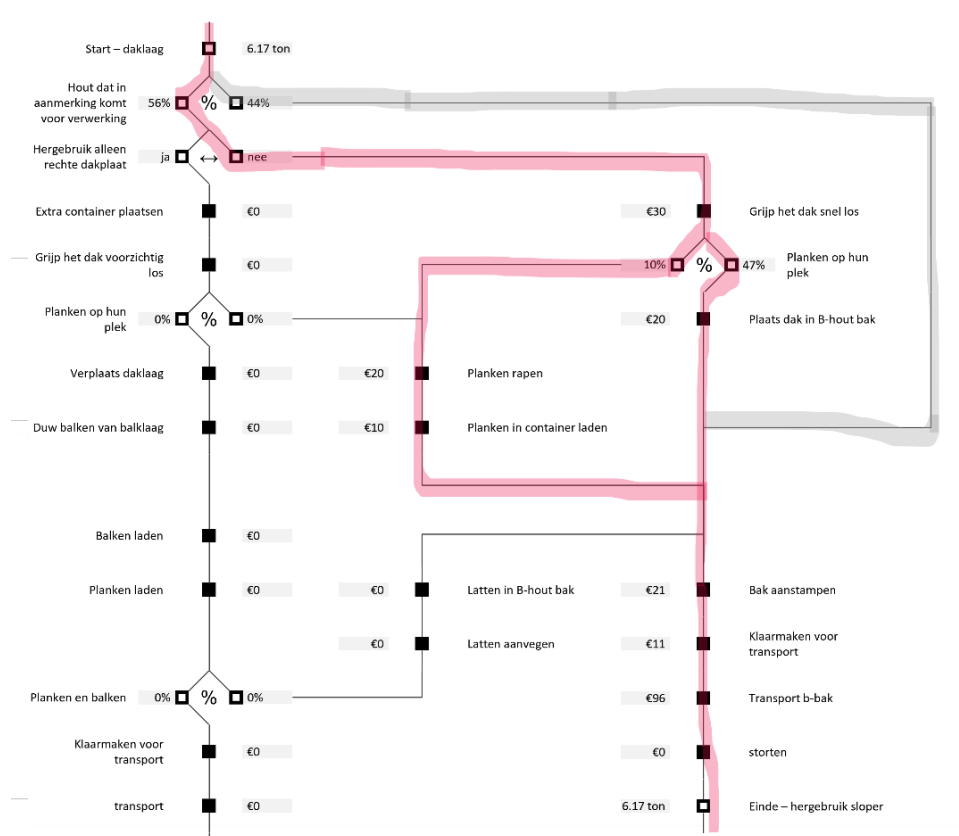
- “Bijlage 3_230913_presentatie demontage_v2_Hooijer” ⁷
- “Bijlage 4_230615_resultaten Scheldeflat” ⁸

Beide documenten bevatten de doorlopen processen van zowel hergebruik als reguliere sloop. In een slide met conclusies zijn de belangrijkste aandachtspunten weergegeven en er is een poging gedaan om de kosten voor hergebruik te vergelijken met de kosten van reguliere sloop, om te komen tot een bedrag dat de verkoop van het gedemonteerde materiaal ongeveer moet opleveren. Tot slot is in beide documenten een uiteenzetting gegeven van de opbrengst van de oogst. De processchema's van beide case studies zijn hieronder weergegeven in figuur 7 t/m 10.

⁷ Sloopcheck, [Bijlage 3_230913_presentatie demontage_v2_Hooijer](#), 13 september 2023

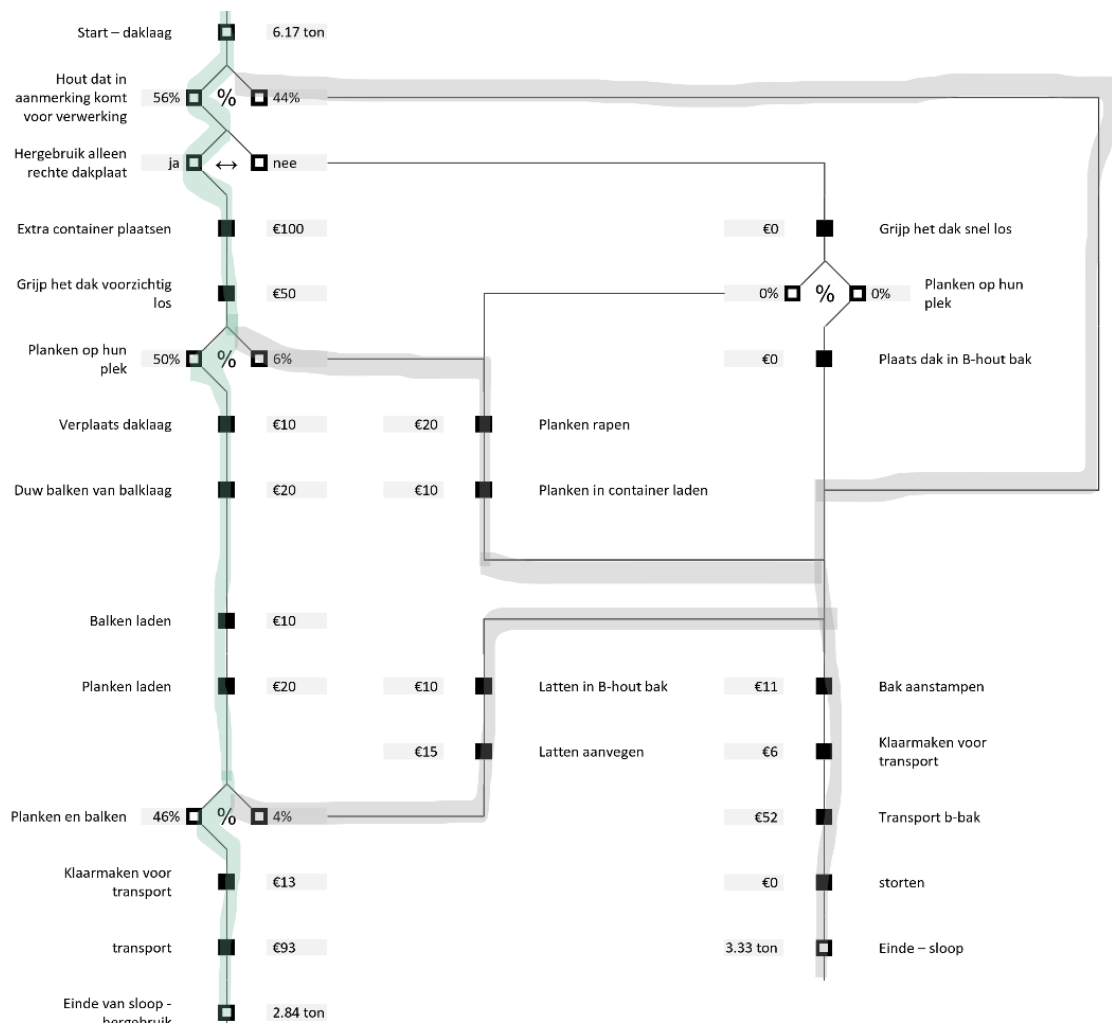
⁸ Sloopcheck, [Bijlage 4_230615_resultaten Scheldeflat](#), 15 juni 2023

Balklaag, reguliere sloop:



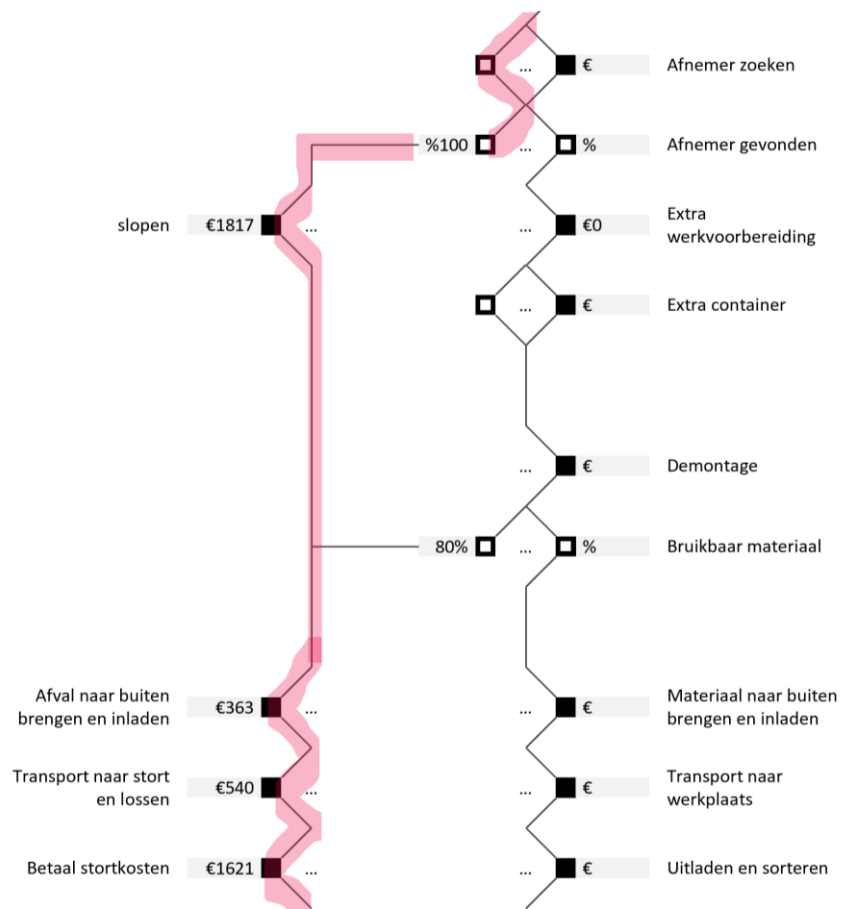
Figuur 7, proces balklaag reguliere sloop

Balklaag, hergebruik, toe te wijzen kosten:



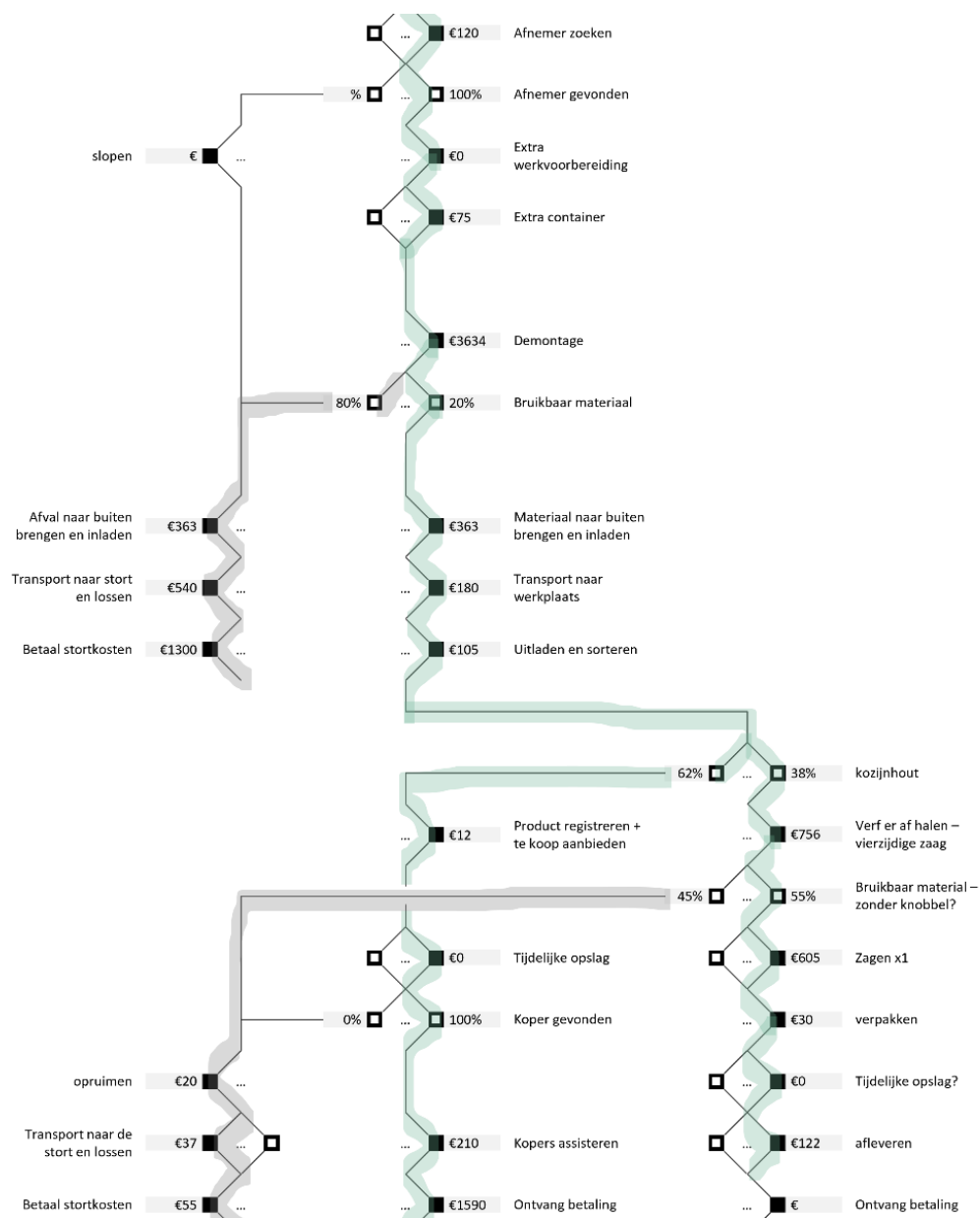
Figuur 8, proces balklaag hergebruik

Binnenkozijn, reguliere sloop:



Figuur 9, proces binnenkozijn reguliere sloop

Binnenkozijn, hergebruik incl verwerking:



Figuur 10, proces binnenkozijn hergebruik

5.1.2.3. Key take-away's

Hieronder staan de belangrijkste conclusies voor het sloopproces om hergebruik van houten balken, planken en kozijnen mogelijk te maken.

- Balklaag (planken en balken)
 - Het is het meest economisch om te demonteren met een graafmachine, zowel voor het loshalen uit het gebouw als verdere demontage op locatie. De machinist heeft wel training nodig om dit te doen zonder de balken te beschadigen.
 - Er is ruimte nodig op het sloofterrein voor een extra container, een plek om de dakdelen tijdelijk neer te leggen en een plek om de planken en balken van elkaar los te halen.
 - Het plaatsen en transporteren van een extra container is de grootste bijkomende kostenpost.
 - Met name voor het inladen zijn duidelijke instructies nodig. Aanstampen is natuurlijk niet gewenst voor her te gebruiken hout. Daarnaast moeten losse balken en planken in dezelfde richting worden gestapeld. Dit bespaart ruimte waardoor transport minder duur wordt en uitladen en sorteren eenvoudiger en met minder beschadigingen.
 - Balken die te stevig aan elkaar bevestigd zijn kunnen beter bij het B-hout ingedeeld worden: losmaken kost dan te veel werk ten opzichte van de snelle normale sloop.
 - Er moet naast de balken een toepassing gezocht worden voor de planken en het proces moet zo worden ingericht dat kapot hout ook kan worden herbestemd. Anders levert een te klein deel van het hout iets op.
- Kozijnen
 - Demonteer alleen hardhouten kozijnen. Uit de test blijkt dat de benodigde prijs van gedemonteerde kozijnstijlen veel hoger ligt dan de prijs voor naaldhout, maar wel overeenkomt met de prijs van hardhout. Een bijkomend voordeel van hardhout is dat ook kleinere profielen de moeite waard worden waardoor een groter deel wordt hergebruikt.
 - Handmatige demontage loont alleen bij binnenkozijnen, omdat met name voor het naar buiten brengen van het materiaal in alle gevallen dezelfde arbeid nodig is. Het is dus niet per se zo dat handmatige demontage ook loont bij buitenkozijnen.
 - Het is een groot financieel voordeel als de sloper een winkel voor tweedehands bouwmaterialen heeft om de 'bijvangst' te verkopen. De kozijnen zelf kunnen beter worden gefabriceerd.

5.1.3. Inzamelprotocol milieustraat

Uit de analyse in hoofdstuk 5.1.1 is gebleken dat er jaarlijks in Nederland ongeveer 563 kton afvalhout uit gemeentewerven beschikbaar komt. Op dit moment wordt het grootste deel van het A- en B-hout uit de containers op de gemeentewerf geshredderd. Deze houtsnippers worden deels afgezet voor materiaalhergebruik (o.a. spaanplaat) en deels doorgezet naar bio-energie centrales. Een deel van het A- en B-hout heeft de potentie voor een hoogwaardigere toepassing, maar moet dan apart worden ingezameld bij de gemeentewerven. Door dit hout bij de bron te scheiden en sorteren kan het efficiënter worden opgewerkt voor circulair gebruik in een nieuw toepassing.

In deze activiteit zijn er meerdere proeven gedaan om de stromen te identificeren die de meest potentie hebben voor hoogwaardig hergebruik (o.a. vanwege beschikbaar volume). Daarnaast is er gewerkt aan het opstellen van een inzamelprotocol, om deze stromen apart te kunnen inzamelen op de gemeentewerven en elders verder op te werken.

5.1.3.1. Methode

- **Concept inzamelprotocol op basis van achtergrondkennis.** Voorafgaand aan de proeven op de milieustraat zijn de meest kansrijke materiaalstromen geïdentificeerd en een globaal stappenplan opgesteld. Op basis hiervan is de eerste praktijktest ingericht voor het inzamelen op de milieustraten.
- **Praktijktesten.** Bij verschillende gemeentewerven van HVC zijn drie inzamelproeven georganiseerd. Tijdens deze proeven zijn speciale maatregelen getroffen om een dag(deel) lang mee te lopen, te experimenteren en data te verzamelen. Telkens zijn er veel foto's en filmpjes gemaakt.
- **Data verwerken in een protocol.** Vanuit TNO is er op basis van de inzichten en data opgehaald tijdens de proeven een protocol opgesteld. Dit betreft de benodigdheden, handelingen en instructies voor het apart inzamelen van de herbruikbare materiaalstromen.
- **Evaluatie.** Het uitgewerkte protocol is door middel van verschillende iteratieslagen verbeterd na elke inzamelproef, om het bruikbare deel zo efficiënt mogelijk te scheiden van het niet bruikbare deel A- en B-hout.

5.1.3.2. Resultaten

Figuur 11 geeft een overzicht van de drie belangrijkste resultaten van deze activiteit. Ten eerste hebben de verschillende inzamelproeven geholpen bij het identificeren van drie stromen die een hoge potentie hebben voor hoogwaardig hergebruik. Dit zijn: 1) Balk- en plankhout, 2) deuren, ramen, kozijnen en plaathout (o.a. tafelbladen), 3) pallets. Daarnaast is aan de hand van de inzamelproeven geconcludeerd dat dit ongeveer 15 – 20 % van het ingezamelde hout betreft.



Figuur 11, resultaten milieustraat

Op basis van deze resultaten is er voor de drie stromen een inzamelprotocol opgesteld. In dit inzamelprotocol zijn benodigdheden (o.a. containers), handelingen en instructies opgenomen. Met dit inzamelprotocol kunnen de medewerkers en bezoekers van de gemeentewerven de stromen zo efficiënt mogelijk scheiden en sorteren. Enkele voorbeelden

uit het protocol zijn zichtbaar in figuur 12. Het protocol is opgenomen in document “Inzamelinstructie container milieustraat”⁹.



Figuur 12, inzamelprotocol milieustraat

Na het uitvoeren van elke inzamelproef was een inspectie noodzakelijk van het opgeslagen hout (op een externe locatie). Dit was nodig om te beoordelen hoe groot het percentage herbruikbaar hout ten opzichte van het percentage onbruikbaar hout is. Tijdens de drie proeven is dat gedaan op basis van expert judgement vanuit TNO / HVC. Op basis van deze bevindingen zijn er verbeteringen doorgevoerd in het inzamelprotocol, om zo het percentage bruikbaar hout in de volgende proef een stuk groter te maken. Uiteindelijk is het van belang dat het protocol ervoor zorgt dat de scheidingsstap uit het proces (nagenoeg) kan worden geëlimineerd. Op basis van de drie uitgevoerde proeven is dat nog niet mogelijk. Het was namelijk erg opvallend dat het gestorte materiaal van één bepaald persoon de samenstelling van een batch tijdens de proef sterk kan beïnvloeden.

5.1.3.3. Key take-away's

- Stromen met de meeste potentie voor hergebruik blijken de volgende drie stromen: 1) Balk- en plankhout, 2) deuren, ramen, kozijnen en plaathout (o.a. tafelbladen), 3) pallets. Acceptabele maten zijn: minimale breedte tussen 2-25 cm, minimale dikte tussen 2-10 cm en minimale lengte tussen de 50 – 200 cm. Enkel massief hout is bruikbaar, geen C-hout.

⁹ TNO, [Inzamelinstructie containers milieustraat](#), 25 augustus 2022

- Uit de inzamelproeven blijkt dat circa 15% - 20% van het ingezamelde hout bruikbaar zou kunnen zijn.
- De stromen moeten in een aparte en droge container worden ingezameld, zodat het hout niet te vochtig wordt. Dit is van belang voor de verdere verwerking. Spijkers, schroeven en verf zijn geen probleem, dit kan later worden verwijderd.
- Het apart inzamelen van het hout door middel van het protocol vergt goede instructies aan het personeel dat werkzaam is op de gemeentewerven. Ook is voldoende personeel en ruimte voor het stallen van meerdere containers vereist. Daarnaast is het van belang dat na inzamelen ruimte beschikbaar is om het hout tijdelijk op te slaan voorafgaand aan verdere verwerking.
- Uit de proeven is het nog niet mogelijk om een conclusie te trekken wat betreft de haalbaarheid van de businesscase.
- Uit de inzamelproeven die tijdens de looptijd van dit project hebben plaatsgevonden, is het nog lastig om met zekerheid iets te zeggen over de samenstelling van de inkomende stromen en in hoeverre de 20% hergebruik echt kan worden gehaald. Om deze reden zal er door HVC in 2024 een langdurige inzamelproef worden georganiseerd. Dit moet inzicht geven in de herbruikbaarheid van de samenstelling ingezameld hout, de dagelijkse operatie en het financieel model van inzameling.

5.2. Verwerking tot halffabricaat: imaging, selectie, sorteren en identificeren (WP2 & WP3)

In dit onderdeel van het project is onderzoek gedaan naar de verwerking van ingezameld A- en B- hout, vanuit de milieustraten en sloopbedrijven. Er is onderzocht welke stappen doorlopen moeten worden om tot een bruikbaar halffabricaat te komen voor de verwerkende industrie. Hierbij zijn de activiteiten uit WP2 en WP3 samengevoegd. Er is gewerkt aan het systeemontwerp van een 'verwerkingsstraat' voor de drie kansrijke stromen: 1) Balk- en plankhout, 2) deuren, ramen, kozijnen en plaathout (o.a. tafelbladen), 3) pallets. Hieronder worden de verschillende ondernomen activiteiten beschreven. In de eerste activiteit zijn de systeemontwerpen van de verschillende verwerkingsstraten toegelicht. Dit zijn procesbeschrijvingen in de vorm van flowdiagrammen. In de daaropvolgende activiteiten is er verder ingezoomd op de verschillende stappen van het verwerkingsproces. Dit gaat o.a. om het scannen van het hout wat betreft vervuilingen (metalen of rot), het efficiënt verwijderen van deze vervuilingen en het vaststellen van andere relevante parameters voorafgaand aan sortering in verschillende categorieën.

5.2.1. Opzet verwerkingsstraat (flowcharts)

In deze activiteit is gefocust op de procesbeschrijving voor het oogsten van bruikbaar volhout door bewerking van A- en B- hout. Hiervoor zijn flowcharts opgesteld die stap voor stap verbeterd en uitgebreid zijn. Hierin zijn voor de verschillende kansrijke stromen van hout de benodigde verwerkingsstappen inzichtelijk gemaakt. Aan deze verwerkingsstappen zijn ook functionele en gebruikseisen gekoppeld in de vorm van een programma van eisen.

5.2.1.1. Methode

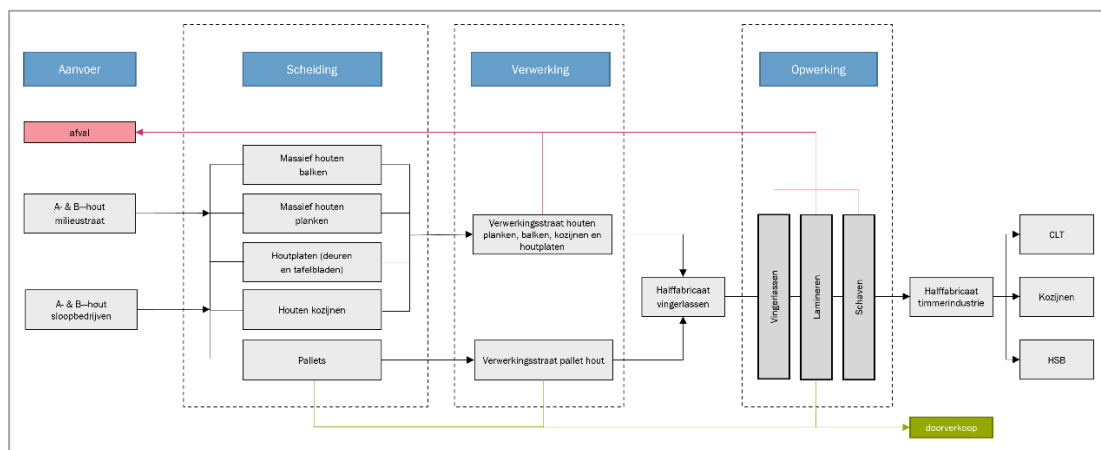
De volgende methodologie is aangehouden bij het opstellen van de flowcharts:

- Eerste opzet flowcharts, hierin is een eerste voorzet gedaan wat betreft het mogelijke verwerkingsproces van de verschillende kansrijke stromen. Dit is gedaan op basis van een expertsessie binnen TNO.
- Vervolgens is deze opzet gevalideerd door middel van diverse testen en lessen uit succesvol gerealiseerde opwerkingsketens binnen dit project. Hierbij is gelet op zowel de juiste volgorde van de verschillende verwerkingsstappen, als op de specificaties/eisen die gelden voor de benodigde verwerkings- en opwerkingsstappen.
- Op basis van de in dit project vergaarde ervaringen zijn de flowcharts iteratief verfijnd en verbeterd.
- Als laatste stap is op basis van de laatste versie van de flowcharts een programma van eisen opgesteld. Hierin zijn de functionele en gebruikseisen aan de detectie- en bewerkingsstappen vastgelegd.
- Aan het einde van de looptijd van dit project is een voorstel goedgekeurd voor het opzetten van een biobased bouwlab vanuit TNO. Hierin wordt ook gefocust op de verwerking en opwerking van hergebruikt hout. Het systeemontwerp en programma van eisen kunnen

worden gebruikt tijdens het opzetten van dit lab, inclusief de benodigde apparatuur voor de verwerking van secundair hout.

5.2.1.2. Resultaten

Onderstaand flowdiagram (figuur 13) toont het principeschema van de verwerking van A- en B-hout tot bruikbaar halffabricaat voor de timmerindustrie¹⁰. De flow start bij de aanvoer vanuit de milieustraat en de sloopbedrijven. Tijdens de praktijkproeven is geïdentificeerd dat de meest kansrijke stromen de volgende zijn: 1) Balk- en plankhout, 2) deuren, ramen, kozijnen en plaathout (o.a. tafelbladen), 3) pallets. De stromen worden na inzameling bij de tweede stap gescheiden zoals aangegeven in figuur 13. De derde stap is dan de verwerking van deze stromen. Voor de verwerking is in het systeemontwerp een onderscheid gemaakt tussen: 1) de opzet voor een verwerkingsstraat van palleshout en 2) de opzet voor een verwerkingsstraat van de overige stromen. Dit onderscheid is gemaakt omdat de aanname is dat het palleshout eenvoudiger kan worden opgewerkt tot bruikbaar element, omdat het een nagenoeg uniforme stroom hout is. Na de verwerkingsstap kan het hout worden gebruikt binnen de timmerindustrie.

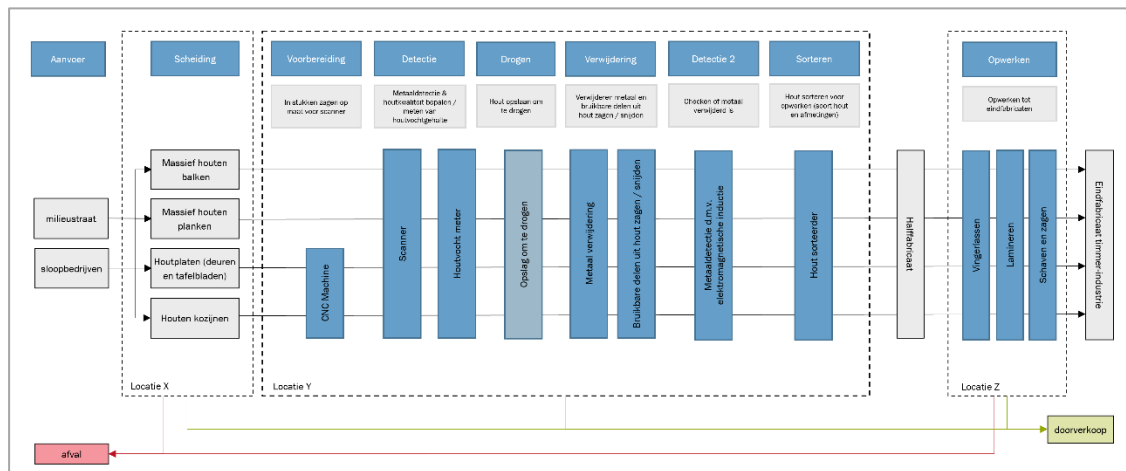


Figuur 13, principe diagram verwerkingsstraat

Verwerkingsstraat: balken, planken, houtplaten en kozijnen

Figuur 14 toont het systeemontwerp van de verwerkingsstraat voor balken, planken, houtplaten en kozijnen. Hierin zijn de verschillende verwerkingsstappen zichtbaar, van voorbereiding tot sortering. Na deze verwerking is verdere opwerking van het hout mogelijk (o.a. door vingerlassen).

¹⁰ TNO, [Opzet flowdiagram](#), 5 augustus 2023



Figuur 14, opzet verwerkingsstraat balken, planken, houtplaten en kozijnen

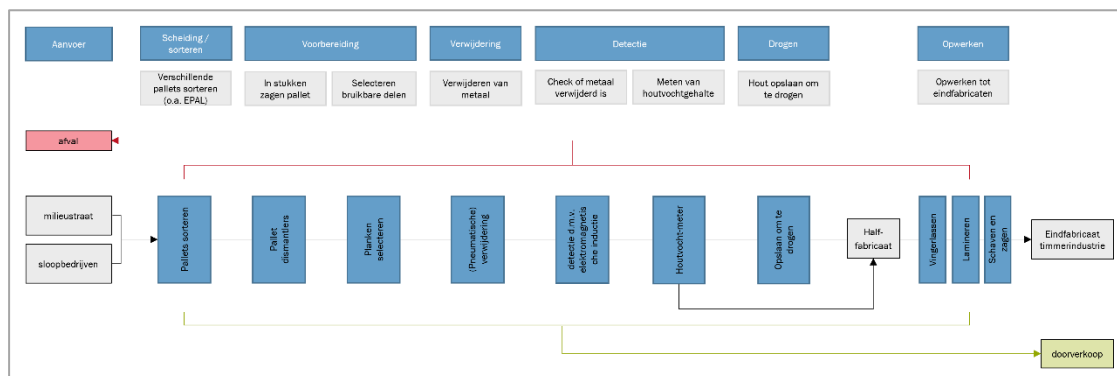
De volgende stappen zijn voorzien in de verwerking van het hout:

1. **Scheiden:** het ingezamelde hout wordt gescheiden en gesorteerd (o.a. type hout, hoeveelheid) om de verwerking zo efficiënt mogelijk te maken
2. **Voorbereiding:** de kozijnen en houtplaten (deuren en tafelbladen) moeten worden verzaagd naar een afmeting waarbij ze door een scanner kunnen. Dit kan met een CNC-machine die de bruikbare stukken uit het hout snijdt of freest. Dit is een zeer nauwkeurig apparaat en kan worden aangestuurd door een computer.
3. **Detectie:** scannen van het inkomend hout om een beeld te krijgen van het hout. Het gaat hier om de aanwezigheid van metalen in het hout, de aanwezigheid van rot of scheuren, het vochtgehalte van het hout, het bepalen van de houtsoort en andere relevante parameters.
4. **Drogen:** eventuele opslag om het hout te drogen. Deze stap kan ook voor stap 2 als duidelijk is dat droging nodig is. Hiervoor kunnen reeds bestaande technieken worden ingezet. Het hout wordt gedroogd tot het gewenste houtvochtpercentage is bereikt en kan vervolgens door voor verdere verwerking.
5. **Verwijdering:** in deze stap worden de bruikbare stukken uit het hout geselecteerd (zonder aantastingen). Daarnaast wordt in deze stap het metaal uit het hout verwijderd (o.a. door frezen, boren of zagen).
6. **Detectie:** een laatste check op gebied van metaaldetectie, om te verzekeren dat het hout volledig metaalvrij is. Het verwijderen van het metaal is essentieel omdat metaal schadelijk is voor de instrumenten die ingezet worden bij de latere houtbewerking.
7. **Sortering:** het hout wordt opnieuw gesorteerd op o.a. afmeting en houtsoort in diverse batches voor verdere verwerking. Na de gewenste sortering (en voldoende volume) kan het hout door naar de verwerkende industrie (o.a. om te vingerlassen, lamineren en schaven). Hierna kan het opgewerkte hout worden ingezet voor de productie van CLT, kozijnen of HSB.

Het is hierbij de wens dit proces zo geïntegreerd en geautomatiseerd mogelijk uit te voeren, zodat er op efficiënte wijze voldoende schaal kan worden bereikt.

Pallet verwerkingsstraat

Figuur 15 toont het systeemontwerp voor de verwerkingsstraat voor pallet hout. Hierin zijn de verschillende verwerkingsstappen zichtbaar, van voorbereiding tot drogen. Na deze verwerking is verdere opwerking van het hout mogelijk (o.a. door vingerlassen).



Figuur 15, opzet verwerkingsstraat pallet hout

De volgende stappen zijn voorzien in de verwerking van het hout:

1. **Scheiden:** de ingezamelde pallets worden gescheiden en gesorteerd, om de verwerking zo efficiënt mogelijk te maken (o.a. afmetingen, type pallet, hoeveelheid).
2. **Voorbereiding:** de pallets worden gedemonteerd, zodat de planken los komen van de logs. De losse planken kunnen door voor verdere verwerking.
3. **Verwijdering:** in deze stap worden de bruikbare stukken uit de houten planken geselecteerd (zonder aantastingen of scheuren). Daarnaast wordt in deze stap het metaal uit het hout verwijderd.
4. **Detectie:** aangezien het metaal op vaste en voorspelbare plekken aanwezig is in het hout, is de aanname dat het vooraf scannen van het hout op metaal niet nodig. Na het verwijderen van metaal moet er dus nog wel worden gecheckt of het hout volledig metaalvrij is. Dit kan op een eenvoudige manier gebeuren. Daarnaast wordt in deze stap het houtvochtgehalte gemeten.
5. **Drogen:** eventuele opslag om het hout te drogen. Hiervoor kunnen reeds bestaande technieken worden ingezet. Het hout wordt gedroogd tot het gewenste houtvochtpercentage is bereikt en kan vervolgens door voor verdere verwerking.
6. **Sortering:** het hout wordt opnieuw gesorteerd (o.a. op afmeting) in diverse batches voor verdere verwerking. Na de gewenste sortering (en voldoende volume) kan het hout door naar de verwerkende industrie (o.a. om te vingerlassen, lamineren en schaven). Hierna kan het opgewerkte hout worden ingezet voor de productie van CLT, kozijnen of HSB.

Het is hierbij de wens dit proces zo geïntegreerd en geautomatiseerd mogelijk uit te voeren, zodat er op efficiënte wijze voldoende schaal kan worden bereikt.

Voor beide systeemontwerpen is een programma van eisen opgesteld. Hierin zijn eisen opgenomen wat betreft gebruik, maar ook functionele eisen over de gewenste prestatie en veiligheid.

5.2.1.3. Key take-away's

- Voor de verwerking van de kansrijke stromen is er in het systeemontwerp een onderscheid gemaakt tussen een verwerkingsstraat voor palleshout en voor de overige stromen, omdat de aanname is dat vanuit palleshout gemakkelijker een bruikbaar product kan worden geoogst. Het is namelijk een meer uniforme stroom waarin ook de aanwezigheid van metalen goed voorspelbaar is.
- Verschillende opwerkingsketens zijn doorlopen gedurende het project, zo is bijvoorbeeld van palleshout CLT gemaakt en van oud kozijnhout en gerecycled naalddhout zijn nieuwe kozijnen en HSB elementen geproduceerd. Deze tests hebben geholpen bij het valideren van het systeemontwerp. Hierover is meer te lezen in hoofdstuk 5.3.3.
- Verschillende bestaande machines die deel moeten uitmaken van de verwerkingsstraat zijn in beeld en de kosten daarvoor zijn ruwweg bekend. Goede automatische koppelingen en communicatie tussen de machines moeten nog ontwikkeld worden (incl. algoritmes) om tot de gewenste halffabricaten te komen.

5.2.2. Proef DZB Leiden

Er is een samenwerking gezocht met sociaal werkbedrijf DZB Leiden om in kaart te brengen wat een handige manier is voor de eerste verwerkingsstappen van geoogst tweedehands hout. Hierbij is gefocust op de verwerking van naalddhouten balken tot kopmaten die geschaafd en/of gevingerlast kunnen worden tot halffabricaten voor de timmerindustrie. “Bijlage 5_dag 1”¹¹ en “bijlage 6_dag 2”¹² bevatten nadere details.

5.2.2.1. Methode

Hier wordt kort omschreven hoe de proef is uitgevoerd en wat de belangrijkste resultaten waren.

Beoogde kopmaten. Op het moment van het onderzoek was DZB Leiden bezig met het verwerken van balken uit verschillende slooprojecten. De verschillende balken zijn terug te vinden in “bijlage 5_dag 1”. Dit hout werd verwerkt tot 3 verschillende (experimentele) halffabricaten:

- Profielen om trapkisten van te maken
- Blokken om te vingerlassen tot halffabricaten voor binnenkozijnen
- Profielen om schuren van te maken

Proefopstelling. Er is twee dagen meegekeken met het proces:

- Dag 1: balken ontspijkeren, met een hand-held metaaldetector controleren en slechte stukken aftekenen. Zie “bijlage 5_dag 1”.
- Dag 2: slechte stukken eruit zagen met een afkortzaag en/of een formaatzaag en vervolgens een eindcontrole met een gevoelige metaaldetector. Zie “bijlage 6_dag 2”.

Een aantal handelingen konden tijdelijk niet bij DZB Leiden worden uitgevoerd en waren daarom geen onderdeel van de scope. Dit betreft het zagen van grote kopmaten met een

¹¹ Sloopcheck, [bijlage 5_dag 1](#), 18 oktober 2023

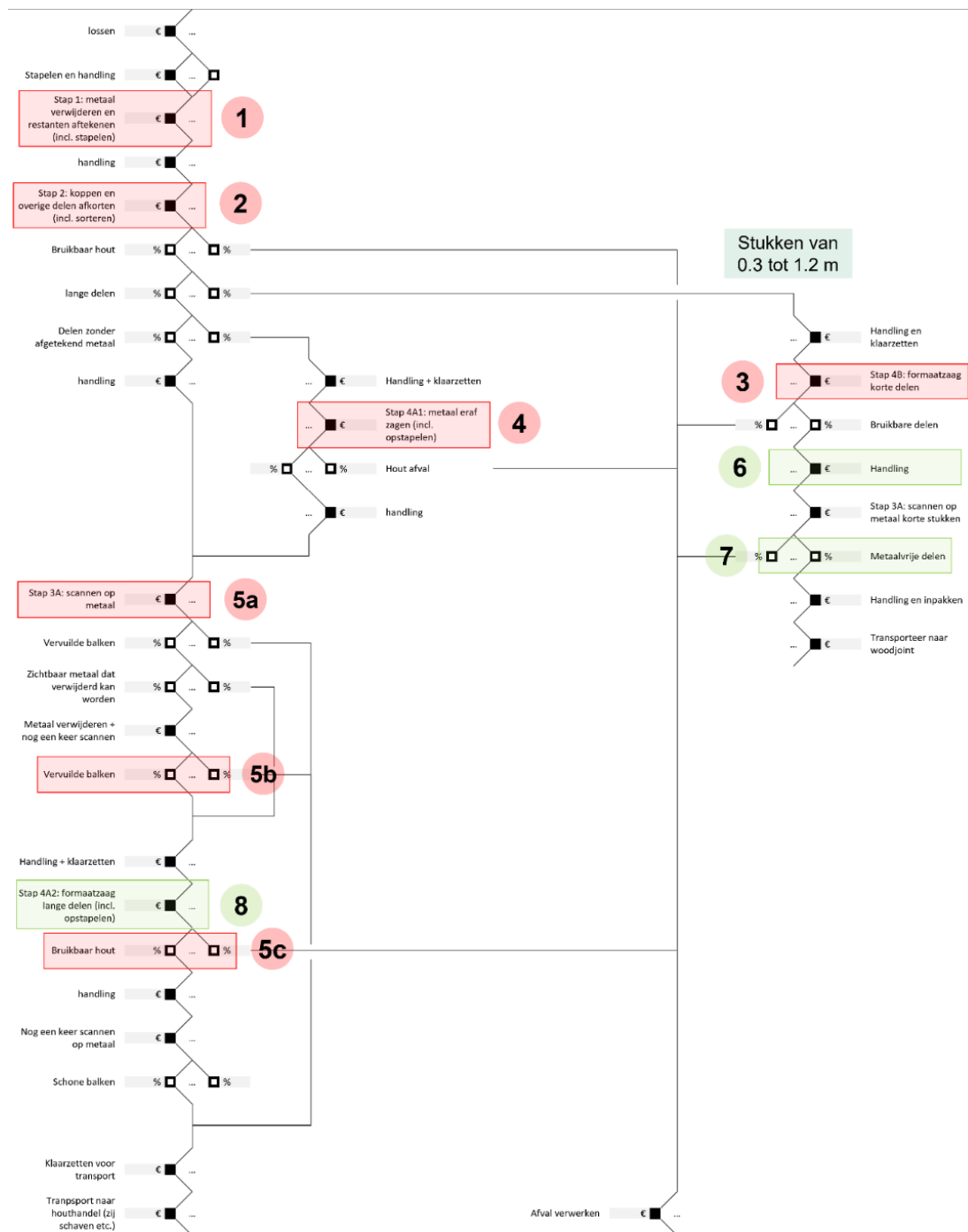
¹² Sloopcheck, [bijlage 6_dag 2](#), 18 oktober 2023

lintzaag en bewerkingen met een vierzijdige schaaf. Die stappen werden als vervolg uitgevoerd bij een derde partij.

Aanpak. Het proces dat tijdens de proef is doorlopen is vooraf besproken met DZB Leiden. Tijdens de verschillende stappen is data verzameld: er zijn veel foto's genomen en bij cruciale processen is getimed hoelang verschillende stappen duurden. Ook zijn onverwachte wijzigingen aan het proces geobserveerd. Het doorlopen proces is in detail vastgelegd in een processchema en de bottlenecks die het meeste tijd (en dus geld) kosten, zijn geïdentificeerd. Op basis daarvan zijn suggesties gegeven voor een verbeterde versie van het proces en zijn kansen voor automatisering opgesomd.

5.2.2.2. Resultaten

Metingen die tijdens de proef zijn gedaan, zijn verwerkt in “bijlage 5_dag 1” en “bijlage 6_dag 2”. De belangrijkste resultaten zijn samengevat en behandeld aan de hand van het onderstaande processchema. Dit schema beslaat de stappen die tijdens de proef zijn doorlopen, alsmede de plekken waar een deel van het hout is uitgevallen (figuur 16).



Figuur 16, procesbeschrijving DZB Leiden

Uit het proces komen twee stapels: 1) lange balken die na DZB Leiden nog naar een zagerij gingen voor een laatste bewerking met de lintzaag en vierzijdige schaaf, 2) stukken van kleiner dan 1,10 m die als laatste stap nog gevingerlast en geschaafd moesten worden. Die batch zou daarvoor op grote schaal naar Woodjoint gebracht kunnen worden. De uitdaging bij het verwerken van naalddhout zit met name in de kosten vergeleken met de opbrengst. Daarom is extra goed gekeken welke stappen de grootste bottleneck in de kosten veroorzaken. In de figuur 16 zijn stappen in het proces met rood aangegeven die tijdens het proces in het

bijzonder voor onnodig hoge kosten zorgden. In groen zijn nog 3 stappen weergegeven die vrij soepel verliepen. Die stappen worden hieronder toegelicht.

1. **Metaal verwijderen.** Dit kost in sommige gevallen wel 20 minuten per balk (zie “bijlage 5_ dag 1”). Het is opvallend dat een groot deel van de tijd verloren gaat aan een klein aantal stukken metaal dat lastig te verwijderen is of voor bepaalde balken met uitzonderlijk veel stukken metaal. Het zou lonen om in sommige gevallen het metaal weg te zagen om tijd te besparen. Vanaf welke hoeveelheid vervuiling dit loont, moet nader worden onderzocht.
2. **Koppen en overige delen afkorten.** De afkortzaag zelf is vrij snel. Het is haalbaar om in minder dan 1 minuut de vervuiling uit een balk te zagen. Echter, er ging tijdens de proef veel tijd verloren door de keuze tussen 1) het opzagen in blokken van vervuilde delen of 2) vervuilde delen in een later stadium met de formaatzaag verwijderen. Het is nodig om een efficiënt en eenvoudig protocol te ontwikkelen zodat dit keuzeproces niet meer nodig is.
3. **Korte stukken met de formaatzaag.** Net als de afkortzaag ging de formaatzaag vrij snel (terwijl een lintzaag eigenlijk geschikter is voor balken). Voor de kleine stukken gold wel dat er relatief meer tijd werd besteed aan handling dan bij lange balken. Ook moesten veel blokken een tweede of zelfs derde keer langs de zaag om onregelmatigheden te verwijderen. Hier is een optimalisatie mogelijk door een andere volgorde van zagen.
4. **Metaalhoudende stukken wegzagen met de formaatzaag.** Een deel van de balk verdwijnt hierbij als afval maar dat was niet het grootste obstakel: slechts bij enkele balken moest er diep gezaagd worden. In veel gevallen ging het om nietjes waarbij het wegzagen van 1cm hout genoeg was. Het probleem was dat er op een gegeven moment een onverwachte spijker werd geraakt die met de handscanner over het hoofd was gezien vanwege alle nietjes er omheen. Hierdoor kwam de productie stil te liggen. Ook zonder nietjes was het nodig om de balk te checken met een handscanner, wat veel tijd kost. De makkelijkste oplossing hiervoor zou zijn om een lintzaag te gebruiken met een tolerantie voor metaal.
5. **Scannen voor metaal.** De eerste keer dat de lange balken door de scanner gingen, werd een ruime meerderheid afgekeurd. Er ging veel tijd verloren aan het zoeken naar de vervuiling. Uiteindelijk bleek dat de scanner in veel gevallen afging door roestdeeltjes die achterblijven nadat een roestige spijker wordt verwijderd. Dit kan helaas niet met de hand verwijderd worden en moest allemaal worden weggezaagd omdat de zagerij waar het hout heen ging deze vervuiling niet tolereert. Dit leidt tot een kleine opbrengst. De beste oplossing is om de spijkergaten bij voorbaat weg te zagen of frezen en een toepassing voor de vervuilde stukken te zoeken waar de kleine vervuiling niet uitmaakt.

De volgende stappen verliepen heel soepel:

6. **Handling van stukken van ~1m.** Blokken van ongeveer een meter kunnen makkelijk in één hand gepakt worden en op een pallet gestapeld worden. Die pallets met blokken zijn veel eenvoudiger om door de hal te verplaatsen met een pompwagen dan stapels van 3 of 4 meter die overal klem komen te zitten.
7. **Metaalvrije stukken van ~1m.** Een groot deel van de lange balken dat werd afgekeurd, had op een enkele plek een vervuiling. Statistisch gezien is de kans op vervuiling bij korte stukken daardoor veel lager. Dit bleek ook uit de observaties.
8. **Lange delen met de formaatzaag.** Hoewel de kans op afkeur en de handling beter werkte bij korte stukken ging het zagen (per meter) een stuk sneller bij lange balken.

5.2.2.3. Key take-aways

Op basis van het doorlopen proces is gezocht naar mogelijkheden voor optimalisatie. Allereerst is gekeken naar manieren om het proces op basis van de huidige set-up (ontspijkeren, afkortzaag, formaatzaag en metaaldetector) efficiënter te maken. Vervolgens zijn ook aanbevelingen opgesteld voor mogelijke upgrades van de opstelling door automatisering.

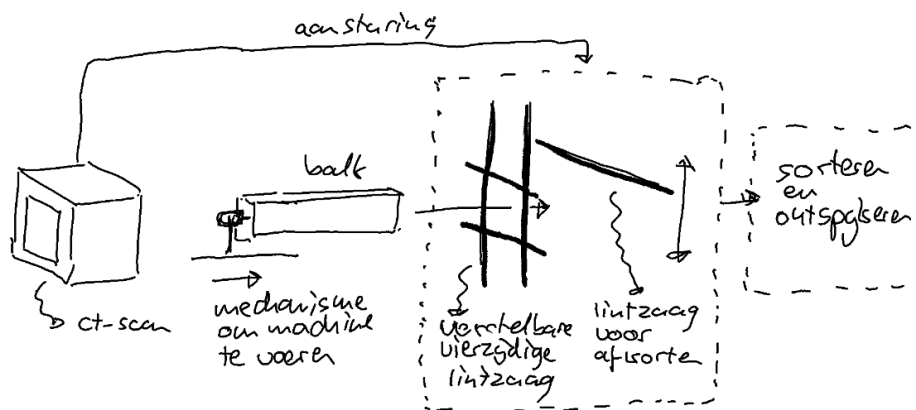
Efficiënter gebruik van de huidige opstelling. Het doorlopen proces is vooraf opgesteld door Sloopcheck op basis van de verwachting dat dit het handigst zou zijn. Door de proef is gebleken dat sommige activiteiten handiger kunnen. Daarnaast waren er ook aspecten aan de huidige manier die goed werkten:

- Gebruik rolkarren om balken te verplaatsen. Dit werd al gedaan en werkte erg gemakkelijk.
- Moeilijke stukken metaal wegzagen i.p.v. handmatig verwijderen. Een klein deel van het metaal kost een groot deel van de tijd. Een oplossing zou kunnen zijn om tijdens het ontspijkeren een tweede persoon te laten aftekenen wat de 'ontspijkeraar' moet laten zitten. Dit is meteen een geschikt moment om strepen op het hout af te tekenen waar de afkortzaag doorheen moet. Bijvoorbeeld links en rechts van moeilijke stukken metaal. Dat scheelt 'denktijd' bij de afkortzaag.
- Zaag bij voorbaat alle spijkergaatjes weg. Spijkergaatjes blijken regelmatig roest te bevatten waardoor de balk niet metaalvrij gelabeld kan worden. Twee keer scannen kost veel tijd. Het zou daarom efficiënter zijn om bij voorbaat met de formaatzaag alle delen weg te zagen die potentieel metaalresten kunnen bevatten. Het is dan interessant om een B-keuze toepassing te vinden waarbij kleine metaaldeeltjes geen obstakel vormen.
- Zaag balken op één standaardlengte. De rest van het hout kan in blokken gezaagd worden. Het is namelijk ontzettend veel werk om de juiste lengtes te matchen met de juiste order en om daar rekening mee te houden tijdens het zagen. Een alternatief zou zijn dat een afnemer allerlei verschillende lengtes accepteert. Alles opdelen in blokken van een meter zou wellicht zelfs het meest efficiënt zijn door onder andere makkelijke handling, maar dit valt of staat bij de kosten van vingerlassen en de toepassingsmogelijkheden van gevingerlaste balken.
- Zoek afnemers voor verschillende kopmaten. Terwijl werken met verschillende lengtes het proces ingewikkeld maakt, is het juist fijn om te kunnen terugvallen op verschillende kopmaten. De meest efficiënte kopmaat varieert namelijk telkens, afhankelijk van bijvoorbeeld de kopmaat van de ingaande balk en de aanwezigheid van scheuren en metaal.

Efficiëntere opstelling door automatisering. Met oog op opschaling is gekeken naar technologie die veel waarde zou kunnen toevoegen aan het proces:

- Gebruik een lintzaag i.p.v. een formaatzaag. Dit levert veel voordelen op: 1) zaagt rechter waardoor er minder weg geschaafd hoeft te worden. 2) Er kan worden gekeken naar lintzagen die beter tegen metaal kunnen (of in ieder geval makkelijker te vervangen zijn). Dan komt de lijn niet stil te liggen als er per ongeluk een keer een spijker wordt geraakt. 3) Het is sneller. Daarnaast kan het onderzocht worden of het loont om meerdere snedes tegelijk te maken waardoor een balk maar één keer door de zaag hoeft.
- Gebruik een CT-scan i.p.v. een scan op magnetisme. Ook dit heeft meerdere voordelen:
 - 1) Het verschil tussen ijzer schilfers en grote stukken zoals spijkers wordt dan duidelijk. Een tweede controle met de handscanner (die alleen afaat bij grote stukken) is dan niet nodig,
 - 2) Naast metaal kunnen andere onzuiverheden worden afgetekend zoals knoesten, rot en scheuren. Die moesten tijdens de proef op het oog worden geïdentificeerd waardoor het proces moeilijker te certificeren is,

- 3) Je weet precies op welke plek onregelmatigheden zitten. Bij de gebruikte metaaldetector uit de proef was dit vaak moeilijk te zien.
- Ontwikkel een optimaal algoritme. Er is een optimalisatie mogelijk tussen ontspijken, afkorten en lintzagen. Het snijvlak zit hem vooral in het volgende: het doel is zoveel mogelijk (metaalvrij) hout over te houden, maar ontspijken en scannen kost veel tijd. Daarbij bestaat de kans dat er alsnog metaal achterblijft. De vraag is dus: hoeveel kan er weggezaagd worden? De vervolgvraag is op welke manier het metaal weggezaagd kan worden. Als bijvoorbeeld voor een aantal spijkers een hele strook van de balk wordt afgezaagd met een lintzaag gaat er veel hout verloren, maar met de afkortzaag blijven er korte stukken over die potentieel minder waard zijn vanwege de noodzaak om te vinglassen. Er zijn ook combinaties tussen de lintzaag en de afkortzaag mogelijk, maar dan is het nadeel dat handling tussendoor geld kost. Er is rekensoftware nodig om hierin een optimum te vinden.
- Aansturing van een automatische zaaginstallatie vanuit de scanner. Bij toepassing van een CT-scanner die alle vervuiling precies detecteert, met een algoritme dat een optimaal zaagplan opstelt, is er nog een manier nodig om die instructies uit te voeren in praktijk. Tijdens de proef is geconstateerd dat het voor mensen vaak te complex is om goed af te tekenen. Die stap óf het zagen zelf moet dus worden geautomatiseerd. Hieronder in figuur 17 een suggestie van hoe dat proces zou kunnen verlopen:



Figuur 17, mogelijke opzet verwerking

Het hierboven omschreven proces (figuur 17) bestaat een CT-scan, een zaaginstallatie met een stel bewegende lintzagen, een mechanisme om de machine te voeren en een algoritme om de machine vanuit de scan aan te sturen. Het meest efficiënt zou zijn als balken eerst in stukken worden gezaagd en daarna pas ontspijkerd. Dat levert stukken op die al helemaal metaalvrij zijn en stukken die nog ontspijkerd moeten worden. Voor die laatste groep kan ervoor gekozen worden om alleen de stukken hout te ontspijkeren en gebruiken met een beperkte hoeveelheid metaal.

5.2.3. Scannen van hout en verwijderen ongewenste elementen

Zoals in de proef bij de sociale werkplaats is gebleken wordt de verwerking van gebruikt hout op dit moment voornamelijk handmatig gedaan. Om op industriële wijze secundair hout te verwerken is een automatiseringsslag een vereiste. De mogelijkheden van automatische detectie en bewerking van hout zijn in deze activiteit onderzocht. Het onderzoek is door twee projectpartners uit het consortium in parallel uitgevoerd, de Hogeschool van Amsterdam (HvA) en TNO.

5.2.3.1. Methode

In deze activiteit is onderzoek gedaan naar het scannen van hout. Dat was gericht op de nauwkeurigheid en snelheid waarmee bestaande technieken metaal en andere aspecten dan metaal kunnen detecteren (zoals houtsoort, noesten of degradatie van hout door vocht). Daarnaast is er onderzoek gedaan naar de inzet van diverse technieken (o.a. robotica) voor het beproeven van mogelijkheden tot verwijdering van (primair) metalen en andere 'ongerechtigdheden'. Tenslotte is er door de HvA ook aanvullend onderzoek gedaan naar de automatische koppeling tussen de detectie van het hout en het verwijderen van ongewenste elementen.

De volgende stappen zijn aangehouden voor het onderzoek naar scanners:

- Inventarisatie van bestaande scanners en scantechnieken, die binnen en buiten de houtverwerkende industrie worden ingezet;
- Vergelijking van de mogelijke alternatieven op basis van diverse criteria;
- Uitvoeren van proeven, om de meest kansrijke technieken te valideren. Deze proeven zijn uitgevoerd met diverse proefstukken;
- Evaluatie van het proces, waarmee de specificaties van deze verwerkingsstap in zowel de flowcharts als het programma van eisen verfijnd konden worden.

Voor het onderzoek naar verwijdering van metaal en andere ongerechtigdheden:

- Inventarisatie van bestaande technieken voor verwijdering;
- Vergelijking tussen de diverse mogelijkheden op basis van verschillende criteria;
- Uitvoeren van diverse proeven, om de meest kansrijke technieken te valideren. Hiervoor zijn dezelfde proefstukken gebruikt als hierboven beschreven;
- Evaluatie van het proces, waarmee de specificaties van deze verwerkingsstap in zowel de flowcharts als het programma van eisen verfijnd konden worden.

5.2.3.2. Resultaten

Scannen van hout

De HvA heeft in een quick scan een breed scala aan metaaldetectoren onderzocht, variërend van handscanners en detectiepoortjes tot high-end röntgenscanners. Na het uitvoeren van tests met verschillende handscanners gemonteerd op een robotarm (in hun Robotlab), werd besloten om vervolgonderzoek te focussen op vier verschillende X-ray scanners. Geïnccludeerd zijn zowel röntgenapparaten (o.a. bagagescanners op luchthavens) als CT-scanners, deze zijn gekozen met de veronderstelling dat X-ray scanners gemakkelijker te automatiseren en integreren zijn in het verdere houtverwerkingsproces.

Het eerste resultaat van dit onderzoek is een multi-criteria analyse met een 5-puntsschaal waarin de 4 verschillende scanners onderling worden vergeleken. Het verslag van dit onderzoek is beschikbaar als “AUAS_Phase 1_(C)BM_Report”¹³. De criteria die hierin zijn meegenomen zijn: 1) nauwkeurigheid, 2) snelheid van het scannen, 3) snelheid van data verwerking, 4) kosten, 5) afmetingen scanner, 6) gewicht van de scanner, 7) de maximale houtafmetingen, 8) robuustheid, 9) data toegankelijkheid, 10) veiligheid, 11) gebruiksvriendelijkheid, 12) automatiseringspotentie. Ieder criterium heeft zijn eigen weegfactor. Deze analyse is zichtbaar in onderstaand figuur (figuur 18).

Property	Score (high score = positive)				Weight (high score = important)
	Microtec CT	DXA	VMI Spectrum 6040	Smiths detection HI-SCAN (dual view)	
Accuracy of metal detection	5	1	3	4	4
Speed of the scanning process	5	1	3	3	3
Speed of data processing	2	1	3	3	4
Price (purchase price, usage costs and support / license costs)	1	3	5	4	5
Size (floor space and volume)	1	2	4	3	2
Weight	-	3	4	4	2
Maximum scan size	4	3	2	2	3
Robustness (dust/humidity)	5	1	3	3	4
Ease of data retrieval	5	4	3	3	4
Accessibility	2	2	4	4	2
Safety	2	5	4	4	4
User friendliness	1	4	5	5	1
Ease of external automation	5	4	3	2	3
TOTAL Weighted score	130	100	142	136	

Figuur 18, multi-criteria analyse scanners

De VMI Spectrum 6040 komt op basis van deze criteria als beste uit deze vergelijking; deze is in praktisch vervolgonderzoek ingezet voor het testen van diverse proefstukken wat betreft scannen, dataverwerking en koppeling met metaalverwijdering. Daarnaast is hiervoor ook de Mito CT scanner van Microtec geselecteerd, omdat dit een high-end scanner is geschikt voor andere toepassingen.

De proefstukken die voor het vervolgonderzoek met de scanners zijn gebruikt, zijn zichtbaar in figuur 19. Deze zijn ingezameld tijdens de verschillende inzamelproeven bij slopers en

¹³ Hogeschool van Amsterdam, [AUAS_Phase 1_\(C\)BM_Report_V_1.15](#), 12 april 2023

milieustraten. De proefstukken variëren wat betreft afmetingen, toepassing, houtsoort, hoeveelheid metaal en aanwezigheid van andere onregelmatigheden (scheuren, noesten en rot).



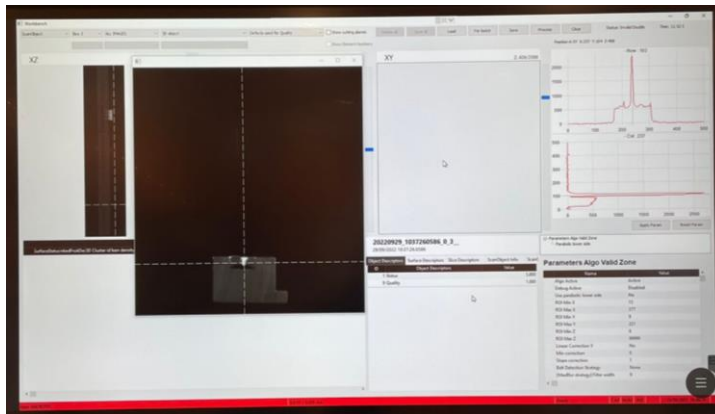
Figuur 19, proefstukken scanner

De resultaten van het scannen van de Mito CT-scan van Microtec (figuur 20) waren positief. Alle proefstukken zijn in een demonstratiesessie door de machine gescand en de belangrijkste bevindingen van deze sessie worden hieronder toegelicht:



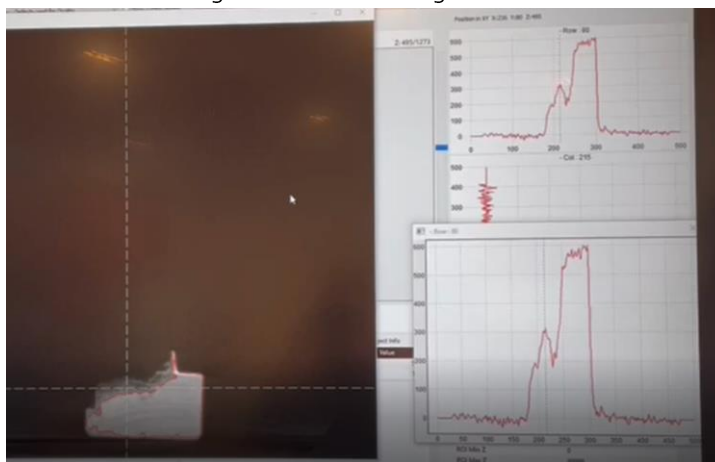
Figuur 20, Mito CT-scan Microtec

- Met de CT scanner wordt een 3D beeld gemaakt; het beeld kan door x-as, y-as en z-as worden doorsneden.
- Maximale afmetingen mogelijk in scanner: kopmaat 200x100mm en lengte 5 m.
- De scanner meet de dichtheid van het materiaal. Het verschil tussen de dichtheid van hout en de dichtheid van metaal is groot genoeg om met zekerheid te zeggen dat de detector al het metaal in het hout kan detecteren. Ook de afmetingen van het metaal kunnen worden bepaald. De kleinste maat van metaal die de machine kan detecteren heeft een diameter van 1 mm met een spatiële resolutie van 0,3 mm. Dit is voor toepassing bij afvalhout groot genoeg. Zie figuur 21.



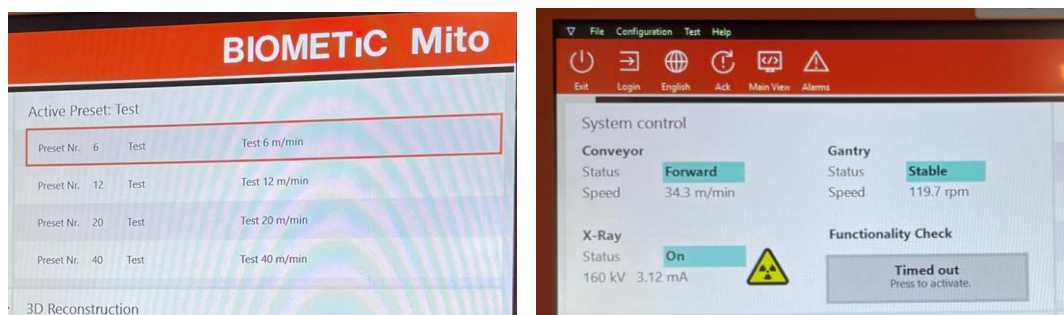
Figuur 21, metaaldetectie

- Ook aantasting en scheurvorming in het hout kan worden bepaald (zie figuur 22).



Figuur 22, detectie van scheuren en andere aantasting

- Er zijn verschillende snelheden waarmee het materiaal gescand kan worden. Het snelste geteste apparaat scant met 40 m/min. De snelheid verhogen heeft tot gevolg dat de spatiale resolutie groter wordt doordat het aantal slices dat de CT-scanner per seconde opneemt, niet hoger wordt. Bij een snelheid van 40 m/min was het nog steeds mogelijk om al het metaal te detecteren. Zie figuur 23.



Figuur 23, snelheden scanner

- Om de verschillende soorten houten (naald- en loofhout) te onderscheiden, kunnen er in het script verschillende thresholds voor dichtheden worden opgenomen. Zo kan het

verschil in dichtheid voor de verschillende houtsoorten worden opgenomen, zodat die in de scan te onderscheiden zijn. Switchen tussen de verschillende soorten hout kan zonder kalibratie.

- Sterktemeting is niet rechtstreeks mogelijk; wel zou dat bijvoorbeeld kunnen met een algoritme dat gebruik maakt van het aantal knoesten e.d. Microtec kan de output van de CT scanner zo configureren dat de output (data) de juiste input vormt voor koppeling met een machine die ongewenste delen kan verwijderen. Dat kan geprogrammeerd worden in o.a. het zeer gangbare C++ . Er is ervaring met deze koppeling; zo is eerder de aansluiting aan verschillende zaagmachines al geconfigureerd.
- Het grootste nadeel van deze toepassing is de prijs; de aanschafkosten van deze machine zijn hoog. Hierdoor wordt het lastig deze op te nemen in decentrale opstellingen voor verwerking.

In onderstaande tabel zijn de bevindingen wat betreft de Microtec CT scanner samengevat. Hierin is een beoordeling (inclusief beredenering) van de scanner zichtbaar op basis van de verschillende criteria die in de multicriteria analyse zijn gedefinieerd.

Table 2.1: Overview of properties of the Microtec CT scanner

Properties	Score	Reasoning
Accuracy	5	The scan data can be used to create very detailed 3D models. These models show every single detail of the scanned object.
Speed of the scanning process	5	The Microtec scanner has been designed to scan wood pieces on a conveyor belt. The scanning process is tweaked to handle the scanning of fast-moving objects.
Speed of data processing	2	Because the scans contain data of every detail of the scanned object, the files are very heavy. This causes long load and processing times.
Price (purchase price, usage costs and support/license costs)	1	Because the scanner is specially designed for fully automated industrial use the price is high (estimated 400k€).
Size (floor space and volume)	1	As can be seen in the image of the scanner, the scanner is very high and wide. Because the conveyor belt moves with a high speed the scanner needs to be placed in a cage. The cage around the scanner causes the occupied floor space to be very big.
Weight	-	The weight of the scanner is not openly shared.
Maximum scan size	4	Microtec scanners are made to scan very long pieces of wood. Some of the pieces that were scanned for testing were thick.
Robustness (dust/humidity)	5	The Microtec scanner is built for industrial use. They are designed to be placed in area's where dust is very common.
Ease of data retrieval	5	Because the scanner is designed to work automatically, it is normal for the scanner to export the data automatically.
Accessibility	2	The scanner is hard to transport because of the size. Getting access to a scanner would take time.
Safety	2	Because the conveyor belt moves with high speed, the scanner needs to be placed in a cage. The scanner is very dangerous otherwise.
User friendliness	1	The scanner uses its own software, this means that it is not a machine anyone can use without training.
Ease of external automation	5	External automation is what the scanner is designed for.

De testen met de VMI Spectrum 6040 zijn gedaan bij Gelan, een bedrijf dat X-ray scanners verhuurd voor evenementen. De resultaten van het scannen met de VMI Spectrum 6040 zijn samengevat in de tabel van figuur 24¹⁴.

Properties	Points	Reasoning
Accuracy	3	The data from the scanner can be used to accurately pinpoint the location of metal in the X direction. In the Y-direction, however, the X-ray scans under an angle, making the Y-location of the metal less clear. For creation of 3D bounding boxes, two scans are needed.
Speed of the scanning process	3	Conveyor belt speed is 0.24m/s, but adjustable. Scanning something takes less than 20 seconds. Continuous scanning is possible.
Speed of data processing	3	The scan data consists of "PNG" files. These can be easily be processed in big amounts.
Price (purchase price, usage costs and support/license costs)	5	The scanner that is tested costs around € 23k.
Size (floor space and volume)	4	1.98m x 0.88m x 1.24m
Weight	4	495 kg
Maximum scan size	2	0.62m x 0.42m x 1.50m
Robustness (dust/humidity)	3	It is a machine intend for unfriendly work at airports, yet in relatively clean environments.
Ease of data retrieval	3	The scan data has to be exported by hand, using a memory stick
Accessibility	4	This scanner, or similar alternatives, are readily available on the market.
Safety	4	Dose lower than 1uSv/h at 0.1m away from the equipment
User friendliness	5	The control panel of the scanner is very easy to use
Ease of external automation	3	Unclear, it is expected not to be easy to automate the export of the images (to be discussed with the scanner manufacturer, who is located in Brazil). But the scanner can be connected to remote management software, using a WiFi connection.

Figuur 24, overzicht eigenschappen VMI Spectrum 6040 op basis van testen

Hieruit wordt zichtbaar dat de grootste voordelen van de VMI scanner onder andere de prijs van de techniek en de gebruiksvriendelijkheid zijn.

De VMI-scanner heeft drie grote nadelen:

- Het scant alleen 2D
- De scanner scant onder een hoek
- De scanner wordt handmatig bediend en kan niet eenvoudig worden geïntegreerd in een geautomatiseerd proces

Over het algemeen is de indruk uit de verschillende experimenten en contacten met leveranciers is dat beide oplossingen geschikt zijn, ieder binnen een eigen toepassingsgebied.

¹⁴ Hogeschool van Amsterdam, [AUAS_Phase 1_\(CBM_Report_V_1.15\)](#), 12 april 2023

Verwijderen van metaal en andere ongewenste delen uit het hout

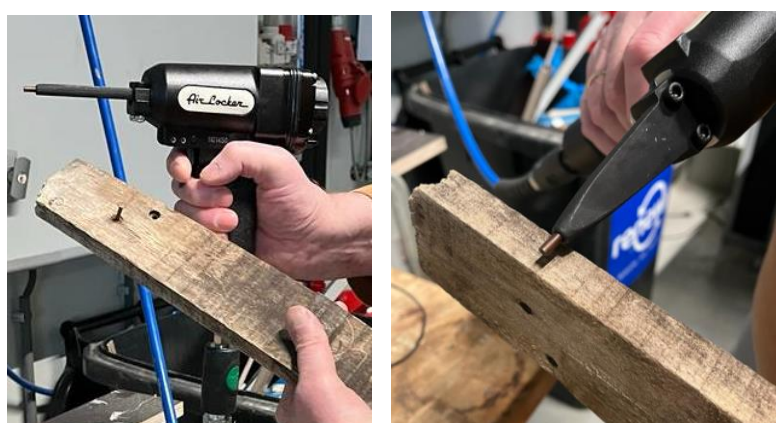
Naar het verwijderen van metaal hebben TNO en de HvA onderzoek uitgevoerd. Hierbij is eerst een inventarisatie gedaan naar de mogelijkheden. Er is onderzoek gedaan naar verwijdering door middel van: 1) druk, 2) trek, 3) verwarmen, 4) uithollen, 5) frezen, 6) water- of lasersnijden en 7) zagen. Onderzoek is gedaan naar o.a. snelheid, hoeveelheid verlies van het hout, kosten en effectiviteit voor verschillende types en soorten metaal. Deze rapportage is beschikbaar als “Opzet metaalverwijdering_TNO”¹⁵.

Op basis van deze inventarisatie zijn enkele technieken beproefd in het TNO bouwlab. Een van de proeven was het verwijderen van nagels uit pallethout door middel van uithollen (wat bij automatisering frezen zou worden). De techniek werkt als volgt: rondom de nagel wordt een klein stuk hout van de plank uitgehold. Het resultaat is dat de planken, inclusief enkele kleine uithollingen, los komen van de rest van de pallet. De spijkers blijven zitten in de blokken en de houten planken zijn metaalvrij. De proef is zichtbaar in figuur 25.



Figuur 25, ontspijkeren test (uithollen)

Een ander voorbeeld van een proef in het lab is zichtbaar in figuur 26. Daarbij is een spijker in een balk door middel van luchtdruk verwijderd.



Figuur 26, ontspijkeren test (d.m.v. druk)

¹⁵ TNO, [Opzet Metaalverwijdering_TNO](#), 12 september 2022

Door de grote diversiteit aan afmetingen en types van het metaal in de verschillende houtstromen, is het onmogelijk om één techniek te selecteren die geschikt is voor alle situaties. Tijdens de looptijd van het project is daarom onderzoek gedaan naar de mogelijkheid van een robotarm die alle bovengenoemde verwijderstechnieken combineert. De robotarm maakt hierbij gebruik van verschillende cassettes. Hierover is contact geweest met diverse fabrikanten / producenten van robotica; een vervolg hierop heeft niet binnen dit project plaatsgevonden.

Door de HvA is onderzoek uitgevoerd naar het verwijderen van metaal, inclusief de automatische koppeling tussen het detectieproces en het proces van verwijdering¹⁶. Die koppeling is succesvol gemaakt; een houtsample met spijkers is gescand en vervolgens zijn de spijkers verwijderd door het direct omliggende hout robotisch weg te frezen.

5.2.3.3. Key take-away's

- Een afweging tussen kosten en mogelijkheden van de (duurdere) CT-scanner en de (goedkopere) security scanner is nog niet gemaakt. De indruk uit de verschillende experimenten en contacten met leveranciers is dat beide oplossingen geschikt zijn, ieder binnen een eigen toepassingsgebied.
- De kwaliteit van goedkopere scanners (o.a. VMI spectrum) is niet hetzelfde als de Mito CT-scanner, maar wel voldoende voor het detecteren van het metaal. Dat is voornamelijk bruikbaar bij de stroom planken en balken. De goedkopere security scanners zouden meerdere gedistribueerde en decentrale verwerkingsstations kunnen faciliteren.
- Het toekomstige biobased lab van TNO zal worden voorzien van een scanner. Hiervoor wordt ook vervolgonderzoek gedaan naar de variant Smiths Detection HI-SCAN 6040 CTiX. Een eerste proef is uitgevoerd en de eerste bevindingen wijzen uit dat dit mogelijk een interessant alternatief kan zijn voor de Mito CT scanner, o.a. omdat in een lab- en testomgeving geen hoge (productie)snelheid vereist is. Het verslag van dit bezoek is beschikbaar¹⁷.
- Tijdens de looptijd van dit project is er minder inzicht verkregen in de praktische mogelijkheden voor het koppelen van de scaninformatie met een machine voor metaalverwijdering en het automatisch verwijderen van metaal. Dat hangt mede samen met de grote variatie aan configuraties waarin metaal verwijderd zou moeten worden. Uitgebreid vervolgonderzoek hiernaar is nodig om dit in een later stadium opschaalbaar te kunnen uitvoeren.

¹⁶ Hogeschool van Amsterdam, [Internship report - Semih Aydin - 500804493](#), 7 mei 2021

¹⁷ TNO, [Verslag bezoek Smiths Industries](#), 26 oktober 2023

5.2.4. Brandklasse inlands hout

Grootschalige gebruik van inlands of gebruikt hout in geveltoepassingen wordt belemmerd door regelgeving m.b.t. de vereiste brandklasse. In deze activiteit is onderzoek gedaan naar het vereenvoudigen van deze toepassing.

5.2.4.1. Methode

Voor hout in gevelbekleding is het per 2024 wettelijk vereist om hout met een brandklasse te leveren. De meest gevraagde (en zwaarste) klasse is B, maar ook D komt veel voor. Onder bepaalde voorwaarden is het toepassen van hout in gesloten gevels afgedekt met Classified Without Further Testing (CWFT) toegestaan. Dit onderzoek richtte zich daarom op de toepassing van lariks en douglas in open gevelsystemen.

Met testinstituut Peutz is overeengekomen dat met de 'slechtst presterende variant' in een gevelopstelling wordt doorgetest. Indien deze 'worst case' voldoet, mag daaruit afgeleid worden dat ook alle andere varianten voldoen. Het testen is in de volgende stappen doorlopen:

- Om een indicatie te kunnen krijgen zijn vooraf in een small flame test verschillende houtsoorten in exact dezelfde uitvoering getest om een eerste indruk te krijgen van het brandgedrag.
- In samenwerking met vier houthandels zijn vervolgens sneltests uitgevoerd op verschillende houtsoorten, waarna besloten is met Nederlands lariks verder te testen.
- Bij Peutz zijn vervolgens verschillende gevelpanelen van lariks hout in dampopen opstelling volgens SBI (NEN-EN 13501-1) getest op brandgedrag. Hierbij werd gevarieerd op dikte, breedte, voegbreedte en de oppervlakte. De verschillende testopstellingen zijn voorafgaand aan de brandtest bij Peutz gedurende langere tijd in een klimaatkamer geconditioneerd, conform de geldende testprotocollen.
- Op basis van de resultaten van de testen vindt de classificatie plaats conform NEN EN 13501-1. Hierbij wordt op basis van de waarden voor brandgroei (F_{igra}) en totale warmteproductie (THR_{600s}) de brandklasse bepaald.

Figuur 27 t/m 29 geven een indruk van de proefopstellingen. Naast de brandtesten heeft het consortium Pyromaan aan TNO gevraagd om een verkenning uit te voeren naar de mogelijkheden om een brandklasse van een houten gevelontwerp te voorspellen. Deze verkenning is uitgevoerd¹⁸.

5.2.4.2. Resultaten

Brandtesten

De resultaten van de testen naar brandklasse D met lariksgevelbekleding in dampopen opstelling waren zo positief, dat het voor het testinstituut mogelijk was om voor de hele geteste range tot end use classification te komen. De rapportages van de testen door Peutz bieden perspectief dat zowel lariks als douglas aan brandklasse D voldoet voor een grote toepassingsrange van end uses in open opbouw, verticaal en horizontaal.

Daarnaast is op basis van de positieve resultaten vanuit het onderzoek naar brandklasse D van inlands (naald)hout gesuggereerd dat toepassing van lariks in Brandklasse B mogelijk zou kunnen zijn. Aan het eind van dit project is een start gemaakt met de voorbereiding voor bijbehorende testen. Als die succesvol zijn, zou dat in de toekomst tot een veel bredere toepassing van inlands naaldhout in de bouw kunnen leiden.

¹⁸ TNO, [R11363_SNY Ministerie EZK Emissieloos bouwen](#), 11 juli 2023



Figuur 27, proefopstelling lariks hout bij start brandtest (verticale wandbekleding)



Figuur 28, proefopstelling larikshout tijdens en na brandtest (verticale wandbekleding)



Figuur 29, proefopstelling lariks hout, tijdens en na brandtest (horizontale wandbekleding)

Verkenning voorspellen brandklasse houten gevelontwerp

TNO heeft in samenwerking met Staatsbosbeheer en het consortium Pyromaan in 2023 een verkenning uitgevoerd naar de mogelijkheden om de brandklasse van een houten gevelontwerp te voorspellen. Gekeken is naar de ruimte die de bouwregelgeving biedt, zowel naar het gebruiken van brandproefresultaten van gelijksoortige gevels als naar de mogelijkheden voor voorspelling van de brandklasse, zodat geen brandproef meer nodig is. De volgende onderzoeksvragen zijn hierbij gesteld:

- 1) Welke ruimte biedt de bouwregelgeving om uitspraken te doen over de brandklasse van een bepaalde houten gevelopbouw die niet onderworpen is aan een brandproef, maar door gebruik te maken van de resultaten van brandproeven op gevels van andere houtsoorten of detailleringen?
- 2) Op welke manier kan een uitspraak over de brandklasse van een gevelopbouw worden gedaan op basis van resultaten van brandproeven op andere, min of meer, vergelijkbare gevels?

Op basis van de uitgevoerde verkenning worden ten aanzien van beide vragen de volgende conclusies getrokken:

- De bouwregelgeving biedt de mogelijkheid om uitspraken te doen over de brandklasse van een bepaalde houten gevelopbouw die niet onderworpen is aan een brandproef, op basis van een interpretatie van de Handreiking. Echter, de invloedsfactoren zoals gevelopbouw, buitenbekleding, folies, isolatiematerialen, warmtecapaciteiten, spouwafmetingen en ophangconstructies maken het lastig om hieraan invulling te geven voor houten gevelsystemen.
- De resultaten van brandproeven op gevels van andere houtsoorten of detailleringen kunnen niet 1-op-1 vertaald worden voor andere gevels. TNO ziet mogelijkheden om daarvoor een model te ontwikkelen op basis van AI. Het is echter nog niet duidelijk of de resultaten van een dergelijk model voldoende bewijs kunnen leveren om aan te tonen dat een gevel voldoen aan de eisen van het Besluit bouwwerken leefomgeving. Vooral nog wordt ervan uit gegaan dat de resultaten ingezet kunnen worden bij optimalisatie van het ontwerp. Uiteindelijk zal een test op basis van het Besluit bouwwerken leefomgeving noodzakelijk zijn om aan te tonen dat voldaan wordt aan de gestelde eisen.

5.2.4.3. Key take-away's

- Uit de testresultaten is gebleken dat zowel lariks als douglas in brandklasse D kunnen vallen voor een range van end uses in open constructies, verticaal en horizontaal. De classificatierapporten worden geschreven.
- Brandklasse B testen zijn gestart; als deze succesvol zijn, helpt dat bij een bredere toepassing van inlands naaldhout in de bouw, omdat dit vaak een eis is bij grotere projecten (>500 m²).
- Het wordt aanbevolen om op basis van de door het consortium Pyromaan ter beschikking gestelde resultaten van brandtesten binnen afzienbare tijd een onderzoek uit te voeren naar hoe AI kan worden ingezet voor het maken van een voorspellingsmodel voor de brandklasse van houten gevels.

5.3. Opwerken tot producten voor de timmerindustrie (WP4)

In dit werkpakket zijn allereerst de specificaties van de benodigde halffabricaten voor de timmerindustrie vastgesteld (gereed voor vingerlassen). Dit helpt om de samenhang tussen de verschillende stappen uit de ‘verwerkingsstraat’ en de gestelde eisen aan de uitgaande producten te onderzoeken.

Ten tweede is het proces van vingerlassen in kaart gebracht. Vingerlassen en lamineren is al een ontwikkeld proces, daarom is niet zozeer gekeken naar manieren om het proces te optimaliseren maar is vooral gekeken naar de beste manier om het herbruikbare hout aan te leveren om het binnen financiële mogelijkheden te kunnen verwerken.

Als laatste activiteit zijn er voorbeelden van succesvol gerealiseerde opwerkingsketens binnen dit project beschreven. Hierin zijn verschillende voorbeelden zichtbaar van geoogst hout in een nieuwe toepassing (CLT, HSB of kozijnen).

5.3.1. Specificaties halffabricaten timmerindustrie

In deze onderzoeksactiviteit zijn eisen opgesteld voor het opwerken van hout (zonder metaal e.d.) tot halffabricaten die gebruikt kunnen worden in de timmerindustrie. De opwerking van halffabricaten is onderdeel van de huidige procesgang, dus valt buiten de scope van dit onderzoek.

5.3.1.1. Methode

De volgende methodologie is aangehouden voor het specificeren van de eisen van de halffabricaten voor de timmerindustrie (om te gebruiken voor de productie van CLT, HSB, kozijnen).

- Opzetten Excel format om specificaties in te definiëren (bevat informatie over o.a. benodigde houtsoort, benodigde afmetingen en toegestane vochtpercentage).
- Gezamenlijke sessies met experts uit de timmerindustrie (o.a. fabrikanten van kozijnen, HSB-elementen en CLT hout) onder leiding van Quake / Noordereng en TNO om in overleg de eisen vast te stellen.
- Verwerken informatie uit sessie in het opgestelde Excel format¹⁹.

5.3.1.2. Resultaten

Specificaties van halffabricaten worden opgesteld als onderdeel van het gehele proces van ingenomen hout tot eindproduct (kozijnen, randhout/ spouwlaten, HSB-stijlen, regels, CLT-producten).

Onderstaande tabel (tabel 1) geeft een overzicht van de eisen aan het halffabricaat voor CLT. Deze eisen worden voorafgaand aan vingerlassen gesteld en zijn in overleggen tussen vooral de timmer- en bewerkingsbedrijven opgesteld.

¹⁹ Quake, [Eisen CLT, HSB, kozijnen](#), 7 juli 2023

Tabel 1, eisen halffabricaat CLT

	Toepassing	Opmerking
Houtsoort	Naaldhout, grenen + vuren + douglas + lariks	Ófwel niet sorteren, maar vooral invloed op uiterlijk
Max. lengte voor vingerlassen	1800 mm	Langhoutvingerlasmachine
Min. lengte voor vingerlassen	400 mm	
Max. lengte voor vingerlassen	6000 mm	
Inkorten t.o.v. kromming	Mag	
Minimale dikte	22 / 32 / 42 / 52 mm	
Visueel hand sorteren van hout op kwasten		Kleine kwast geeft toewijzing tot C18, grote kwast leidt tot afkeur
Stressgrading op gelamineerde balken		
Vochtigheid	10% tot 16%	
Aangetaste plekken	Weghalen	Blauwschimmel mag; roodstreep mag, mits hard; bruinrot mag niet; witrot mag niet
Aanwezigheid metaal	Geen enkele spijker, zelfs geen nieten, etc.	
Overig	Geen kiezels / insluitingen / etc.	
Minimaal ingangsvolume	5 m3 (2x stelkosten) / 10 m3 (1x stelkosten) / 15 m3 (0x stelkosten)	

Onderstaande tabel (tabel 2) geeft een overzicht van de eisen voor het halffabricaat van HSB. Dit zijn de eisen die gesteld worden voorafgaand aan vingerlassen.

Tabel 2, eisen halffabricaat HSB

	Toepassing	Opmerking
Houtsoort	Naaldhout, grenen + vuren + douglas + lariks	Sorteren op deze houtsoorten
Sortering houtsoort	Menging van houtsoorten is toegestaan	
Max. lengte voor vingerlassen	1800 mm	Langhoutvingerlasmachine
Min. lengte voor vingerlassen	400 mm	
Max. lengte voor vingerlassen	6000 mm	
Inkorten t.o.v. kromming	Mag	
Minimale dikte	42 mm	
Visueel hand sorteren	Visueel hand sorteren van hout op kwasten	Kleine kwast geeft toewijzing tot C18, grote kwast leidt tot afkeur
Stressgrading op gelamineerde balken		
Vochtigheid	10% tot 16%	

Aangetaste plekken	Weghalen	Blauwschimmel mag; roodstreep mag, mits hard; bruinrot mag niet; witrot mag niet
Aanwezigheid metaal	Geen enkele spijker	
Minimaal ingangsvolume	5 m3 (2x stelkosten) / 10 m3 (1x stelkosten) / 15 m3 (0x stelkosten)	

Onderstaande tabel (tabel 3) geeft een overzicht van de eisen voor het halffabricaat van kozijnen. Dit zijn de eisen die gesteld worden voorafgaand aan vingerlassen.

Tabel 3, eisen halffabricaat kozijnen

	Toepassing	Opmerking
Houtsoort	Liefst naaldhout, evt. loofhout	Loofhout slechter voor lambda waarde
Sortering houtsoort	Grenen + vuren + douglas + lariks mag	Sorteren op naaldhout én loofhout
Max. lengte voor vingerlassen	1100 mm	Korthoutvingerlasmachine
Min. lengte voor vingerlassen	400 mm	Kan eigenlijk vanaf 220 mm
Max. lengte voor vingerlassen	6000 mm	
Max. groeiring	6 mm	
Minimale dikte	28 mm	Vóór vingerlassen
Visueel hand sorteren op A, B of C-klasse		Voor A op rif / half rif gezaagd
Vochtigheid	10% tot 16%	
Aangetaste plekken	Weghalen	blauwschimmel mag voor B, niet voor A; roodstreep mag, mits hard voor B, niet voor A; bruinrot mag niet; witrot mag niet
Geen enkele spijker	Er mag géén metaal achterblijven	A lamel mogen geen spijkergaten in zitten -> zagen tussen de spijkers B lamel mogen spijkergaten in zitten -> afweging trekken / drukken / zagen
Minimaal ingangsvolume	5 m3 (2x stelkosten) / 10 m3 (1x stelkosten) / 15 m3 (0x stelkosten)	

Onderstaande tabel (tabel 4) geeft een overzicht van de eisen voor het halffabricaat van CLT. Dit zijn de eisen die de producent stelt aan het hout.

Tabel 4, eisen halffabricaat CLT

	Toepassing	Opmerking
Sortering houtsoort	Menging van houtsoorten is toegestaan liefst vooraf sorteren op houtsoort, geen Siberisch lariks / andere groeigebieden mengen.	
	Slechte stukken er tussenuit. Evt. kwaliteit van B naar A door wegzagen van slechte delen	
Dikte wens	20 / 30 / 40 / 50 mm	

Breedte wens	Minimaal 120, gemiddeld 150 à 160, maximum 200	Per paneel zoveel mogelijk identieke breedtes houden, diktes kunnen wel variëren in één plaat
Minimale lengte	1300 mm	
Maximale lengte vóór verwerking	6000 mm	
Vochtigheid	Afhankelijk van lijm bij MUF ~10% bij PUR ~11 à 12%	
Lijm	MUF / PUR	

Onderstaande tabel (tabel 5) geeft een overzicht van de eisen voor het halffabricaat van HSB. Dit zijn de eisen die de producent stelt aan het hout.

Tabel 5, eisen halffabricaat HSB

	Toepassing	Opmerking
Breedte wens	38 mm	
Hoogte wens	220 / 235 / 286 mm	

Onderstaande tabel (tabel 6) geeft een overzicht van de eisen voor het halffabricaat van kozijnen. Dit zijn de eisen die de producent stelt aan het hout.

Tabel 6, eisen halffabricaat kozijn

	Toepassing	Opmerking
Breedte wens	72 / 86 / 94 / 106 / 120 mm	
Hoogte wens	22 x 24 mm	

5.3.1.3. Key take-away's

- Deze activiteit heeft eraan bijgedragen dat de uiteindelijke relatie tussen ingezameld (gebruikt) hout en het (tussen)product veel duidelijker is, met uitgewerkte eisen aan de in- en uitgaande stromen.
- Een tool of techniek moet worden ontwikkeld die kan ondersteunen in de afweging wat betreft de meest realistische koppeling tussen inkomend hout en uitgaand product (a.d.h.v. eisen), op basis van de benodigde verwerkingstappen inclusief schatting van de mogelijke kosten. Hiermee is in de loop van dit project een start gemaakt, maar dit is nog onvoldoende gevalideerd.

5.3.2. Vingerlassen

Na het inzamelen, ontspijkeren en op maat zagen van sloophout, is het voor sommige toepassingen nog nodig om het hout te vingerlassen en te lamineren. Na het in kaart brengen van die stap is duidelijk welke stappen er allemaal nodig zijn om het hout te verwerken tot een fabricaat dat opnieuw door de timmerindustrie gebruikt kan worden.

5.3.2.1. Methode

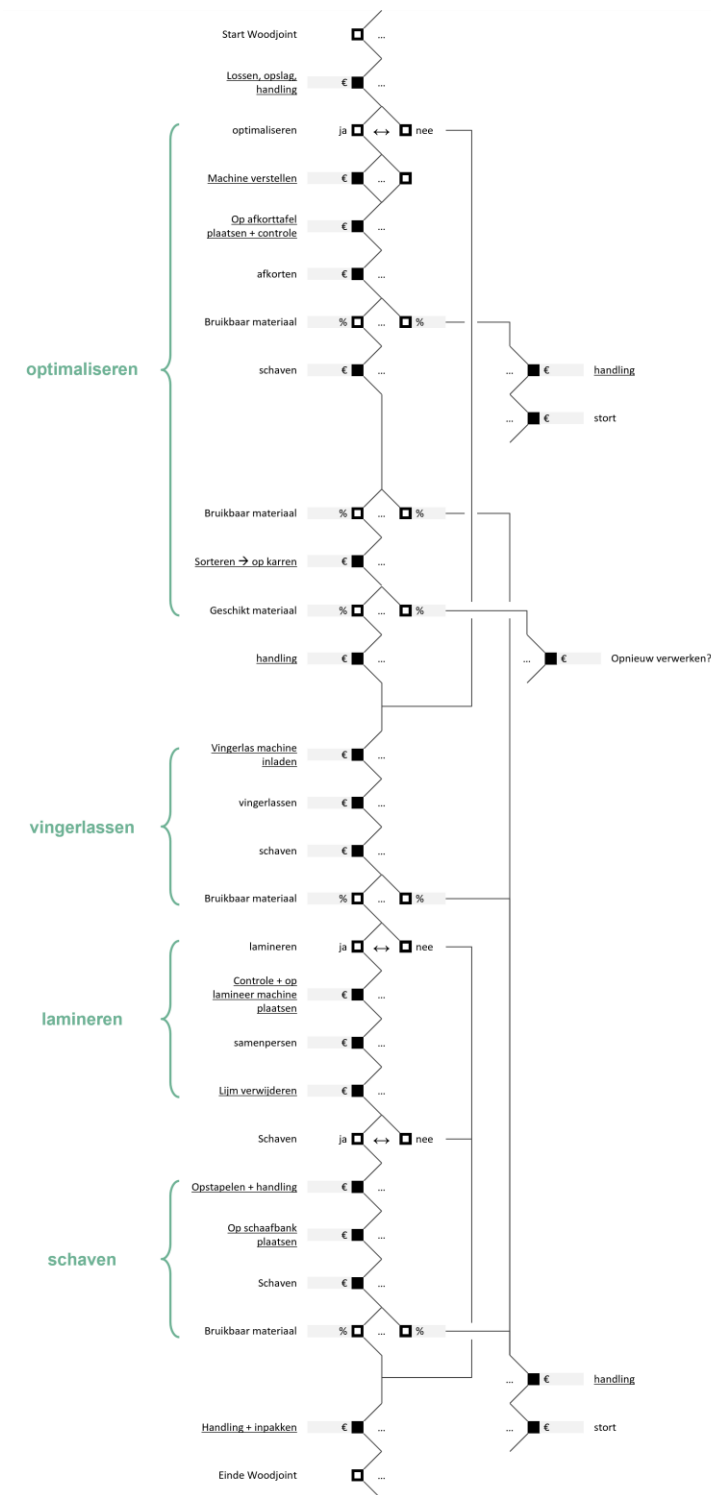
Net als de verwerking bij het sociaal werkbedrijf (DZB in Leiden) is voor vingerlassen en lamineren in kaart gebracht hoe het proces eruit ziet. Hiervoor is het proces van Woodjoint onder de loep genomen. In tegenstelling tot bijvoorbeeld het schoonmaken van afvalhout, is vingerlassen en lamineren een doorontwikkeld proces. Daarom is niet zozeer gekeken naar manieren om het proces te optimaliseren, maar vooral naar de beste manier om hout aan te leveren om de verwerking financieel haalbaar te houden. De volgende stappen zijn gezet om tot resultaten te komen:

- Bezoek aan de fabriek van Woodjoint en een interview met de directeur.
- Alle observaties zijn verwerkt om te komen tot een schematisch weergave van het proces, zie onderstaande flowchart.
- Een tweede gesprek met de directeur van Woodjoint om het processchema te verifiëren en te identificeren op welke manier sloophout het best aangeleverd kan worden.

5.3.2.2. Resultaten

Op de volgende pagina staat een geschematiseerde weergave van het proces van Woodjoint (figuur 30). In grove lijnen bestaat het proces uit vier optionele stappen die hieronder zijn omschreven.

1. **Optimaliseren.** In veel gevallen leveren klanten van Woodjoint hout aan met het doel om het te optimaliseren. Dit houdt in dat onregelmatigheden eruit worden gehaald om de kwaliteit te verhogen. Het hout wordt in stukken gezaagd en geschaafd tot rechte stukken. Hierbij worden onregelmatigheden zoals knoesten en scheuren verwijderd en overgebleven stukken (na het schaven) gecontroleerd. Alleen goedgekeurde stukken gaan na deze controle door om te vingerlassen en lamineren. Hout dat dit proces heeft doorlopen krijgt een Komo-keurmerk. De directeur gaf aan dat deze stap niet geschikt is voor tweedehands hout. Hij wil graag dat alle controles op het tweedehands hout al zijn uitgevoerd voordat het naar Woodjoint komt. De eerste stap is dan vingerlassen.
2. **Vingerlassen.** De mogelijke afmetingen die gevingerlast worden op de twee voornaamste productielijnen zijn: lengte = 25 tot 110 cm, dikte = 19 tot 97 mm, hoogte = 50 tot 200 mm. De machine wordt met de hand geladen en vervolgens wordt het hout automatisch gevingerlast en geschaafd. Daaruit komen stukken van ongeveer 6 meter lang.
3. **Lamineren.** Lange delen die uit het vingerlasproces komen, kunnen worden gelamineerd. Ze worden dan met de hand geladen in grote persen die meerdere elementen tegelijk op elkaar drukken. Na het lamineren worden lijmresten er met de hand afgeschraapt.
4. **Schaven.** Optioneel kan gelamineerd hout nog geschaafd worden om ruwe randen te verwijderen. Dit gebeurt op een andere lijn. Vaak is dit niet nodig omdat afnemers van het hout het zelf schaven voor gebruik.



Figuur 30, proces vingerlassen

5.3.2.3. Key take-away's

Op basis van het processchema is met de directeur van Woodjoint gesproken over de beste manieren om sloophout aangeleverd te krijgen en te verwerken bij Woodjoint. Daaruit komen de volgende key take-away's naar voren:

- Vermijd het vingerlassen van naaldhout. Vingerlassen is per meter ongeveer net zo duur voor naaldhout als voor hardhout terwijl het eindproduct veel minder waard is. Dit is met name belangrijk voor bijvoorbeeld hsb-bouwers voor wie een lage prijs heel belangrijk is.
- Minimaliseer lamineren. Lamineren is een duur proces omdat het relatief veel handwerk vereist. Kosten worden per m/lijmlaag gerekend, dus hoe minder lijmlagen hoe goedkoper. Dit kan bereikt worden door grotere lamellen te gebruiken.
- Zorg dat het hout helemaal metaalvrij is. Dit is een voorwaarde. Voor de circulaire lijn gebruikt Woodjoint weliswaar oude beitels, maar vervangen in geval van beschadiging kost veel tijd en dus geld. Daarnaast is metaalvrij hout vooral belangrijk omdat Woodjoint problemen bij afnemers wil voorkomen.
- Zorg dat hout goed op maat is gesorteerd. Het brengt veel extra kosten met zich mee als medewerkers van Woodjoint dit werk moeten doen.
- Zorg dat te vingerlassen kopmaten minder dan 2 mm verschillen. Als stukken aan elkaar worden gelast die meer afwijken, komt het hout niet netjes uit het vingerlasproces.
- Zorg dat er geen scheuren in het hout zitten. Gescheurd hout kan kapot gaan in de vingerlasmachine. Als dit gebeurt, kan er een opstopping ontstaan waardoor er veel tijd verloren gaat.
- Zorg dat hout niet te droog is als het gelamineerd moet worden. Lijm heeft vocht nodig om uit te harden. Het lamineerproces kan wel twee keer zo lang duren als hout heel droog is. Dit kost dus ook meer.
- Stapel stukken op de brede kant in stapels van 40 cm hoog. Die stapels kunnen in één keer worden gepakt en in de machine worden geladen. Op een pallet kunnen twee van zulke stapels bovenop elkaar.
- Lever stukken van 40 tot 50 cm lang. Er passen stukken van 110 cm in de lader maar stukken van 50 cm zijn makkelijker te tillen (in stapels van 40 cm hoog). Van deze stukken passen er 2 naast elkaar op een pallet.
- Lever rechte pallets aan. Als het netjes gestapeld is, kan het sneller worden gepakt.
- Lever grote kopmaten. Kosten van vingerlassen kunnen ongeveer per meter worden bepaald. Hoe groter de kopmaat (binnen het maximum van 97x200mm) hoe lager de kosten voor vingerlassen per m³.
- Lever 15m³ of meer. Uit ervaring blijkt dit ongeveer de hoeveelheid circulair hout te zijn die op een dag verwerkt kan worden. Als je minder hout aanlevert, moeten er stelkosten betaald worden, oplopend tot €500,-.
- Laat elementen van 6 m lamineren. Als lamineren nodig is, zijn elementen van 6 m (maximum) ongeveer net zo duur om te maken als elementen van bijvoorbeeld 4 meter. Elementen van 6 m zijn dus goedkoper per m³.

5.3.3. Voorbeelden van 'opwerkingsketens'

Binnen deze activiteit zijn enkele succesvolle voorbeelden van opwerkingsketens gerealiseerd waarbij veelal vrijkomend hout vanuit de sloop is gebruikt voor het opwerken tot een eindproduct, voor de toepassing in kozijnen zowel als HSB-elementen. Deze producten zijn toegepast in diverse projecten, waaronder een renovatieproject in Arnhem van timmerfabrikant Helwig. Een ander voorbeeld van een succesvolle opwerkingsketen is een CLT Folly (een demo ontwerpobject), hierbij is in samenwerking met verschillende ketenpartijen van oud pallethout hoogwaardig CLT gemaakt.

Deze succesvolle voorbeelden geven inspiratie wat betreft de mogelijkheden om afvalhout hoogwaardig te hergebruiken; hierbij is intensieve samenwerking tussen de verschillende partijen in de keten een absolute vereiste gebleken.

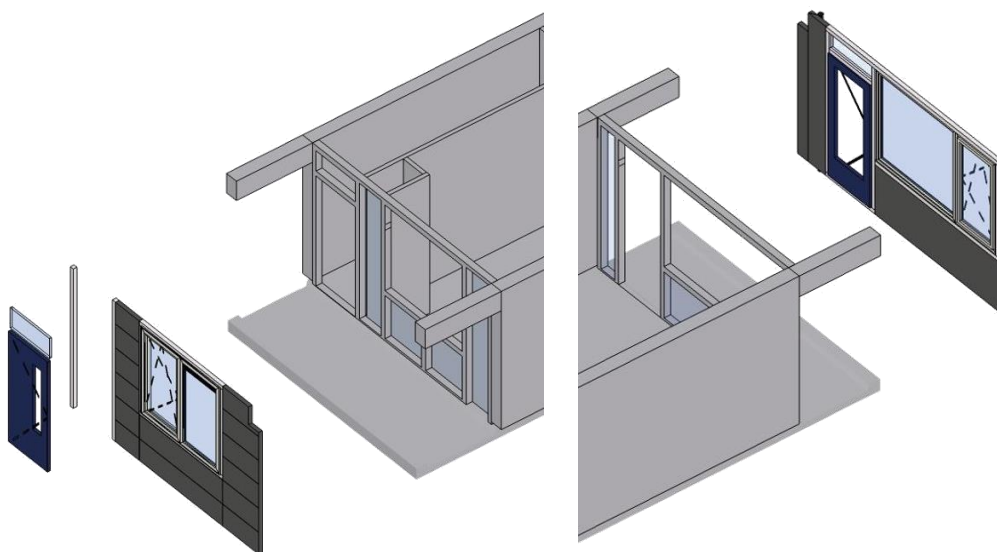
5.3.3.1. Methode

In totaal zijn er vier voorbeelden van opwerkingsketens gerealiseerd in dit project, waarbij van geoogst sloophout of hout afkomstig van de milieustraat een nieuwe toepassing is gemaakt. In alle gevallen heeft het hout in grote lijnen hetzelfde proces doorlopen. Ten eerste is het hout verwerkt tot bruikbaar halffabricaat o.a. door het verwijderen van metaal, verzagen en indien nodig het drogen van het hout. Daarna is het hout bij Woodjoint gevingerlast en eventueel gelamineerd. Tenslotte is het hout bij de desbetreffende producent opgewerkt tot HSB, CLT of kozijn. De vier ketens worden hieronder in meer detail toegelicht.

5.3.3.2. Resultaten

Renovatie 133 woningen Arnhem

Projectpartner Helwig heeft gedurende dit project gewerkt aan de voorbereiding en uitvoering van een renovatie van 133 woningen in Arnhem in het kader van verduurzaming. Hierbij zijn zowel de voor- als de achtergevel voorzien van een extra voorzetgevel. Het principe is zichtbaar in figuur 31. Op deze manier konden de huidige kozijnen voor 60 à 70% worden hergebruikt, in plaats van te slopen en af te voeren. Enkel de draaiende delen, de tussendorpels / stijlen en het glas zijn verwijderd.



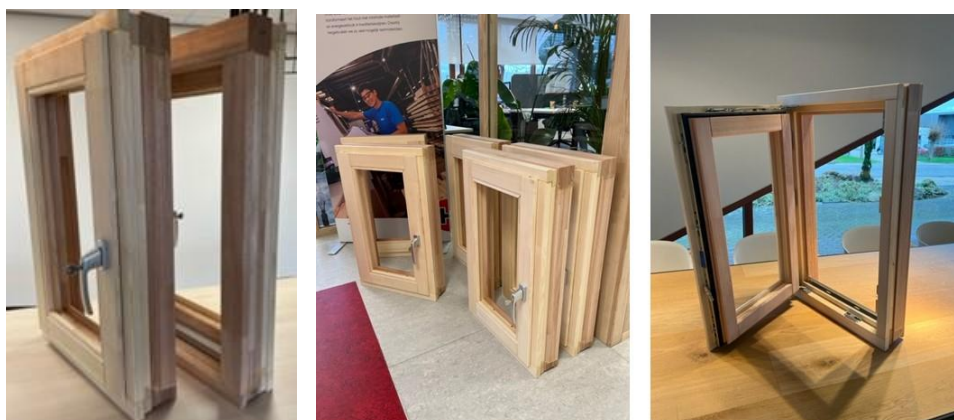
Figuur 31, Principe renovatie Arnhem. Voor- en achtergevel met voorzetgevel

Helwig heeft de HSB voorzetwanden geprefabriceerd in de fabriek (figuur 32). Door het in de fabriek te realiseren blijft de tijd voor het plaatsen van de gevel beperkt tot één dag. De voorzetwanden zijn (deels) gemaakt van gerecycled naaldhout. Dit hout was afkomstig vanuit een sloopproject van A. van Liempd. Het hout is door Woodjoint gevingerlast.



Figuur 32, productie HSB voorzetgevel in de fabriek

Daarnaast zijn de houten kozijnen die in de voorzetwand zijn geplaatst ook gemaakt van ongeveer 50% gerecycled hout. Dit duo kozijn is zichtbaar in figuur 33. De binnenzijde (binnen glaslijn) is gemaakt van gerecycled vurenhout en de buitenzijde (buiten glaslijn) is gemaakt van de houtsoort Red Grandis. Voor dit project is het gerecyclede hout afkomstig van oude kozijnen van Helwig. Deze heeft A. van Liempd ontvangen en gedemonteerd. Dit hout is vervolgens naar Woodjoint gestuurd om het te vingerlassen en lamineren om het uiteindelijk weer naar Helwig te retourneren voor de productie van een nieuw kozijn.



Figuur 33, Duo - kozijn Helwig

Dit is een samenwerkingsproject geweest van drie projectpartners. Opgemerkt wordt dat hierbij momenteel de kosten voor kopen en inzet van gebruikt hout ca. het dubbele zijn van nieuw hout. In figuur 34 is een voorbeeld van het resultaat van de renovatie te zien. Het complete verslag is beschikbaar²⁰.

²⁰ Helwig, "[20230309 Biobased renovatie 133 woningen Arnhem](#)", 9 maart 2023



Figuur 34, resultaat voorzetgevel achterzijde

Renovatiegewel met biobased materialen.

Een voorbeeld van een andere ‘opwerkingsketen’ is opnieuw een HSB – renovatiegevel, dit keer geproduceerd door timmerfabrikant WEBO. In de proefelementen is gebruik gemaakt van zoveel mogelijk biobased materialen. Een deel van het hout in de gevel is gebruikt vurenhout van binnendeuren afkomstig uit een slooppject. Woodjoint heeft het hout eerst geoptimaliseerd (incl. vingerlassen en lamineren) voor verdere productie door WEBO. De renovatiegevel is toegepast in een project voor energetische verduurzaming van woningen in Rijssen.



Figuur 35, Renovatiegevel WEBO inclusief toepassing in project in Rijssen

CLT van houten balken

Projectpartner New Horizon heeft tijdens dit project gebruikte houten balken geogst. Deze zijn geleverd aan een het sociale werkbedrijf DZB (Leiden), dat zich richt op het verwerken van hout. Hier is het hout visueel beoordeeld. Op basis daarvan is 80% van het hout verder verwerkt. Het hout is ontdaan van metaal en verzaagd tot het gewenste halffabricaat. Deze verwerking leverde qua gewicht ca. 75% op van de input. Dit hout is naar Woodjoint gestuurd voor het vingerlassen en schaven. Daarna heeft Boerboom hieruit CLT-platen geproduceerd.

CLT van pallethout

Het laatste voorbeeld van een succesvolle opwerkingsketen binnen dit project is een Folly (demo ontwerp object) van CLT, waarbij het CLT gemaakt is van oud pallethout, zie figuur 36.

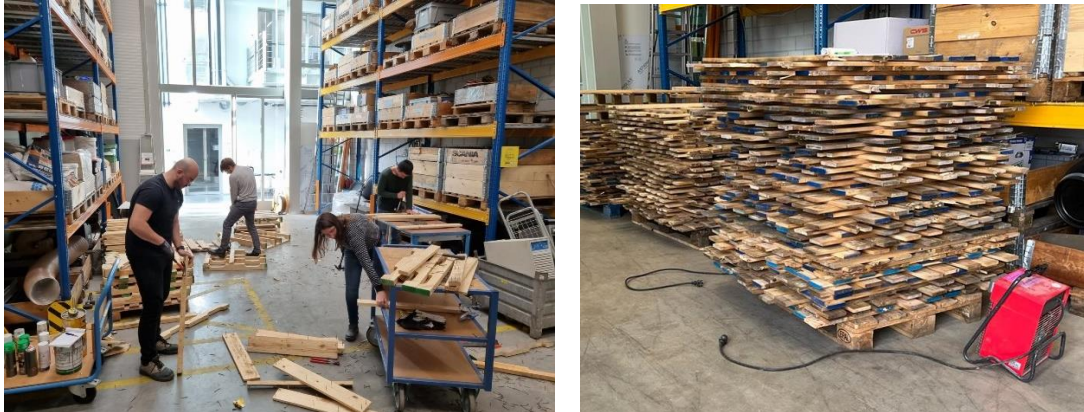


Figuur 36, Folly van CLT van pallethout

Tijdens de looptijd van dit project heeft TNO met diverse bedrijven, waaronder Boerboom, Woodjoint en Renewi, samengewerkt aan een Hackaton van Blue City over de (on)mogelijkheden van de inzet van afvalhout voor CLT-productie. Op dit moment worden veel pallets (geen EPAL) als afvalhout behandeld en verbrand, terwijl een flink deel daarvan nog goed bruikbaar is. Het bijkomende voordeel is dat pallethout eenvoudiger kan worden opgewerkt tot bruikbaar element dan willekeurig geschikt afvalhout, omdat het een meer uniforme stroom is. Daarom is deze lijn ook zeer interessant voor dit project.

Tijdens de Hackaton is er met de verschillende projectpartners en Urban Climate Architects gewerkt aan een opzet en idee voor het hergebruiken van pallets. Het resultaat is een ontwerpobject van circulair CLT (folly) die als demonstratiemodel kan dienen om aan te tonen dat afvalhout opgewerkt kan worden tot hoogwaardig constructief toepasbaar CLT.

Tijdens het experiment is er onderzoek gedaan naar de verschillende mogelijkheden om de pallets te demonteren (handmatig en machinaal), gelet op snelheid, tijdsbesteding en kwaliteit. In het onderzoek zijn in totaal 110 pallets gedemonteerd (figuur 37).



Figuur 37, demonteren en drogen van pallethout

Het hout van de gedemonteerde pallets heeft Woodjoint gelamineerd en gevingerlast (figuur 38), Boerboom heeft daaruit vervolgens een CLT-constructie (folly) geproduceerd als demonstratiemodel (figuur 39).



Figuur 38, vingerlassen van pallethout



Figuur 39, CLT productie pallethout

In deze keten werd (nog) niet automatisch metaal verwijderd en hout afgekort, dat gebeurde handmatig bij DZB. Echter, deze keten heeft inzicht gegeven in de benodigde informatie en samenwerking voor latere automatische koppeling van detectie met metaalverwijdering en andere behandeling. Tenslotte hebben bedrijven betrokken bij pallethandel veel interesse getoond in de mogelijkheid om pallets op deze manier te hergebruiken i.v.m. de waardevermeerdering van het gebruikte hout.

Er is uitgebreide informatie over het resultaat van de Hackaton die tot de folly heeft geleid²¹. Daarnaast zijn er enkele externe publicaties geweest aan de hand van dit resultaat:

- [Artikel in Het Houtblad, 6 februari 2023](#), “Hackaton leidt tot folly van CLT van pallethout (en meer)”
- [Artikel van Urban Climate Architects](#), februari 2023, “CLT from old pallets!”
- [Filmpje op TNO-YouTubekanaal](#) over hergebruik van afvalhout.

²¹ Blue City, [Blue city – pallet tot CLT](#), 6 februari 2023

Niet alleen een folly is geproduceerd, ook losse CLT-platen voor constructieve toepassingen. In het TNO-lab zijn buigtesten en afschuiftesten uitgevoerd op deze CLT-platen zie figuur 40.



Figuur 40, Test set-up en buigtest CLT-platen

Deze tests zijn uitgevoerd om buigsterkte, -stijfheid en failure modes te beproeven. Hetzelfde geldt voor de afschuiftesten (sterkte, stijfheid en failure modes). Aangezien er op het moment van testen geen regelgeving of kwaliteitsnormering is voor het hergebruik van hout, en het aantal beschikbare testmonsters relatief klein is, kunnen de resultaten alleen als indicatief worden beschouwd om de algemene haalbaarheid van het hergebruik van hout voor CLT-panelen te evalueren. Een uitgebreid verslag van deze tests is beschikbaar²².

De conclusie op basis van de buigtesten is: de buigtestresultaten van het pallet CLT werden significant beïnvloed door voortijdig falen van de vingerlassen binnen de parallelle lagen. Hierdoor heeft het CLT van palleshout een lagere elasticiteitsmodulus en buigsterkte in vergelijking met de CLT proefstukken van nieuw hout. Er wordt aangenomen dat de prestaties van CLT van palleshout met geoptimaliseerde vingerlassen aanzienlijk kunnen worden verbeterd, en dat dit kan leiden tot vergelijkbare waarden als de proefstukken van nieuw CLT. Voor de afschuifproeven geldt: de afschuifproeven suggereren dat CLT van palleshout de potentie heeft om op een vergelijkbaar niveau te presteren als CLT van nieuw hout. Zowel voor afschuifmodulus en afschuifsterkte vertoont pallet CLT vergelijkbaar gedrag met CLT van nieuw hout.

Certificering van gebruikt hout in nieuwe toepassingen

Er is overlegd met FSC Nederland m.b.t. mogelijkheden voor certificering van gebruikt hout. Onder bepaalde voorwaarden kan dat onder FSC Recycled label vallen. FSC Recycled staat voor gerecycled materiaal dat voldoet aan de strenge normen van FSC. Dit betekent dat het materiaal afkomstig is van bronnen die anders als afval zouden worden afgedaan, maar in plaats daarvan zijn verzameld en verwerkt voor hergebruik of upcycling, of andere commerciële toepassingen. Dit helpt om de vraag naar nieuw, onbewerkt materiaal te verminderen en draagt bij aan duurzamere productie. FSC Recycled werd in het FSC-systeem geïntroduceerd om de belangrijke rol te erkennen die papier- en houtrecycling speelt bij de bescherming van de bossen in de wereld. In tegenstelling tot algemene beweringen over 'recycling', die niet noodzakelijkerwijs aan controle zijn onderworpen, biedt FSC Recycled de

²² TNO, [TNO 2024 R10087 Bending and Shear Behaviour of Cross-Laminated Timber made from Reclaimed Wood](#), 16 January 2024

zekerheid dat het hout of papier in een product is geverifieerd als materiaal uit te herleiden bron (te slopen pand in dit geval).

Voor het gebruik van retourstroom pallets is de weg vrij om hier een FSC Recycled claim op te leggen. De certificeerder moet echter nog erin toestemmen dat het systeem sluitend is.

5.3.3.3. Key take-away's

- Op dit moment is het gebruik van afval hout nog niet rendabel. Gebruik van afvalhout kan rendabel zijn op het moment dat de arbeidskosten naar beneden gaan. Uit het renovatieproject in Arnhem is gebleken dat in dat geval de kosten voor kopen en inzet van gebruikt hout ca. het dubbele zijn van nieuw hout. Vervolgonderzoek naar automatische koppeling van detectie met metaalverwijdering en andere behandeling in het verwerkingsproces is een vereiste voor versnelling van het proces, opschaling en verbeteren van de businesscase. Hierbij moet ook aandacht geschonken worden aan de samenwerking en verdeling van verantwoordelijkheden binnen de keten.
- Vanuit verschillende partijen buiten het project is veel belangstelling getoond voor de mogelijkheden van hergebruik, zeker als het gaat om een waardevermeerdering van het gebruikte hout.
- Het is aan te raden om NEN-EN 16351:2021 te gebruiken voor CLT testen als resultaten die verder gaan dan een indicatief karakter gewenst zijn.
- Het is mogelijk om hergebruikt hout te laten certificeren onder het FSC Recycled label, als het materiaal anders als afval behandeld zou worden. Daarvoor gelden strenge voorwaarden, om misbruik te voorkomen.

5.4. Emissieberekeningen (WP5)

Gedurende het gehele project is gewerkt aan het opstellen en verbeteren van NO_x- en CO₂-emissieberekeningen, om de emissiebeperkingen te kwantificeren die behaald worden door toepassing van inlands hout en gebruikt A- en B-hout. In dit deel van het rapport worden de uitgevoerde onderzoeken, experimenten en verkenningen met betrekking tot emissie-reductie en milieu-impact verder toegelicht.

5.4.1. Onderzoek Milieu-impact

Deze studies hebben tot doel om betrouwbare en nauwkeurige kwantitatieve milieugegevens te genereren van zowel producten waarin hergebruikt hout wordt toegepast, als diverse biobased materialen en producten. De gegevens dienen als basis voor bouw-gerelateerde berekeningen en als argumentatie voor oplossingen die een lage(re) milieubelasting veroorzaken. Dit wordt middels een levenscyclusanalyse (LCA) uitgevoerd. Met een LCA kan milieu-impact (inclusief emissies) over de gehele levensduur van een materiaal of product worden berekend. Er worden verschillende milieu-impact categorieën (o.a. klimaatverandering, verzuring of uitputting van grondstoffen) meegenomen. Om de verschillende LCA berekeningen onderling vergelijkbaar te maken worden ze omgezet naar een single – score indicator, de Milieukostenindicator (MKI). De MKI vereenvoudigt en verenigt de relevante milieueffecten in één score uitgedrukt in euro's die de schaduwkosten van het product weergeven. Een lage MKI betekent dat de milieu-impact van een product laag is. Dit betreft niet enkel CO₂-emissie, maar kan ook gaan om andere impactfactoren als verzuring, aantasting van de ozonlaag en toxiciteit. Deze emissies zijn vaak het gevolg van gebruik van fossiele brandstoffen. In dat geval zullen ook significant minder NO_x-emissies in de keten veroorzaakt worden, ook op de bouwplaats.

5.4.1.1. Methode

Gedurende het project zijn er diverse LCA berekeningen uitgevoerd:

- LCA (MKI) gelamineerde liggers van HEKO met nieuw hout
- LCA (MKI) kozijn Helwig
- LCA (MKI) re-CLT van pallets (met partijen Woodjoint en Boerboom)
- LCA (MKI) kolommen fix green met industrieel afvalhout ²³
- LCA (MKI) diverse bio-based bouwmaterialen (WikiHouse, Faay wanden van vlas, RikMak's biopanel, Van hier BioM panelen, Mycelium, Mymo, Ecocon²⁴, Ecor²⁵, Isofloc²⁶, Rawblox²⁷, Thermofloc²⁸, Strawblocks²⁹).

In de berekeningen is de gehele levensduur meegenomen. Dit bevat de productiefase (A1-A3), de bouwfase (A4-A5), gebruiksfase (B1-B5), sloop- en verwerkingsfase (C1-C4). Daarnaast worden de kosten en baten buiten het productsysteem ook vaak meegenomen in module D (hergebruikt, terugwinning, recyclingpotentieel).

²³ Hedgehog company, [20230315 LCA_FixGreenbuilding_NL](#), 15 maart 2023

²⁴ Hedgehog company, [EPD Ecocon V3.2](#), 7 november 2022

²⁵ Hedgehog company, [EPD Ecor](#), 3 juli 2023

²⁶ Hedgehog company, [EPD Isofloc](#), 3 juli 2023

²⁷ Hedgehog company, [EPD Rawblox](#), 11 juli 2023

²⁸ Hedgehog company, [EPD Thermofloc](#), 3 juli 2023

²⁹ Hedgehog company, [Strawblocks LCA rapport](#), 23 juli 2023

Voor de uitvoering van een LCA berekening wordt de volgende methodologie aangehouden (volgens EN15804/ NMD bepalingmethode) :

- Verzamelen data benodigd voor LCA berekening. De partijen leveren de gegevens over de input van grondstoffen en energie voor het te berekenen product.
- Levenscyclus inventaris en allocatie. Op basis van aanwezige data wordt een productsysteem / scenario's opgezet voor de verschillende fases (productie, bouw, gebruik, sloop en verwerking). Dit omvat de verschillende materiaal- en energie-instromen die nodig zijn gedurende de verschillende stadia van het productieproces.
- LCA berekening uitvoeren (incl. datacollectie). Hiervoor worden de databases Eco-invent en Nationale Milieudatabase geraadpleegd. Resultaat is een levenscycluseffectbeoordeling (milieuprofiel incl. MKI).
- Interpretatie resultaten. Resultaten LCA worden geanalyseerd o.a. met een contributie analyse en gevoeligheidsanalyse.
- LCA berekening verifiëren, dit is nodig indien het product wordt opgenomen in de NMD (nationale milieudatabase). Hiervoor wordt een Environmental Product Declaration (EPD) opgesteld. Een EPD is een samenvatting van de LCA's, deze profielen kunnen worden gedeeld zonder dat er gevoelige informatie in vermeld staat.

Alle berekeningen zijn uitgevoerd door Hedgehog company. Over een aantal elementen en producten heeft Hedgehog gecorrespondeerd met de NMD in het kader van EPD's en het eenduidig toepassen van rekenregels.

5.4.1.2. Resultaten

LCA gelamineerde liggers HEKO

In dit project is een levenscyclusanalyse (LCA) van de gelamineerde ligger van HEKO uitgevoerd. Hiervan is een EPD opgesteld en deze zal worden opgenomen in de Nationale Milieu Database (NMD).

LCA Kozijn Helwig (& WEBO)

Hedgehog heeft in samenwerking met Helwig een LCA gemaakt van een kozijn, deze kan worden opgenomen in de NMD.

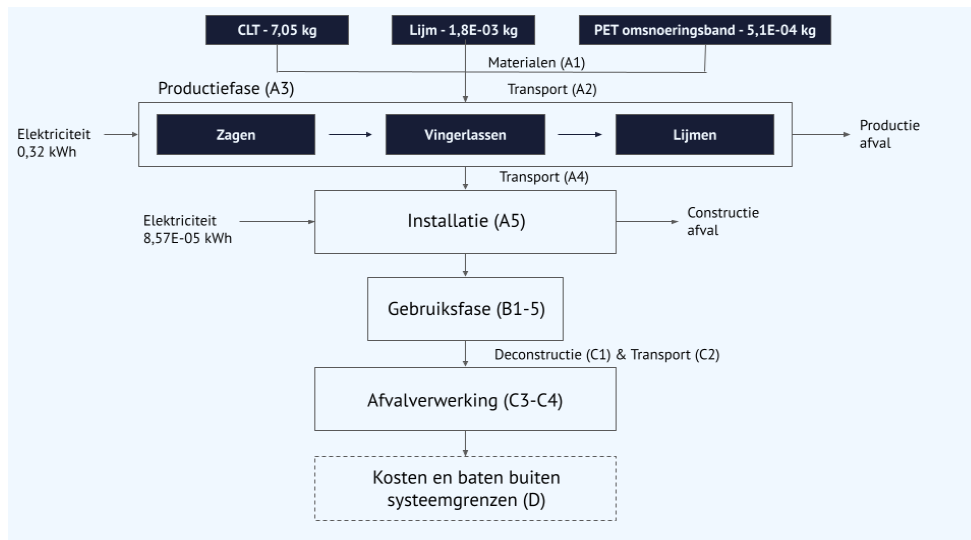
In parallel zijn de rekenregels met betrekking tot het kozijn in samenwerking met WEBO (de LCA – deskundige) onder de loep genomen en aangekaart bij de NMD. Op basis hiervan is een brief opgesteld naar de VLCA (vereniging voor LCA in de bouw). Momenteel is dit verzoek in behandeling bij de NMD, zodat het verwerkt kan worden in de bepalingmethode.

LCA re-CLT van pallethout

In de LCA van CLT van pallethout is bepaald dat er significante reductie van milieu-impact plaatsvindt ten opzichte van gebruik van nieuw materiaal. Zo heeft re-CLT een factor 3 tot 4 keer minder impact dan conventioneel CLT.

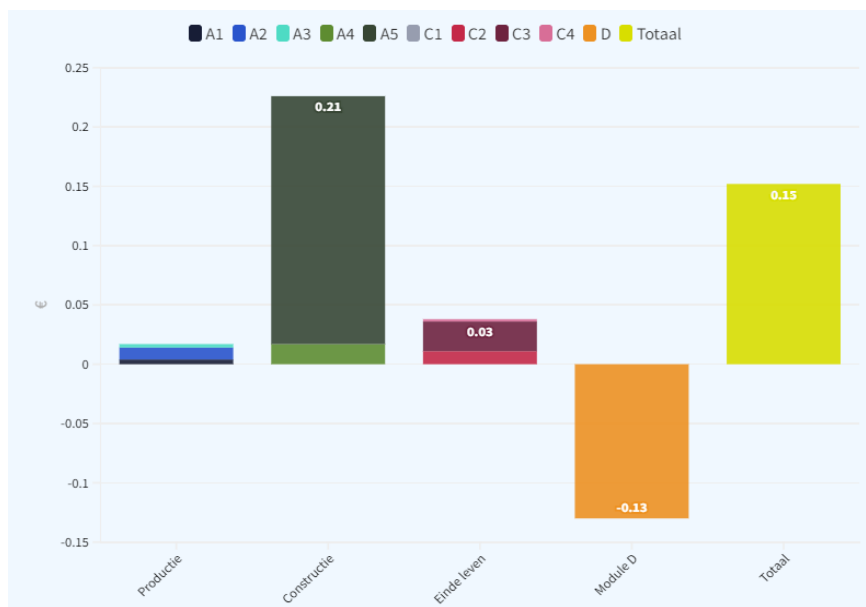
LCA FIX Greenbuilding kolom

Deze studie betreft één strekkende meter (m1) FIX Greenbuilding constructie kolom, die bestaat uit CLT. Het CLT wordt in Nederland verkregen van Derix, waar het vrijkomt bij het maken van deur- en raamopeningen in CLT elementen. De stukken CLT worden verwerkt tot het product van FIX Greenbuilding door Woodjoint. Het door FIX Greenbuilding verkregen CLT is een bijproduct van het bedrijf Derix. Figuur 41 geeft een overzicht van de systeemgrenzen van deze studie.



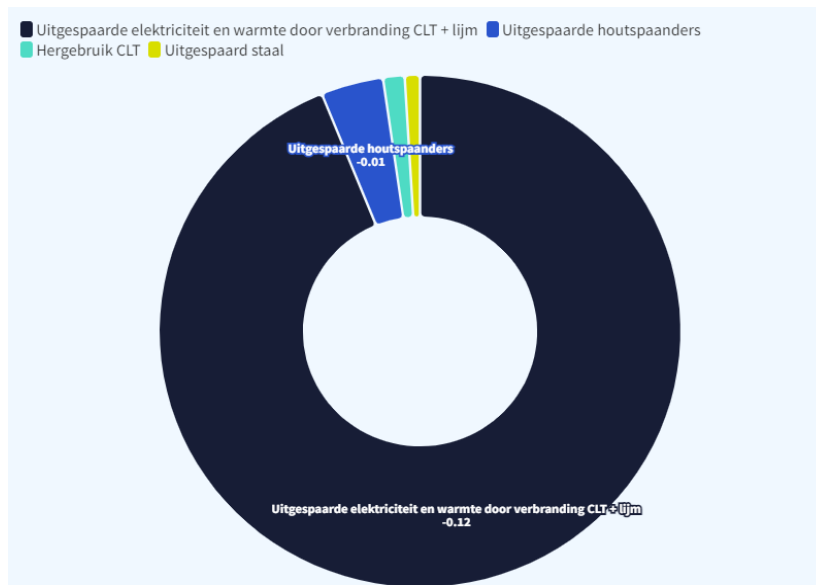
Figuur 41, stroomschema van het productsysteem voor FIX Greenbuilding

Figuur 42 laat de MKI per LCA module zien voor 1 strekkende meter FIX Greenbuilding bouwkolom. De totale MKI staat helemaal rechts en heeft een waarde van € 0,15. De meeste impact van het totaal wordt veroorzaakt door A5 (74%); deze module is onderdeel van de constructie. De impact wordt voornamelijk veroorzaakt door het gebruikte staal, in de vorm van roestvrijstalen schroeven. In de stap einde-leven, wordt de impact voornamelijk veroorzaakt door C3, dat staat voor de afvalverwerking van de materialen. De impact van de verbranding van het CLT hout draagt voor 94% bij aan de totale impact in module C3.



Figuur 42, verdeling van de MKI over de LCA modules voor 1 strekkende meter FIX Greenbuilding bouwkolom

In deze studie wordt maar liefst 85% van de MKI gecompenseerd in Module D. Dit komt voornamelijk doordat er in deze module wordt gecompenseerd voor de verbranding van CLT en lijm door middel van de uitgespaarde elektriciteit en warmte die vrijkomt bij verbranding, zichtbaar in figuur 43.



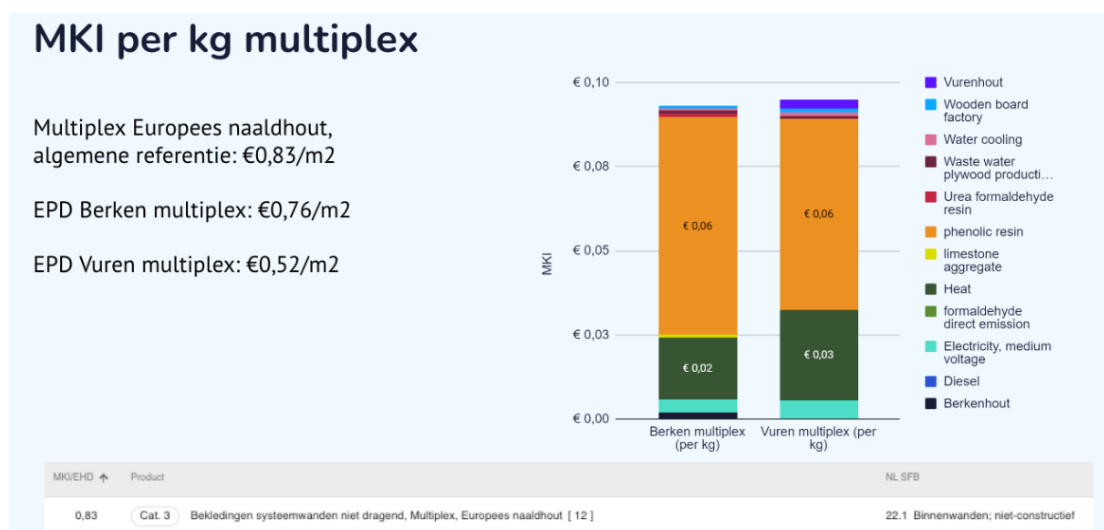
Figuur 43, de verdeling van de MKI over de baten en lasten in Module D.

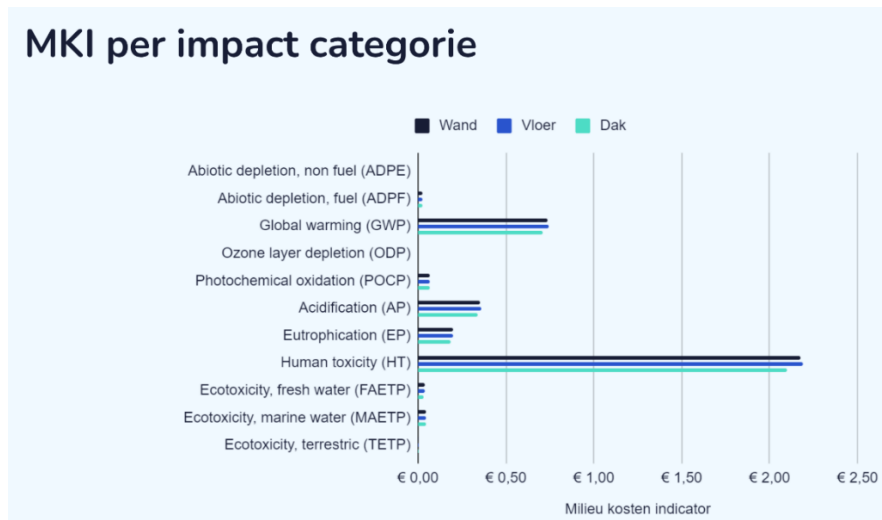
LCA diverse biobased materialen

Er zijn diverse LCA's voor biobased materialen uitgevoerd, 3 celluloseproducten (Ecor, Isofloc en Thermofloc), 2 stroproducten en enkele andere producten. Hiervan zijn ook de EPD's opgemaakt en de producten zijn opgenomen in de NMD. Hiermee zullen de biobased bouwproducten zichtbaarder zijn en aantoonbaar duurzamer.

De afgeronde LCA's voor biobased producten hebben veel inzicht gegeven in de milieu-impact. Van de twee cellulose isolatiematerialen is de MKI €0,21 en €0,23 per m²; dit is een factor 3 tot 6 minder dan voor het gangbare glas- en steenwol.

Het plaatmateriaal van cellulose heeft een MKI van €0,46, dit is ongeveer de helft van een multiplex plaat die eenzelfde functie vervult. De milieu-impact van multiplex is hierbij ook onder de loep genomen. Er is een LCA uitgevoerd van een houtbouwconcept met multiplex. Er is gekeken welke factoren de MKI van multiplex bepalen. De Nederlandse rekenregels bleken de impact voornamelijk te bepalen o.b.v. de categorie 'human toxicity'. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door het gebruik van specifieke lijm, phenol formaldehyde (phenoc resin) in het multiplex. De onderstaande twee illustraties in figuur 44 illustreren dit.



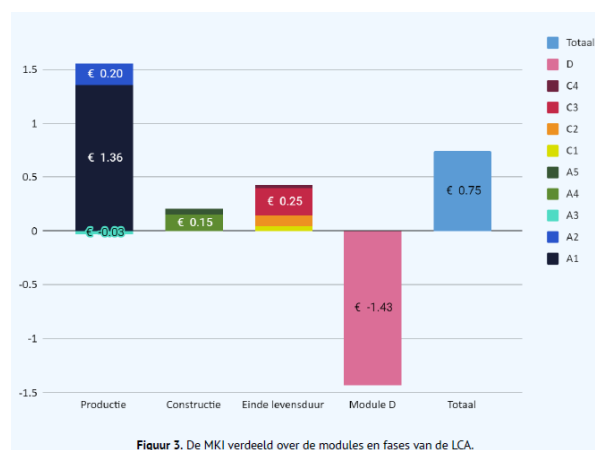


Figuur 44, MKI multiplex

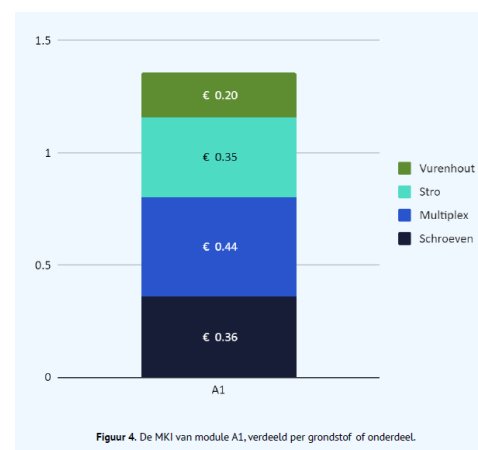
Als gevolg van dit onderzoek wordt nu onderzocht of het mogelijk is om alternatieve lijm te gebruiken en welke delen van de constructie direct kunnen worden hergebruikt.

Bovendien is het gelukt om de drie celluloseproducten op de MIA VAMIL-lijst van de NMD te krijgen. Dit betekent dat bedrijven die deze materialen toepassen de hoogst mogelijke investeringsaftrek kunnen aanvragen. Dit is een belangrijke mijlpaal, aangezien dit de eerste drie bio-based producten zijn die op deze lijst van duurzame producten komen te staan. Het bevorderen van bio-based en duurzame materialen is een positieve ontwikkeling voor milieuvriendelijke bouwpraktijken en duurzaam ondernemerschap.

Uit de LCA voor stroproducten blijkt dat de milieu-impact erg afhankelijk is van de economische allocatie van stro en dus over tijd zal fluctueren³⁰. Stro is een restproduct van de tarwe-productie en door diverse oorzaken zijn de prijzen erg variabel. Hoe hoger de economische waarde van stro, des te groter de milieu-impact. Hiervoor is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd en in de originele allocatie wordt uitgegaan van een worst case scenario. Zie figuur 45.



Figuur 3. De MKI verdeeld over de modules en fases van de LCA.



Figuur 4. De MKI van module A1, verdeeld per grondstof of onderdeel.

Figure 45, MKI stroproduct (strawblock)

³⁰ Hedgehog company, [Strawblocks LCA rapport](#), 23 juli 2023

5.4.1.3. Key take-away's

- Uit de analyse is gebleken dat voor alle houten producten de milieu-impact wordt gereduceerd als we op grote schaal gebruikt hout hoogwaardig recycleren en hergebruiken. Bij laagwaardig recycleren komt momenteel nog naar boven dat verbranden van hout gunstiger lijkt. Als de rekenregels in de toekomst rekening gaan houden met het langdurig inzetten van hout (dus lang uitstellen van verbranding), zal het gunstiger worden om hout ook laagwaardiger te recycleren.
- Voor biobased producten (inclusief hout) zijn mogelijke toxiciteit van de lijm en het gebruik van staal (verbindingsmiddelen zoals schroeven) belangrijke aandachtspunten in het (verder) verlagen van de milieu-impact.
- Van de 3 celluloseproducten (Ecor, Isofloc en Thermofloc) en de stroproducten zijn de EPD's opgemaakt en ze zijn opgenomen in de NMD. De 3 celluloseproducten staan op de MIA VAMIL-lijst van de NMD.
- Als er enkel wordt gekeken naar de productiefase van materialen (A1-A3), dan hebben bio-based producten een significant lagere milieu-impact dan conventionele producten. Hierbij kan worden aangenomen dat dit ook betekent dat de CO₂- en stikstof emissies van het productieproces van bio-based materialen een stuk lager zijn dan de CO₂- en stikstof emissies van het productieproces van conventionele materialen. Als er wordt gekeken naar de gehele levenscyclus, wordt dat verschil in milieu impact gecompenseerd door het gunstige afvalscenario van de conventionele producten. Denk hierbij bijvoorbeeld aan staal, waarbij de forfaitaire waarde in de bepalingsmethode heel gunstig zijn door een hoog percentage recycleren en laag percentage storten of verbranden.

6 Conclusies

De vraag naar (circulaire) biobased grondstoffen voor de bouw stijgt sterk, dit komt onder andere doordat de toepassing van deze materialen resulteert in een lagere CO₂ en NO_x - uitstoot. Een bedreiging voor de ambitie om meer hout en andere biobased materialen toe te passen, is dat er wordt verwacht dat het aanbod de vraag structureel niet kan bijhouden. In dit onderzoek is er om deze reden onderzoek gedaan naar alternatieve bronnen van volhout. Specifiek heeft dit deelconsortium onderzocht hoe hout uit Nederlandse bossen en herbruikbaar A- en B-hout op industriële wijze verwerkt kunnen worden tot grondstof voor nieuwe, hoogwaardige producten, tot o.a. CLT aan toe. In dit project waren bedrijven betrokken uit de gehele keten, van aanvoer tot toepassing.

In de vijf werkpakketen is gewerkt aan een vijftal resultaten. Deze resultaten zijn hieronder beschreven, inclusief bijbehorende conclusie:

1. Inname- en scheidingsprotocol om geschikt gebruikt A-hout en B-hout te oogsten;

Met betrekking tot hergebruik van A- en B-hout is de eerste stap het scheiden bij de bron, bij gemeentewerven en door sloopbedrijven. Hier kan het hout in zekere mate uniform en als redelijk 'ongeschonden' hout geoogst worden, zodat verdere verwerking gemakkelijker wordt. Voor zowel de slopers als de milieustraten zijn inzamelprotocollen opgesteld. Hierin zijn benodigdheden (o.a. containers), handelingen en instructies opgenomen voor het oogsten van A- en B-hout. Met dit inzamelprotocol kunnen slopers en medewerkers van de milieustraten de stromen zo efficiënt mogelijk scheiden en sorteren.

2. Schatting van het jaarlijkse potentieel aan inlands hout en opgewaardeerd A- en B-hout;

Het aanbod van inlands hout (primaair hout) bedraagt circa 0,8 tot 1,2 *10⁶ m³. Ongeveer 90% van de houtvraag in Nederland is afkomstig uit import, waarvan 80% Europees hout. Daar er ongeveer 2,4*10⁶ m³ rondhout equivalent naar schatting is ingezet in 2015 voor woning- en utiliteitsbouw zou dat betekenen dat 1,72*10⁶ m³ rondhout equivalent wordt geïmporteerd uit Europa.

Productie en verzamelen van A/B hout in Nederland levert 1200-1500 kton op. Hiervan wordt een deel (156-463 kton) hergebruikt en een deel (542-897 kton) gebruikt voor het opwekken van energie. Van het beschikbare A/B hout is 563 kton afvalhout van gemeentewerven en 230 kton bouw- en sloophout. Van deze 230 kton sloophout is ongeveer 65 kton beschikbaar voor her-fabricage.

3. Beschrijving van een proces en deelprocessen om uit A-, B- en inlands hout bruikbaar volhout te oogsten;

In processchema's zijn gedurende het project de benodigde stappen vastgelegd om vanuit A-, B- hout bruikbaar volhout te oogsten. Deze processchema's zijn door middel van praktijkproeven gevalideerd. Daarnaast zijn er optimalisaties voor de verschillende deelprocessen geïdentificeerd. Er zijn processchema's van 1) de aanvoer, scheiding en sortering 2) verwerking tot halffabricaat (incl. detectie) en 3) opwerking van het afvalhout (o.a. door vingerlassen). Dit onderzoek heeft uitgewezen dat hergebruiken van afvalhout in nieuwe hoogwaardig toepassing technisch mogelijk is. Echter, op dit moment is het gebruik van afval hout nog niet rendabel. Gebruik van afvalhout kan rendabel zijn op het moment dat de arbeidskosten naar beneden gaan. Dit heeft betrekking op het

oogstproces, het verwerkingsproces (verwijderen van metalen en andere onrechtmatigheden) en het opwerken (lamineren en vingerlassen). Deels kan het door delen van het proces nog verder te automatiseren en deel zal dit moeten gebeuren door het proces in het algeheel efficiënter in te delen.

De verwerking van inlands hout is al een ontwikkeld proces. Echter, toepassing van Nederlands hout in gevelbekleding wordt gehinderd door regelgeving met betrekking tot brandklasse. Het is wettelijk vereist om hout met een brandklasse te leveren. De meest gevraagde (en zwaarste) klasse is B, maar ook D komt veel voor. Om dit mogelijk te maken zijn in dit project diverse brandtesten uitgevoerd. Op basis van deze testen is er duidelijk perspectief dat zowel lariks als douglas in brandklasse D kunnen vallen voor een range van end uses in open opbouw, verticaal en horizontaal. Op basis van de positieve resultaten van deze testen, zullen er in de toekomst ook brandklasse B testen worden uitgevoerd. Als deze succesvol zijn, helpt dat bij een bredere toepassing van inlands naaldhout in de bouw, omdat dit vaak een eis is bij grotere projecten (>500 m²).

4. Een systeemontwerp van een ‘verwerkingsstraat’ voor de verwerking van afvalhout. Waarvan in de basis de benodigde machines (o.a. voor detectie, sortering en opwerking) beschikbaar zijn voor opname in deze ‘verwerkingsstraat’.

De verwerking van kansrijke stromen afvalhout zal gaan via twee verwerkingslijnen. De eerste lijn is palleshout en de tweede stroom bestaat uit het overige massieve hout (kozijnen, deuren, balken en planken). Dit komt omdat palleshout een redelijk uniforme stroom is, waardoor de verwerking makkelijker gaat. De twee systeemontwerpen zijn afgerond en verschillende bestaande machines die deel moeten uitmaken van de verwerkingsstraten zijn in beeld en de kosten daarvoor zijn ruwweg bekend. Goede automatische koppelingen en communicatie tussen de machines moeten nog ontwikkeld worden (incl. algoritmes) om tot de gewenste halffabricaten te komen.

5. Resultaten van emissieberekeningen: effecten van de onderzochte toepassing van meer biobased materialen op emissies (m.n. NO_x en CO₂).

Uit de diverse emissieberekeningen is gebleken dat voor alle houten producten de milieu-impact wordt gereduceerd als we op grote schaal gebruikt hout hoogwaardig recycleren en hergebruiken. Bij laagwaardig recycleren komt momenteel nog naar boven dat verbranden van hout gunstiger lijkt. Als de rekenregels in de toekomst rekening gaan houden met het langdurig inzetten van hout (dus lang uitstellen van verbranding), zal het gunstiger worden om hout ook laagwaardiger te recycleren.

Daarnaast kan worden geconcludeerd dat indien er wordt gekeken naar de productiefase van materialen (A1-A3), dan hebben biobased producten een significant lagere milieu-impact dan conventionele producten. Hierbij kan worden aangenomen dat dit ook betekent dat de CO₂- en stikstofemissies van het productieproces van biobased materialen een stuk lager zijn dan die van het productieproces van conventionele materialen. Dit verschil in milieu-impact wordt gecompenseerd als de gehele levenscyclus wordt meegenomen, vanwege het gunstige afvalscenario van de conventionele producten.

Aan de hand van dit onderzoek is een aantal interessante aanknopingspunten voor vervolgonderzoek gedefinieerd. De volgende vervolgstappen worden aanbevolen:

- Er wordt binnen TNO een biobased lab ontwikkeld. Het voorstel voor dit lab is deels geschreven op basis van de successen die zijn geboekt in dit project, en de aandacht die de resultaten uit het project kregen vanuit de markt. In deze labfaciliteit zal o.a. gewerkt worden aan de ontwikkeling en opschaling van afvalhout in een nieuwe toepassing. In het lab zal worden gewerkt aan zowel de verwerkingslijn van palleshout als de verwerkingslijn van overig afvalhout en inlands hout. Op dit moment worden de machines en andere faciliteiten die nodig zijn in het lab geïnventariseerd. In dit lab kunnen diverse projecten worden gedraaid, o.a. projecten wat betreft afvalhout. Naar grote waarschijnlijkheid zullen

twee vervolgprojecten van EB M1 rond dit lab gaan plaatsvinden. Dit gaat om zowel een project voor pallets als een project voor inlands hout en overig afvalhout.

- Daarnaast wordt er wat betreft verwerking van afvalhout ook gezocht naar internationale samenwerkingen, om zo het onderzoek naar dit onderwerp nog een stap verder te brengen. Een leuke eerste stap daarin is geweest dat collega Niels Vonk op vrijdag 15-12-2023 een seminar over de toepassing van palleshout in CLT heeft gegeven voor SirkTRE uit Noorwegen (op basis van resultaten uit dit project). In februari 2024 reizen enkele collega's van TNO naar diverse instituten en kennisinstellingen in Scandinavië om rondom het onderwerp afvalhout mogelijke samenwerkingen te bespreken.
- Naast de daadwerkelijke ontwikkeling van de verwerkingslijnen van afvalhout, werkt TNO ook aan de ontwikkeling van de regelgeving wat betreft de toepassing van hergebruikt hout. In overleg met SKH kijkt TNO naar de relevante regelgeving wat betreft afvalhout, om na te gaan hoe afvalhout opnieuw als een product kan worden gebruikt in de markt. Hierbij wordt gesproken over o.a. regelgeving wat betreft sterkte, verlijmbaarheid en het lamineren van afvalhout.
- In relatie tot de ontwikkelingen op het gebied van regelgeving gaat TNO in het lab diverse sterktemetingen uitvoeren met afvalhout (o.a. CLT). Het gaat hierbij om het niet-destructief testen van het hout. Dit kan bijdragen aan het doel om in de toekomst het gebruik van afvalhout binnen de regelgeving mogelijk te maken.
- Tenslotte: één van de relevante vervolgtrajecten na dit project is onderzoek naar biobased lijmen die gebruikt kunnen worden om te het lamineren. De verwachting is dat daarmee de milieu-impact van verlijmde houten producten nog kleiner zal worden dan deze op dit moment is.

7 Ondertekening

Delft, 8 mei 2024

Drs. R.A. Bezemer
Projectleider

Ir.Eng. M. Steins
Research Manager
Building Materials & Structures

- Mobility & Built Environment

- Molengraaffsingel
2629 JD Delft

- www.tno.nl