

AFSTUDEERSCRIPTIE ALOHA!

Architecten Laten Ontwerpen van Houtbouw
Appartementen (ALOHA) Appartementen Leuk
Ontwerpen met Houtconstructies voor Architecten,
ALOHA! Ontwerpen met Houtconstructies in
Appartementen O.H.A. Appartementen
Houtconstructies voor Architecten, AHA! Hoofd-
draagconstructies van Appartementen in Hout voor
Architecten (HAHA) Architecten Leren
Ontwerpen met Hout in Appartementen (ALOHA)

KARINA SULTAN

0931014 | BOUWKUNDE

HOGESCHOOL ROTTERDAM

MEVR. H.C. BELJAARS-FREDERIKS

ATELIER PRO ARCHITEKTEN

DHR. R. SOUVERIJN

DHR. B. DESSENS

MAANDAG 26 OKTOBER 2020

ROTTERDAM

DEFINITIEVE VERSIE

Colofon

Scriptie:	Bachelor Thesis Bouwkunde	
Plaats, datum:	Rotterdam, 26 oktober 2020	
Auteur:	Karina Sultan + 31 6 864 112 74 0931014@hr.nl karinaasultann@gmail.com	
Studentnummer:	0931014	
Opleiding:	Bouwkunde BE	
Bedrijf:	Atelier PRO architecten Kerkhoflaan 11a 2585 JB Den Haag +31 70 350 69 00	
Bedrijfsbegeleiding:	Hoofdbegeleider René Souverijn Technisch Ontwerper +31 70 338 55 85 rsouverijn@atelierpro.nl	Ondersteunend begeleider Bart Dessens Architect +31 70 753 17 08 bdessens@atelierpro.nl
Schoolbegeleiding:	Hannah Beljaars-Frederiks Hoofddocent Bouwkunde Hogeschool Rotterdam Architect +31 6 412 743 94 h.c.frederiks@hr.nl	
Onderwijsinstelling:	Hogeschool Rotterdam G.J. de Jonghweg 4-6 3015 GG Rotterdam +31 10 794 94 94 externebetrekkingen@hr.nl	
Afstudeercommissie:	1e lezer, docentbegeleider Sasa Radenovic Afstudeercoördinator Bouwkunde Architect + 31 10 794 59 62 s.radenovic@hr.nl 2e lezer, Hogeschool Rotterdam Paul Blonk Docent Bouwkunde Deeltijd, Architect +31 10 794 58 69 p.n.m.blonk@hr.nl	
Versie:	Definitief	

Beste lezer,

Voor u ligt mijn afstudeerscriptie over het ontwerpen van appartementsgebouwen in houtbouw. Deze scriptie is een afsluiting aan mijn vier jaar (en een kwartaal) tijd aan de opleiding Bouwkunde aan de Hogeschool Rotterdam. In opdracht van Atelier PRO architecten heb ik van februari 2020 tot en met oktober 2020 mij beziggehouden met het onderzoek.

Mijn ambitie is iets te doen wat mensen kan helpen een stap in een betere richting te zetten op het gebied waar ik invloed op kan uitoefenen en mijn interesses in liggen, namelijk architectuur. Vanuit de gedachtegang van de Sustainable Development Goals wilde ik mijn afstudetijd goed benutten. Met dit onderzoek heb ik dus een missie en hoop ik een positieve bijdrage te kunnen leveren aan de ontwikkeling in de wereld. Een wereld waarin mensen gezonder kunnen wonen, de bouw milieuvriendelijker is en het klimaat niet drastisch verslechterd. Hieruit is dit onderzoek tot stand gekomen; architecten en mensen in de bouw de juiste handvaten te geven om te ontwerpen met hout.

Halverwege maart, vijf weken na start van het onderzoek, werd vanuit de overheid verzocht dat heel Nederland thuis moest blijven en werken om de verspreiding van het coronavirus (COVID-19) te verminderen. Hiermee is het afstuderen anders verlopen dan eerst geanticipeerd werd. Helaas is het thuiswerken niet volledig soepel verlopen, ook door persoonlijke omstandigheden. In overleg werd besloten de opleverdatum van juni te verplaatsen naar oktober 2020 om zo alsnog een goed beroepsproduct op te leveren waar velen baat bij hebben.

Zonder de steun en hulp van bepaalde mensen heb ik dit onderzoek niet kunnen realiseren. Allereerst wil ik mijn bedrijfsbegeleiders René Souverijn en Bart Dessens bedanken voor de persoonlijke begeleiding en samenwerking gedurende de periode. Ondanks alle omstandigheden hebben zij mij veel ondersteunt en geholpen. Ik mag van geluk spreken hen als begeleiders te hebben gehad. Daarbij wil ik Atelier PRO bedanken voor het mij welkom laten voelen en mij de kans te geven dit onderzoek uit te voeren.

In het bijzonder wil ik mijn schoolbegeleider Hannah Beljaars-Frederiks bedanken voor de begeleiding en fijne gesprekken. Het afgelopen vier jaar heb ik met haar het meeste contact gehad, mooie samenwerkingen gehad en studiereizen meegemaakt (terwijl ik nooit les van haar heb gehad). Mede dankzij haar heb ik de afgelopen jaren mezelf enorm uitgedaagd en mij op diverse disciplines ontwikkeld. Daar kijk ik met plezier op terug. Vanuit de hogeschool wil ik ook Sasa Radenovic en Paul Blonk bedanken voor de feedback op mijn onderzoek.

Daarbij wil ik Team V architectuur, Constructie Adviesbureau Geuijen, Mecanoo architecten en Pieters Bouwtechniek bedanken voor de vele informatie die zijn mij hebben gegeven: Rob Doomen die zijn kennis en expertise met mij deelde; Thomas Harms die het eindproduct wilde valideren; Theo Geuijen die mij geholpen heeft met houtconstructies en het valideren; en Gijs Sluijter die mij de kans gaf om de bouwplaats van een houtbouw project te bezoeken en het eindproduct heeft gevalideerd.

Ook wil ik mijn vrienden en studiegenoten bedanken voor het motiveren en sparren als ik niet vooruit kwam. Als laatst maar niet het minst wil ik mijn ouders enorm bedanken voor de steun en toeverlaat. Er zijn geen genoeg woorden om mijn dankbaarheid aan hen te uiten.

Afsluitend wil ik u als lezer bedanken voor de interesse in dit onderzoek. Hopende het u ook iets nieuws of verheldering bij te brengen. Moge ook u deze tijd in goede gezondheid door te kunnen brengen.

Mijn missie is nog niet ten einde gekomen. Ik ben van mening dat ieder mens impact kan hebben, zelfs met een kleine stap, en hierin draag ik mijn verantwoordelijkheid. Zolang ik die missie heb blijf ik vooruit gaan. Hierbij wens ik u veel leesplezier toe.

Karina Sultan
Rotterdam, 26 oktober 2020

Samenvatting

De grote hoeveelheid ongewenste CO₂ en stikstof dat wordt uitgestoten is slecht voor mens en milieu. De milieueisen worden steeds strenger en er is veel vraag naar woningen. Hierom is er meer interesse in een duurzamere bouwmethode. Het grotendeel van de bouw is traditioneel terwijl de ontwikkelingen voor duurzamere bouwmethoden er wel zijn. Bouwen met hout kan bijdragen aan de vermindering van deze uitstoot. Momenteel wordt er weinig gebouwd met hout, maar de interesse is enorm gestegen sinds er in oktober 2019 de aflevering VPRO Tegenlicht Houtbouwers is uitgezonden.

Veel architecten en ontwerpers weten niet waar zij moeten beginnen met het ontwerpen van houten hoofddraagconstructies en wat de eigenschappen zijn. Het onderzoek is uitgevoerd bij Atelier PRO architecten, die meer over houtbouw willen weten om toekomstige projecten in hout te kunnen realiseren en belanghebbenden te informeren. Hieruit is de volgende hoofdvraag ontstaan:

“Hoe kan het gebruik van hout als hoofddraagconstructie worden gestimuleerd bij het ontwerpen van appartementen?”

Hout blijkt een positief impact te hebben op het klimaat. Hout slaat CO₂ op en door het lichte gewicht kan de stikstofuitstoot gereduceerd worden. Daarbij heeft hout een positief effect op de gezondheid van mensen. Wel blijken er diverse aandachtspunten te zijn met betrekking tot kosten, brandveiligheid en akoestiek.

Uit onderzoek blijkt dat Atelier PRO appartementencomplexen van diverse grootten ontwerpt en dat appartementen hoge eisen hebben voor de brandveiligheid en akoestiek. Voor Atelier PRO is het interessant om te weten waar er rekening mee gehouden moet worden bij houtbouw hoofddraagconstructies.

Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van zowel nationale als internationale bronnen, omdat houtbouw producten en methoden met name in andere landen (in Europa, Canada en Australië) erg doorontwikkeld zijn. Onder houtbouw blijken de volgende drie methoden te vallen: houtskeletbouw, massieve houtbouw en hybride bouw. De keuze voor een methode blijkt vooral af te hangen van het aantal te bouwen lagen, waarbij houtskeletbouw tot circa zes lagen kan, massieve houtbouw tot circa tien lagen en hybride bouw tot circa 21 lagen.

Hoofddraagconstructies bestaan uit wanden, vloeren, liggers en/of kolommen, waar bij hybride bouw ook andere bouwmethoden als beton en staal toegepast worden om een stabiel gebouw te realiseren. Ook blijken verschillende houten vloeren te zijn waarvan de overspanning en andere eigenschappen van elkaar verschillen. Voor appartementen blijkt een CLT vloer en HBV Decken vloer het meest geschikt.

Uit onderzoek blijkt ook dat voor de brandveiligheid en akoestiek er diverse oplossingen zijn, waarbij de keuze afhangt van de wens of het hout in het zicht gewenst is. Er is geconcludeerd dat houten vloeren en wanden vaak afgewerkt moeten worden om aan de hoge eisen te voldoen.

Door referentieonderzoek is inzichtelijk geworden dat in de praktijk hybride houtbouw wordt toegepast bij appartementsgebouwen vanaf tien lagen en er een betonnen plint aanwezig is voor commerciële ruimten. In referentieprojecten blijkt dat de wanden en vloeren afgewerkt worden, maar dat de onderkant van de houten vloer (plafond) vaak nog in het zicht worden gelaten kan worden.

Het onderzoek sluit af met een Architecten HoutBouw Overzicht (AHBO) voor appartementen en een toetsing van dit eindproduct op een casus van Atelier PRO. Uit de toetsing blijkt dat de casus in hout te realiseren is met enkele consequenties aan het ontwerp. Aanbevolen wordt om in de schetsontwerpfase al met houtexperts te spreken waardoor een houtbouwproject beter te realiseren is.

Samenvatting	5
1. Inleiding	6
1.1 Aanleiding en probleemstelling	
1.2 Afbakening	
1.3 Doelstelling	
1.4 Onderzoeksvragen	
1.5 Onderzoeksmethode	
2. Klimaat impact en houtbouw	8
2.1 Klimaat impact	
2.2 Klimaatvoordelen van hout	
2.3 Reputatie houtbouw	
2.4 Voordelen houtbouw	
2.5 Aandachtspunten	
2.6 Conclusie	
3. Ontwerpen van appartementen	17
3.1 Analyse Landhuis Roosenhorst	
3.2 Analyse Kop van het Dok	
3.3 Ontwerptraject en ervaringen Atelier PRO	
3.4 Aandachtspunten hoofddraagconstructie appartementen	
3.5 Conclusie	
4. Hoofddraagconstructies in hout	25
4.1 Algemene eigenschappen (constructie)hout	
4.2 Bouwmethoden in hout	
4.3 Massiefhouten platen en producten	
4.4 Vloeren	
4.5 Liggers en kolommen	
4.6 Overige aandachtspunten constructie	
4.7 Conclusie	
5. Brandveiligheid en akoestiek	36
5.1 Brandveiligheid	
5.2 Akoestiek	
5.3 Woningscheidende wanden	
5.4 Conclusie	
6. Referentieonderzoek houten appartementen	40
6.1 Analyse projecten	
6.2 Conclusie	
7. Hulpmiddel voor ontwerpers	43
7.1 Eindproduct	
7.2 Validatie	
7.3 Toetsing op casus	
8. Conclusie en aanbeveling	46
Afkortingen en begrippenlijst	48
Figurenlijst	49
Tabellenlijst	52
Literatuurlijst	53

Hoofdstuk 1. Inleiding

1.1 Aanleiding en probleemstelling

De bouw draagt bij aan de hoeveelheid ongewenste CO₂ op de wereld en dat is slecht voor het milieu. Op dit moment wordt er grotendeels met beton, steen en staal gebouwd, waar bij de productie veel CO₂ vrijkomt. Hierin is de bouw grotendeels onveranderd. Het CO₂-probleem vraagt naar oplossingen om de hoeveelheid te reduceren. Een oplossing is het toepassen van hout.

Hout slaat CO₂ op en is een hernieuwbaar materiaal; het groeit terug en is onderdeel van de natuur. Daarbij draagt hout bij aan een fijner binnenklimaat. Enkele architectenbureaus ontwerpen en bouwen al met houten constructies, maar nog lang niet iedereen. Dit komt veelal doordat het algemeen onbekend is hoe hout als constructiemateriaal toegepast kan worden in het ontwerp. In andere (Scandinavische) landen in Europa komen houten draagconstructies vaker voor, zoals in Noorwegen of Finland. Daar loopt de ontwikkeling al ver voorop. De kennis en techniek bestaat dus wel, maar er moet gewerkt worden aan de implementatie in Nederland.

Atelier PRO is een architectenbureau die graag wil bijdragen aan een beter milieu, maar bovenal het creëren van gezonde en aangename gebouwen voor mensen. Zij vinden hout een mooi materiaal. Hierom wil Atelier PRO in hun ontwerpen meer houten constructies toepassen waar dit mogelijk is. Alleen weten zij niet hoe dit het beste gedaan kan worden en zouden zij meer kennis over dit onderwerp willen. Daarbij moet de keuze voor een houten hoofddraagconstructie te verantwoorden zijn naar de opdrachtgevers van Atelier PRO.

1.2 Afbakening

Het onderzoek concentreert zich op de hoofddraagconstructie om binnen de beschikbare tijd gericht en goed onderzoek te doen. Dit is de kern van een gebouw en dekt een groot oppervlak. Overige gebouwonderdelen, die niet onder de hoofddraagconstructie vallen, zijn uitgesloten. Onder de hoofddraagconstructie vallen dragende en/of stabiliserende; wanden, vloeren, daken, kolommen, balken, liftkernen, trapkernen en balkons (voor balkons worden namelijk ook in de vloeren voorzieningen getroffen). De fundering, kelderwanden en -vloeren worden uitgesloten. Daarbij is het bekend dat deze niet in hout uitgevoerd kan worden door vochtproblemen.

Op dit moment is er een grote behoefte aan woningen. Door het onderzoek te richten op houten constructies in de woningbouw kan zo dus de meeste impact gemaakt worden; zo veel mogelijk bouwen in hout voor een beter milieu. De woningbouw opgave is heel actueel en hier zit dus de meeste potentie in. Dit kan dus, met oog voor de toekomst, ook meteen beter uitgevoerd worden door toepassing van hout.

Voor het onderzoek is gekozen voor één bouwtypologie die bij Atelier PRO het meeste voorkomt, namelijk appartementenbouw. Het ontwerpen van gestapelde woningbouw is in de constructie en scheiding complexer dan bij één- en tweelaagse woningbouw. Bij de één- en tweelaagse woningen zit de scheiding alleen in de wanden, terwijl bij gestapelde woningbouw (appartementen) de woningen zowel door wanden als vloeren gescheiden zijn. Dit vraagt extra aandacht op het gebied van brandveiligheid en akoestiek. Daarbij wordt uitgegaan van platte daken. Overige (schuine) dakvormen worden uitgesloten.

Voor het onderzoek zijn de manuurkosten en de exacte kosten van onderdelen uitgesloten, omdat deze afhankelijk zijn van verschillende factoren als leverancier, project en bouweconomie. Ook is het bekend dat hout circulaire toepassingen heeft, maar door de hoeveelheid aan mogelijkheden is hier niet diep op ingegaan. Het onderwerp hergebruik is alleen globaal inzichtelijk gemaakt.

1.3 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is het inzichtelijk maken van houten hoofddraagconstructies in appartementen. Zo heeft Atelier PRO (en indien mogelijk ook andere bureaus) informatie waarmee zij in een vroege ontwerpfasen een constructie van hout kunnen ontwerpen. De toepassingen van hout als draagconstructie moeten te verantwoorden zijn naar opdrachtgevers met voor- en nadelen. Diverse aspecten zijn onderzocht, waaronder de constructieve werking, brandveiligheid en akoestiek. Met de resultaten is een overzicht samengesteld in de vorm van informatiekaarten die een architect kan raadplegen.

De hoofdzaken van het onderzoek zijn: 1. Informeren over de bouwkundige mogelijkheden om duurzaam te bouwen door toepassing van houten constructies in appartementen, 2. Bijdragen aan de duurzaamheidsdoelen van de Verenigde Naties (mens en milieu) en 3. Voor- en nadelen verantwoorden naar opdrachtgevers zodat zij kunnen overwegen in hout te willen bouwen

1.4 Onderzoeksvragen

HOOFDVRAAG: *Hoe kan het gebruik van hout als hoofddraagconstructie worden gestimuleerd bij het ontwerpen van appartementen?*

DEELVRAGEN

- 1 **Ontwerpen van appartementen (H3)**
 - 1.1 Wat voor appartementen heeft Atelier PRO de afgelopen vijf jaar ontworpen?
 - 1.2 Wat speelt er in de beginfase van een ontwerpproject af?
 - 1.3 Waar moet rekening mee gehouden worden bij hoofddraagconstructies van appartementen?
- 2 **Hoofddraagconstructies in hout (H2, H4 t/m H6)**
 - 2.1 Wat is de impact van de bouw op mens en milieu?
 - 2.2 Waarom wordt er weinig met hout gebouwd?
 - 2.3 Welke voordelen biedt houtbouw?
 - 2.4 Wat zijn de algemene eigenschappen en mogelijkheden van houtconstructies?
 - 2.5 Welke oplossingen zijn er voor de brandveiligheid en de akoestiek bij houtbouw?
 - 2.6 Welke referentieprojecten zijn er binnen de houtbouw, zowel in Nederland als buitenland, en op welke manier wordt hout daar in de constructie toegepast?
- 3 **Informatiekaart als oplossing (H7)**
 - 3.1 Hoe kunnen de verschillende bevindingen samenkomen tot een overzicht om toegepast te kunnen worden door een ontwerper?
 - 3.2 Is de bedachte oplossing bruikbaar binnen Atelier PRO?
 - 3.3 Wat vinden externe experts van de bedachte oplossing?
 - 3.4 Hoe zal de hoofddraagconstructie van een ontwerp van Atelier PRO eruitzien bij toepassing van hout, met gebruik van de bedachte oplossing?

1.5 Onderzoeksmethode

Het onderzoek is in twee hoofdonderwerpen gescheiden; 1. Appartementen en 2. Houtbouw. Atelier PRO ontwerpt diverse soorten appartementen met verschillende overspanningen. Hierom is het van belang allereerst inzicht te krijgen in de appartementen van Atelier PRO. Deze gegevens creëren een onderlegger voor de soorten constructies en ontwerpen voor appartementen, waar later in het onderzoek naar gerefereerd wordt.

Er is een referentieonderzoek gedaan naar de projecten van Atelier PRO, waarvan twee dieper geanalyseerd zijn. Ook zijn er interviews gehouden met de werknemers om zo inzicht te krijgen over het verloop van een ontwerpproces en hoe zij te werk gaan in het bureau. In de interviews werd gevraagd naar hun ervaring; wat er in bepaalde fases gebeurt, hoe zij met een opdracht omgaan, wat zij vaak hanteren in ontwerpen en het onderwerp houtbouw.

Daarnaast zijn toepassingen van houtbouw onderzocht. Er is geïnventariseerd wat de huidige problemen zijn met betrekking tot het milieu, waar de bouw impact op heeft, en hoe de toepassing van hout hier een rol kan spelen. Verder is geanalyseerd wat de technische aspecten zijn van houtbouw en waar rekening mee gehouden moet worden als er met hout ontworpen wordt, zoals brand en akoestiek.

Vervolgens is gekeken hoe de bevindingen in het onderzoek kunnen samenkomen tot een oplossing, in de vorm van informatiekaarten die ontwerpers kunnen gebruiken om met hout kennis te maken en toe te passen in appartementsprojecten. Dit leidt tot een antwoord op de hoofdvraag.

Hoofdstuk 2. Klimaat impact en houtbouw

Dit hoofdstuk behandelt wat de impact van de bouw is op mens en milieu (deelvraag 2.1). Ook is onderzocht waarom er weinig met hout wordt gebouwd (deelvraag 2.2) en wat de voordelen en aandachtspunten zijn van houtbouw (deelvraag 2.3).

De bouw is nu nog traditioneel; gebouwen worden grotendeels gerealiseerd in beton, staal en kalkzandsteen. Deze bouwmethoden worden veel toegepast, de bouwers zijn er goed bekend mee en hebben er veel ervaring in en kosten kunnen hierdoor laag zijn. Waarom zou dat dan anders gedaan moeten worden?

De voornaamste reden om anders te bouwen is de negatieve impact op het milieu. Er is een overtollige uitstoot van stikstof (NO_x) en CO₂. De stikstofcrisis is momenteel een groot probleem binnen de bouw door de schadelijke gevolgen voor natuur en gezondheid. Dit vraagt om oplossingen als circulair bouwen. Daarbij moet de uitstoot van CO₂ worden verminderd. Broeikasgassen, waaronder CO₂, houden namelijk warmte vast op de aarde en dit leidt tot klimaatverandering (Bensdorp, 2019; Feenstra, 2018).

Klimaatverandering heeft verschillende gevolgen; voor de natuur, gezondheid, veiligheid en voedsel- en waterbeschikbaarheid. Hittegolven zullen toenemen, langer aanhouden en er komen meer bosbranden; recent bijvoorbeeld in Australië (januari 2020). De zeespiegel stijgt als gevolg van smeltende ijskappen, waardoor er meer overstromingen zullen zijn. Bepaalde dier- en plantensoorten sterven uit. Door droogte zullen er voedseltekorten zijn wat leidt tot honger en ondervoeding (Klimaatverandering: wat zijn de gevolgen?, z.d.). De toename van CO₂ en stikstof, die wordt veroorzaakt door de mens, moet dus worden aangepakt.

Daarbij bestaan bouwmaterialen als beton uit eindige grondstoffen, die vaak laagwaardig worden hergebruikt of eindigen als afval (al wordt nu wel gekeken naar mogelijkheden om beton ook duurzamer te maken). De economie bestaat voor een groot deel uit het gebruiken en daarna weggooien van materialen, terwijl materialen juist kostbaar zijn en efficiënter (meer circulair) benut kunnen worden.

2.1 Klimaat impact

Lineaire en circulaire economie

In de bouwsector (maar ook andere sectoren) is er onderscheid tussen de lineaire economie en circulaire economie. Wereldwijd worden er heel veel grondstoffen gebruikt. In de afgelopen eeuw is deze hoeveelheid verachtvoudigd, wat leidt tot een enorme belasting van het milieu en uitputting van de aarde (PBL, z.d.). Grondstoffen zullen ooit opraken, en hierom zou de bouw ook naar toekomstbestendige (circulaire) manieren van bouwen moeten kijken.

De lineaire economie volgt het principe van 'take-make-dispose'. Hierin worden grondstoffen verwerkt tot product en na gebruik weggegooid. Gebouwen van steen zullen weinig hergebruikt kunnen worden, waar bij de sloop ook chemische stoffen vrijkomen. In een circulaire economie staat centraal dat grondstoffen efficiënter gebruikt worden, door middel van hergebruik. Grondstoffen worden zo langer in de productieketen gehouden, met de minste schade voor het milieu. Het principe van de circulaire economie is om optimaal her te gebruiken; met behoudt van de economische waarde (PBL, z.d.).

Met een circulaire economie kan de klimaatverandering beperkt worden. Volgens een onderzoek van de Ellen MacArthur Foundation kan er 9.3 miljard ton aan uitstoot verminderd worden door onder andere het in gebruik houden van materialen (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Binnen de circulaire economie is er onderscheid tussen de biologische kringloop en de technische kringloop. Bij de biologische kringloop kunnen producten, gemaakt met biologische grondstoffen als hout, worden teruggegeven aan de natuur. Bij de technische kringloop worden producten, die vaak van niet-biologische grondstoffen zijn gemaakt, vanaf het begin ontworpen voor (hoogwaardig) hergebruik (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Hout is een hernieuwbare grondstof en valt onder de circulaire materialen. Daarbij kan het terug in de natuur zonder dat het schade brengt. Vanuit de circulaire economie is hout dus een geschikt materiaal; het is een oneindige, natuurlijke grondstof die efficiënt (her)gebruikt kan worden en draagt bij aan een beter klimaat. Bouwen in hout draagt bij aan circulariteit.

Stikstofcrisis

Door de stikstofcrisis staan duizenden bouwprojecten in Nederland een tijd stil. Dit komt doordat het stikstofbeleid niet voldoet aan de Europese Natuurwetgeving. In Nederland wordt er veel reactief stikstof uitgestoten, wat niet goed is voor de natuur (vooral in Natura2000 gebieden). Om de natuurkwaliteit te bewaren moet de hoeveelheid stikstofuitstoot gehalveerd worden.

De toename van stikstof zorgt er onder andere voor dat de bodem verzuurt, waar bepaalde planten niet tegen kunnen en dus afsterven. Ook zijn er bepaalde planten die juist sterker groeien door de stikstof. Door die sterke groei zal de diversiteit aan planten uit balans raken en zullen bepaalde plantensoorten (en daarbij insecten) verdwijnen. De overtollige uitstoot van reactief stikstof zorgt ook voor meer fijnstof in de lucht (slecht voor de gezondheid) en vervuult het water. Hierom is aangekondigd dat Nederland zich ook moet houden aan de Europese Natuurbeschermingswetgeving (Aanpak Stikstof, z.d.).

Voor Nederland is nu de uitdaging om te kiezen tussen de natuur en de economie. Binnen de economie heeft de wetgeving namelijk invloed op de bouwindustrie en de logistiek, wat een probleem is. Volgens het Economisch Instituut voor de Bouw (2020) steeg de bouwproductie in 2019, maar zal deze groei de aankomende twee jaar stil komen te liggen. Er worden minder vergunningen verleend aan nieuwe gebouwen, door de grote uitstoot van stikstof, terwijl de vraag naar woningen groot blijft. Voor de bouwsector is de potentiële schade geraamd op 14 miljard euro in de komende vijf jaar (ABN AMRO, 2019).

Er zijn wel nog kansen voor bouwprojecten, die geen grote impact hebben op de uitstoot van stikstof. De bouwprojecten waarbij veel stikstof vrijkomt maken gebruik van (zware) materialen die bij de productie en het transport veel uitstoten (zoals beton). Een analyse van ABN AMRO (2019) over *de gevolgen van de stikstofuitspraak per sector* zegt het volgende:

“Het adviescollege Remkes heeft aangegeven dat modulair, circulair, emissieloos en natuurinclusief bouwen de toekomst heeft en nu al betere mogelijkheden biedt om door de vergunningsprocedure te komen” (p. 9).

Om veel te kunnen bouwen is het dus efficiënter om gebouwen te maken van materialen die de stikstofuitstoot minimaliseren en ook herbruikbaar zijn (circulaire economie). Natuurlijke en lichte materialen (zoals hout) kunnen hieraan bijdragen.

CO₂-uitstoot en klimaatakkoord

Naast stikstof is er op dit moment veel CO₂ aanwezig in de wereld en dat heeft een negatief impact op het klimaat. CO₂ is het meest bekende (en aanwezige) broeikasgas en komt van allerlei kanten vrij; onder andere van de industrie en de transportsector, maar de bouwsector speelt hier ook een grote rol. 39% van de aanwezige broeikasgassen op de wereld komt van de gebouwde omgeving (IEA, UNEP, 2019).

Samen met 194 landen heeft Nederland afspraken gemaakt over het voorkomen van verdere klimaatverandering (Klimaatakkoord, z.d.). Dit valt onder het VN-Klimaatakkoord van Parijs, die in 2016 is ondertekend en ingaat per 2020. Met de Klimaatwet is in Nederland vastgesteld hoeveel minder CO₂ uitgestoten moet worden:

- In **2030**: 49% minder CO₂-uitstoot ten opzichte van 1990
- In **2050**: max. 2 °C (wenselijk 1,5 °C) stijging in gemiddelde wereldtemperatuur
- In **2050**: 95% minder CO₂-uitstoot ten opzichte van 1990

Daarbij is ook gesteld dat eind 2020 minstens 25% minder broeikasgassen worden uitgestoten in Nederland (Rijksoverheid, z.d.). Het toepassen van natuurlijke, hernieuwbare materialen in de bouw, zoals hout, draagt bij aan een vermindering in CO₂ en is minder schadelijk voor het milieu. Hernieuwbaar betekent dat het materiaal uit de natuur komt, onuitputtelijk is en kan worden hersteld; bomen kunnen geplant worden en blijven groeien.

Sustainable Development Goals

De Verenigde Naties heeft zeventien duurzame ontwikkelingsdoelen (SDG's) opgesteld om meer houvast te geven op de belangrijke onderwerpen die in de wereld aan de orde zijn. Met deze doelen kan bijgedragen worden aan een betere wereld, natuur, leefomgeving en mensheid. Binnen de Verenigde Naties (VN) zijn veel landen aangesloten, waaronder Nederland, die samenwerken en zich willen inzetten voor een betere toekomst voor allen.

Iedereen kan bijdragen aan deze doelen om zo gezamenlijk de wereldomstandigheden te verbeteren. Of het een grote of kleine verbetering is; het heeft impact, en als velen dit doen wordt de positieve impact een groter geheel. Ook binnen de bouwwereld kan bijgedragen worden aan een betere wereld.

Er zijn op dit moment 169 targets binnen de SDG's. Dat zijn punten die de doelen concreter maken; zoals het Bouwbesluit nodig is voor de bouw. Het verschil is dat het Bouwbesluit een eis is vanuit de rijksoverheid, en de SDG's meer als strevend richtlijn zijn opgesteld. De SDG's kunnen wel helpen met het realiseren van het Klimaatakkoord en -wet, dat wel een eis is. Er is gekeken welke doelen het meest van toepassing zijn om binnen de gebouwde omgeving invloed te kunnen uitoefenen en bij te dragen aan een betere wereld. Het gaat om de onderwerpen over steden, materiaal en natuur. Hieruit is bepaald dat drie doelen het meest relevant zijn (zie figuur 1, 2, en 3). Op de website van SDG Nederland zijn alle doelen met bijbehorende targets uitgeschreven. Voor dit onderzoek is gekeken welke targets binnen de bouw relevant kunnen zijn.



Figuur 3. SDG 11



Figuur 2. SDG 12



Figuur 1. SDG 15

Doel 11: Duurzame steden en gemeenschappen

Steden kunnen een groot verschil maken. Ze zijn namelijk verantwoordelijk voor 75% van de CO₂-uitstoot. In target 11.3 en 11.6 wordt gesproken over duurzame stadsontwikkeling en een reductie in de nadelige milieu-impact van steden, voor 2030. Hiervoor is onder andere aandacht nodig voor luchtkwaliteit en afvalbeheer (SDG Nederland, z.d.).

Met het toepassen van houten constructies kan hieraan worden bijgedragen doordat CO₂ in hout wordt vastgehouden en bomen ook bijdragen aan een verbetering in de luchtkwaliteit.

Doel 12: Verantwoorde consumptie en productie

De huidige consumptie- en productiepatronen moet duurzamer; schoner. Het doel is om chemicaliën en afval in de lucht, water en bodem te verminderen en natuurlijke hulpbronnen efficiënt te gebruiken. In de targets wordt gestreefd tegen 2030 duurzaam beheer van materiaal en afval te realiseren door onder andere preventie van bepaalde uitstoten en meer hergebruik en recycling. Hiermee worden de negatieve invloeden op de menselijke gezondheid en milieu beperkt (SDG Nederland, z.d.).

Hout is een natuurlijke bron dat hernieuwbaar is; het groeit. Dit valt samen met het principe van de circulaire economie. Hout kan hergebruikt worden en hiermee ook afval reduceren.

Doel 15: Leven op het land

Bossen bedekken 30% van het landoppervlak op aarde. Ze zijn van belang voor het verminderen van klimaatverandering en het beschermen van biodiversiteit. Ook bieden bossen onderdak en voedselveiligheid. Bossen moeten dus beschermd, hersteld en duurzaam gebruikt en beheerd worden. In target 15.2 wordt gesteld dat bossen duurzaam beheerd en hersteld moeten worden. Ontbossing moeten worden tegengegaan en (her)bebossing juist op een duurzame manier uitvoeren (SDG Nederland, z.d.).

Als er meer met hout gebouwd wordt, zal de vraag naar hout stijgen en moeten er dus ook meer bomen geplant worden om ontbossing tegen te gaan. Aandacht voor bossen stijgt en daarbij slaan nieuw geplante bomen meer CO₂ op. De kap van bomen kan selectief worden gedaan en daarna bij geplant (Bruggink, 2019). Het is een rondlopend proces.

Bosbeheer

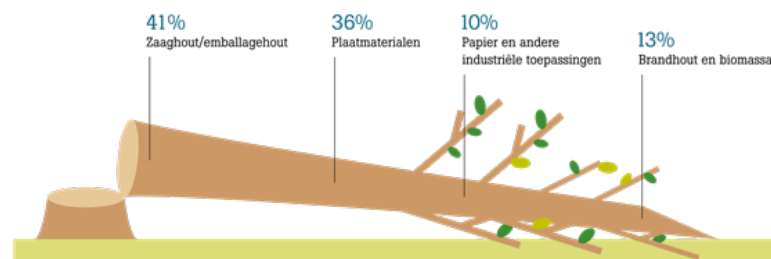
Bij de targets worden jaartallen genoemd om een houvast te geven aan het tijdsbestek dat aan een doel gewerkt moet worden (en behaald). Het valt op dat bij target 15.2 is aangenomen tegen 2020 onder andere de implementatie van duurzaam bosbeheer te bevorderen. Duurzaam bosbeheer betekent volgens Staatsbosbeheer (z.d. – a) onder andere dat er nooit méér hout uit het bos geoogst wordt dan erbij groeit.

Nu, in 2020, wordt duurzaam bosbeheer wel meer onder de aandacht gebracht. In oktober 2019 is een aflevering uitgezonden op de VPRO, genaamd Tegenlicht Houtbouwers. Het is niet te ontkennen dat deze uitzending Nederland heeft wakker geschud en bewustzijn heeft gecreëerd. Het heeft een bijdrage geleverd om het belang van duurzaam bosbeheer en houtbouw onder de aandacht te brengen. Sindsdien worden meer bouwprojecten in hout voorgesteld en blijft deze belangentrend geleidelijk stijgen. Het nut wordt gezamenlijk meer ingezien, maar toch zijn er nog niet genoeg projecten die in hout uitgevoerd (kunnen) worden. In de bouw heeft beton nog het voortouw.

Duurzame houtkap

In duurzame bosbouw worden bomen selectief gekapt; ieder jaar op verschillende plekken bomen selecteren die uit het bos worden gekapt, in plaats van grote vlakken bos (van 200m³) direct leeg te kappen. Selectieve houtkap houdt naar schatting in: 8m³ stamhout per hectare per jaar. Bossen worden rijker als nieuwe (en diverse soorten) bomen worden geplant op de plaats van de gekapte bomen (Studio Marco Vermeulen, 2019; VPRO Tegenlicht Houtbouwers, 2019)

Van de gekapte bomen wordt naar schatting 41% gebruikt voor zaaghout, wat onder andere gebruikt wordt voor constructieve onderdelen. Overige delen van de boom worden benut voor andere doeleinden, te zien in figuur 5. Biomassa (in de vorm van houtsnippers) wordt beschouwd als laagste niveau van het duurzaam benutten (Staatsbosbeheer, z.d. - b).



Figuur 4. Toepassing van gekapte bomen

Productie en transport

Vaak wordt hout uit Scandinavische landen gehaald. Het totaal aan energie die nodig is om goederen te produceren of diensten te verlenen wordt embodied energy genoemd. Onder embodied energy valt niet het gebruik en weggooien van materiaal (Milne & Reardon, 2013). Transport wordt wel meegenomen in embodied energy. Hoe meer afstand, hoe meer transport en dus ook meer CO₂-uitstoot. Hoe lager de afstand, hoe lager de embodied energy. Oftewel; als er met hout gebouwd wordt, is het duurzamer om het hout zo lokaal mogelijk te verkrijgen en produceren.

(On)voldoende hout

Er is wel een gevaar als de vraag voor houtbouw snel stijgt. Momenteel is er namelijk (nog) niet genoeg hout voor de nieuwbouw, maar de realiteit is ook dat alle nieuwbouw niet opeens alleen in hout gebouwd gaat worden. Van de Nederlandse nieuwbouw is 2% in hout (De Bruijn, 2019), en dit aantal zal langzaam stijgen.

2.2 Klimaatvoordelen van hout

Vermindering stikstof

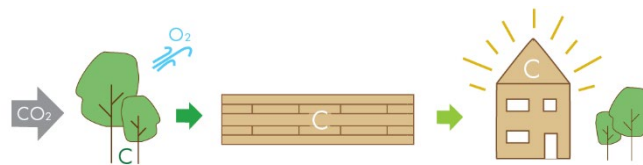
Door circulair te bouwen kan de stikstofuitstoot verminderd worden. Houtbouw draagt hierin bij. Het is een lichte bouwmethode wat dus leidt tot het volgende:

- Een lichtere fundering volstaat, waardoor er minder beton nodig is en dus ook minder zwaar graafwerk;
- Houten elementen kunnen met een lichtere kraan worden getild, en ook elektrisch. In tegenstelling tot het gebruik van zware dieselkranen met meer uitstoot;
- Er is minder uitstoot door vrachtverkeer. Door het lichtere gewicht en prefabricage van houten elementen is er op een vrachtwagen veel te vervoeren en kan het aantal verkeersbewegingen verminderd worden (ORGA architect, 2020a).

CO₂-opslag

Bomen nemen CO₂ op. Als de boom gekapt wordt leeft het niet meer (hout), maar de opgenomen CO₂ komt niet vrij. De CO₂-opname van bomen vindt plaats door fotosynthese (zie figuur 5). Fotosynthese is een proces waarbij zonlicht, water en CO₂ wordt opgenomen door bomen en planten, en wordt omgezet in glucose (suiker) en zuurstof (O₂). Mensen en dieren ademen CO₂ uit die de bomen nodig hebben en bomen produceren de zuurstof waar mensen en dieren van leven. Bomen werken als het ware samen met mensen en dieren en hebben elkaar nodig.

Centrum Hout (2020) meldt dat er per kubieke meter hout ongeveer 1 ton (1000 kg) CO₂ wordt opgeslagen, maar dat de exacte hoeveelheid CO₂-opslag afhangt van de houtsoort. Houtproducten kunnen zowel uit één houtsoort als meerdere houtsoorten bestaan. In deze scriptie is niet onderzocht wat alle verschillende houtsoorten en daarbij behorende eigenschappen zijn. Hiervoor zou een vervolgonderzoek interessant zijn.



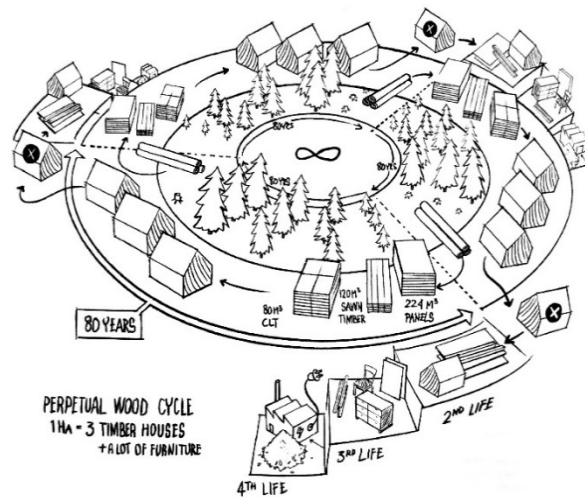
Figuur 5. Fotosynthese van bomen en CO₂-opslag

Hout is net niet CO₂-neutraal vanwege bewerking en transport, maar in tegenstelling tot de meeste andere bouwmaterialen legt hout CO₂ vast (Haas, z.d.). Als een boom bijvoorbeeld 30 jaar staat kan het hout gekapt worden als grondstof voor de bouw. Op de gekapte posities worden er weer nieuwe bomen geplant. Deze groeiende bomen nemen vervolgens weer meer CO₂ op. Dit proces is oneindig.

Binnen een gebouw heeft hout geen giftige materiaalemissies. Het hout geeft natuurlijke stoffen af wat luchtkwaliteit en gezondheid bevordert. Daarbij kan hout, dat niet meer hergebruikt kan worden, veelal terug de natuur in zonder dat het veel schade(lijke stoffen) met zich mee brengt. Organismen kunnen het hout afbreken (waarbij CO₂ vrijkomt) en in de natuur opnemen. CO₂ komt dus vrij als een boom doodgaat en verrot, maar dood hout is wel belangrijk als plantenvoeding en onderdak voor dieren (Redactie Het Houtblad, 2020a).

De enige andere manier dat CO₂ vrij kan komen is door het hout (biomassa) te verbranden als duurzame energiebron. Vanuit de SDG's is het doel om goed met materiaal om te gaan en zo veel mogelijk her te gebruiken; het liefst op een gelijkwaardig of hoger niveau (upcycling). In figuur 6 is de circulariteit van houtbouw te zien.

Nu zijn er strengere milieueisen om klimaatdoelen te halen en de natuur te beschermen. Het gebruik van materialen als beton, die bij productie en transport veel CO₂ en stikstof uitstoten, wordt lastiger. Er is meer besef dat de bouw gezonder en duurzamer kan. Duurzame bouwmaterialen als hout worden hierom steeds interessanter om te gebruiken.



Figuur 6. Circulariteit houtbouw

2.3 Reputatie houtbouw

De huidige traditionele bouw werkt met steen, staal en beton, maar vroeger zijn huizen veel in hout gebouwd. De vraag is waarom er een massale slag naar betonbouw is gemaakt. Hiervoor is het belangrijk om kort stil te staan bij de ontwikkeling van de bouw in Nederland en de eventuele belemmeringen van het toepassen van hout.

Verloop bouwontwikkeling

Ondanks dat huizen in de 17^e/18^e eeuw vooral in hout zijn gebouwd, was er destijds te weinig (lokale) bosproductie en speelde brandgevaar een rol. Destijds had hout ook weinig ontwerpvrijheid. De overspanning/beukmaat hing af van de lengte van de gekapte boomstam omdat de balken daaruit vervaardigd waren. Er waren geen vergevorderde bewerkingen die voor grote overspanningen konden zorgen. De constructieve kwaliteit was toen geen constant gegeven.

Daarbij zijn er ook strengere eisen gekomen om gezondheid van mensen te bevorderen. In Nederland is vanaf 1901 de Woningwet geïntroduceerd en doorontwikkeld om de bouw en gebruik van slechte, ongezonde gebouwen tegen te gaan en juist betere omstandigheden te creëren. Hieronder vielen ook strengere geluidseisen en brandveiligheid, dampdichte begane grondvloeren, stijvere constructies en compartimentering van woningen.

Met de industrialisatie en de komst van nieuwe, innovatievere materialen is er een slag gemaakt. Beton en staal werden geïntroduceerd. Dit was in grote schaal makkelijker te produceren en hiermee konden grotere overspanningen gemaakt worden. Er was veel meer ontwerpvrijheid wat verkend kon worden. Bovenal voldeed het aan de strengere eisen. Met de grote vraag naar woningbouw is er door houtschaarste en de brandveiligheidseisen gekozen voor de meest optimale materiaal van die tijd; beton. Sindsdien is de bouw blijven ontwikkelen in de (ontwerp)mogelijkheden en bouwmethoden van beton. Nu wordt het verduurzamen van gebouwen steeds belangrijker en is de noodzaak om naar andere bouwmaterialen te kijken (zoals hout).

Hout in het heden

Op dit moment is houtbouw veel verder ontwikkeld dan in de 18^e eeuw, vooral in het buitenland zoals in Scandinavische landen. Bouwmethoden zijn beter ontwikkeld, grotere overspanningen zijn mogelijk en er zijn meer bewerkingsmethoden. Bouwmethoden in hout zijn onder andere houtskeletbouw, houtmassiefbouw (CLT), ligger-kolomconstructies, hybride bouw en houten dakconstructies.

In Nederland worden enkele projecten wel in hout gebouwd, maar dat is minimaal ten opzichte van de hoeveelheid betonnen gebouwen. In andere landen daarentegen zijn er meer projecten (hoge woontorens) in hout gebouwd; de kennis bestaat. Desondanks gaat in Nederland de voorkeur niet snel uit naar houtbouw. Soms wordt het niet overwogen, blijkt het niet mogelijk te zijn voor een project of zijn er andere argumenten.

Tegenargumenten

Hoge kosten zijn de voornaamste reden dat er niet in hout gebouwd wordt. Massieve houtbouw leidt tot circa 10% hogere kosten dan bouwen met kalkzandsteen, beton of staal, maar dit percentage hangt ook af van de manier waarop de kosten worden berekend (Redactie Het Houtblad, 2020a). In een begroting is vaak geen rekening gehouden met besparingen in bijvoorbeeld materieelkosten door het lichtgewicht van hout. Volgens architect Bjarne Mastenbroek zal de prijs ook verlagen naarmate hout meer wordt toegepast (Van Wetering, 2019). In tabel 1 zijn globaal de kosten te zien voor een betonnen en houten vloer bij een soortgelijke dikte. De hoeveelheid hout dat gebruikt wordt en de bewerkingen lijken een groot verschil te maken in de prijs tussen balken en massiefhout.

	BREEDPLAATVLOER BETON	MASSIEF HOUTEN VLOER	HOUTEN BALKEN VLOER
Kosten	€ 74,35/m ²	€ 181,96/m ²	€ 54,71/m ²

Tabel 1. Globale kostenvergelijking vloeren (bij dikte 200mm)

Heel vaak wordt ook terughoudendheid gemerkt bij de aannemerij door onbekendheid met hout(massief)bouw, maar vaak ook doordat ze een belang hebben bij betonbouw. Zo zijn veel aannemers eigenaar van een (prefab) betonfabriek.

Andere onzekerheden gaan over houtrot, de levensduur, akoestiek en brandveiligheid. Houtrot is te behandelen en ontstaat voornamelijk buiten. Afhankelijk van de functie en omgeving (binnen, buiten) worden ook andere houtsoorten voorgesteld. Het is goed om hier mee rekening te houden. Over de levensduur kan gezegd worden dat houten gebouwen net als andere bouwmethoden lang mee kunnen gaan; wel een paar honderd jaar, mits het goed onderhouden wordt (De Bruijn, 2019). Akoestiek en brandveiligheid worden in paragraaf 2.9 en hoofdstuk 5 behandeld.

Algeheel is een gebrek aan kennis van en/of ervaring met houtbouw de hoofdzakelijke reden dat er weinig in hout wordt gebouwd; terwijl de kennis wel bestaat in de wereld. Door de nodige kennis bij te brengen kan helder worden dat hout in veel projecten toe te passen is, en zelfs zijn eigen unieke eigenschappen heeft. Om houtbouw te kunnen overwegen is het allereerst belangrijk de verschillende voordelen inzichtelijk te maken.

2.4 Voordelen houtbouw

Houtbouw heeft niet alleen voordelen voor het klimaat maar ook op diverse andere vlakken. Het helpt bij de gezondheid en geeft een fijn comfort en binnenklimaat. Bij het bouwen heeft het voordelen door het lichte gewicht en prefabricage, en is ook goed her te gebruiken.

Gezondheid en comfort

Uit verschillende studies blijkt dat hout een positieve impact heeft op de gezondheid van mensen, onder andere door de warme en natuurlijke uitstraling en werking. Hout beïnvloed zowel fysiek als psychisch: het bevordert het algemeen welbevinden, genezing, leerprestaties en werkproductiviteit. Hout is hypoallergeen (weinig allergische reacties) en vochtregulerend; het kan vocht uit de lucht opnemen en afgeven en zorgt dus voor een gebalanceerde luchtvochtigheid (Centrum Hout, z.d.). Daarbij voelt hout op het oppervlak warm aan, door de hoge contacttemperatuur, wat bijdraagt aan comfort (Starink, 2015).

Het kijken naar de houtstructuur werkt stressverlagend, helpt tegen depressieve gevoelens en kan productiviteit verhogen. Een houten gebouw kan ook helpen bij de genezing van mensen en verbeterd de temperatuurhuishouding in het lichaam (commARCH, 2020; Redactie Het Houtblad, 2020a).

Goed isolerend

Hout heeft een hoge warmteweerstand/isolatie waarde (R-waarde), wat gunstig is voor een energiezuinig gebouw. Een gebouw kan hierdoor met minder ingrepen worden geïsoleerd. De warmteweerstand wordt berekend door onder andere de warmtegeleidingscoëfficiënt (λ -waarde) van een materiaal. In tabel 2 is de λ -waarde van enkele materialen vergeleken. Hier is te zien dat hout een hele lage waarde (ca. 0,13 W/m·K) heeft. Hoe lager de λ -waarde, hoe hoger de warmteweerstand en dus hoe beter de isolatie (Kassenberg, z.d.).

Bouwen met hout is energie efficiënt door deze eigenschappen. In de zomer kan warmte buitengehouden worden, en in de winter kan warmte binnen blijven. Warmteverlies wordt beperkt (De Groot Vroomshoop, 2017).

Licht in gewicht

Zoals eerder is vermeld (paragraaf 2.2 stikstof) heeft hout een licht gewicht, wat ook andere voordelen meebrengt. Afhankelijk van de houtsoort kan hout tot vijf keer lichter zijn dan beton. Om een vergelijking te maken is het soortelijk gewicht van de materialen in tabel 2 vermeldt, uitgaande van hout voor constructies:

	KALKZANDSTEEN	GEWAPEND BETON	NAALDHOUT
λ -waarde [$W/m \cdot K$]	1,14	1,83	0,13
Soortelijk gewicht [kg/m^3]	1750	2300	550

Tabel 2. Soortelijk gewicht en λ -waarde bouwmaterialen

Prefabricage en kwaliteitsborging

Houtbouw elementen zijn geprefabriceerd in de fabriek en worden zo aangeleverd op de bouwplaats.

Prefabricage heeft als voordeel dat de elementen een hoogwaardige kwaliteit krijgen (Swan Housing Association & Waugh Thistleton Architects, 2019).

Het hout is makkelijk te bewerken voor installaties; in de fabriek kan ruimte voor leidingen en kabels gefreesd worden. In houtbouw zit veel maatwerk, net als bij prefab beton; het is een prefab bouwmethode. Hierdoor wordt bouwafval tot een minimum beperkt en kan de constructie op de bouwplaats snel opgebouwd worden. Door de snelle opbouw hoeft materieel minder lang gehuurd te worden (projectafhankelijk).

Circulair

Na gebruiksduur en sloop van een gebouw kunnen de houten elementen op verschillende manieren worden hergebruikt. De constructie kan voor een ander ontwerp gebruikt worden, of het kan als grondstof dienen voor andere producten als meubilair of gevelmateriaal. Zo zijn er veel mogelijkheden voor hergebruik. Wat niet her te gebruiken is kan terug de natuur in of wordt als biomassa verbrand voor energie (Lüning, z.d.; Swan Housing Association & Waugh Thistleton Architects, 2019). Een vervolgonderzoek zou interessant zijn over in hoeverre de elementen hergebruikt kunnen worden, in welke vormen en de impact hiervan.

Aardbevingsbestendig

Zware constructies zijn slecht bestand tegen aardbevingen en leiden tot veel schade. Hout is licht en kan schokken en bevingen goed absorberen. Onder belasting zal hout verbuigen en minder snel breken, in tegenstelling tot steen. In Noord-Amerika en Japan wordt hierom al veel met hout gebouwd (Aardbevingsbestendige Huizen & NBvT, z.d.).

2.5 Aandachtspunten

In verschillende bronnen worden voordelen genoemd van hout die niet volledig zijn. Er zijn bepaalde onderwerpen waar rekening mee gehouden moet worden bij het ontwerpen. Volgens Rob Doomen van Pieters Bouwtechniek zijn geluid, brand en de sterkte van hout essentiële aandachtspunten bij appartementsgebouwen in hout (bijlage 1).

Akoestiek

Geluidstrillingen bij houten wanden en vloeren kunnen doortrillen door de lage massa (Starink, 2015). Bij appartementen is het belangrijk dat er geen overdracht is van trillingen en geluid tussen woningen onderling. Vanuit het Bouwbesluit zijn daar eisen voor opgesteld. Voor de architect is het allereerst belangrijk om de vraag te stellen of het hout van de constructie in zicht gewenst wordt, of dat het afgewerkt moet worden. Dit heeft namelijk invloed op de uitwerking van de constructie. In hoofdstuk 5 is te lezen wat de mogelijke oplossingen zijn.

Brandveiligheid

Eenzijds wordt aan de brandveiligheid van hout getwijfeld omdat het een brandbaar materiaal is. Anderzijds wordt gezegd dat hout wel brandveilig is. Beide argumenten kloppen, maar om te voldoen aan de eisen van brandveiligheid moeten maatregelen getroffen worden (hoofdstuk 5). Het is belangrijk tijdens het ontwerpen

bewust te zijn wat mogelijk is. Het brandgedrag van hout is wel te voorspellen, in tegenstelling tot staal dat op een moment gaat bezwijken. Momenteel worden er nog veel studies gedaan naar de brandveiligheid van hout (Redactie Het Houtblad, 2020a).

Sterkte en stabiliteit

Hoogbouw in hout is goed mogelijk, maar nog niet voor alle hoogten. Tot welke hoogte er gebouwd kan worden is afhankelijk van de houtbouwmethode. Dit heeft met name te maken met de stevigheid en stabiliteit bij weersinvloeden (wind), door het lichte gewicht van hout. Hierom wordt vaak voor een hybride bouwwijze gekozen waarbij hout en beton (of staal) worden gecombineerd (Redactie Het Houtblad, 2020b). Zie hoofdstuk 4 voor het onderzoek naar bouwhoogten per bouwmethode.

Korte montagetijd

Vaak wordt gezegd dat hout een korte montagetijd heeft. Dit hangt wel af van de projectsoort en -grootte. Een klein gebouw (met enkele lagen) is wellicht efficiënter in hout dan in beton dat in het werk gestort is, maar hoogbouw zal meer tijd nodig hebben. Desondanks heeft een prefab bouwmethode (zowel hout als beton) een kortere montagetijd omdat er geen droogtijd nodig is en zo snel gestapeld kan worden.

2.6 Conclusie

De bouw heeft impact op mens en milieu (*deelvraag 2.1*). Het brengt milieuschade en draagt bij aan klimaatverandering door de overtollige uitstoot van stikstof en CO₂; onder andere afkomstig van fabrieken, transport en sloop/afval. De circulaire economie streeft ernaar om gebruikskringlopen te sluiten door hergebruik. Er zijn duurzame ontwikkelingsdoelen (SDG's) die naast vermindering van klimaatverandering ook streven naar verantwoorde productie, duurzaam bosbeheer en een gezonde leefomgeving. Houtbouw kan hieraan bijdragen.

De bouw kan zijn milieu impact verlagen door de opgave van '1 miljoen nieuwe woningen' circulair te bouwen. Hout is een natuurlijk en circulair materiaal wat goed her te gebruiken is. Er is genoeg hout, maar niet om alle aankomende nieuwbouw mee te bouwen. De vraag naar hout zal stijgen naarmate er meer in hout gebouwd wordt. Dit bevordert het planten van nieuwe bomen en het in stand houden van bossen.

Dat er nu minder met hout gebouwd wordt (*deelvraag 2.2*) dan in de 17^e eeuw begon met de industrialisatie. Beton en staal werden geïntroduceerd, terwijl hout minder beschikbaar werd. Er is een slag gemaakt hiermee te bouwen door de betere eigenschappen. Meer ontwerpvrijheid, grotere overspanningen, efficiëntere massaproductie (en lagere kosten) en (brand)veiligheid was beter te garanderen. Nu er strengere milieueisen zijn om klimaatverandering te verminderen en de natuur te beschermen wordt gekeken naar andere manieren van bouwen.

Houtbouw heeft verschillende voordelen (*deelvraag 2.3*), ook voor het klimaat. Bomen slaat CO₂ op. In 1 m³ hout zit ongeveer 1 ton CO₂ opgeslagen (afhankelijk van de boomsoort). Het lichte gewicht zorgt voor minder transportbewegingen en dus minder stikstofuitstoot. Het materiaal is veelal aardbevingsbestendig. Door prefabricage zijn constructies snel op te bouwen, installaties makkelijk aan te leggen en hebben elementen een consistent goede kwaliteit. Hout draagt ook bij aan de gezondheid en comfort van mensen door de natuurlijke uitstraling en goed isolerende eigenschappen. Bij gebouwen in hout is er wel aandacht nodig voor akoestiek, brandveiligheid en het aantal bouwlagen. Of het hout wel of niet in zicht wordt gelaten heeft invloed op de oplossingen.

Hoofdstuk 3. Ontwerpen van appartementen

In dit hoofdstuk is onderzocht wat voor appartementen Atelier PRO de afgelopen vijf jaar heeft ontworpen (deelvraag 1.1). Ook wordt duidelijk wat er in de beginfase van een ontwerpproject afspeelt (deelvraag 1.2) en waar rekening mee gehouden moet worden bij hoofdconstructies van appartementen. (deelvraag 1.3).

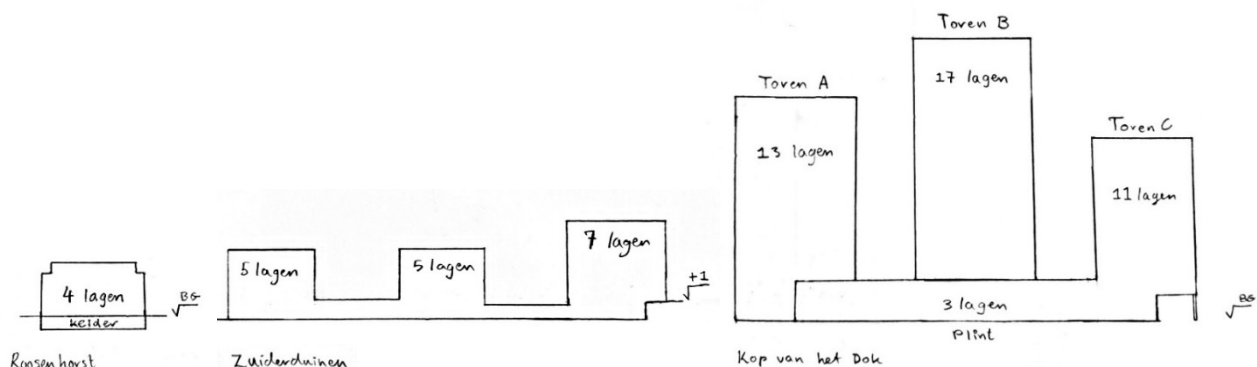
Atelier PRO ontwerpt verschillende soorten appartementen. Van sociale woningen tot luxe of zorgappartementen. Voor het onderzoek is het belangrijk om inzicht te krijgen in de gebouwen die zij ontwerpen. De afgelopen vijf jaar zijn er drie projecten ontworpen die belangrijk zijn voor het bureau. Deze projecten zijn allereerst geanalyseerd op complextype (ontsluiting), omvang en globale draagconstructie.

Uit de analyse is duidelijk geworden dat Atelier PRO zowel grote appartementencomplexen ontwerpt, met woontorens tot wel zeventien verdiepingen, en compactere gebouwen van vier tot zeven verdiepingen. Projectgrootten kunnen variëren van 14 tot 184 woningen.

In tabel 3 is een globale analyse te zien van de drie belangrijke appartementencomplexen die Atelier PRO de afgelopen vijf jaar heeft ontworpen. In figuur 7 is de omvang van de verschillende projecten in een schets vergelijkbaar gemaakt. Alle drie projecten gebruiken betonnen breedplaatvloeren voor de vloerconstructie. Het valt op dat voor de wanden van Roosenhorst kalkzandsteen wordt gebruikt (vier woonlagen) en voor de projecten met meer lagen zijn de wanden van in het werk gestort beton. Het laatste zorgt voor een goede aansluiting met de breedplaatvloeren, en dus een stevige constructie. Alleen bij de hoge torens van Kop van het Dok worden de kernen, waar de stabiliteit uit wordt gehaald, uitgevoerd in prefab beton.

	PROJECT	OMVANG	DRAAGCONSTRUCTIE
	Buurschap Roosenhorst, Landhuis – Voorschoten • Ontwerp fase • 2016 – heden • Portiek	1 gebouwblok, met kelder: • 4 lagen • Parkeren + berging in kelder • 14 appartementen	Stapelbouw Breedplaatvloer Kalkzandsteen wanden en kern l.h.w.g. kelder
	Woningen Zuiderduinen – Den Haag • Ontwerp fase • 2015 – heden • Portiek	3 blokken, verbonden met BG: • 5, 5 en 7 lagen • Parkeren + opslag op BG • 61 appartementen	Gietbouw Breedplaatvloer l.h.w.g. wanden (i.h.w.g.: in het werk gestort, beton)
	Woningen Kop van het Dok – Vlissingen • Ontwerp fase • 2017 – heden • Portiek, galerij en corridor	3 torens, verbonden met plint: • 13, 17 en 11 lagen (plint is eerste 3 lagen) • 177 appartementen • 7 eengezinswoningen	Gietbouw Breedplaatvloer l.h.w.g. wanden Prefab beton (trap)kern

Tabel 3. Globale analyse projecten Atelier PRO



Figuur 7. Schets Omvang projecten Atelier PRO

Om meer inzicht te krijgen in de indeling en specificaties van appartementen die Atelier PRO ontwerpt, zijn er twee gebouwen verder geanalyseerd. Hiervoor zijn twee uitersten genomen; een laag en klein project en een hoog appartementsgebouw. Het gaat om het Landhuis van project Roosenhorst (vier-laags luxe appartementencomplex) en project Kop van het Dok (woningcomplex met drie hoge torens).

3.1 Analyse Landhuis Roosenhorst

Ingenieursbureau Lievense is verantwoordelijk voor de constructie van het Landhuis. Voor de analyse van het gebouw is informatie gevonden uit het bouwaanvraagrapport van Lievense (2018). Atelier PRO heeft dit rapport ter beschikking gesteld voor het onderzoek, samen met plattegronden en details. Voor de analyse is de plattegrond van de 2^e verdieping als onderlegger genomen, omdat de indeling overeenkomt met de verdiepingen eronder en hier balkons bevinden.

Ontsluiting en programma

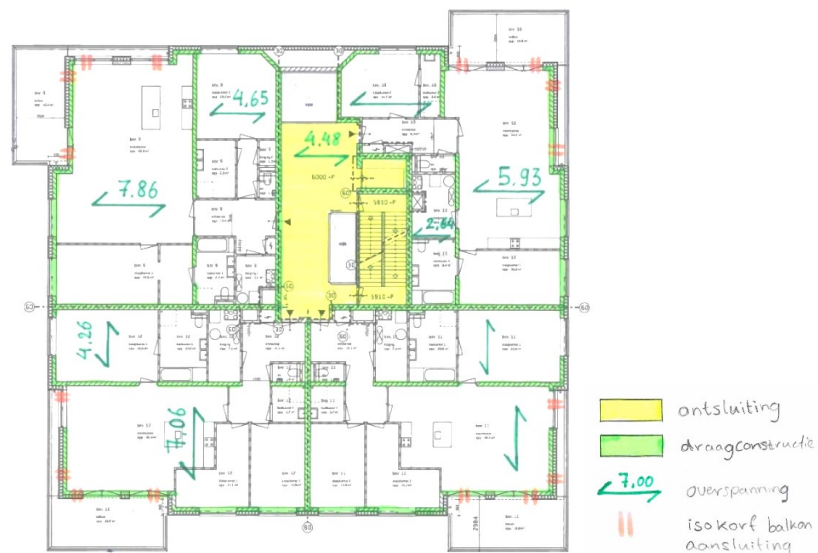
In het midden van het gebouw zit een trappenhuis en lift, ook wel portiekontsluiting, waaruit de appartementen te bereiken zijn. De ontsluiting is in figuur 11 te zien. In bijlage 2 zijn alle plattegronden van het Landhuis te zien met de ontsluiting en vluchtroute omschrijving. De begane grond en 1^e en 2^e verdieping heeft elk vier appartementen. De 3^e verdieping heeft twee appartementen.

Constructie

De bouwmethode die voor het Landhuis wordt toegepast heet stapelbouw. Hierbij wordt het gebouw opgebouwd uit wanden van kalkzandsteenelementen en vloeren van beton. Voor dit project zijn de volgende constructiespecificaties geïnventariseerd:

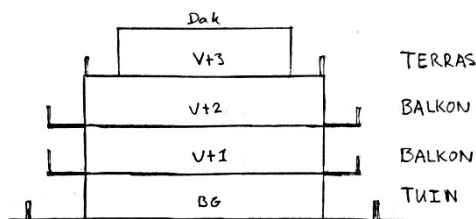
Ontwerplevensduur (gebruiksfase)	50 jaar
Begane grondvloer	Breedplaatvloer
Verdiepingsvloeren en dak	Breedplaatvloer
Wanden	Kalkzandsteen

De stabiliteit wordt verkregen door schijfwerking van de vloeren en het dak in samenwerking met de kalkzandsteenwanden. In figuur 8 is te zien welke wanden constructief zijn, wat de overspanningsrichting is van de vloeren en verschillende overspanningsmaten (in meter). De kleinste overspanning is 4,26 meter en de grootste overspanning is 7,86 meter.

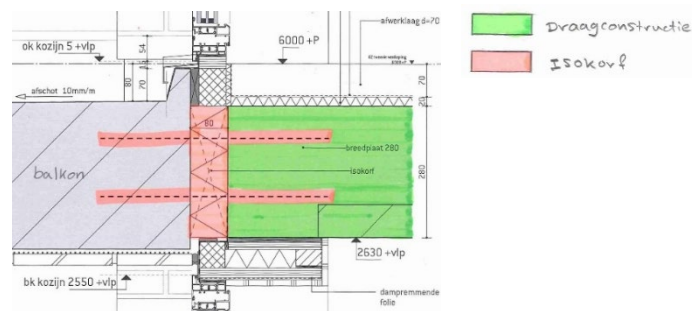


Figuur 8. Ontsluiting en hoofddraagconstructie Landhuis (2^e verdieping)

Ieder appartement heeft een eigen buitenruimte in de vorm van een tuin, balkon of terras. In figuur 9 zijn de soort buitenruimten per verdieping weergegeven. De balkons (prefab beton) worden met behulp van een isokorf, bevestigd aan de verdiepingsvloeren en maken zo onderdeel uit van de hoofddraagconstructie. In figuur 8 zijn de isokorf posities te zien.



Figuur 10. Schets Buitenruimten Landhuis



Figuur 9. Principedetail balkonaansluiting Landhuis

De aansluiting van het prefab betonnen balkon (met behulp van isokorf) aan de betonnen breedplaatvloer is in figuur 10 te zien. De balkons worden met het wapeningsstaal van de isokorf gestort en wordt geheel als element aangeleverd op de bouwplaats. De balkons worden met de wapening geschoven in de breedplaatvloerwapening, waarna de vloeren volgestort worden (uitgaande dat overige handelingen als installaties ook zijn volbracht). De isokorf dient ook voor het onderbreken van koudebruggen tussen buiten en binnen.

Vloer- en wanddikten

Afhankelijk van de functie of positie heeft elke wand of vloer een andere (afwerkings)dikte. Deze waarden zijn in tabel 4 en 5 te vinden. Ook is het totale eigen gewicht (blijvende belasting) van de constructie vermeldt om een indicatie te hebben. Voor het dak is alleen de grindlaag meegenomen omdat overige dikten van bedekkingen niet bepaald zijn. De 3^e verdiepingvloeren hebben een grotere afwerking door de (dak)terrassen.

VERDIEPING	VLOERTYPE	DIKTE (mm)	OVERIG (mm)	TOTAAL (mm)	BELASTING (kN/m ²)
Dak	Breedplaat	250	50	300	7,15
+3 (met terras)	Breedplaat	330	230	560	11,25
+1 en +2	Breedplaat	280	90	370	8,80
BG	Breedplaat	500	300	800	16,40

Tabel 4. Vloerconstructie dikten Landhuis

POSITIE/FUNCTIE	WANDTYPE	DIKTE (mm)	BELASTING (kN/m ²)
Woningscheiding en kern	Kalkzandsteen	300	5,40
Constructief binnen(gevel)wand	Kalkzandsteen	214	3,85
Schacht	Kalkzandsteen	150	2,70

Tabel 5. Wanddikten Landhuis

Brandwerendheid

De hoogste vloer van een verblijfsgebied bevindt zich op een hoogte van 9,2 meter. Dat wil zeggen dat voor de bouwconstructie een brandwerendheid van 90 minuten wordt geëist. Voor het vluchten naar een beschermde vluchtroute wordt 30 minuten gehanteerd. De WBDBO (weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag) tussen woningen is 60 minuten.

3.2 Analyse Kop van het Dok

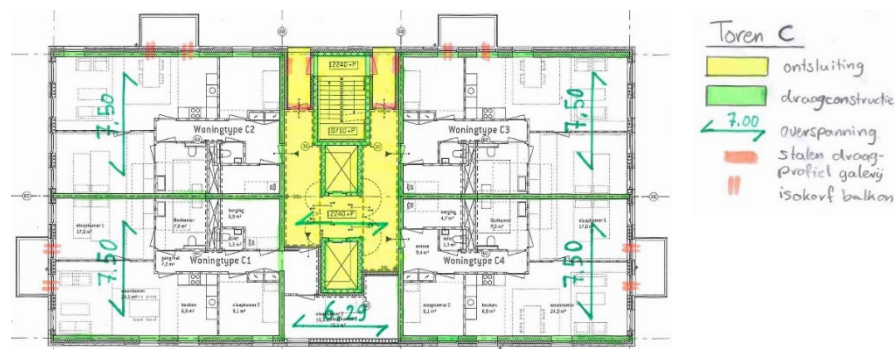
De constructie voor de woningen en woontorens van Kop van het Dok is uitgewerkt door IMd Raadgevende Ingenieurs (2019). Voor de analyse is informatie gevonden in het constructierapport van IMd (ter beschikking gesteld door Atelier PRO). Ontwerptekeningen van Atelier PRO zijn voor de analyse als onderlegger gebruikt.

Ontsluiting en programma

In de eerste twee lagen van de plint zitten eengezinswoningen; in de derde laag van de plint en in de drie torens zitten de appartementen. De appartementen hebben verschillende ontsluitingstypen. In bijlage 3 zijn de plattegronden en ontsluiting vanaf plint te zien. Op de begane grond zijn op drie posities een centrale entree te vinden; voor iedere toren één (zie figuur 11). Op de 2^e verdieping is er een corridor; een verbinding tussen alle torens en de parkeergarage. In figuur 11 is de verbinding paars aangegeven.

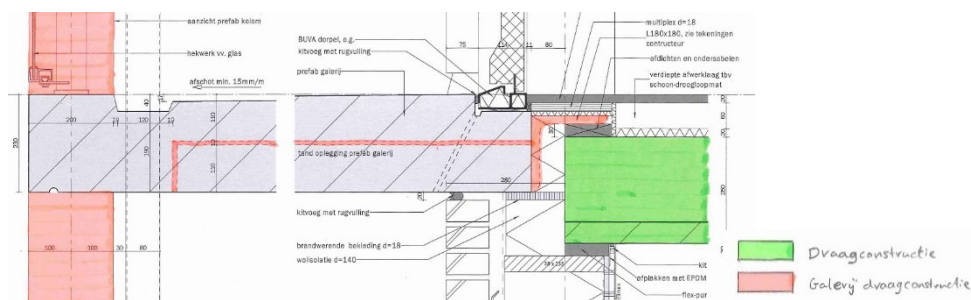


Figuur 13. Ontsluiting en hoofdconstructie Kop van het Dok - Toren B



Figuur 14. Ontsluiting en hoofdconstructie Kop van het Dok - Toren C

Alle torenappartementen hebben een buitenruimte in de vorm van een balkon. De balkons worden met isokorfbalkon bevestigd aan de breedplaatvloeren (zie figuur 10 voor impressie). In de figuren 12, 13 en 14 is aangegeven waar de balkons aan de vloer bevestigd worden. Naast balkons heeft toren A ook loggia's. Een loggia is een inpandig balkon en wordt door een stalen kolom gedragen, welke afdraagt naar de fundering. De prefab galerijplaten van de ontsluiting van toren A worden gedragen door prefab betonkolommen en stalen hoeklijnen (aan de gevelzijde). Zie figuur 15 voor de draagconstructie van de galerij. In figuur 12 is de positie van de kolommen, de hoeklijnen en de overspanning van de loggia aangegeven.



Figuur 15. Principedetail galerij draagconstructie Kop van het Dok - Toren A

Vloer- en wanddikten

In tabel 6 en 7 is geïnventariseerd in welk materiaal de vloeren (per laag) en wanden worden uitgevoerd, en bijbehorende dikten. Hierbij is ook weergegeven hoeveel dikte aan afwerking erbij komt en wat het totale gewicht (belasting) is.

VERDIEPING	VLOERTYPE	DIKTE (mm)	OVERIG (mm)	TOTAAL (mm)	BELASTING (kN/m ²)
Dak	Breedplaat	250	300	550	8,75
Verd.	Breedplaat	250	100	350	8,25
BG woning	Kanaalplaat (geïsoleerd)	265 + 135	100	500	7,05
BG overig	I.h.w.g. beton	250	X	250	6,25

Tabel 6. Vloerconstructie dikten Kop van het Dok

POSITIE/FUNCTIE	WANDTYPE	DIKTE (mm)	BELASTING (kN/m ²)
Woningscheiding/constructief	I.h.w.g. beton	250	6,25
Kern	Prefab beton	200	5,00
Binnen(gevel)wand	HSB	285	0,50
Schacht	Kalkzandsteen	100	2,00

Tabel 7. Wanddikten Kop van het Dok

Brandwerendheid

Voor de bouwconstructie wordt een brandwerendheid van 120 minuten vereist, omdat de hoogste woonvloer op een hoogte van 49 meter zit. Voor vluchtrouten wordt 30 minuten brandwerendheid gehanteerd. De WBDBO tussen woningen is 60 minuten.

3.3 Ontwerptraject en ervaringen Atelier PRO

Bij het ontwerpen wordt er rekening gehouden met verschillende aspecten. Vanuit elke functierol wordt daar anders naar gekeken. Om erachter te komen wat er in (de beginfase van) een ontwerpproject afspeelt zijn er interviews afgelegd met verschillende werknemers van Atelier PRO. Ook is gevraagd naar de ervaringen van het werken met houtbouw en de meningen daarover. In deze paragraaf zijn de belangrijkste antwoorden samengevat. Voor het interviewdocument kan bijlage 4 geraadpleegd worden.

Uit de interviews is duidelijk geworden dat architecten vooral in de SO en VO-fase te werk gaan met het ontwerp, waarna eind VO en begin DO projectleiders en bouwkundigen meer betrokken zijn en langzaam het project gaan overnemen tot de realisatie van het gebouw. In de beginfase wordt de constructie wel vormgegeven, maar nog niet met definitieve dikten. De constructeur, bouwfysisch- en installatieadviseur werken vaker na de SO of VO fase mee aan het ontwerp, maar soms ook tijdens. De opdrachtgever geeft meestal geen voorkeur in bouwmethode, maar wel een budget en hier hangt het ontwerp ook van af. De opdrachtgever is soms ook de aannemer en heeft dan bijvoorbeeld al bepaald dat er met kalkzandsteen of beton gebouwd wordt (wat van de aannemer is).

Bij appartementen is een flexibele indeling wenselijk en hiervoor moet een gangbare overspanningsmaat gekozen worden. Hierom wordt dus eerst de hoofd draagconstructie ontworpen met ontsluiting, waarna de ruimten en schachten worden ingedeeld. Stramien en overspanningsmaten zijn vaak in veelvoud van 0,30 meter, bijvoorbeeld 5,7 / 6,0 / 7,2 / 7,5 meter. In de ontwerpontwikkeling is ontdekt dat gebouwen goed in te delen zijn in deze maten; maar dit komt ook omdat de industrie zijn prefabricage hierop heeft afgestemd (Nijssse, 2017). Afhankelijk van het project wordt hiervan afgeweken (zoals te zien in figuur 8).

Houtbouw

Meestal is van tevoren al een Programma van Eisen (PvE) opgesteld en soms moet Atelier PRO dit maken of aanvullen op basis van de locatie en bestemmingsplan. In het PvE vermeldt de opdrachtgever soms ook duurzaamheidswensen; deze gaan vaak over energie waarop terugverdiend kan worden, maar niet over materialisering als houtbouw. Aannemers die niet eerder met hout hebben gebouwd kunnen hoge kosten in rekening brengen omdat het dus risico's heeft. De keuze voor houtbouw ligt niet alleen bij de architect; de constructeur moet er in kunnen ontwerpen, maar bovenal moet de opdrachtgever ook de ambitie hebben.

De keuze of er in hout gebouwd kan worden gaat veelal om de kosten, maar heeft ook met de fasering te maken. Hoe later in het proces (eind VO of DO) houtbouw ter sprake wordt gebracht, hoe moeilijker het wordt het te realiseren. Elke aanpassing kost tijd en dus geld. Als er vroeg in het proces al gekeken wordt naar de mogelijkheden in houtbouw, kan al beter rekening gehouden worden met bepaalde concessies voor het budget of uitvoering.

Daarbij wordt opgemerkt dat constructeurs vaak niet de optie voorgelegd krijgen om in hout te construeren, door architecten of opdrachtgevers, en vooral staal en beton gewend zijn. De geïnterviewden zeggen dat zij een gebrek aan kennis en ervaring hebben in houtbouw, en het hierom lastig vinden om opdrachtgevers en adviseurs te overtuigen.

Atelier PRO heeft wel ervaring in houtskeletbouw bij niet-dragende onderdelen, maar niet in houtmassiefbouw. Sommige werknemers vinden houtbouw een uitdaging (door de kosten), maar ze hebben er wel allemaal belangstelling voor om meer met hout te bouwen door de verschillende voordelen voor mens en milieu en de esthetische kwaliteiten. Het handigst is om in de SO en VO fase te bepalen of er in hout gebouwd wordt. Tijdens de VO en DO fase kan dan gekeken worden hoe dit wordt uitgevoerd. Volgens de geïnterviewden kan het een bureau-uitgangspunt worden om standaard de vraag te stellen of een project in hout te realiseren is. Door die vraag te stellen opent het meer deuren om in hout te bouwen, maar zijn er nog opties om in andere materialen te bouwen. Atelier PRO is van mening dat het zo realistischer is om een project te realiseren.

3.4 Aandachtspunten hoofddraagconstructie appartementen

Er zijn bepaalde aandachtspunten waar rekening mee gehouden moet worden bij het ontwerpen van hoofddraagconstructies van appartementen, met name bij houtbouw. Dit is door de analyse en interviews naar voren gekomen. In tabel 8 is geïnventariseerd waar een architect rekening mee houdt, wat van invloed is op de hoofddraagconstructie. Afhankelijk van de fase zijn andere aandachtspunten van belang, en voor sommige onderdelen zijn adviseurs nodig. In tabel 9 is geïnventariseerd waarvoor een adviseur het beste kan helpen. Volgens het boek Jellema 3 Draagstructuur (2011) heeft elk gebouwvorm of -deel een bepaalde belasting die maatgevend is. Dit is in tabel 10 weergegeven.

FASE	AANDACHTSPUNTEN	
SO	Gebouwhoogte (maximaal) Gebouwworm Type en aantal appartementen Overspanning/beukmaat	Ontsluiting: galerij/portiek, trapvorm, lift Verdiepingshoogte Buitenruimte: balkon/loggia/terras Gewenste uitstraling
VO	Algemene stabiliteit constructie Indeling: ruimten, schachten Openingen: deuren en ramen	Brandcompartimentering en vluchten Uitstraling gevel (i.v.m. constructie) Materialisering en globale (handels)maten
DO	Uitwerking detaillering van specifiek onderdelen	Definitieve dikten wanden en vloeren
TO	Specificeren en vastleggen van materialisering	Definitief maken van detaillering

Tabel 8. Aandachtspunten waar architect rekening mee houdt per fase (globaal)

FASE	CONSTRUCTEUR	BOUWFYSISCH ADVISEUR	INSTALLATIE ADVISEUR
SO	Algemene aandachtspunten en informatieverstrekking	Algemene aandachtspunten en informatieverstrekking	Algemene aandachtspunten en informatieverstrekking
VO	Materialisering constructie Sterkte en stabiliteit Brandweerstand constructie	Brandveiligheidseisen en oplossingen Akoestiek/geluidswering	Globale indicatie dimensies en verloop installaties
DO	Wand- en vloerdikten	Vastleggen brandveiligheid van onderdelen	Verwerking installaties in gebouw/vloer/wand/schacht
TO	Definitief maken van constructie en maten	Definitief maken van bouwfysische uitwerking	Definitief maken van installaties en maten

Tabel 9. Waarvoor een adviseur nodig is per fase (globaal)

				
Gebouwworm	Kelder	Laagbouw	Verdiepingbouw	Hoogbouw
Aantal lagen	Ondergronds	1 of 2 lagen	3 of 4 lagen	+4 lagen
Maatgevende belasting	Grond- en waterdruk	Regen- en sneeuwbelasting	Vloerbelasting	Windbelasting

Tabel 10. Maatgevende belasting gebouwvormen

Deze aandachtspunten zijn voor alle bouwmethoden van belang. Wel is het gunstiger om bij houtmassiefbouw de verschillende adviseurs eerder in het ontwerpproces te betrekken. Doordat veel architecten minder kennis en ervaring hebben in houtbouw kunnen onder andere houtconstructeurs hun expertise gebruiken om de (on)mogelijkheden en algemene aandachtspunten voor te leggen. Een architect of ontwerper kan dan tijdens het ontwerpproces bewust zijn van deze informatie. Of het hout in het zicht gewenst wordt heeft bijvoorbeeld veel invloed op de mogelijke oplossingen voor brandveiligheid en akoestiek.

3.5 Conclusie

Uit de analyse is gebleken wat voor soort appartementen Atelier PRO de afgelopen vijf jaar heeft ontworpen (*deelvraag 1.1*). Van sociale huurwoningen en middeldure woningen tot luxe appartementen. De gebouwen variëren van vier lagen (verdiepingbouw) tot 17 lagen (hoogbouw); van 14 tot 184 woningen. Ook zijn er verschillende ontsluitingstypen ontworpen (portiek, galerij en corridor), waarbij een portiek het meest voor komt. De overspanning is vaak 5,7 of 7,5 meter. Stapelbouw komt vooral voor bij verdiepingbouw. Bij hoogbouw wordt gietbouw en prefab betonbouw toegepast.

Ook is duidelijk geworden wat er in de beginfase van een ontwerpproject afspeelt (*deelvraag 1.2*). In de SO en VO fase gaan architecten aan de hand van het Programma van Eisen (PvE) een ontwerp maken. Bouwtechnische adviseurs voor constructie, installatie en bouwfysische onderdelen worden vaak vanaf de VO fase betrokken bij het ontwerp. Over het algemeen is er weinig kennis van houtmassiefbouw, zowel bij Atelier PRO als opdrachtgevers en bouwtechnische adviseurs. Dit maakt een project in hout realiseren lastig. Atelier PRO wil bij projecten kijken of houtbouw mogelijk is.

Bij hoofdconstructies van appartementen (*deelvraag 1.3*) moet rekening gehouden worden met verschillende aspecten, afhankelijk van de ontwerpfase. Een architect houdt daar al rekening mee, maar bij houtbouw is er extra aandacht voor nodig door andere materiaaleigenschappen. Er wordt geadviseerd om in de beginfasen met bouwtechnische adviseurs en houtexperts te werken die al kennis en ervaring hebben in hout(massief)bouw. Bij verdiepingbouw is de vloerbelasting maatgevend, en bij hoogbouw de windbelasting.

Hoofdstuk 4. Hoofddraagconstructies in hout

In dit hoofdstuk is onderzocht wat de algemene eigenschappen en mogelijkheden van houtconstructies zijn (deelvraag 2.4).

Om hout te kunnen toepassen is het allereerst belangrijk de materiaaleigenschappen van hout te weten. Er zijn veel verschillende houtsoorten, maar hoofdzakelijk wordt hout ingedeeld in loofhout (hardhout) en naaldhout (zachthout) (Jellema 3, 2011). Loofhout komt van bomen met bladeren die in de herfst vallen. Naaldhout komt van bomen met naalden, die in de herfst niet vallen en dus het hele jaar door groen zijn. Een uitzondering binnen naaldhout is de lariks die wel naalden laat vallen (Bone, 2015).

In figuur 16 zijn de belangrijke verschillen tussen de twee houtgroepen te zien. Voor constructies wordt voornamelijk naaldhout gebruikt door het lage gewicht, druk- en treksterkte; maar dit hout moet veelal behandeld worden. Loofhout is harder, zwaarder hout dat goed tegen vocht kan. Hierom heeft loofhout vooral buitentoepassingen, zoals kozijnen en gevelbekleding. In dit onderzoek zit de aandacht op naaldhout.



Figuur 16. Verschillen loofhout en naaldhout

4.1 Algemene eigenschappen (constructie)hout

Een goede constructie heeft voldoende sterkte, stijfheid en stabiliteit; oftewel het voldoet aan de drie S-en eis (Nijse, 2017). Houten hoofddraagconstructies bestaan over het algemeen uit houten wanden, vloeren, kolommen en liggers. Alhoewel elke houtsoort verschillend is heeft hout wel bepaalde constructieve eigenschappen, waaronder een lage druk- en treksterkte en gewicht. In tabel 11 zijn de waarden hiervan te vinden. Ter vergelijking is het vaak toegepaste vurenhout (bij een vochtgehalte van 12%), (gewapend) beton en staal genomen. Voor hout zijn de sterktewaarden evenwijdig aan de houtvezels vermeld.

Hout is in de richting van de vezels namelijk sterker dan loodrecht op de vezels (Van Dorst & Detzel, 2013). Volgens ir. Rob Doomen (bijlage 1) zorgt deze eigenschap vaak voor complexe details bij de knooppunten van elementen. Afhankelijk van de houtsoort, bewerking en sterkteklasse heeft hout andere constructieve waarden.

		HOUT	BETON	STAAL
Druksterkte	[N/mm ²]	37	15 - 30	235
Treksterkte	[N/mm ²]	75	15 - 30	235
Volumieke massa	[kg/m ³]	450	2.400	7.800

Tabel 11. Dragende eigenschappen vurenhout, (gewapend) beton en staal (S235)

Voor constructies wordt vaak vurenhout gebruikt, met een massa van 450 kg/m³, maar het gewicht kan oplopen per houtsoort. De dragende eigenschappen van hout worden onder andere beïnvloed door de richting van de houtvezels en het vochtgehalte (Verver & Fraaij, 2015). Om meer informatie te krijgen over houtconstructies is contact opgenomen met een houtconstructeur; ing. Theo Geuijen (bijlage 5). Over de stijfheid geeft hij aan dat trillingen in een houten vloer een grotere rol zullen spelen bij een vloeroverspanning boven de 5 meter.

Kruip en vocht

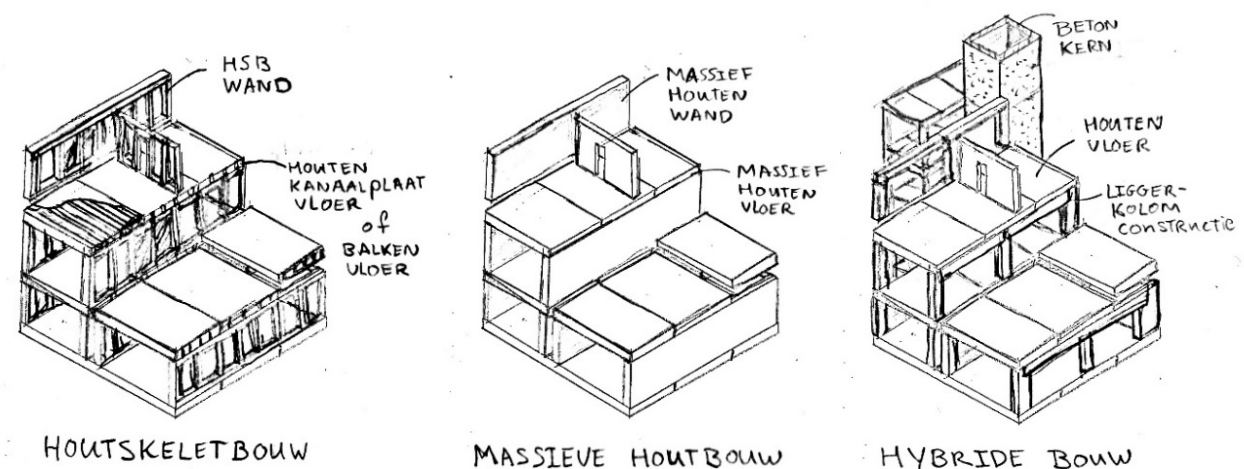
Bij hout moet rekening gehouden worden met kruip; de toenemende vervorming van een materiaal bij een aanhoudende belasting. Het is namelijk ongewenst en kan de levensduur van een element beperken (Van Dorst & Detzel, 2013). Het is belangrijk om van het bestaan van kruip af te weten, maar hoe hier het beste mee rekening gehouden kan worden hangt af van het project en kan een (hout)constructeur het beste adviseren en berekenen.

T. Geuijen (bijlage 5) maakt duidelijk welke onderdelen wel en niet in hout kunnen. Trappenhuizen en liftkernen kunnen in hout, afhankelijk van het aantal bouwlagen in het ontwerp, maar moeten wel bekleed worden in verband met rookontwikkeling. De fundering, de kelder en de begane grondvloer kunnen niet in hout. Het hout kan namelijk vocht opnemen en afstaan (drogen), uitzetten en krimpen, maar ook schimmels aantrekken. Het water in de grond en een schommelende grondwaterstand beschadigen het hout.

Het vochtgehalte van hout heeft grote invloed op de sterkte. Vocht verweekt de houtvezels en dat vermindert de sterkte (Van Dorst & Detzel, 2013). De invloed van vocht en temperatuur op de houteigenschappen wordt verdeeld in klimaatklassen. Centraal verwarmde verblijfsruimten vallen onder klimaatklasse 1. Voor naaldhout wordt daar uitgegaan van een gemiddeld vochtgehalte van maximaal 12% (Verver & Fraaij, 2015).

4.2 Bouwmethoden in hout

Houtbouw is een droge bouwmethode en kent zowel open als gesloten draagstructuren. Tot op heden komt voor (laagbouw) woningen houtskeletbouw het meest voor. Een andere methode die nu meer aandacht krijgt, voor zowel laag- als hoogbouw, is houtmassiefbouw. Houtskeletbouw en houtmassiefbouw vallen onder een gesloten draagstructuur. Ligger-kolomconstructies, gunstig voor een flexibele ontwerpindeling, vallen onder een open draagstructuur. De verschillende methoden kunnen ook gecombineerd worden met beton of staal, voor bijvoorbeeld meer stabiliteit. Het combineren van methoden wordt hybride bouw genoemd. Zie figuur 17 voor de verschillende methoden. Om vrij te ontwerpen is het goed om kennis te hebben van alle mogelijkheden.

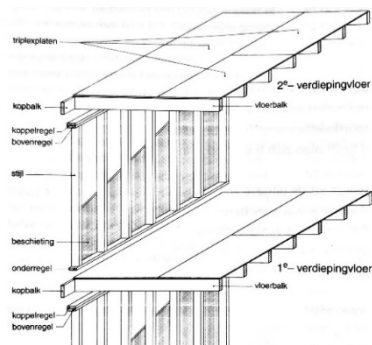


Figuur 17. Schematische weergave bouwmethoden met hout

Houtskeletbouw

De houtskeletbouwmethode is rond 1830 ontwikkeld en veelvuldig toegepast in Canada (en Noord-Amerika). In 1968 is de Canadese kennis in Nederland geïntroduceerd door de uitgave van het SBR-rapport *Houtskeletbouw*. Sindsdien zijn veel woningbouwprojecten in Nederland ook in houtskeletbouw gerealiseerd (Jellema 8, 2011).

Alle elementen (dragend en niet-dragend) zijn van gestandaardiseerd bouwhout gemaakt en worden als geprefabriceerd element aangeleverd op de bouwplaats. In de Nederlandse woningbouw wordt vooral de platformmethode toegepast; verdiepingshoge wanden en vloeren worden op elkaar gestapeld, waarbij de stabiliteit wordt ontleend aan de totale verbinding van wanden en stijve vloeren (Jellema 8, 2011). Dit is op figuur 18 te zien. Wandens bestaan uit stijl- en regelwerk en afwerkingsplaten, die ook zorgen voor de vormvastheid van de constructie. Tussen de stijlen is ruimte voor isolatie en installaties, waardoor het gevelpakket vaak dunner is dan met massieve wandsoorten. De vloeren worden uitgevoerd als een balklaag met daarop plaatmateriaal. In figuur 19 is een impressie te zien van houtskeletbouw in uitvoering.



Figuur 18. Houtskeletbouw platformmethode



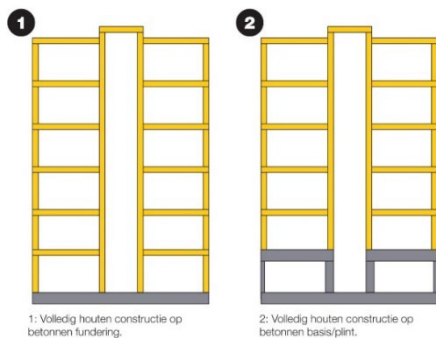
Figuur 19. Houtskeletbouw in uitvoering

Massieve houtbouw

Een houtbouwmethode die nu meer aandacht krijgt is houtmassiefbouw. Het is ontwikkeld in Duitsland en Oostenrijk vanaf 1990 (ORGA architect, 2020b). Voor deze bouwmethode wordt vaak de term cross-laminated timber (CLT; kruislaaghout) gebruikt. CLT is een houtproduct dat bestaat uit houten planken die kruislings opgestapeld en verlijmd zijn. Bij de prefabricage van elementen worden openingen voor kozijnen en deuren uitgezaagd. Ook kan ruimte voor elektra-leidingen meteen in het hout gefreesd worden (zie paragraaf 4.6).

In figuur 20.1 is schematisch de opbouw van een massief houten constructie te zien. Een variant hiervan is figuur 20.2, waarbij de houten constructie op een betonnen plint is gebouwd. Dit kan gedaan zijn als de plint bijvoorbeeld winkels, kantoren en/of een parkeergarage bevat en daarboven woningen bevinden. Zo zijn de functies beter te scheiden voor het behalen van de verschillende brand- en geluidseisen.

Gebouwen worden opgebouwd uit massieve wand- en vloerelementen. In tegenstelling tot houtskeletbouw, waar minder hout per element wordt toegepast, is een CLT constructie veel stabielere door de massieve draagstructuur en gekruiste lagen (Van der Lugt & Harsta, 2020; Redactie Het Houtblad, 2020a). In figuur 21 is te zien hoe een ruimte uitgevoerd in CLT wanden en vloeren eruit ziet.



Figuur 21. Houtmassiefbouw constructies



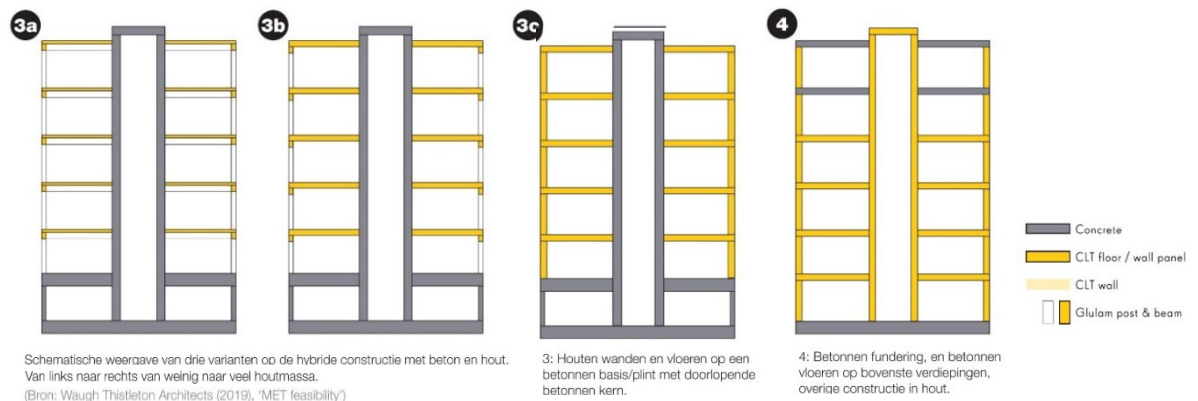
Figuur 20. Houtmassiefbouw in uitvoering

Hybride houtbouw

Als meerdere bouwmethoden gecombineerd worden om de hoofddraagconstructie van een gebouw te realiseren heet dat hybride bouw. Hybride draagconstructies zijn gunstig wanneer één methode niet voldoende is om een bepaalde bouwhoogte, overspanning en/of veiligheid te realiseren (Redactie Het Houtblad, 2020b; Van der Lugt & Harsta, 2020). Volgens T. Geuijen is er binnen hybride bouw onderscheid te maken tussen gesloten (hybride wand-vloerconstructies) en open draagstructuren (hybride ligger-kolomconstructies).

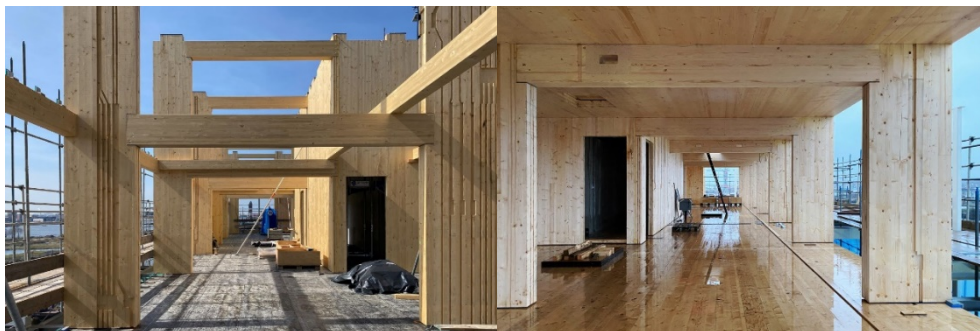
Een gebouw kan tot een bepaalde hoogte volledig in massief houten wanden en vloeren worden opgebouwd, maar bij grotere hoogten volstaat dit niet om het gebouw stijf en stabiel te krijgen. Door hout samen met beton of staal toe te passen is er meer te bereiken. In figuur 22.3c en 22.4 zijn varianten te zien van hybride wand-vloerconstructies met beton. Figuur 3c laat een betonnen plint met een betonnen kern zien (wat veel voorkomt); figuur 22.4 laat zien dat de stabiliteit ook te verkrijgen is door de bovenste verdiepingvloeren in beton uit te voeren, zonder betonkern. Volgens Wim van der Heide van ingenieursbureau Sweco (zie bijlage 6) kan zo traagheid gecreëerd worden, door toevoeging van gewicht.

Ligger-kolomconstructies zijn open draagstructuren waarmee een vrije indeelbaarheid te realiseren is. De houtconstructie wordt opgebouwd uit kolommen, liggers en vloeren. Deze constructies hebben op zichzelf niet voldoende massa. De balken met kolommen en vloeren dragen alleen verticale krachten en de betonnen kern zorgt voor het opvangen van onder andere de wind (de horizontale krachtsoverdracht). Figuur 22.3a en 22.3b laat een doorsnede zien van ligger-kolomconstructies, waarbij figuur 22.3a houten balkenvloeren laat zien en figuur 22.3b massieve vloeren.



Figuur 22. Veel voorkomende hybride constructies met (massief) hout en beton

Om een beeld te krijgen van hybride ligger-kolomconstructies is zijn in figuur 23 als referentie het project Stories (Buiksloterham, Amsterdam) te zien van Olaf Gipser Architects.



Figuur 23. Hybride ligger-kolomconstructies (Stories - Buiksloterham)

Aantal bouwlagen per methode

In literatuur is weinig te vinden over de maximaal aantal bouwlagen dat mogelijk is met massieve houtbouw of hybride bouw; deze methoden zijn nog in ontwikkeling en worden langzaam meer toegepast in Nederland. Met houtskeletbouw is tot zes lagen mogelijk (Van der Lugt & Harsta, 2020), maar er wordt meestal aangeraden om drie tot vier lagen te bouwen door het lage gewicht, geringe massa en het krimpgedrag. Een gebouw in kruislaaghout is het meest efficiënt te bouwen tot tien lagen, volgens houtkenners, en woont ook het prettigst (Redactie Het Houtblad, 2020b).

Om meer informatie uit de praktijk te krijgen is aan ing. Theo Geuijen gevraagd of er richtlijnen zijn voor de maximaal aantal bouwlagen per bouwmethode. In tabel 12 is dit overzichtelijk gemaakt. Het maximum aantal lagen is een indicatie voor de huidige situatie, voor als er nu ontworpen gaat worden. Een referentie is het project HAUT in Amsterdam die nu gebouwd wordt en 21 lagen heeft (73 meter hoog). Volgens T. Geuijen is het mogelijk dat er over enkele jaren ook 30 lagen haalbaar is, doordat de houtbouw methoden nog aan het ontwikkelen zijn.

	HOUTSKELETBOUW	MASSIEF HOUTBOUW	HYBRIDE BOUW
Maximaal aantal lagen	Ca. 4 - 6 lagen	Ca. 10 lagen	Ca. 21 lagen
Maatgevende belasting	Vloerbelasting	Windbelasting	Windbelasting

Tabel 12. Maximaal aantal bouwlagen per houtbouwmethode

Appartementencomplexen hebben veelal meer dan vier bouwlagen en vereisen ook meer massa voor contactgeluid. Hierom wordt houtskeletbouw niet verder onderzocht; ook omdat het onder de traditionele en algemeen bekende bouwmethoden valt.

4.3 Massiefhouten platen en producten

Onder houtbouw vallen verschillende elementen; wanden, vloeren, liggers en kolommen. Sommige elementen zijn opgebouwd uit massiefhouten platen, waar ook verschillende soorten van zijn. Voor ligger-kolomconstructies wordt gelamineerd hout (glulam) toegepast. Veelvoorkomend voor wanden en vloeren is kruislaaghout (CLT), maar houten kanaalplaat-/ cassettevloeren worden veelal ook gemaakt van LVL platen. In figuur 24 zijn de verschillende materialen weergegeven die worden behandeld.



Figuur 24. Verschillende houtproducten

Glulam

Gelamineerd hout, toegepast in liggers, kolommen en spanten, bestaat langer dan CLT en wordt ook wel glulam of Brettschichtholz genoemd. Het woord komt uit de combinatie van glue en laminated; lijm en gelamineerd. Glulam bestaat uit houten planken die in dezelfde (lengte)richting op elkaar gestapeld en verlijmd zijn, waardoor overspanningen tot 30 meter mogelijk zijn (Redactie Het Houtblad, 2020a). In figuur 25 is de opbouw te zien.

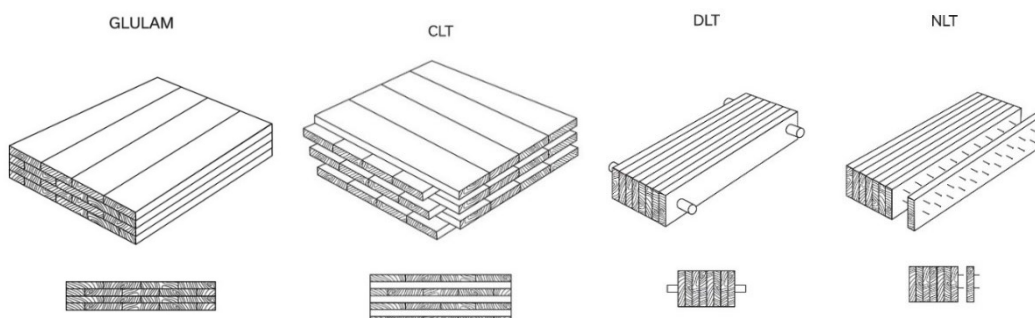
CLT

Kruislaaghout wordt toegepast voor wanden en vloeren en is bekend onder de namen Cross-Laminated Timber (CLT), X-lam en Massivholz. Kruislings opgestapelde planken die met elkaar verlijmd zijn (zie figuur 27) vormen een sterk constructief materiaal. Elementen bestaan uit drie, vijf of zeven lagen planken die verschillende dikten kunnen hebben. De productiematen zijn veelal afhankelijk van het project, de fabrikant en het vrachtverkeer; maar kunnen tot breedten van 3,5 of 4,5 meter, lengten tot 18 of 25 meter en dikten van 60 tot 400 of 500 mm (Redactie Het Houtblad, 2020a; Derix, 2020; Van der Lugt & Harsta, 2020).

NLT en DLT

Ook bestaan er gelamineerde houten elementen waarbij geen lijm is gebruikt voor het verbinden van de planken, namelijk NLT en DLT (zie figuur 27). NLT (Nail Laminated Timber; Nailed Brettstapel) bestaat al 150 jaar en wordt toegepast in Noord-Amerika. Hierbij worden de planken aan elkaar gespijkerd. Wat betreft hergebruik is een aandachtspunt dat er geen methode is om eenvoudig de spijkers uit het hout te krijgen zijn.

DLT (Dowel Laminated Timber; Brettstapel) is ontwikkeld rond 1970 in Duitsland. Planken worden onderling aan elkaar bevestigd met houten deuvels die van een andere houtsoort zijn. Door het uitzet- en krimpgedrag van de deuvels zit het geheel aan planken goed vast, maar DLT is wel veel minder sterk dan CLT (Redactie Het Houtblad, 2020a; Van der Lugt & Harsta, 2020). NLT en DLT lijkt in Europa niet veel toegepast te worden, in tegenstelling tot CLT. Door de minderheid in sterkte, productie en toepassing wordt NLT en DLT niet verder onderzocht, maar het zou een interessant vervolgonderzoek kunnen zijn.



Figuur 25. Opbouw principes van glulam, CLT, DLT en NLT



Figuur 26. LVL plaat

LVL

Bij Laminated Veneer Lumber (LVL) zijn opgestapelde laminaatlagen (in een richting maar soms kruislings) van maximaal 6 mm dik met lijm aan elkaar vastgemaakt. Hieruit ontstaat een gelamineerd plaatmateriaal wat sterker is dan glulam. Laminaat is een zeer dunne plak van de boomstam. In tegenstelling tot multiplex, wat meer uit allerlei (rest)lagen wordt gemaakt, bestaat LVL uit kwaliteit-geselecteerde plakken hout (T. Geuijen, bijlage 5). De LVL platen kunnen tot 3 bij 24 meter geproduceerd worden, tot een dikte van 90 mm. Hiermee worden verschillende vloeren gemaakt, zoals houten cassettevloeren (Redactie Het Houtblad, 2020a; Van der Lugt & Harsta, 2020). In figuur 26 is een LVL plaatopbouw te zien.

4.4 Vloeren

Naast CLT vloeren zijn er ook andere houten vloeren zoals houten kanaalplaatvloeren van LVL platen (Kerto-Ripa) of van gelamineerd hout (LIGNATUR). Een minder bekende houten vloer is de Holz-Beton-Verbundelement (HBV), waarbij ook beton en staal worden toegepast. In figuur 27 t/m 30 zijn de verschillende houten vloeren te zien.

Volgens T. Geuijen (bijlage 5) wordt bij appartementen een blijvende belasting van 4,0 tot 4,5 kN/m² gerekend en een veranderlijke belasting van 2,5 tot 3,0 kN/m² (opgeteld samen maximaal 7,5 kN/m²). Dit heeft invloed op de vloeroverspanning en bijbehorende dikte. Bij het vergelijken van de verschillende vloeren wordt uitgegaan van vloeren op twee steunpunten. Meer steunpunten zijn mogelijk en zorgen voor grotere overspanningswaarden, maar voor dit onderzoek wordt uitgegaan van appartementen die ieder een eigen vloer hebben (ontkoppeld in verband met contactgeluid).

Het is lastig alle verschillende vloeren met elkaar te vergelijken doordat elke leverancier andere belastingen aanneemt, maar er wordt gekeken naar waarden die bij elkaar in de buurt komen. De verschillende gebruikte tabellen zijn in bijlage 7 te vinden. Belangrijk is om te weten dat de waarden uit de tabel alleen een indicatie geven. Voor de exacte waarden zijn wel rekentools ontwikkeld, waarbij constructeurs deze het beste kunnen gebruiken om de constructie te berekenen. In dit onderzoek wordt uitgegaan van de indicatieve waarden omdat in de beginfasen van een ontwerpproces de exacte waarden nog niet exact berekend zijn.



Figuur 27. CLT vloer



Figuur 28. Kerto-Ripa LVL Box



Figuur 29. LIGNATUR

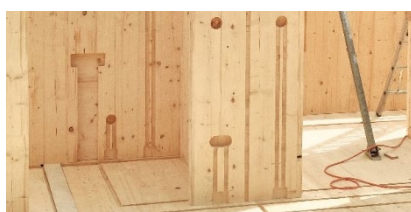


Figuur 30. HBV vloer

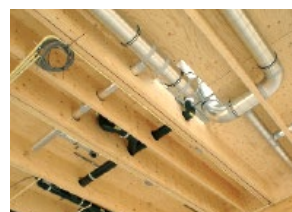
CLT vloer

In paragraaf 4.3 is CLT deels toegelicht. Een overspanningstabel van CLT-fabrikant Derix (2020) geeft een maximale blijvende belasting van 2,0 kN/m² aan, omdat er wordt uitgegaan van verdiepingsvloeren van laagbouw woningen. Bij een blijvende en veranderlijke belasting van 2,0 kN/m² en 3,0 kN/m² kan een CLT vloer maximaal 7 meter overspannen, met een dikte 240mm. Maar appartementen vereisen een twee keer zo grote blijvende belasting. Hierdoor moet de vloer dikker worden, wat minder efficiënt is. Hierom geeft T. Geuijen aan dat 5 meter een gunstige overspanningsmaat is om mee te ontwerpen en/of gebruik te maken van meer steunpunten om de vloerdikte te verminderen.

In combinatie met CLT wordt vaak ook een zwevende dekvloer toegepast om aan de akoestische eisen te voldoen. Een voordeel van CLT (wanden en vloeren) is dat er bij de productie ook ruimte voor kleine leidingen en elektra gefreesd kan worden, zoals te zien is in figuur 31, door het gebruik van het BIM-model van een project (Van der Lugt & Harsta, 2020).



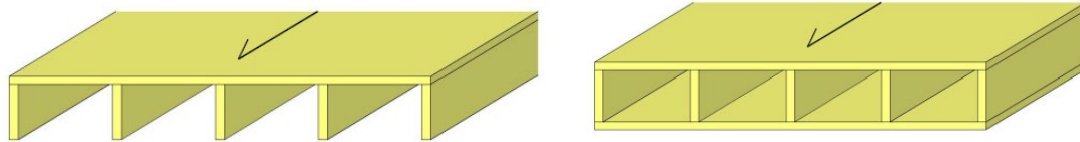
Figuur 31. Gefreesd CLT voor installaties



Figuur 32. Leidingen door Kerto-Ripa vloer

Kerto-Ripa LVL kanaalplaatvloer

Fabrikant MetsäWood levert houten kanaalplaat-/cassettevloeren die van LVL platen zijn gemaakt; Kerto-Ripa LVL. Er zijn twee vormen: Kerto-Ripa T en Kerto-Ripa Box (zie figuur 33). Kerto-Ripa vloerelementen worden geproduceerd tot een lengte van 20 meter, en ribben van 100 tot 600mm hoog. De elementen zijn standaard 2,4 meter breed (maar kunnen ook van 0,6 tot 2,5 meter zijn) en worden veelal met vijf ribben uitgevoerd (MetsäWood, 2017a).



Figuur 33. Kerto-Ripa T (links) en Kerto-Ripa Box (rechts)

Vloeren hebben een maximale vrije overspanning van 16 meter, meer dan CLT, maar zijn wel dikker. In een overspanningstabel van MetsäWood wordt uitgegaan van een blijvende belasting van $2,4 \text{ kN/m}^2$ en een veranderlijke belasting van 4 kN/m^2 . Hierbij kan Kerto-Ripa T 8,8 meter overspannen bij een dikte van 630 mm (dikte inclusief boven- en/of onderplaat) en Kerto-Ripa Box kan maximaal 10,2 meter overspannen en is 660 mm dik (MetsäWood, 2017b).

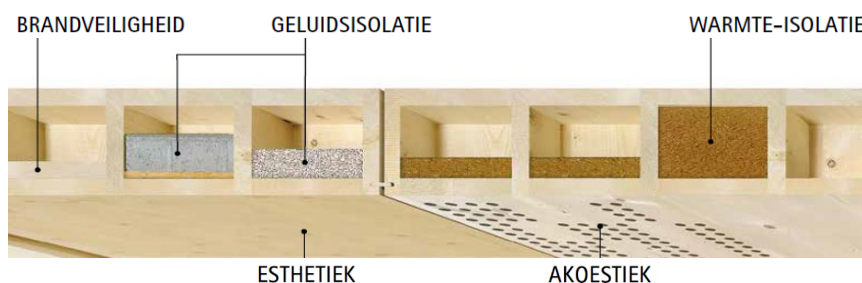
Isolatie en leidingen kunnen tussen de ribben geplaatst worden (figuur 32). Het voordeel van deze vloeren is dat ze sterker zijn en grotere overspanningen kunnen maken door de LVL ribben. Daarentegen is de grotere vloerdikte ongunstig voor een appartementencomplex omdat hierdoor de kosten oplopen, er minder appartementen gerealiseerd kunnen worden of de vrije hoogte juist beperkt wordt; er is verlies aan totale bouwhoogte. Daarbij is contactgeluid een probleem doordat de vloeren hol zijn/veel 'lucht' bevatten; voor appartementen is massa nodig bij de vloeren (T. Geuijen, bijlage 5).

LIGNATUR kanaalplaatvloer

Een ander soort houten kanaalplaatvloer, dat is gemaakt van massiefhouten planken, heet LIGNATUR. De kanaalplaattelementen hebben een standaardbreedte van 1000mm en kunnen maximaal 16 meter lang zijn. De vloeren zijn 90 tot 480mm hoog (LIGNATUR, 2011).

Op de interactieve werksite van LIGNATUR worden verschillende specificaties gedeeld; van constructieve waarden tot akoestische prestaties. Hierin is een overspanningstabel te vinden waar wordt uitgegaan van een blijvende belasting van $2,00 \text{ kN/m}^2$ bij woningen. De maximale overspanning is dan 10 meter met een 440 mm dikke vloer, maar voor grotere belastingen is een vloer van 480mm dik gunstiger.

LIGNATUR (2019) heeft door de houten kanalen veel variaties wat betreft een betere ruimte akoestiek of brand- en geluidsisolatie. Enkele voorbeelden zijn te zien op figuur 34. Ondanks de optie voor geïntegreerde isolatie wordt LIGNATUR minder toegepast bij appartementsgebouwen, door de grotere dikte en weinig massa.



Figuur 34. LIGNATUR variaties

HBV vloerelement

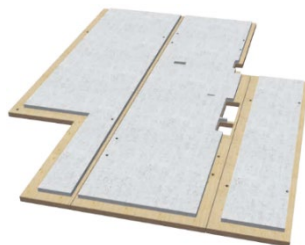
De Holz-Beton-Verbundelement (HBV) is een vloer ontwikkeld in Duitsland, waarbij CLT, beton en staal samen een element vormen. Het is in Nederland nog niet erg bekend. De vloer heeft verschillende benamingen; HBV-Decken, Xlam Concrete, XC Wood-Concrete floor en Timber Concrete Composite floor. In figuur 35, 36 en 37 zijn de HBV elementen te zien.

Het bedrijf MMK produceert deze elementen met een maximale lengte van 10,20 meter, dikten van 200 tot 320 mm (totaal hout en beton) en standaard breedten van 2,50 tot 3,00 meter. Bij een blijvende en veranderlijke belasting van 2,5 en 2,0 kN/m² is de maximale overspanning 7,9 meter met een dikte van 320mm (CLT 180mm en beton 140mm).

Er is een belangrijk verschil tussen een CLT vloer waar beton op gestort is en de HBV vloer. Bij de CLT vloer wordt het beton op locatie gestort als de wand- en vloerconstructie (geheel) staat, terwijl de HBV vloer met het beton geprefabriceerd wordt om ook onderdeel te zijn van de constructie (StructureCraft, z.d.; T. Geuijen, bijlage 5).



Figuur 35. HBV op de bouw



Figuur 36. HBV vloerelementen



Figuur 37. HBV doorsnede

Opsomming houten vloeren

De eigenschappen van de verschillende vloeren zijn opgesomd in tabel 13. Ook is per vloer opgezocht wat de vloerdikte is bij de 'optimale vloeroverspanning van 5 meter'. Bij sommige tabellen was er geen optie voor 5 meter. Bij die vloeren is de laagst geleverde waarde vermeld. Er is een kleine opsomming gemaakt van de gunstige en minder gunstige eigenschappen over onder andere de maximale overspanning, massa/contactgeluid en vloerdikte. Op basis van deze eigenschappen hebben de vloeren een adviserende score gekregen.

					
	CLT	KERTO-RIPA T	KERTO-RIPA BOX	LIGNATUR	HBV
Max. lengte [m]	25	20	20	16	10,2
Breedten [m]	max. 4,5	2,4 (0,6 - 2,5*)	2,4 (0,6 - 2,5*)	1,0	2,5 - 3,0
Dikten/hoogten [mm]	60 - 500	100 - 600	100 - 600	90 - 480	max. 320
Max. overspanning [m]	7	8,8	10,2	10	7,90
Dikte bij max. overspanning [mm]	240	630	660	480	320
Dikte bij overspanning van ca. 5 meter	5 m: 170 mm	5,6 m**: 330 mm	5,8 m**: 260 mm	5 m: 180 mm	5,45 m**: 200 mm
Gunstig	Massa/geluid Vloerdikte Kleine leidingen	Overspanning Isolatie Leidingen	Overspanning Isolatie Leidingen	Overspanning Isolatie Akoestiek	Massa/geluid Vloerdikte
Minder gunstig	Lagere overspanning	Contactgeluid Vloerdikte	Contactgeluid Vloerdikte	Contactgeluid Vloerdikte	Installaties/ leidingen
Vergelijkingsscore	+	-	-	+/-	+

*Optioneel naast standaardbreedte

**Tabel geeft dit als laagste waarde

Tabel 13. Overzicht houten vloeren bij appartementen

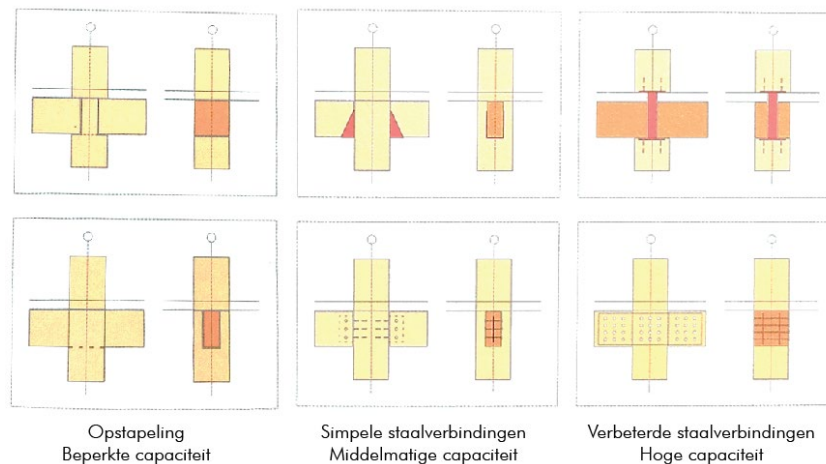
Er kan geconcludeerd worden dat de CLT en HBV (combinatie van CLT en beton) vloer het beste zijn doordat deze het meeste massa bevatten en dus beter presteren als het om contactgeluid gaat. Ook zijn deze twee vloeren minder dik dan de Kerto-Ripa vloeren, die tevens de minste massa hebben. De LIGNATUR vloer heeft gunstige overspanningen en dikten, maar is net als de Kerto-Ripa vloeren meer gevoelig voor contactgeluid door het holle karakter; de vloer gaat als klankkast werken (Jellema 3, 2011).

In de HBV vloer komt CLT voor. Het onderzoek zal zich verder alleen richten op CLT; de overige, minder gunstige, vloeren worden nu uitgesloten maar zullen bij de eindoplossing nog vermeld worden ter informatie.

4.5 Liggers en kolommen

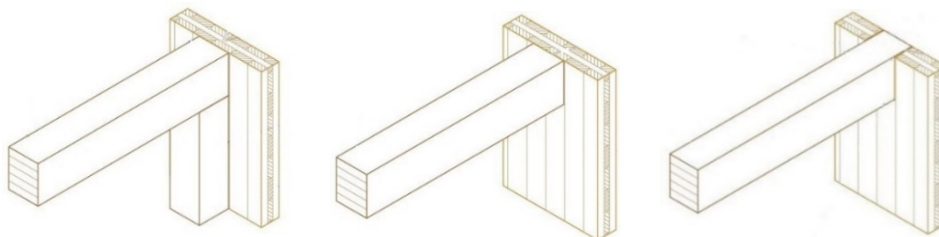
In verschillende houten appartementsgebouwen in Nederland (zie hoofdstuk 6 voor referenties) komen hoofddraagconstructies met liggers, kolommen en vloeren voor. Hierdoor zijn grotere overspanningen en een vrije indeelbaarheid mogelijk. Alhoewel de ontwerpen van Atelier PRO bestaan uit wanden en vloeren als constructie zijn ligger-kolomconstructies ook te overwegen. Hiervoor is het belangrijk om te weten welke mogelijkheden er zijn en hoe bepaalde onderdelen samenkomen. Eerder is al gemeld dat glulam een materiaal is wat sterk genoeg is om als ligger overspanningen van 30 meter te overbruggen; maar deze waarde zal minder zijn als vloeren worden gedragen.

De afmetingen van kolommen en liggers hangen af van het project en kan hierom het beste door een constructeur berekend worden. Volgens ing. Hubert Kuijpers is het belangrijk dat boven elkaar staande kolommen niet worden onderbroken door een ligger. Anders gaat het ten koste van de stabiliteit en moeten de verbindingen ter plaatste meer versterkt worden (Nationaal Digitaal Houtbouw Congres, 2020). In figuur 38 zijn verschillende ligger-kolom aansluitingen te zien met daarbij de sterkte capaciteit van de verbinding. Het stevigst en sterkst is als de kolommen worden verbonden door een stalen profiel, en tussen de kolommen ook ruimte overblijft voor vloeren of liggers, zoals te zien is figuur 40 rechtsboven (Van der Lugt & Harsta, 2020).



Figuur 38. Ligger-kolom aansluitingen

Sommige ligger-kolomconstructies worden ook met wanden gecombineerd. Bij wanden kan een ligger zowel op een kolom rusten of gedragen worden door een wand. Dit is in figuur 39 te zien. Een ligger kan aan een wand hangen of er kan ruimte uit de wand worden gezaagd, zodat de ligger op de wand rust (Stora Enso, 2015).



Figuur 39. Ligger-wand aansluitingen

4.6 Overige aandachtspunten constructie

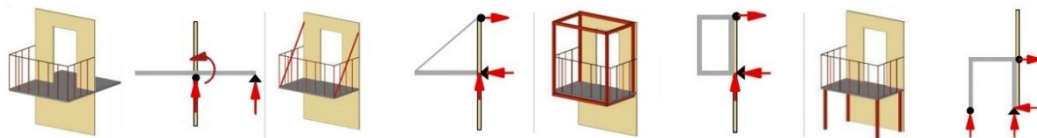
Gevelbekleding

Bij houtbouw is niet elke gevelbekleding geschikt of handig, en daar zal rekening mee gehouden moeten worden. Prefab-betonnen gevelelementen bijvoorbeeld zijn niet alleen zwaar, maar ook niet logisch om toe te passen als er juist naar een CO₂-reductie gestreefd wordt. Een houten gevel kan mooi zijn maar het is niet heel onderhoudsvriendelijk. Er bestaan wel gevels van (tropisch) hard- of naaldhout die beter bestand zijn tegen weersinvloeden, of hout dat is geïmpregneerd of behandeld met bijvoorbeeld een coating, maar die zijn wel duur. Materialen als baksteen, ClickBrick, steenstrips, pleisterwerk en plaatbekleding zijn goed te combineren met houtbouw (T. Geuijen, bijlage 5), maar er kan niet met zekerheid gezegd worden of baksteen ook voor

hoogbouw geschikt is. Een vervolgonderzoek naar de verschillende gevelmaterialen die geschikt zijn voor een houten gebouw zou interessant zijn.

Uitkragingen en balkons

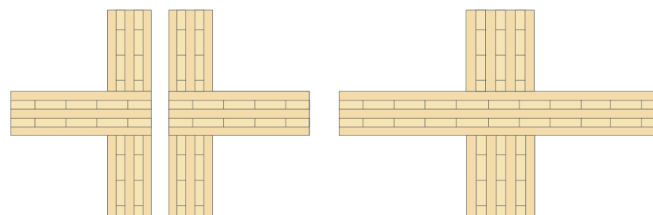
Hout is goed isolerend waardoor er minder grote koudebruggen zullen zijn dan met andere bouwmaterialen. Dit heeft een voordeel bij uitkragingen of balkons. T. Geuijen (bijlage 5) geeft als richtlijn aan dat een uitkragende, doorgaande vloer maximaal 2 meter kan uitsteken, omdat de vloer niet voldoende stijf is bij grotere uitkragingen. Om (grotere) uitkragingen te realiseren kan er een uitwendige constructie gemaakt worden van kolommen en balken die de balkon- of galerijplaten dragen (zoals ook bij andere bouwmethoden gedaan wordt). In figuur 40 zijn enkele principes te zien die in appartementen veel worden toegepast (zie bijlage 8 voor overige principes) en de krachtenverloop/krachtswerking op de hoofddragconstructie. Van links naar rechts is te zien een doorlopende vloer; een hangconstructie met een diagonale staaf en hoekligger aan de gevel; een frame die aan de gevel hangt; en een tafelconstructie met kolommen en balken.



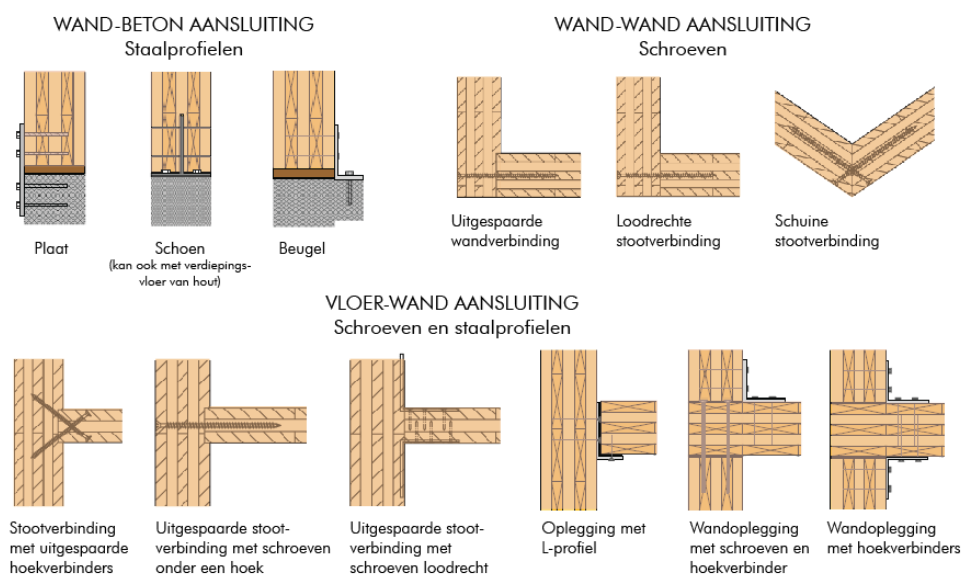
Figuur 40. Verschillende balkonconstructies met krachtenverloop

Aansluitingen

Er zijn veel verschillende aansluitingen mogelijk tussen vloeren, wanden en daken. Sommige aansluitingen zijn van belang op het gebied van brandveiligheid en akoestiek. Dit wordt in hoofdstuk 5 behandeld. In figuur 41 zijn schematische aansluitingen te zien van een houten draagconstructie, bestaande uit woningscheidende wanden en vloeren. Belangrijk is om te weten dat de aansluiting per project kan afwijken en de afwerkingen hier achterwege zijn gelaten. In figuur 42 zijn enkele mogelijke verbindingen te zien tussen verschillende elementen, zoals wand-beton(vloer)verbindingen, wand-wandverbindingen en verbindingen tussen wanden en verdiepingsvloeren.



Figuur 41. Principe aansluitingen woningscheidende constructie



Figuur 42. Mogelijke verbindingen tussen elementen

4.7 Conclusie

Voor **deelvraag 2.4** is onderzocht wat de algemene eigenschappen en mogelijkheden van houtconstructies zijn. Constructiehout is voornamelijk naaldhout, afkomstig van naaldbomen. Vurenhout is een naaldhoutsoort dat veel wordt toegepast en heeft een gewicht van ongeveer 450 kg/m^3 . Bij houtconstructies zijn kruip en vocht belangrijke aandachtspunten, maar een (hout)constructeur kan daar het beste in adviseren en rekenen.

Hoofdzakelijk zijn er drie houtbouwmethoden; houtskeletbouw (HSB) massieve houtbouw en hybride bouw. Wanneer meerdere bouwmethoden (zoals hout, beton en/of staal) worden gecombineerd om een hoger of stabielere gebouw te realiseren heet dat hybride bouw. Iedere bouwmethode heeft een maximum aantal te bouwen lagen.

Er bestaan veel verschillende soorten houtproducten maar glulam, CLT en LVL worden het meest toegepast in Europa; glulam voor balken, CLT voor wanden en vloeren en LVL voor kanaalplaatvloeren. Voor appartementenvloeren van hout zijn de CLT en HBV vloer het beste geschikt door de massieve opbouw. Deze vloeren kunnen maximaal 7 tot 8 meter overspannen. Overspanningen van ongeveer 5 meter lijken het meest gunstig te zijn.

Overige aandachtspunten voor houten hoofdconstructies zijn het type gevelbekleding (in verband met het gewicht en onderhoud), balkons en aansluitingen tussen constructieve onderdelen. Balkons kunnen maximaal 2 meter veilig uitkragen en hebben een uitwendige constructie of bestaan uit een doorlopende vloer. In de basis wordt een vloeren en wanden op elkaar gestapeld en zijn woningscheidende wanden van elkaar losgekoppeld.

Hoofdstuk 5. Brandveiligheid en akoestiek

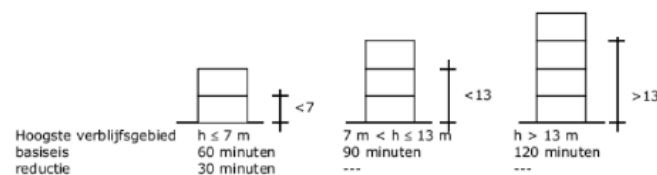
In dit hoofdstuk is onderzocht welke oplossingen er zijn voor de brandveiligheid en de akoestiek bij houtbouw (deelvraag 2.5).

Er is veel discussie over de brandveiligheid van hout. Hout is namelijk een brandbaar materiaal, maar heeft ook een bepaalde brandwerendheid. Naast brand is akoestiek ook een belangrijk onderdeel waar rekening mee gehouden moet worden. Hout is gevoelig voor contactgeluid doordat het een licht materiaal is. Wat wordt er van een gebouw vereist voor de brandveiligheid en akoestiek? Hoe presteert hout en wat zijn mogelijke oplossingen? In dit hoofdstuk worden deze onderdelen globaal behandeld en beantwoord.

5.1 Brandveiligheid

Vanuit het Bouwbesluit 2012 worden eisen gesteld aan gebouwen over brandveiligheid. Dit gaat om het veilig vluchten van mensen bij ontstaan van brand. In het ontwerp wordt hiermee rekening gehouden door vluchtrouten en een of meer trappenhuizen. Maar aan de constructie worden ook eisen gesteld met betrekking tot bezwijken. De constructie moet voldoende lang stevig blijven voor mensen om het gebouw te kunnen verlaten en geen gevaar te lopen. De brandwerendheid wordt uitgedrukt in minuten: 30, 60, 90 of 120 minuten (internationaal naar verwezen met 'REI', zoals REI 90). Dit is de tijdsduur dat een constructie niet mag bezwijken.

In figuur 43 is te zien wat de eisen zijn vanuit het Bouwbesluit 2012 bij woongebouwen. Een gebouw tussen drie en vijf lagen moet 90 minuten brandwerend zijn. Als de hoogste vloer van een woongebouw boven 13 meter reikt (ongeveer meer dan vijf lagen) wordt een brandwerendheid van 120 minuten gehanteerd.



Figuur 43. Bouwbesluit 2012 eisen brandwerendheid van woongebouwen

Brandklasse

De brandbaarheid van materialen wordt uitgedrukt in brandklassen volgens de Europese klassering. De klassering loopt van A (onbrandbaar) tot en met F (uiterst brandbaar). In de Europese klassering worden ook de rook- en druppelvorming meegenomen; voor rook (smoke) aangeduid met s0 (geen rookproductie) tot en met s3 (grote ondoorzichtige rookproductie); en voor brandende of hete druppels (droplet) aangeduid met d0 (geen druppelvorming) en met d2 (onbeperkte druppelvorming). De meesten houtsoorten en CLT (dat onafgewerkt/niet geïmpregneerd is) vallen onder brandklasse D-s2-d0; zwaardere houtsoorten vallen vooral onder klasse C. Klasse D en C geven aan dat hout (goed) brandbaar is (DGMR & IFV, 2014; Van der Lugt & Harsta, 2020).

In een appartement (brandcompartiment) wordt een brandklasse van D of hoger vereist voor wanden vloeren en trappen. Bij een trappenhuis (vluchtroute) wordt een brandklasse van B of hoger vereist voor wanden en een brandklasse van C of hoger voor vloeren en trappen (ROCKWOOL & ARCADIS, 2018). Dit houdt in dat met name bij trappenhuisen van CLT extra maatregelen nodig zijn omdat CLT een lagere brandklasse heeft (brandbaar is). De rookvorming moet voldoen aan minimaal klasse s2. CLT voldoet hieraan.

Brandgedrag

Het brandgedrag van hout is voorspelbaar, in tegenstelling tot bijvoorbeeld staal. Bij brand maakt hout een koollaag aan. Dit proces wordt ook wel carbonisatie genoemd. De koollaag beschermt het hout en vertraagt het doordringen van de brand door het materiaal. Als de brand niet uitdooft en het hout delamineert (het loslaten van houtlagen) kan de koollaag bezwijken en treedt er verdere verkoling op. Hierdoor verliest de constructie zijn kracht (Jellema 3, 2011; Redactie Het Houtblad, 2020b).

Naast de houtsoort heeft ook de gebruikte lijm invloed op de inbrandsnelheid van gelamineerde houtproducten. Hier wordt nog veel onderzoek naar gedaan, maar het is bekend dat MUF-lijm, lijm op melaninebasis, een lagere inbrandsnelheid heeft dan PU-lijm (polyurethaan). In de meeste CLT en glulam producten wordt MUF toegepast omdat het als een massief hout gedraagt, terwijl PU-lijm bijdraagt aan het delamineren. Voor de inbrandsnelheid wordt als vuistregel 0,65mm/min aangehouden. Hiermee kan globaal berekend worden hoeveel millimeter weg mag branden (Van der Lugt & Harsta, 2020; Laminated Timber Solutions, 2019).

Oplossingen

Een CLT wand van 100 mm dik heeft een brandwerendheid van 60 minuten. Bij het overdimensioneren van CLT worden de buitenste planken dikker gemaakt; bedoeld als brandwering (Laminated Timber Solutions, 2019; Redactie Het Houtblad, 2020b). Om de brandwerendheid van 90 en 120 minuten te halen zijn er naast het overdimensioneren ook andere oplossingen. In tabel 14 zijn verschillende oplossingen weergegeven voor wanden en vloeren, waarbij is aangegeven of het hout van de hoofdconstructie nog in zicht blijft.

	OPLOSSINGEN	HOUT IN ZICHT
Wanden	Overdimensioneren	Wel
	Impregneren of coaten	Wel/niet
	Afwerkplaat (bijv. gipsvezel)	Niet
	Voorzetwand	Niet
Vloeren		
- Erop	Dekvloer (zwevend, beton)	Niet
- Eronder	Verlaagd plafond	Niet
	Sprinklersysteem	Wel/niet

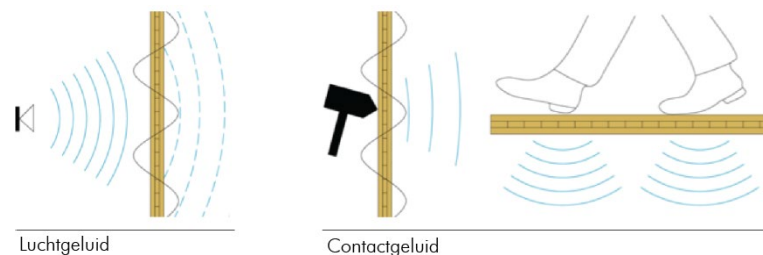
Tabel 14. Oplossingen voor brandveiligheid

Een voorzetwand heeft als nadeel dat de bruikbare vloeroppervlakte van een appartement minder wordt; plaatafwerking is hierom gunstiger. Fermacell brandwerende gipsvezelplaten zijn 12,5 mm dik en vallen onder brandklasse A1 (niet brandbaar). Een plaat kan voor 30 minuten brandwerendheid zorgen (Fermacell, 2019). Dit zou betekenen dat twee platen aan beiden zijden van een CLT wand voldoende zou zijn voor 120 minuten brandwerendheid.

Trappenhuizen en liftkernen van hout zijn volgens T. Geuijen (bijlage 5) constructief wel mogelijk, maar moeten door de hoge eisen met gipsplaten bekleed worden.

5.2 Akoestiek

Binnen geluidsproblemen is er onderscheid tussen luchtgeluid en contactgeluid (zie figuur 44). Luchtgeluid is geluid dat in de vorm van trillingen in de lucht verplaatst; het geluid is direct. Enkele bronnen van luchtgeluid zijn stemmen, de TV of een instrument. Contactgeluid is geluid dat wordt verspreid door trillingen in materie; het geluid is indirect. Een luidspreker die aan een wand bevestigd is produceert zowel lucht- als contactgeluid. Het maakt contact en geeft de resonanties door. Andere bronnen van contactgeluid zijn bijvoorbeeld een wasmachine, sluitende deuren en loopgeluiden (Merford, z.d.).



Figuur 44. Lucht- en contactgeluid

Het is belangrijk dat er minimale geluidsoverdracht is tussen appartementen door de woningscheidende wanden en verdiepingsvloeren. Geluidsoverdracht kan verminderd worden door geluidsisolatie en geluidsabsorptie. Geluidsisolatie houdt geluid binnen of buiten een bepaalde ruimte; ook wel akoestische isolatie genoemd. Geluidsabsorptie zorgt ervoor dat trillingen in de lucht geabsorbeerd worden, waardoor er minder geluid zal verspreiden binnen een ruimte (Merford, z.d.). Om trillingen in de constructie te verminderen wordt geadviseerd om constructieonderdelen te ontkoppelen door tussen de verbonden onderdelen bijvoorbeeld stukken vilt, kunststof of ander dempend materiaal te leggen (Redactie Het Houtblad, 2020b).

Bij vloeren wordt gelet op lucht- en contactgeluid en bij wanden vooral op luchtgeluid. In tabel 15 staan eisen vanuit het Bouwbesluit 2012 voor lucht- en contact geluid tussen woningen. Eerder is aangegeven dat hout weinig massa heeft. Volgens Stora Enso (2020) heeft een CLT wand van 100 mm dik een luchtgeluidsweerstand (R_w) van 34 dB. Dit voldoet niet aan het minimum van 52 dB.

In tabel 16 staat een opsomming van verschillende oplossingen die (gecombineerd) kunnen zorgen voor een betere geluidsisolatie. Afwerkplaten zijn niet genoeg om aan de eisen te voldoen. Door de platen te bevestigen op een achterconstructie van latten of stalen profielen, of door gebruik te maken van isolatie, kan een betere geluidsisolatie gerealiseerd worden (Stora Enso, 2020; Fermacell, 2019; Laminated Timber Solutions, 2019).

BOUWBESLUIT EIS	
Luchtgeluid (Rw/isolatie)	min. 52 dB
Contactgeluid (Lw/niveau)	max. 54 dB

Tabel 15. Bouwbesluit 2012 geluidseisen tussen woningen

	OPLOSSINGEN	HOUT IN ZICHT
Wanden	Losgekoppelde wanden	Wel
	Isolatie tussen wanden	Wel
	Afwerkplaat (bijv. gipsvezel)	Niet
	Voorzetwand	Niet
Vloeren		
- Erop	Dekvloer (zwevend, beton)	Plafond wel
- Eronder	Verlaagd plafond	Niet
	Isolatie met afwerkplaat	Niet

Tabel 16. Oplossingen voor geluid

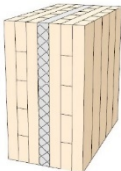
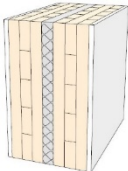
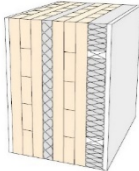
Houten vloeren hebben meer massa nodig om te volden aan de eisen. Volgens T. Geuijen (bijlage 5) wordt hierom vaak een dekvloer toegepast van bijvoorbeeld licht-/spuitbeton of kalksplit. Deze toegevoegde massa zorgt voor geluiddemping en hier kan eventueel ook vloerverwarming in. Uitgevoerd als zwevende dekvloer zou het materiaal ook verwijderd kunnen worden voor hergebruik van de constructie (Redactie Het Houtblad, 2020b).

De oplossingen uit tabel 14 en 16 komen veelal met elkaar overeen. Met dezelfde soort oplossing(en) kunnen dus zowel de brandwerendheid als de akoestiek worden aangepakt.

5.3 Woningscheidende wanden

Om appartementen te scheiden en te voldoen aan de brand- en geluidseisen worden woningscheidende wanden toegepast, waarbij de constructie ontkoppeld is door middel van twee CLT wanden die van elkaar gescheiden zijn (zie ook figuur 41, linker aansluiting). Tussen de twee wanden kan ook brandwerende en akoestische beplating of isolatie geplaatst worden.

Laminated Timber Solutions (2019) heeft enkele wandpakketten geïllustreerd met daarbij de brandwerende en akoestische prestatie. Deze gegevens zijn verwerkt in tabel 17. Daaruit kan geconcludeerd worden dat de akoestische eisen van minimaal 52 dB behaald worden als er minimaal 30 mm minerale wol isolatie en aan beide wanden gipskartonplaten worden geplaatst. Dit pakket heeft een brandwerendheid van 90 minuten. Om 120 minuten te bereiken zou een tweede laag gipskartonplaat kunnen voldoen.

			
	CLT WANDEN (WONINGSCHIEDEND)	+ MINERALE WOL + GIPSKARTONPLAAT	+ MINERALE WOL + GIPSKARTONPLAAT + VOORZETWAND
Pakketdikte [mm]	230	255	305
Brandweerstand	REI 60	REI 90	REI 90
Geluidsisolatie/Rw	48 dB	56 dB	62 dB

Tabel 17. Akoestische en brandwerende prestatie bij verschillende ingrepen

5.4 Conclusie

Voor *deelvraag 2.5* is onderzocht welke oplossingen er zijn voor de brandveiligheid en de akoestiek bij houtconstructies. Voor trillingen is het belangrijk dat de constructieonderdelen ontkoppeld worden en er dempend materiaal (zoals vilt of kunststof) bij de verbindingen wordt gelegd. Uit de analyse blijkt dat de oplossingen voor brandveiligheid en geluidisolatie grotendeels overeenkomen. Met eenzelfde ingreep kunnen de Bouwbesluit eisen voor beide onderwerpen dus behaald worden. Oplossingen zijn onder andere: overdimensioneren, impregneren, isolatiemateriaal, afwerkplaten, voorzetwanden, een verlaagd plafond en een zwevende dekvloer (beton).

Een goede ingreep waarbij de wanddikte nog redelijk beperkt kan blijven is bijvoorbeeld het plaatsen van minerale wol tussen twee CLT wanden, en twee gipsvezelplaten aan de buitenzijde van elke wand. Vloeren volstaan door het toevoegen van een zwevende dekvloer wat dient als massa (voor geluidsdemping).

Hoofdstuk 6. Referentieprojecten

In dit hoofdstuk is onderzocht welke referentieprojecten er zijn binnen de houtbouw, zowel in Nederland als buitenland, en op welke manier hout daar in de constructie wordt toegepast (deelvraag 2.6).

In Nederland staan al een aantal massiefhouten gebouwen, waarvan sommigen nog in ontwerp of uitvoering zijn. In andere (buur)landen zijn al meerdere houtbouw projecten opgeleverd. Om kennis op te doen van houtbouw in de praktijk zijn vier projecten geanalyseerd; twee in Nederland en een in het buitenland. De projecten zijn geselecteerd op basis van enkele criteria: (1) houten hoofdconstructie, (2) appartementsgebouw, en (3) klimaat van buitenlandse project moet vergelijkbaar zijn met die van Nederland: (gematigd) zeeklimaat. Onder zeeklimaat vallen Duitsland, Finland, Oostenrijk en het Verenigd Koninkrijk. In tabel 18 zijn de geselecteerde projecten met een globale analyse.

	PROJECT	OMVANG	DRAAGCONSTRUCTIE
	HAUT – Amsterdam, NL - Team V architectuur - In uitvoering 2016 – 2021 - Portiek	Toren van 73 m hoog 21 lagen 55 appartementen - Commerciële ruimte in plint - Parkeren in kelder	Hybride houtbouw Massiefhouten ligger-kolomconstructie met vloeren en wanden; Betonnen kern, kelder en plint
	BSH20A Stories – Buksloterham, NL - Olaf Gipser Architects - In uitvoering 2016 – 2021 - Portiek	Toren van 45 m hoog 13 lagen 29 appartementen 6 commerciële ruimten in plint - Inpandige garage en fietsenberging in plint	Hybride houtbouw Massief houten wanden, vloeren en liggers; Betonnen kern en plint; Uitwendige staalconstructie voor buitenruimten
	Dalston Works – Londen, Verenigd Koninkrijk - Wagh Thistleton Architects - Gerealiseerd 2014 (?) – 2017 - Portiek (x5)	Complex van 34 m hoog 5 - 10 lagen 121 appartementen - Commerciële ruimten in plint - Kantoorruimten in plint en kelder	Hybride houtbouw Massief houten wanden en vloeren; Betonnen plint en kelder

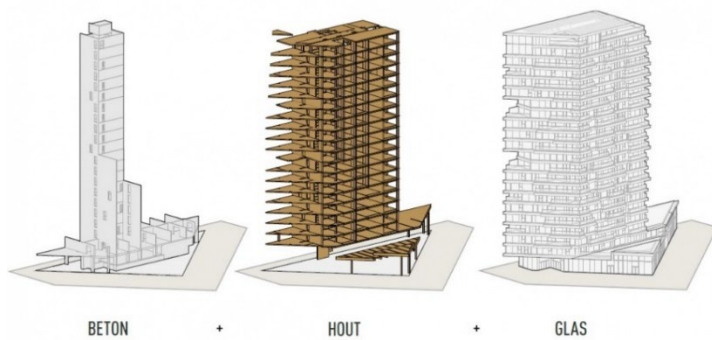
Tabel 18. Globale analyse houtbouw projecten in Nederland en buitenland

6.1 Analyse projecten

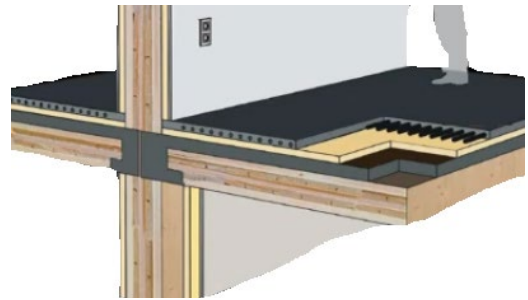
HAUT

HAUT is momenteel het hoogste hybride houten gebouw dat in Nederland gebouwd wordt. In figuur 45 is de opbouw van HAUT te zien. De constructie bestaat uit een betonnen kelder, plint en kern die voor de stabiliteit zorgt. Op de betonnen plint zit een massief houten hoofdconstructie die bestaat uit een glulam ligger-kolomconstructie in combinatie met een HBV-Decken vloer (hout-beton composiet vloer) en CLT wanden. In figuur 46 is een aansluiting te zien van de woningscheidende onderdelen.

De CLT wanden bestaan uit één massief element van circa 250-300 mm en hebben aan beide zijden een geluidsisolerende voorzetwand met brandwerende beplating. Voor de brandveiligheid zijn ook sprinklers geïnstalleerd. De vloeren werken ook constructief door de prefab beton laag en zijn akoestisch ontkoppeld. Boven op de vloer is nog een zwevende dekvloer toegepast waarin vloerverwarming is verwerkt. De vloeroverspanningen zijn 4,85 – 6,05 meter (maar met name 6 meter). Leidingwerk is geïntegreerd in de wand-vloeraansluiting (HAUT webinar 2 juli, 2020).



Figuur 45. Constructie HAUT

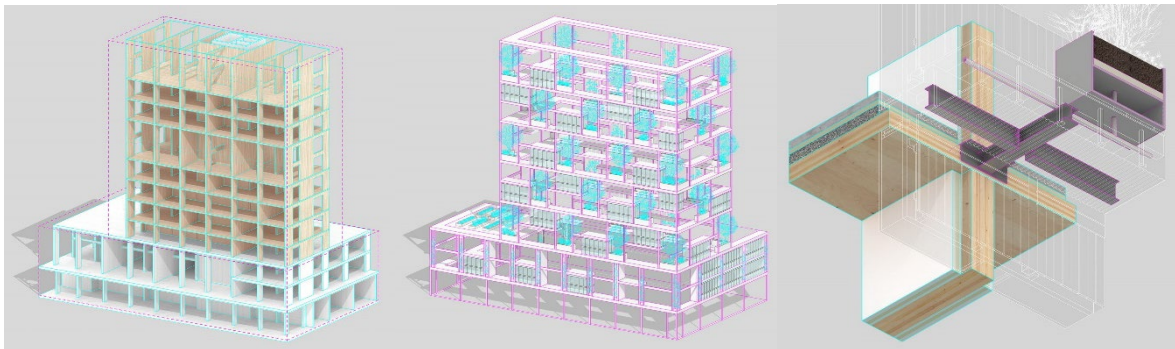


Figuur 46. Wand-vloeraansluiting HAUT

BSH20A Stories

Stories is ontstaan door een samenwerking van geïnspireerde mensen en hiervoor het CPO (Collectief Particulier Opdrachtgeverschap) BSH20A hebben gevormd. In figuur 47 is de constructie van Stories te zien. Het bestaat uit een betonnen plint van 11 meter, met daarop een constructie van glulam liggers en CLT wanden en vloeren. Het gebouw heeft een uitwendige staalconstructie die de uitstraling van het gebouw kenmerkt. Het dient voor de buitenruimten (balkons en terrassen) en wintertuin; een in de gevel verzonken binnen-buitenruimte met grote glazen schuifpanelen en plantenbakken. In figuur 48 is de aansluiting te zien van de woningscheidende wanden, vloeren en de uitwendige staalconstructie. De wanden zijn bekleed met brandwerende en geluidsisolerende gipsplaat.

De CLT vloeren hebben een zwevende dekvloer. Volgens de projectconstructeur T. Geuijen (bijlage 5) heeft de vloer meerdere steunpunten en is het vloerpakket 380mm dik: 160mm CLT, 20mm dempende laag, 100mm gestort kalksplit, 20mm dempende laag en 80 mm anhydriet dekvloer. De vloeroverspanningen zijn met name 4,5 meter, maar op sommige plekken 3,6 – 5,98 meter doordat elk appartement een unieke plattegrond heeft. (Olaf Gipser Architects, Heutink & Bouwgroep BSH20A, z.d.; Olaf Gipser Architects, z.d.)



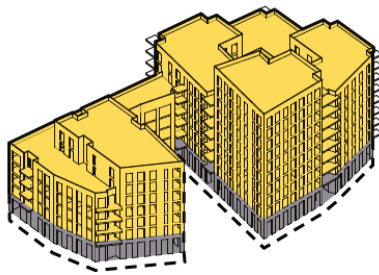
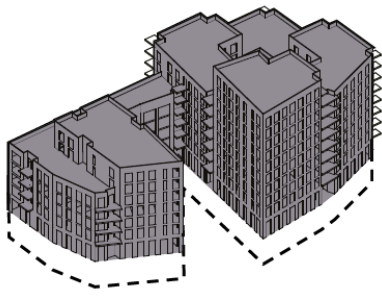
Figuur 47. Constructie Stories

Figuur 48. Aansluiting Stories

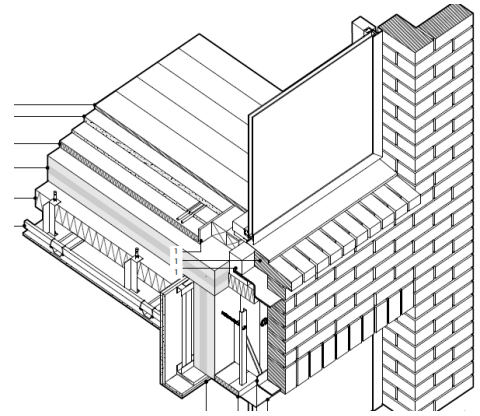
Dalston Works

's Werelds grootste CLT project is Dalston Works. Het lichte gewicht van CLT werkte bij het project Dalston Works enorm in het voordeel. De locatie gaf restricties omdat er spoorwegtunnels onder lopen, waardoor alleen een ondiepe, vlotter te maken fundering mogelijk was. In beton zou het gebouw 86 appartementen opleveren met 700 vrachtwagenleveringen voor de elementen; maar in CLT konden er drie lagen bij wat leidde tot 121 appartementen, minder fundering (wat te zien is in figuur 49) en maar 98 vrachtwagenleveringen waardoor een veel uitstoot is bespaard. Het gebouw is in 130 weken opgeleverd, waarvan 52 weken voor de houtconstructie (Waugh Thistleton Architects, 2018; Van der Lugt & Harsta, 2020).

De constructie bestaat uit een betonnen plint, waar commerciële ruimten gevestigd zijn, en daarop CLT wanden en vloeren. In figuur 50 is een detail te zien. Op de 100mm CLT vloer zit akoestische isolatie en een zwevende dekvloer met vloerverwarming. Onder de CLT vloer zit een verlaagd plafond bestaande uit 50mm minerale wol isolatie en 12,5mm gipsplaat. De CLT wanden zijn 140mm dik en hebben een voorzetwand constructie met twee gipsplaten, voor de brandveiligheid en akoestiek (Waugh Thistleton Architects & Architecture Today, 2017).



Figuur 49. Dalston Works in beton vs. CLT: stippellijn geeft aan hoeveel minder fundering nodig was



Figuur 50. Detail Dalston Works

6.2 Conclusie

Uit het referentieonderzoek (*deelvraag 2.6*) kan geconcludeerd worden dat in de praktijk: er commerciële en/of openbare plinten aanwezig zijn en in beton zijn uitgevoerd; bij de 'slanke' woontorens in Nederland een betonnen kern nodig is voor de stabiliteit en in het grote project in Londen alles boven de plint van CLT is; woningscheidende wand uit één CLT wand bestaat en is afgewerkt met akoestische en brandwerende beplating (gipsplaat); de vloer van hout-beton composiet is (HBV Decken) of een CLT vloer met een zwevende dekvloer en geluiddempend materiaal; in HAUT en Stories wordt de onderkant van de CLT vloer in zicht gelaten, waar bij Dalston Works een verlaagd plafond zit; brandwerendheid en akoestiek zijn opgelost door bijvoorbeeld gipskartonplaat, isolatie (minerale wol), een voorzetwand, een zwevende dekvloer, een verlaagd plafond en/of sprinklers.

Daarbij kan ook geconcludeerd worden dat Dalston Works efficiënter gerealiseerd kon worden doordat hout licht is: minder (zwaar) fundering en bovenop spoorwegtunnels, drie extra lagen en daardoor 35 extra appartementen ten opzichte van het gebouw in beton.

Hoofdstuk 7. Hulpmiddel voor ontwerpers

In dit hoofdstuk is onderzocht hoe de verschillende bevindingen samenkomen tot een overzicht om toegepast te kunnen worden door een ontwerper (deelvraag 3.1), of de oplossing bruikbaar is binnen Atelier PRO (deelvraag 3.2), wat externe experts vinden van de bedachte oplossing (deelvraag 3.3) en hoe een appartement van Atelier PRO eruitziet als de hoofdconstructie in hout is (deelvraag 3.4).

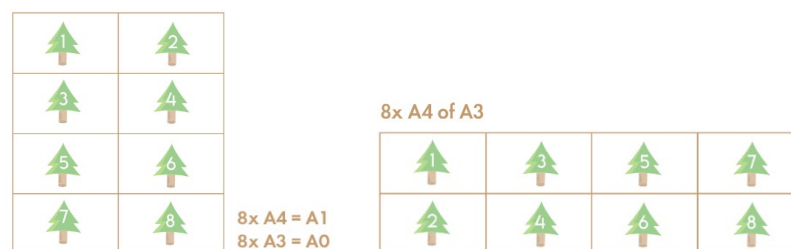
7.1 Eindproduct

De verschillende bevindingen, overzichten en conclusies uit het onderzoek zijn gebruikt om tot een eindproduct te komen die architecten en ontwerpers kunnen gebruiken. Het eindproduct heeft de vorm van een overzichtsboekje van A4 bladen. Het overzicht heeft een soortgelijke indeling als de hoofdstukvolgorde van het onderzoek; van grof naar fijn, van algemene informatie over hout en klimaatvoordelen naar bouwkundige ontwerprichtlijnen. Elk blad heeft een eigen onderwerp en bevat compact de belangrijkste informatie.

Het overzicht is opgesteld en vormgegeven met een bepaalde gedachtegang, ook wel criteria: het moet een krachtige naam hebben waardoor ontwerpers eenduidig ernaar kunnen verwijzen; het moet prettig leesbaar zijn; het moet serieus en rustig ogen maar wel een speels karakter hebben wat de aandacht erbij houdt en plezier geeft in het onderwerp; de bladen moeten een goede balans hebben tussen tekst en figuur, waarbij tekst met name in de oriëntatiefase van belang is en figuren vooral handig zijn om de ontwerpfase te ondersteunen; de toegevoegde informatie moet tot de kern blijven; in het overzicht moet te herleiden zijn waar de gebruikte figuren vandaan komen; voor gedetailleerde informatie moeten handige handleidingen aanbevolen worden (die tijdens het onderzoek gevonden en/of gebruikt zijn).

Om de samenhang tussen de verschillende bladen duidelijk te maken, en hoe het AHBO gebruikt kan worden, is er een soort stappenplan gecreëerd. De gebruikshandleiding en inhoudsopgave zijn gecombineerd om compact en tot de kern te blijven. Hierin is ook vermeld in welke volgorde/fase elk blad het beste te gebruiken is. Hieruit voortgekomen is De AHBO-kit: Architecten HoutBouw Overzicht, bestaande uit negen bladzijden, met daarin: 1) voorblad, 2) gebruikshandleiding met inhoudsopgave, 3) voordelen, 4) aandachtspunten, 5) hout & bouwmethoden, 6) hybride bouw & vloeren, 7) aansluitingen, 8) brand & geluid en 9) bronnenlijst

Het AHBO is ontworpen op A4 (of A3) formaat om tijdens het ontwerpproces zowel het digitaal als uitgeprint er bij te kunnen houden. Daarnaast is het zodanig opgemaakt dat alle uitgeprinte bladen ook als poster kunnen worden opgehangen. Het is zowel samen te stellen door ontwerpers die alleen over een A4 en A3 printer beschikken, als ontwerpers die het geheel op een A1 (of A0) willen afdrukken. In figuur 51 is te zien hoe de losse bladen kunnen worden opgehangen (wat tevens ook op de laatste overzichtsbladzijde is vermeld). Het totale AHBO is op de volgende bladzijde bijgevoegd. De AHBO poster is in bijlage 9 op ware grootte te zien.



Figuur 51. Hoe het AHBO als poster kan worden opgehangen

7.2 Validatie

Interne validatie Atelier PRO

Voor de interne validatie van het eindproduct is aan een partner-architecten van Atelier PRO gevraagd wat hij van het product vindt; of het helder is hoe het product gebruikt kan worden, of het bruikbaar is binnen het bureau, wat het mist en overige feedback. In bijlage 10 is de volledige beoordeling te vinden.

Het AHBO is volgens hem exact hetgeen dat hij miste en zeker bruikbaar. Voor hem zitten hier alle basis-ingrediënten om een houtbouw project op te starten, en ook opdrachtgevers mee te kunnen nemen in het verhaal, zonder in de diepte te hoeven duiken. Hij vindt de grafische opmaak erg fijn, al mist er voor hem een klein overzicht die op elk blad te vinden is.



De AHBO-kit:

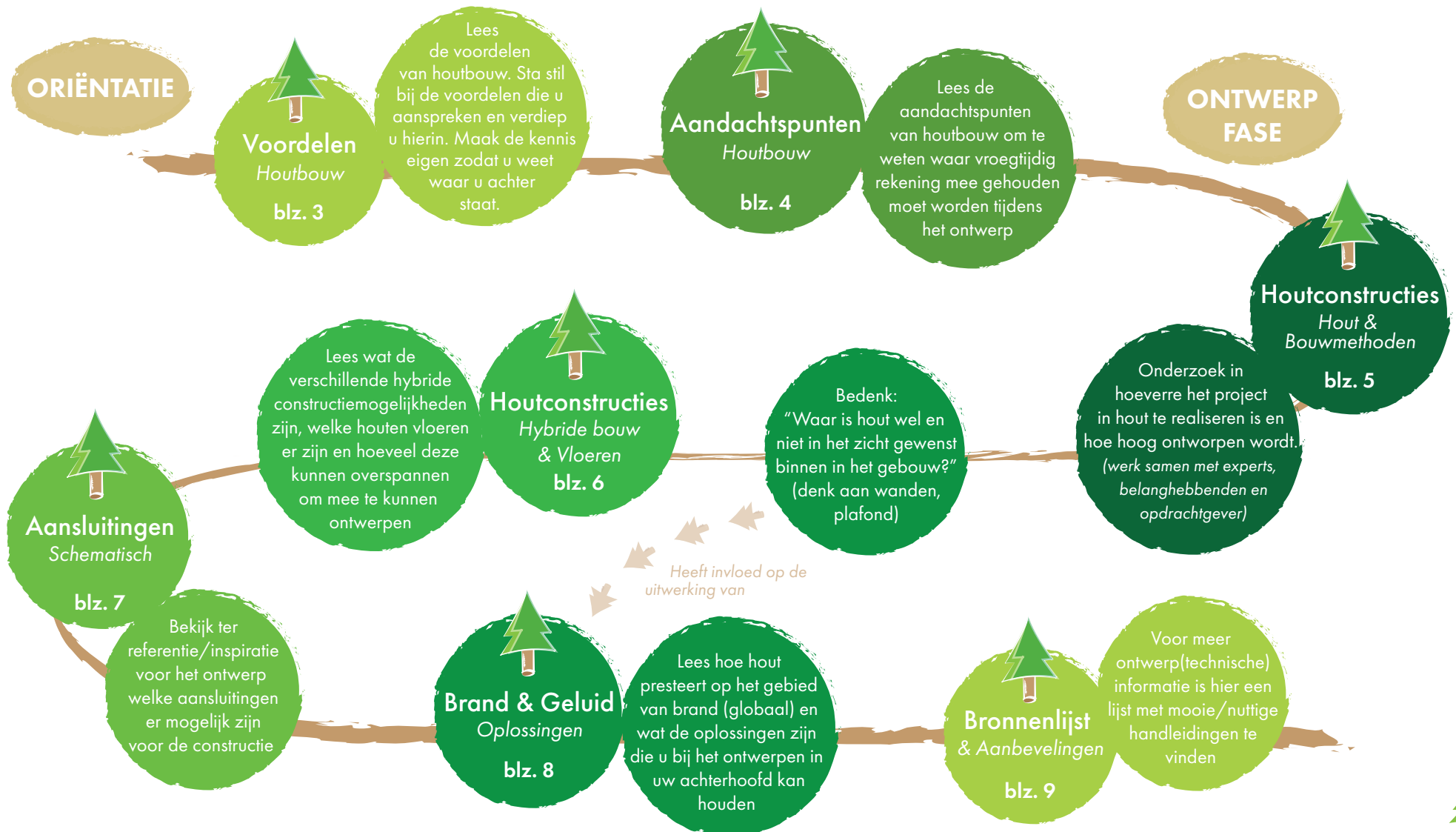
Architecten HoutBouw Overzicht

INLEIDEND BLAD

GEBRUIKSHANDLEIDING & INHOUDSOPGAVE

Voor u ligt de Architecten HoutBouw Overzicht, het eindresultaat van Karina's afstudeeronderzoek. Dit overzicht is gericht op het **ontwerpen van (massief) houten hoofddragconstructies van appartementen**. De AHBO heeft als doel architecten en ontwerpers basis handvaten te geven om meer met hout te kunnen ontwerpen en realiseren. **Het streven: zoveel mogelijk hout toepassen waar dat kan!**

Bij elk project kan overwogen worden of een gebouw met houtbouw realiseerbaar is, of welke onderdelen wel in hout kunnen. In het **stappenplan hieronder** is te zien hoe de AHBO doorlopen kan worden (*dit is een richtlijn*). U kunt dit document zowel digitaal als geprint gebruiken. Op papier kunt u het als **boekje** naast zich houden of op kantoor als **poster** ophangen. Op blz. 9 zijn impressies te zien van hoe het als poster kan worden opgehangen.



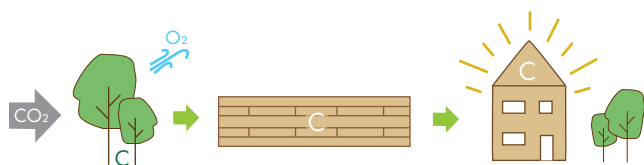
INFORMATIE BLAD VOORDELEN HOUTBOUW

← figurennummering voor bronvermelding, blz. 9

3A

CO₂ opslag

1 m³ hout = ca. 1 ton CO₂



3B

Positieve bijdrage klimaat

- Hout is een **natuurlijk** materiaal en **milieuvriendelijk**
- Meer vraag naar hout = meer bomen planten
- Draagt bij aan behalen van **klimaatdoelen** en *Sustainable Development Goals (SDG)*:



Circulair

Na gebruiksduur/sloop van een gebouw kunnen de houten elementen op verschillende manieren worden **hergebruikt**. Daarbij is het een **hernieuwbaar** materiaal: het groeit en is onderdeel van de natuur.

Licht in gewicht

Constructiehout heeft een licht gewicht van **circa 450 tot 650 kg/m³**, afhankelijk van de houtsoort. Hierdoor volstaat onder andere een lichtere fundering.

**projectafhankelijk*

Prefabricage en kwaliteitsborging

Houtbouw elementen zijn geprefabriceerd in de fabriek en krijgen hierdoor een hoogwaardige kwaliteit. Hout is **makkelijk te bewerken**. In de fabriek kan ruimte voor leidingen en kabels gefreesd worden. **Bouwafval is minimaal** door de maatwerk en prefabricage.

Aardbevingsbestendig

Hout is licht en kan schokken en bevingen goed absorberen. Onder belasting zal hout verbuigen en minder snel breken. Hierom is het veelal aardbevingsbestendig.

Lange levensduur

Een gebouw in hout gaat net als met andere bouwmethoden lang mee; wel een paar honderd jaar (met goed onderhoud)

Minder stikstofuitstoot

Circulair bouwen = minder stikstofuitstoot
Het lichte gewicht van hout leidt tot:

- Lichtere/elektrische kraan voor het tillen van elementen in tegenstelling tot een zware dieselkranen met meer uitstoot
- Lichtere fundering = minder beton en minder zwaar graafwerk
- Op een vrachtwagen kan meer vervoerd worden waardoor vrachtverkeer/aantal verkeersbewegingen minder wordt

**projectafhankelijk*

Goed isolerend vermogen

Hout is goed isolerend. Het heeft een lage warmtegeleidingscoëfficiënt (λ) van circa 0,13 W/m · K, wat gunstig is bij koude bruggen of een energiezuinige woning.

Gezondheid en comfort

Door de warme, natuurlijke uitstraling en werking heeft hout invloed op zowel de lichamelijke als geestelijke gezondheid: het bevordert het welzijn. Kijken naar de houtstructuur kan productiviteit verhogen, werkt **stressverlagend** en helpt tegen depressieve gevoelens. Daarbij draagt hout bij aan comfort door de hoge contacttemperatuur en **vochtregulerende** karakter. Ook wekt het weinig allergische reacties op (hypoallergeen).

OVERZICHTS BLAD

AANDACHTSPUNTEN

HOUTBOUW

Sterkte en stabiliteit

De dragende eigenschappen van hout worden onder andere beïnvloed door de richting van de houtvezels en het vochtgehalte. Hout is in de richting van de vezels namelijk sterker dan loodrecht op de vezels. Dit vraagt vaak extra aandacht voor details.

Bij hoogbouw wordt vaak voor een hybride bouwwijze gekozen waarbij hout en beton (of staal) worden gecombineerd. Dit heeft met name te maken met de stevigheid en stabiliteit bij weersinvloeden (wind), door het lichte gewicht van hout.

Zie blad 5

Kosten

Massieve houtbouw leidt tot circa 10% hogere kosten dan bouwen met andere materialen, maar dit percentage hangt ook af van de manier waarop de kosten worden berekend. Vaak is geen rekening gehouden met kostenbesparingen in bijvoorbeeld de fundering (door licht gewicht hout) en kortere materieelhuur door snelle montagetijd (zoals steigers en kranen).

Gevelmateriaal

Materialen als baksteen, ClickBrick, hout, steenstrips, pleisterwerk en plaatbekleding zijn goed te combineren met houtbouw. Van baksteen zou onderzocht moeten worden tot hoeveel lagen het geschikt is door het gewicht. In het project Dalston Works is het tot tien lagen gelukt (CLT lagen met plint van beton).

Korte montagetijd

Houtbouw is een prefab bouwmethode waardoor de constructie op de bouwplaats snel (droog) kan worden opgebouwd. Dit hangt wel af van de projectgrootte.

Samenwerking met experts

Geadviseerd wordt om experts in houtbouw vroeg in het ontwerpproces te betrekken voor een goed projectverloop en advisering. Denk aan een houtleverancier, constructeur, bouwfysisch adviseur en installateur.

Kruip en vocht

Wees bij hout bewust van het optreden van kruip: de toenemende vervorming van een materiaal bij een aanhoudende belasting (ongewenst). Een constructeur kan hier het beste aan rekenen. Een grote vochtgehalte zorgt dat houtvezels verweken, waardoor de sterkte vermindert. Voor naaldhout wordt uitgegaan van een gemiddeld vochtgehalte van maximaal 12% (klimaatklasse 1).

4A

Uitkragingen

Als richtlijn kan genomen worden dat een uitkragende, doorgaande vloer **maximaal 2 meter kan uitsteken**, omdat de vloer niet voldoende stijf is bij grotere uitkragingen. Om (grotere) uitkragingen te realiseren kan er een **uitwendige constructie** gemaakt worden van kolommen en balken die de balkon- en of galerijplaten dragen (zoals ook bij andere bouwmethoden gedaan wordt).



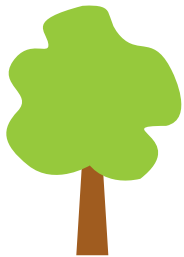
OVERZICHTS BLAD

HOUTCONSTRUCTIES

HOUT & BOUWMETHODEN

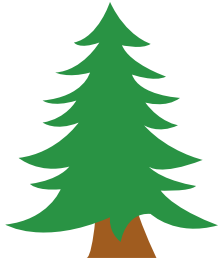
5A

HOUT KENMERKEN



Loofhout (hardhout)

- Bladeren vallen
- Groeit langzamer
- Groter gewicht
(ca. 650-1100 kg/m³)
- Hogere druk- en treksterkte
- Bijv. eiken, beuken, azobé, mahonie
- O.a. gevel en kozijn

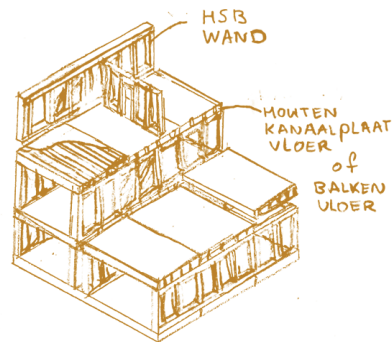


Naaldhout (zachthout)

- Bladeren vallen niet
- Groeit sneller
- Lager gewicht
(ca. 450-650 kg/m³)
- Lagere druk- en treksterkte
- Bijv. vuren, grenen, lariks, oregon pine
- **Constructiehout**

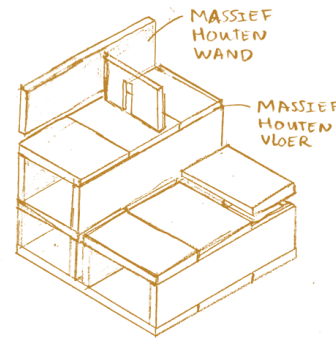
5B

HOUTBOUWMETHODEN



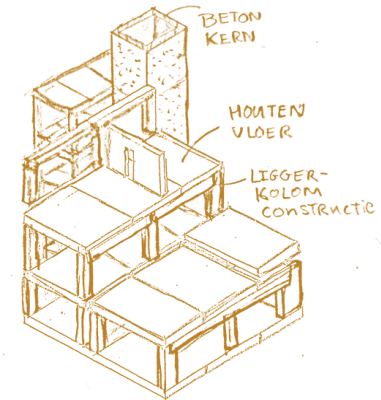
HOUTSKELETBOUW

HSB wand-vloerconstructies bestaande uit: wanden van stijl- en regelwerk, isolatie en afwerkplaten; houten kanaalplaat vloer of balkenvloeren (daartussen isolatie) met daarop plaatmateriaal. Stabiliteit ontleend aan totaal aan verbonden elementen.



MASSIEVE HOUTBOUW

Wand-vloerconstructies van massief houten /CLT elementen (kruislaaghout cross-laminated timber). Stabieler dan HSB door de massieve draagstructuur en gekruiste, verlijmden lagen van de houten elementen.



HYBRIDE BOUW

Combineren van bouwmethoden om de hoofd-draagconstructie van een gebouw te realiseren. Als basis vaak een constructie van gelamineerde houten (glulam) liggers en kolommen en/of houten vloeren en wanden. Gecombineerd met bijvoorbeeld beton- of staalconstructies.

Zie ook 6A

MAATGEVENDE BELASTING

GEBOUWVORM	Kelder	Laagbouw	Verdiepingbouw	Hoogbouw
LAGEN	Ondergronds	1 of 2 lagen	3 of 4 lagen	+4 lagen
MAATGEVENDE BELASTING	Grond- en waterdruk	Regen- en sneeuwbelasting	Vloerbelasting	Windbelasting



RICHTLIJN AANTAL TE BOUWEN LAGEN

	HOUTSKELETBOUW	MASSIEVE HOUTBOUW	HYBRIDE BOUW
MAXIMAAL AANTAL LAGEN	Ca. 4 - 6 lagen	Ca. 10 lagen	Ca. 21 lagen
MAATGEVENDE BELASTING	Vloerbelasting	Windbelasting	Windbelasting

OVERZICHTS BLAD

HOUTCONSTRUCTIES

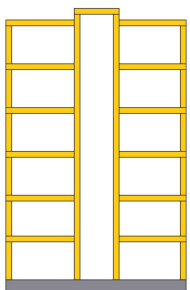
HYBRIDE BOUW & VLOEREN

6A

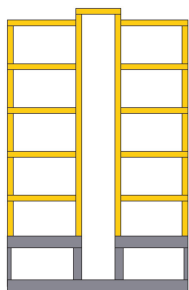
VARIANTEN HYBRIDE BOUW

Veelvoorkomende varianten van hybride houten constructies met beton:

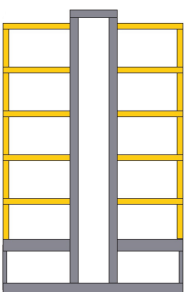
- o Betonnen plint; vaak voor commerciële ruimten, kantoren en/of parkeergarage. Scheiden van de appartementen/verschillende functies ook voor brand- en geluidseisen
- o Betonnen kern; vooral voor stabiliteit hoogbouw
- o Betonnen vloeren op bovenste verdiepingvloeren; voor stabiliteit hoogbouw



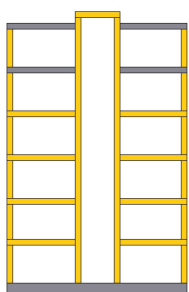
Volledig houten constructie



Houten constructie op betonnen basisplint



Houten constructie op betonnen basisplint, met betonnen kern



Houten constructie met betonnen vloeren op bovenste verdiepingen

6B

SOORTEN HOUTEN VLOEREN

CLT

Opgebouwd uit kruislings gelamineerde houten planken



KERTO-RIPA

Opgebouwd uit LVL platen (laminated veneer lumber)



LIGNATUR

Opgebouwd houten planken die met elkaar verlijmd zijn



HBV DECKEN

Holz-Beton-Verbund; Compleet prefab element van CLT en daarop beton



VERGELIJKING VAN VLOEREN

	CLT	KERTO-RIPA T	KERTO-RIPA BOX	LIGNATUR	HBV
Max. lengte [m]	25	20	20	16	10,2
Breedten [m]	max. 4,5	2,4 (0,6 - 2,5*)	2,4 (0,6 - 2,5*)	1,0	2,5 - 3,0
Dikten/hoogten [mm]	60 - 500	100 - 600	100 - 600	90 - 480	max. 320
Max. overspanning [m]	7	8,8	10,2	10	7,90
Dikte bij max. overspanning [mm]	240	630	660	480	320
Dikte bij overspanning van ca. 5 meter	5 m: 170 mm	5,6 m**: 330 mm	5,8 m**: 260 mm	5 m: 180 mm	5,45 m**: 200 mm
Gunstig	Massa/geluid Vloerdikte Kleine leidingen	Overspanning Isolatie Leidingen	Overspanning Isolatie Leidingen	Overspanning Isolatie Akoestiek	Massa/geluid Vloerdikte
Minder gunstig	Lagere overspanning	Contactgeluid Vloerdikte	Contactgeluid Vloerdikte	Contactgeluid Vloerdikte	Installaties/ leidingen
Vergelijkingscore voor appartementen	+	-	-	+/-	+

Conclusie: CLT en HBV-Decke zijn meest geschikt voor appartementen

*Optioneel naast standaardbreedte
**Tabel geeft dit als laagste waarde

REFERENTIE BLAD

AANSLUITINGEN

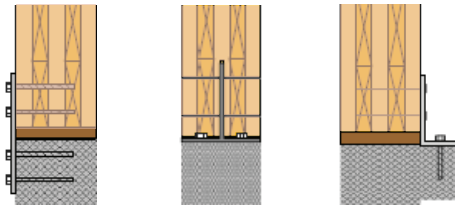
SCHEMATISCH

Om meer een beeld te krijgen van basisaansluitingen en mogelijkheden zijn op dit blad enkele opties weergegeven. Er zijn veel aansluitingen mogelijk en hiervoor bestaan mooie handleidingen (design manuals) met technische details. Zie blad 9 voor de aanbevolen manuals.

7A

WAND-BETON AANSLUITING

Staalprofielen



Plaat

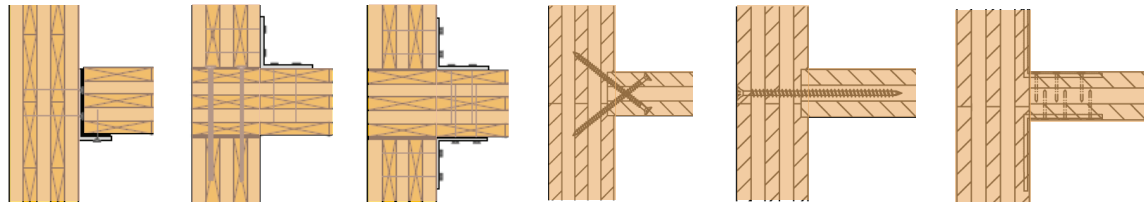
Schoen
(ook mogelijke met
houten verdiepingsvloer)

Beugel

7B

VLOER-WAND AANSLUITING

Schroeven en staalprofielen



Oplegging met
L-profiel

Wandoplegging
met schroeven en
hoekverbinder

Wandoplegging
met hoekverbinders

Stootverbinding
met uitgespaarde
hoekverbinders

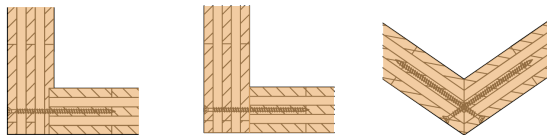
Uitgespaarde stoot-
verbinding met schroeven
onder een hoek

Uitgespaarde stoot-
verbinding met
schroeven loodrecht

7C

WAND-WAND AANSLUITING

Schroeven



Uitgespaarde
wandverbinding

Loodrechte
stootverbinding

Schuine
stootverbinding

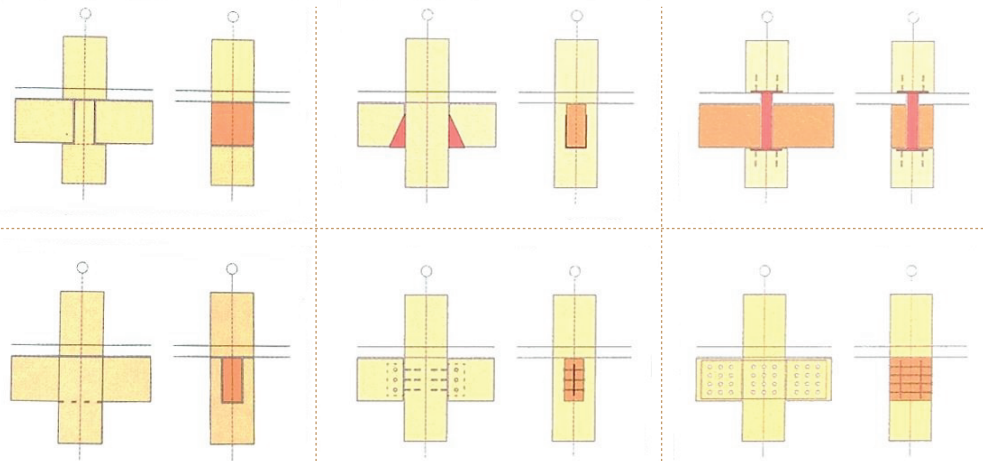
7E

LIGGER-KOLOM AANSLUITING

Opstapeling
Beperkte capaciteit

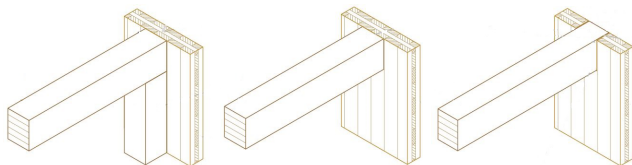
Simpele staalverbindingen
Middelmatige capaciteit

Verbeterde staalverbindingen
Hoge capaciteit



7D

LIGGER-WAND AANSLUITING



Liggend op een kolom

Hangend aan de wand

Op uitsparing in de wand

BOUWFYSISCH BLAD BRAND & GELUID OPLOSSINGEN

BRAND

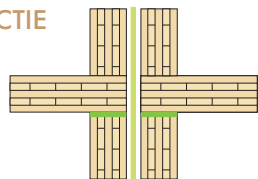
Het brandgedrag van hout is voorspelbaar; er treed namelijk carbonisatie op. De meeste houtsoorten hebben brandklasse D, en zwaardere houtsoorten klasse C. Bij een brandcompartiment wordt klasse D of hoger vereist, en bij trappenhuisen klasse B. Hierom moeten er maatregelen genomen worden (zie vlak 8C en 8D). CLT dat onafgewerkt/niet geïmpregneerd is heeft brandklasse D-s2-d0:

D = goed brandbaar
s2 = ondoorzichtige rook productie (smoke)
d0 = geen brandende of hete druppel vorming (droplet)

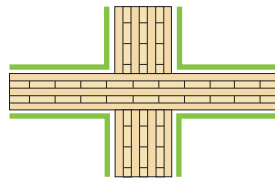


8B

CONSTRUCTIE



Of



Ontkoppelen van constructie, isoleren en dempend vilt tussen onderdelen

Doos-in-doos door alle zijden te isoleren en af te werken

8D

WAND OPLOSSINGEN

✓ = oplossing voor [...]
+/- = afhankelijk van de uitvoering



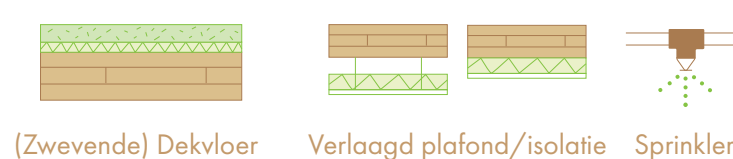
BRANDVEILIGHEID

AKOESTIEK

HOUT IN ZICHT



VLOER OPLOSSINGEN



8A

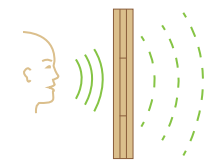
GELUID

Hout is licht, waardoor het sneller trilt. Bij appartementen is belangrijk dat de ene bewoner niet de vloer van de ander voelt trillen als er op gelopen wordt. Om trillingen in de constructie te verminderen wordt ook geadviseerd om constructieonderdelen te ontkoppelen (zie 8B).

Voor vloeren wordt een met name een dekvloer geadviseerd omdat dit de meeste massa creëert. Daarbij leggen bewoners vaak nog een vloerafwerking. Met een dekvloer kan er nog wel naar een houten plafond gekeken worden.

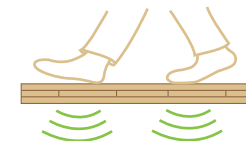
Een enkele CLT wand van 100 mm dik heeft een luchtgeluidsweerstand (Rw) van circa 34 dB. Dit voldoet niet aan het minimum van 52 dB en hiervoor zijn oplossingen als isolatie en gipskartonplaat geschikt (zie 8C en 8D).

Luchtgeluid



Eis: Rw/isolatie min. 52 dB

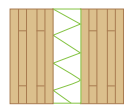
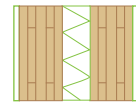
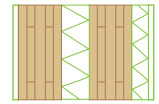
Contactgeluid



Eis: Lw/ niveau max. 54 dB

8C

VERGELIJKING WANDPAKKETTEN

			
	CLT WANDEN (WONINGSCHIEDEND)	+ MINERALE WOL + GIPSKARTONPLAAT	+ MINERALE WOL + GIPSKARTONPLAAT + VOORZETWAND
Pakketdikte [mm]	230	255	305
Brandweerstand	REI 60	REI 90	REI 90
Geluidsisolatie/Rw	48 dB	56 dB	62 dB

AFSLUITEND BLAD BRONNENLIJST & AANBEVELINGEN

BRONNENLIJST VAN FIGUREN

Sommige figuren zijn direct overgenomen van de bron; of volledig ontworpen en geïllustreerd door K. Sultan; of zijn afgeleid/geïnspireerd vanuit een bron en puur voor de huisstijl van de AHBO anders geïllustreerd (door K. Sultan). De bronnen per blad- en figuurnummer:

BLAD 3 | Voordelen - Houtbouw

- 3A Geïllustreerd door K. Sultan o.b.v. "Lignatuur werkboek 2014-1"
- 3B SDG Nederland

BLAD 4 | Aandachtspunten - Houtbouw

- 4A "Balconies and CLT" - Urban

BLAD 5 | Houtconstructies - Hout & Bouwmethoden

- 5A Geïllustreerd door K. Sultan
- 5B Handgetekend door K. Sultan

BLAD 6 | Houtconstructies - Hybride bouw & Vloeren

- 6A "Bouwen met CLT – zes lessen uit de praktijk van Urban Climate Architects" - Architectenweb
- 6B V.l.n.r. "Cross Laminated Timber" - Technology in Architecture; MetsäWood; LIGNATUR; MMK Holz-Beton-Fertigteile

BLAD 7 | Aansluitingen - Schematisch

- 7A "Canadian CLT Handbook" - FPIInnovations (2019)
- 7B Zie bron 7A en 7C
- 7C "DERIX_X_Lam_Brosch_NL_2020_02_WEB" - Derix (2020)
- 7D "02 Technical Folder Stora Enso Building Solutions CLT" - Stora Enso (2015)
- 7E "Tomorrow's Timber" - Van der Lugt & Harsta (2020), illustratie door adviesbureau Lünig

BLAD 8 | Brand & Geluid - Oplossingen

- 8A Geïllustreerd door K. Sultan o.b.v. "Soundproofing for CLT by Stora Enso" - Stora Enso (2020)
- 8B Geïllustreerd door K. Sultan o.b.v. "Tomorrow's Timber" - Van der Lugt & Harsta (2020)
- 8C Geïllustreerd door K. Sultan o.b.v. "Ontwerpen met CLT - Technische handleiding 2019" - Laminated Timber Solutions (2019)
- 8D Geïllustreerd door K. Sultan

DE AHBO ALS POSTER

Op A4 prettig mee te nemen
Op A3 prettiger leesbaar
(met name als poster)

8x A4 = A1
8x A3 = A0

8x A4 of A3



AANBEVOLEN TECHNISCHE/DESIGN MANUALS

Stora Enso:

- Building Systems by Stora Enso - Residential Multi-storey Buildings (2016)
- 02 Technical Folder Stora Enso Building Solutions CLT (2012/2015)
- Building Systems by Stora Enso - 3 – 8 Storey Modular Element buildings (2016)

KLH:

- Component Catalogue for Multi-storey Residential Buildings (2012)
- Component Catalogue for Cross Laminated Timber Structures (2012)

FPIInnovations: Canadian CLT Handbook (2019)

Laminated Timber Solutions: Ontwerpen met CLT - Technische handleiding 2019

Waugh Thistleton Architects: 100 Projects UK CLT (2018)

Swan Housing Association & Waugh Thistleton Architects: NU Build Modular Design Guide (2019)



Externe validatie door experts

Experts uit de beroepspraktijk, die ervaring hebben met houtbouw, zijn gevraagd om het eindproduct te valideren en beoordelen door middel van een vragenlijst. De gevraagde experts zijn een architect van Team V Architectuur, een projectleider van Mecanoo architecten en een houtconstructeur van Constructie Adviesbureau Geuijen.

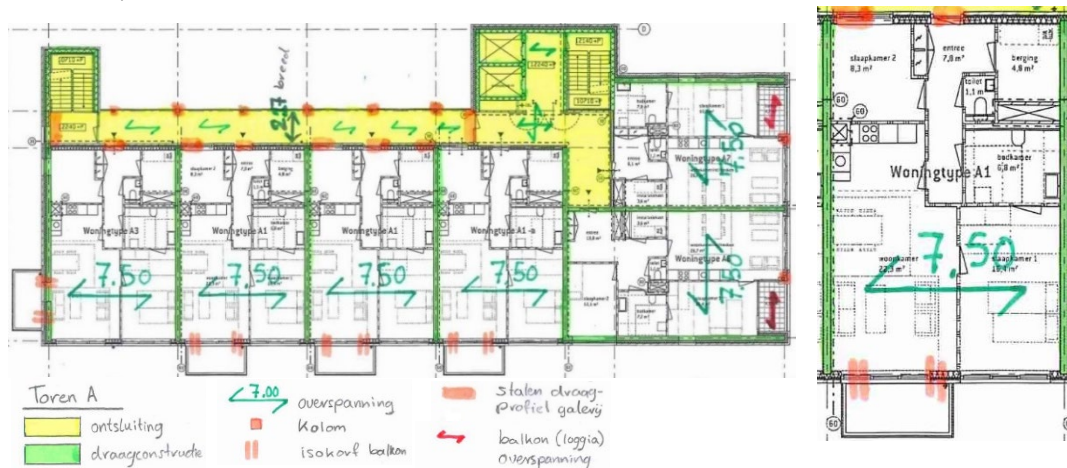
In bijlage 11 zijn de volledige beoordelingen te vinden. De experts vinden allemaal dat het product helder is opgebouwd, leuk vormgegeven en dus ook eenvoudig te gebruiken. Volgens hen is het heel bruikbaar voor zowel architecten als adviseurs, aannemers en/of opdrachtgevers die weinig tot geen kennis hebben van houtbouw. De constructie expert vindt dat de constructieve aspecten inhoudelijk goed en in de juiste volgorde zijn behandeld.

Wel geven de experts aan dat er bepaalde aanvullingen nodig zijn. Zo bestaan er glulam producten van loofhout; wordt er gewenst om ook voor wanden en ligger-kolomconstructies verschillende soorten te zien zoals voor vloeren is gedaan; mag er beter benadrukt worden dat houtbouw vormgevers juist veel mogelijkheden geeft in de vorm van het gebouw en ook nieuwe mogelijkheden geeft tot circulair en demontabel bouwen.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat het overzicht grotendeels valide is, maar zou het AHBO nog aangevuld kunnen worden met de informatie van de experts.

7.3 Toetsing op casus

Het eindproduct wordt getoetst op een casus: een appartement van Atelier PRO, uit de analyse in hoofdstuk 3. Hiervoor is toren A gekozen van het appartementencomplex Kop van het Dok: een galerijtoeren van dertien lagen met een stramienmaat van 7,5 meter. In figuur 52 is de casus, toren A, te zien en uitvergroott het appartement wat getoetst wordt.



Figuur 52. Toetsingscasus Kop van het Dok - Toren A en appartement

De totale hoofd draagconstructie van de toren wordt globaal benoemd, waarna een appartement specifieker wordt uitgewerkt. Voor de toetsing wordt ook het AHBO stappenplan gevolgd. Van het stappenplan wordt de oriëntatiefase overgeslagen omdat de casus al ontworpen is en alleen ontwerp technisch wordt omgezet naar hout. De toren heeft dertien lagen. Bij hoogbouw is windbelasting maatgevend en boven tien lagen wordt hierom ook een hybride bouwconstructie geadviseerd. De toren zal bestaan uit een combinatie van CLT wanden en vloeren voor de appartementen en betonnen trap- en liftkernen die voor de stabiliteit zorgen (en ook voldoen aan 90 minuten brandwerendheid).

De huidige prefab betonnen galerij heeft een uitwendige constructie van prefab betonnen kolommen en stalen hoekprofielen aan de gevel. De betonnen galerijplaten worden vervangen door CLT platen, die een minder grote koudebrug vormen en goed aan te sluiten zijn op de CLT vloeren. De CLT galerijplaten worden enerzijds gedragen door glulam liggers die bevestigd is aan de CLT wanden. De kolommen voor de galerij zullen van massief hout (glulam) zijn, maar naar verwachting zullen de kolommen iets meer ruimte in beslag nemen. Er wordt aangenomen dat hout niet in het zicht gewenst wordt bij de wanden en de vloer, omdat bewoners vaak een vloerbedekking leggen en zo ook de vrijheid hebben wanden te verven of behangen.

Aan het plafond wordt vaak niks gedaan dus hier zal het hout in zicht blijven om toch het gevoel te geven dat men in een houten gebouw leeft. Waar wel en niet hout in het zicht blijft heeft invloed op de uitwerking van brandveiligheid en akoestiek.

De bruto verdiepingshoogte is 3060mm en de vloeroverspanning is 7,5 meter. Het huidige vloerpakket is 350mm dik: 250mm breedplaatvloer en 100mm afwerking. Voor de vloer van een appartement zijn CLT en HBV-Decken het meest geschikt. Het voordeel van CLT is dat ruimte voor elektrische installaties gefreesd kan worden en met de daarop komende dekvloer ook meegestort; de maximale overspanning van CLT op twee steunpunten is 7 meter, bij een dikte van 240mm. Een HBV-Decken vloer kan zelfs 7,6 meter overspannen met 300mm dikte.

Er wordt gekozen voor een HBV vloer omdat hiermee de overspanning van 7,5 meter bereikt kan worden zonder grote ontwerpaanpassingen te doen. De HBV vloer is 50mm minder dik dan het huidige vloerpakket. Wel zal er waarschijnlijk nog een dekvloer op komen van 50mm waardoor de vloerdikte, en dus ook de bruto verdiepingshoogte, soortgelijk zal zijn. De HBV vloer bestaat uit 180 mm CLT en 120 mm constructief prefab beton. Door de beton laag voldoet de vloer aan de geluidseisen: een 20mm minder dikke vloer heeft al een R_w van 64 dB (moest minimaal 52 dB zijn) en een L_w van 47 dB (moest maximaal 54 dB zijn). Ook kan de vloer voldoen aan de brandwerendheidseis van 90 minuten (MMK Holz-Beton-Fertigteile, z.d.).

De woningscheidende wanden zijn nu 250mm dik. Dit wordt omgezet naar twee CLT wanden van 100mm met daartussen 30mm minerale wol en 12,5mm gipskartonplaat aan beide wanden. Het totale wandpakket is dan 255 mm waarbij een brandwerendheid van 90 minuten en een R_w van 56 dB wordt bereikt. De 100mm CLT wand is gebaseerd op de wandpakketvergelijking, en dus niet constructief berekend voor de casus. Het wandpakket zal dus wellicht dikker zijn dan 255 mm. Dit zal leiden tot minder vloeroppervlak. In het plattegrond staan gestippelde vierkantjes (matjes) die minimaal in de ruimten moeten passen. Hieruit wordt geconcludeerd dat een iets grotere wanddikte mogelijk is. De aansluiting tussen de wanden en vloeren wordt akoestisch ontkoppeld door dempend vilt.

De balkon zit niet in dezelfde overspanningsrichting als de vloeren. Dit heeft consequenties voor het ontwerp, namelijk dat er een uitwendige, stalen ophangconstructie nodig is die het gewicht van de CLT balkonvloer naar de gevel afdraagt. De huidige gevelwanden zijn van HSB en die zullen in het nieuwe houtbouw ontwerp ook zo blijven omdat HSB goedkoper is.

Uit deze toetsing kan geconcludeerd worden dat het appartementencomplex Kop van het Dok goed met houtbouw te maken is waarbij ook de brandveiligheids- en geluidseisen voldoen. Er zullen wel enkele consequenties zijn aan het ontwerp, maar deze passen wel binnen de ontwerpmaten. Deze consequenties zijn: de uitwendige ophangconstructie van de balkons en liggers voor de galerij (wat esthetisch eerst niet aanwezig was), een iets kleinere verdiepingshoogte en een iets minder vloeroppervlak.

Voor de toetsing kon het ontwerpstappenplan grotendeels goed gevolgd worden. Maar om technische informatie te gebruiken die voor een casus relevant is moesten productbrochures geraadpleegd worden. Het AHBO zou als aanvulling bepaalde verwijzingen naar leveranciers nodig kunnen hebben, maar het AHBO is opgesteld als algemeen overzicht waarbij er geen voorkeur voor leveranciers wordt uitgesproken. Een oplossing is door in het overzicht een regel toe te voegen dat voor meer technische informatie online informatie te vinden is; dus zonder het benoemen van specifieke namen.

Hoofdstuk 8. Conclusie en aanbeveling

Conclusie

Dit onderzoek is uitgevoerd om tot een antwoord te komen op de vraag: 'Hoe kan het gebruik van hout als hoofddraagconstructie worden gestimuleerd bij het ontwerpen van appartementen?' Om tot het antwoord te komen is er literatuuronderzoek gedaan naar de voordelen en aandachtspunten van houtbouw. Daarnaast is er referentie- en veldonderzoek gedaan naar de appartementen en ervaringen van Atelier PRO architecten. Als laatste is er literatuur-, veld- en toegepast onderzoek gedaan naar houten hoofddraagconstructies voor appartementen.

Het gebruik van hout in de bouw heeft velen voordelen voor het klimaat en de gezondheid van mensen. Dat blijkt uit literatuuronderzoek. Door met hout te bouwen kan CO₂ worden opgeslagen en is er minder stikstofuitstoot. Houtgebruik in de bouw kan gestimuleerd worden door bewustwording van de voordelen.

Uit veldonderzoek blijkt dat de 10% hogere kosten met hout de meeste invloed hebben op de keuze om niet in hout te bouwen. Atelier PRO architecten ontwerpt appartementencomplexen van diverse grootten, maar hebben nog geen project in hout kunnen realiseren door gebrek aan houtbouwkennis. Door de voordelen en aandachtspunten van houtbouw vroegtijdig ter sprake te brengen bij nieuwe opgaven, en vroeg in het ontwerpfase houtexperts te betrekken, is er meer kans dat een houten gebouw gerealiseerd kan worden.

De keuze voor een houtbouwmethode blijkt met name gemaakt te worden door het aantal te bouwen lagen. Constructies bestaan uit wanden, vloeren, liggers en/of kolommen. Uit onderzoek blijkt dat vloeren van CLT en HBV Decken het meest geschikt zijn voor appartementen. Deze kunnen 7 tot 8 meter overspannen, maar lagere overspanningen zijn gunstiger voor de dikte van de vloer. Verschillende aansluitingen zijn in beeld gebracht die een ontwerper in zijn achterhoofd kan houden.

Uit literatuuronderzoek blijkt hout niet te voldoen aan de eisen van brandveiligheid en geluid. Hout heeft weinig massa en is brandbaar. Hierom zijn er verschillende oplossingen. De keuze voor de oplossingen blijkt af te hangen van de wens om hout wel of niet in het zicht te willen. Uit referentieonderzoek is gebleken dat in de praktijk appartementen vaak een betonnen kern en plint hebben met daarop de hoofddraagconstructie. Daarnaast blijkt dat hout meestal alleen bij het plafond in zicht gelaten kan worden door de hoge brand- en geluidseisen.

Het antwoord op de hoofdvraag is dat het ontwerpen van houten hoofddraagconstructies in appartementen gestimuleerd kan worden door een algemeen overzicht met een stappenplan en informatie per fase. Het Architecten HoutBouw Overzicht (AHBO) kunnen ontwerpers doornemen om basiskennis te krijgen over houtbouw. Daarbij kunnen ze het AHBO bij de hand houden tijdens het ontwerpen of de informatie delen met belanghebbenden die ook weinig kennis hebben over houtbouw. Door het volgen van het AHBO stappenplan bij de toetsing is er geconcludeerd dat houtbouw mogelijk is in het ontwerp van Atelier PRO. Het realistische streven is om zoveel mogelijk hout toe te passen waar dat kan, en andere materialen te gebruiken waar hout minder geschikt is.

Aanbevelingen

Houtbouw heeft eigen kwaliteiten waar mee ontworpen kan worden. Hierom wordt geadviseerd in een de oriëntatie- en ontwerpfase (SO en VO) te onderzoeken of houtbouw mogelijk is, in plaats van een ontwerp te maken die later naar hout wordt omgezet. Hoe later in het proces het besluit wordt genomen om met hout te bouwen, hoe lastiger het wordt om dit te realiseren in samenwerking met de opdrachtgever en andere partijen.

Een architectenbureau dat niet eerder een houtbouw project heeft gedaan zou ervaring op kunnen doen door met een klein (particulier) woningbouw project van 1 tot 3 lagen te beginnen. Zo zijn er minder grote risico's dan bij een hoogbouw project van 10 lagen waar alles nog uitgezocht moet worden. Hierdoor kan een bureau ook stapsgewijs leren met welke dikten er gewerkt wordt, wat voor informatie houtadviseurs meegeven en kan er op het bureau ook een eerste verzameling houtbouw details opgezet worden waar zij later veel aan hebben.

Zoals in het onderzoek naar voren is gekomen wordt enorm aanbevolen om te werken met ervaren en geïnteresseerde partijen. Het is niet alleen belangrijk om in de schetsontwerpfase samen te werken met constructeurs, bouwfysisch adviseurs en installatie adviseurs die kennis hebben van houtbouw, maar het is in de oriëntatiefase al belangrijk om de samenwerking aan te gaan met opdrachtgevers, woningcorporaties en/of aannemers die de ambitie hebben om met hout te bouwen. Dit maakt de kans groter op het realiseren van een houtbouw project.

Belangrijk blijft wel om te weten dat het oplossen van de brandveiligheid en akoestiek niet zo makkelijk is. Het AHBO geeft alleen de mogelijkheden aan maar zegt niet wat voor moeilijkheden of kosten hieraan verbonden zijn. Algemeen is bekend dat sprinklerinstallaties duur zijn, maar ook in de detaillering is extra aandacht nodig.

Vervolgonderzoeken

Tijdens het onderzoek zijn onderwerpen naar voren gekomen waar weinig tijd voor was, of wat buiten de afbakening viel, om dieper onderzoek naar te doen. Voor een vervolgonderzoek zou interessant zijn:

- Onderzoek naar de verschillende houtsoorten en de daarbij behorende eigenschappen, waaronder ook de plaatsen waar het beschikbaar is, kosten, milieu-impact en of het hout van bedreigde bossen komt;
- In hoeverre houtbouwelementen hergebruikt kunnen worden (ook in verband met gefreesde delen), manieren van hergebruik en de impact van het type hergebruik;
- Hoe appartementen demontabel en remontabel ontworpen en gebouwd kunnen worden;
- Wat de kosten van houtbouwelementen zijn en waar te besparen is in een totale begroting;
- Wat de sterkte, productie en toepassing van NLT en DLT is en of het geschikt is in de Nederlandse bouw;
- Welke verschillende gevelmaterialen geschikt zijn bij houtbouw, door het gewicht en onderhoud.

Afkortingen en begrippenlijst

Brandweerstand	De tijd dat een bouwelement zijn dragende (constructieve) en/of scheidende functie blijft behouden tijdens een ontwikkelde brand, uit oogpunt voor veiligheid (Laminated Timber Solutions, 2019)
Circulair	Rondgaand proces; herbruikbaarheid; benutten van grondstoffen en zo min mogelijk weggooien
CLT	Cross Laminated Timber, ook wel kruislaaghout. Opgebouwd uit kruislings gelamineerd houten platen die zo een massief houten constructiemateriaal vormen
CO₂	Koolstofdioxide. Een broeikasgas die in overmaat schadelijk is voor het milieu
Duurzaam	Lange levensduur en/of oneindige (natuurlijke) bronnen; weinig milieubelastend
Hoofddraag-constructie	De (hoofd)draagconstructie van een gebouw boven de begane-grondvloer, bestaande uit alle dragende en/of stabiliserende wanden, vloeren, daken en/of kolommen. Brengen gewicht en belastingen over naar de fundering. (Bone, 2015, p. 146; Jellema 8, 2011, p. 48 en 220)
Houtbouw	Hieronder vallen de bouwmethoden waar hout als hoofddraagconstructie functioneert, zoals HSB, houtmassiefbouw (CLT), gelamineerde balken en kolommen
HSB	Houtskeletbouw. Een bouwmethode waarin constructieve elementen worden gevormd door een skelet van houten balken, met daartussen isolatie en afgewerkt met een plaat
Hybride (bouw)	Wanneer meerdere bouwmethoden gecombineerd worden voor de hoofddraagconstructie (zoals betonkern met houten wanden/vloeren)
Milieu	Ander woord voor omgeving, waarin organismen leven als mensen, dieren en planten
NO_x	Stikstofoxiden (ook wel ingekort als 'stikstof'). In overmaat schadelijk voor het milieu
SO - VO - DO - TO - UO	Afkortingen voor fasen in een ontwerpproject, in chronologische volgorde: Schetsontwerp, Voorlopig ontwerp, Definitief ontwerp, Technisch ontwerp en Uitvoeringsontwerp. Soms worden fasen overgeslagen als ze niet nodig zijn.
SDG	Sustainable Development Goals. Duurzame Ontwikkelingsdoelen van de Verenigde Naties (VN). Zeventien opgestelde werelddoelen over duurzaamheid op allerlei vlakken

Figurenlijst

BLZ.

Figuur 1, 2 en 3: “SDG11”, “SDG12” en “SDG15”

10

Bron: SDG Nederland

Figuur 4: “Toepassing van gekapte bomen”

11

Bron: Staatsbosbeheer

Figuur 5: “Fotosynthese van bomen en CO₂-opslag”

12

Bron: Geïllustreerd door Karina Sultan

Figuur 6: “Circulariteit houtbouw”

13

Bron: Tomorrow's Timber (Van der Lugt & Harsta, 2020), geïllustreerd door Jakob Lagerweij

Figuur 7: “Schets Omvang projecten Atelier PRO”

17

Bron: Handgetekend door Karina Sultan

Figuur 8: “Ontsluiting en hoofddraagconstructie Landhuis (2^e verdieping)”

18

Bron: Atelier PRO, gemarkeerd door Karina Sultan

Figuur 9: “Schets Buitenruimten Landhuis”

19

Bron: Handgetekend door Karina Sultan

Figuur 10: “Principedetail balkonaansluiting Landhuis”

19

Bron: Atelier PRO, gemarkeerd door Karina Sultan

Figuur 11: “Ontsluiting en programma Kop van het Dok”

20

Bron: Atelier PRO, bewerking door Karina Sultan

Figuur 12: “Ontsluiting en hoofddraagconstructie Kop van het Dok - Toren A”

20

Bron: Atelier PRO, gemarkeerd door Karina Sultan

Figuur 13: “Ontsluiting en hoofddraagconstructie Kop van het Dok - Toren B”

21

Bron: Atelier PRO, gemarkeerd door Karina Sultan

Figuur 14: “Ontsluiting en hoofddraagconstructie Kop van het Dok - Toren C”

21

Bron: Atelier PRO, gemarkeerd door Karina Sultan

Figuur 15: “Principedetail galerij draagconstructie Kop van het Dok - Toren A”

21

Bron: Atelier PRO, gemarkeerd door Karina Sultan

Figuur 16: “Verschillen loofhout en naaldhout”

25

Bron: Geïllustreerd door Karina Sultan; informatie uit Basisboek Bouwkunde (Bone, 2015), Jellema 3 Draagstructuur (2011), Gadero (2018) en TU Delft Dictaat Draagconstructies I (Nijssen, 2017)

Figuur 17: “Schematische weergave bouwmethoden in hout”

26

Bron: Handgetekend door Karina Sultan

Figuur 18: “Houtskeletbouw platformmethode”

27

Bron: Jellema 8 Woningbouw (2011)

Figuur 19: “Houtskeletbouw in uitvoering”

27

Bron: ECOVESTA Houtskeletbouw

Figuur 20: “Houtmassiefbouw constructies”

27

Bron: Vermeend & Hauer (2020)

Figuur 21: “Houtmassiefbouw in uitvoering”	27
Bron: Pinterest Korlambelgie / Laminated Timber Solutions	
Figuur 22 “Veel voorkomende hybride constructies met (massief) hout en beton”	28
Bron: Vermeend & Hauer (2020)	
Figuur 23: “Hybride ligger-kolomconstructies (Stories - Buiksloterham)”	28
Bron: Olaf Gipser Architects	
Figuur 24: “Verschillende houtproducten”	29
Bron: Perkins&Will - Ideas + Buildings blog, opgehaald van: https://www.revistadinlemn.ro/2018/06/04/cat-de-inalte-pot-fi-cladirile-la-care-se-folosesc-materiale-de-constructii-din-lemn/products/	
Figuur 25: “Opbouw principes van glulam, CLT, DLT en NLT”	29
Bron: CE Center - Designing Sustainable, Prefabricated Wood Buildings, opgehaald van: https://continuingeducation.bnpmedia.com/courses/think-wood/designing-sustainable-prefabricated-wood-buildings/3/	
Figuur 26: “LVL plaat”	29
Bron: MetsäWood	
Figuur 27: “CLT vloer”	30
Bron: Technology in Architecture, opgehaald van: https://technologyinarchitecture.com/cross-laminated-timber/	
Figuur 28: “Kerto-Ripa LVL”	30
Bron: MetsäWood	
Figuur 29: “Lignatur vloer”	30
Bron: LIGNATUR	
Figuur 30: “HBV vloer”	30
Bron: StructureCraft	
Figuur 31: “Gefreesd CLT voor installaties”	30
Bron: Karina Sultan (zelfgemaakte foto op bouwplaats Mecanoo project)	
Figuur 32: “Leidingen door Kerto-Ripa vloer”	30
Bron: Finnforest / MetsäWood (2009)	
Figuur 33: “Kerto-Ripa T (links) en Kerto-Ripa Box (rechts)”	31
Bron: MetsäWood (2017a)	
Figuur 34: “LIGNATUR variaties”	31
Bron: LIGNATUR (2019)	
Figuur 35: “HBV op de bouw”	32
Bron: MMK Holz-Beton-Fertigteile	
Figuur 36: “HBV vloerelementen”	32
Bron: MMK Holz-Beton-Fertigteile	
Figuur 37: “HBV doorsnede”	32
Bron: MMK Holz-Beton-Fertigteile	
Figuur 38: “Ligger-kolom aansluitingen”	33
Bron: Tomorrow's Timber (Van der Lugt & Harsta, 2020), geïllustreerd door adviesbureau Lünig	

Figuur 39: “Ligger-wand aansluitingen”	33
Bron: Stora Enso (2015)	
Figuur 40: “Verschillende balkonconstructies met krachtenverloop”	34
Bron: Eurban (z.d.)	
Figuur 41: “Principe aansluiting woningscheidende constructie”	34
Bron: Geïllustreerd door Karina Sultan, informatie uit Stora Enso (2015)	
Figuur 42: “Mogelijke verbindingen tussen elementen”	34
Bron: Derix (2020) en FPInnovations (2019), samengesteld en bewerkt door Karina Sultan	
Figuur 43: “Bouwbesluit 2012 eisen brandwerendheid van woongebouwen”	36
Bron: Zee (2018)	
Figuur 44: “Lucht- en contactgeluid”	37
Bron: Stora Enso (2020), bewerkt (vertaald) door Karina Sultan	
Figuur 45: “Constructie HAUT”	41
Bron: Team V Architectuur	
Figuur 46: “Wand-vloeraansluiting HAUT”	41
Bron: HAUT webinar 2 juli (2020)	
Figuur 47: “Constructie Stories”	41
Bron: Olaf Gipsier Architects	
Figuur 48: “Aansluiting Stories”	41
Bron: Olaf Gipsier Architects	
Figuur 49: “Dalston Works in beton vs. CLT: stippellijn geeft aan hoeveel minder fundering nodig was”	42
Bron: Waugh Thistleton Architects (2018)	
Figuur 50: “Dalston Works in beton vs. CLT: stippellijn geeft aan hoeveel minder fundering nodig was”	42
Bron: Waugh Thistleton Architects & Architecture Today (2017)	
Figuur 51: “Hoe het AHBO als poster kan worden opgehangen”	43
Bron: Geïllustreerd door Karina Sultan	
Figuur 52: “Toetsingscasus Kop van het Dok - Toren A en appartement”	44
Bron: Atelier PRO, gemarkeerd door Karina Sultan	

Tabellenlijst	BLZ.
Tabel 1: “Globale kostenvergelijking vloeren (bij dikte 200mm)” Gegevens uit: Bouwkosten Online Archidat	14
Tabel 2: “Soortelijk gewicht en λ-waarde bouwmaterialen” Gegevens uit: Kennisbank ISSO	15
Tabel 3: “Globale analyse projecten Atelier PRO” Gegevens uit: Atelier PRO	17
Tabel 4: “Vloerconstructie dikten Landhuis” Gegevens uit: rapport Lievense (2018)	19
Tabel 5: “Wanddikten Landhuis” Gegevens uit: rapport Lievense (2018)	19
Tabel 6: “Vloerconstructie dikten Kop van het Dok” Gegevens uit: rapport IMd Raadgevende Ingenieurs (2019) en tekeningen Atelier PRO	21
Tabel 7: “Wanddikten Kop van het Dok” Gegevens uit: rapport IMd Raadgevende Ingenieurs (2019) en tekeningen Atelier PRO	22
Tabel 8: “Aandachtspunten waar architect rekening mee houdt per fase (globaal)” Gegevens uit: analyse en interviews Atelier PRO (hoofdstuk 3 en bijlage 4)	23
Tabel 9: “Waarvoor een adviseur nodig is per fase (globaal)” Gegevens uit: analyse en interviews Atelier PRO (hoofdstuk 3 en bijlage 4)	23
Tabel 10: “Maatgevende belasting gebouwvormen” Gegevens uit: Jellema 3 Draagstructuur (2011) en Basisboek Bouwkunde (Bone, 2015)	23
Tabel 11: “Dragende eigenschappen vuren hout, (gewapend) beton en staal (\$235)” Gegevens uit: Jellema 3 Draagstructuur (2011) en Verver & Fraaij (2015)	25
Tabel 12: “Maximaal aantal bouwlagen per houtbouwmethode” Gegevens uit: persoonlijk contact met ing. Theo Geuijen (bijlage 5) en tabel 10	28
Tabel 13: “Overzicht houten vloeren bij appartementen” Gegevens uit: Derix (2020), MetsäWood (2017a; 2017b), LIGNATUR (sd; 2011) en MMK Holz-Beton-Fertigteile (z.d.)	32
Tabel 14: “Oplossingen voor brandveiligheid” Gegevens uit: Laminated Timber Solutions (2019), DGMR & IFV (2014) en Redactie Het Houtblad (2020b)	37
Tabel 15: “Bouwbesluit 2012 geluidseisen tussen woningen” Gegevens uit: Bouwbesluit 2012	38
Tabel 16: “Oplossingen voor geluidsproblemen” Gegevens uit: Laminated Timber Solutions (2019), Stora Enso (2020) en Redactie Het Houtblad (2020b)	38
Tabel 17: “Akoestische en brandwerende prestatie bij verschillende ingrepen” Gegevens uit: Laminated Timber Solutions (2019)	38
Tabel 18: “Globale analyse houtbouw projecten in Nederland en buitenland” Gegevens uit: HAUT webinar 2 juli (2020), Olaf Gipser Architects (z.d.) en Waugh Thistleton Architects (z.d.)	40

Literatuurlijst

- Aanpak Stikstof. (z.d.). *Alles over het stikstofprobleem*. Opgeroepen op 2020, van <https://www.aanpakstikstof.nl/achtergrond>
- Aardbevingsbestendige Huizen & NBvT. (z.d.). *Aardbevingsbestendigbouwen*. Opgeroepen op juli 20, 2020, van <http://aardbevingbestendigehuizen.nl/>
- ABN AMRO. (2019). *Analyse gevolgen stikstofuitspraak per sector*. Opgehaald van <https://insights.abnamro.nl/2019/10/stikstof-waait-breed-uit-over-sectoren/>
- Bensdorp, J. (2019, oktober 31). *De stikstofcrisis toont aan: we moeten sneller circulair gaan bouwen*. Opgehaald van Trouw.nl: <https://www.trouw.nl/opinie/de-stikstofcrisis-toont-aan-we-moeten-sneller-circulair-gaan-bouwen~b70fd807/>
- Bone, A. (2015). *Basisboek Bouwkunde*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- Bouwbesluit 2012. (z.d.). *BRISbouwbesluitonline*. Opgehaald van <https://www.bouwbesluitonline.nl/>
- Bouwkosten Online. (z.d.). *Archidat richtprijzen voor de bouw*. Opgeroepen op juli 15, 2020, van <https://bouwkosten-bouwformatie-nl.ezproxy.hro.nl/>
- Bruggink, D. (2019, december 17). *Bomen kappen, in hout bouwen en het klimaat redden!* Opgeroepen op juni 25, 2020, van Houtwereld: <https://www.houtwereld.nl/blog/bomen-kappen-in-hout-bouwen-en-het-klimaat-redden/>
- Centrum Hout. (2020). *Factsheet duurzaam hout & het klimaat in Nederland*. Opgehaald van <https://www.houtnatuurlijkvanu.nl/download-de-factsheet-duurzaam-hout-het-klimaat-in-nederland/>
- Centrum Hout. (z.d.). *Whitepaper 1 'Meer hout, meer gezondheid'*. Opgeroepen op juli 15, 2020, van <https://www.houtnatuurlijkvanu.nl/media/whitepapers/>
- commARCH. (2020, juni 16). *Whitepaper Why do we feel better with wood?* Opgehaald van <https://www.commarch.com/think-wood-white-paper/>
- De Bruijn, W. (2019, oktober 18). *10 antwoorden op de meestgestelde vragen rond houtbouw*. Opgehaald van VPRO Tegenlicht: <https://www.vpro.nl/programmas/tegenlicht/lees/artikelen/10-antwoorden-houtbouw.html>
- De Groot Vroomshoop. (2017). *GHC CLT informatie*. Opgehaald van https://gelijmde-houtconstructies.nl/wp-content/uploads/sites/4/2017/02/GHC_CLT-informatie.pdf
- Derix. (2020). *DERIX_X_Lam_Brosch_NL_2020_02_WEB*. Opgehaald van <https://www.derix.de/nl/service/downloads/broschueren/>
- DGMR & IFV. (2014, december). *Materialen en brandveiligheid*. Opgehaald van DGMR: <https://dgmr.nl/kennis/publicaties/150108-materialen-en-brandveiligheid/>
- Economisch Instituut voor de Bouw. (2020, januari 22). *Structureel groeiperspectief voor de bouw blijft sterk*. Opgehaald van <https://www.eib.nl/nieuws/structureel-groeiperspectief-voor-de-bouw-blijft-sterk/>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy*. Opgehaald van <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change*. Opgehaald van <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>
- Eurban. (z.d.). *Balconies and CLT*. Opgeroepen op september 23, 2020, van Eurban - Specialists in Solid Timber Construction & Cross-Laminated Timber: <http://www.eurban.co.uk/industry-insights/balconies-and-clt/>
- Feenstra. (2018, oktober 4). *CO2 uitstoot; Hoe schadelijk is het?* Opgehaald van <https://www.feenstra.com/zorgelooswonen/co2-uitstoot/>

- Fermacell. (2019, december). *Constructie overzicht - Fermacell, Jameshardie & Aestuver constructies voor wanden, plafonds en vloeren*. Opgehaald van <https://www.fermacell.nl/nl/actueel/nieuw-het-bouwkundige-brandboek-van-fermacell>
- Finnforest / MetsäWood. (2009, oktober). *Kerto-Ripa. Houten vloer- en dakelementen voor grote overspanningen*. Opgehaald van <https://docplayer.nl/9301579-Kerto-ripa-houten-vloer-en-dakelementen-voor-grote-overspanningen.html>
- FPIInnovations. (2019). *Canadian CLT Handbook*. Opgehaald van <https://web.fpinnovations.ca/clt/>
- Gadero. (2018, augustus 31). *Hardhout vs. Zachthout*. Opgehaald van https://gadero.nl/blog_hardhout-vs-zachthout/
- Haas, M. (z.d.). *Stimuleren CO2 opslag in gebouwen*. Opgeroepen op juni 25, 2020, van Duurzaam Gebouwd: <https://www.duurzaamgebouwd.nl/expertpost/20180529-stimuleren-co2-opslag-in-gebouwen/>
- HAUT webinar 2 juli. (2020, juli 6). HAUT webinar met Team V Architectuur, Arup, Lingotto en JP van Eesteren. Opgehaald van <https://www.youtube.com/watch?v=FUEBilTHHo&feature=youtu.be>
- IEA, UNEP. (2019). *2019 Global Status Report for Buildings and Construction*. UNEP.
- IMd Raadgevende Ingenieurs. (2019). *Constructief uitgangspuntenrapport ontwerp DO Kop van het Dok*. Rotterdam.
- Jellema 3. (2011). *Jellema 3 Draagstructuur*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- Jellema 8. (2011). *Jellema 8 Woningbouw*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- Kassenberg, K. (z.d.). *R-waarde, wat is het en wanneer is die belangrijk?* Opgeroepen op juli 16, 2020, van <https://www.floorsite.nl/r-waarde-is-en-wanneer-is-belangrijk/>
- Kennisbank ISSO. (2020). *Bijlage 3 Soortelijke massa en λ -waarde van bouwmaterialen*. Opgehaald van [https://kennisbank.isso.nl/publicatie/energievademecum-energiebewust-ontwerpen-van-nieuwbouwwoningen/2020/bijlage-3\[1\]](https://kennisbank.isso.nl/publicatie/energievademecum-energiebewust-ontwerpen-van-nieuwbouwwoningen/2020/bijlage-3[1])
- Klimaatakkoord. (z.d.). *Wat is het doel van het Klimaatakkoord?* Opgeroepen op juni 24, 2020, van Klimaatakkoord: <https://www.klimaatakkoord.nl/klimaatakkoord/vraag-en-antwoord/wat-is-het-doel-van-het-klimaatakkoord>
- Klimaatverandering: wat zijn de gevolgen? (z.d.). Opgeroepen op maart 24, 2020, van Milieu Centraal: <https://www.milieucentraal.nl/klimaat-en-aarde/klimaatverandering/>
- Laminated Timber Solutions. (2019). *Ontwerpen met CLT - Technische handleiding 2019*. Moorslede: Laminated Timber Solutions.
- Lievense. (2018). *Landhuis Roosenhorst Bouwaanvraag*. Apeldoorn.
- LIGNATUR. (2011, oktober). *Lignatur Workbook*.
- LIGNATUR. (2019, december 20). *2019-12-20-Brochure_nl_Lignatur*. Opgehaald van Gelijkde houtconstructies: https://gelijmde-houtconstructies.nl/wp-content/uploads/sites/4/2020/02/2019-12-20-Brochure_nl_Lignatur.pdf
- LIGNATUR. (z.d.). Opgehaald van <https://www.lignatur.ch/en/>
- Lüning. (z.d.). *Circulair bouwen gaat niet over de toekomst, maar over nú!* Opgeroepen op juli 20, 2020, van <https://www.luning.nl/kennis/circulair-bouwen-gaat-niet-over-de-toekomst-maar-over-nu.aspx>
- Martinsons. (2017, april 28). *Martinsons CLT panelen overspanningstabel*. Opgehaald van Solid Timber: <http://solidtimber.nl/wp-content/uploads/2019/09/Overspanningstabel-CLT-2017-04-28.pdf>
- Merford. (z.d.). *Wat is akoestische isolatie?* Opgehaald van Akoestiekwinkel: <https://www.akoestiekwinkel.nl/uitleg-akoestische-isolatie>

- MetsäWood. (2017a, januari). *KERTO - RIPA TECHNISCHE RICHTLIJNEN*. Metsä Wood - PDF. Opgehaald van <https://docplayer.nl/60911911-Kerto-ripa-technische-richtlijnen-metsa-wood.html>
- MetsäWood. (2017b, mei). *Kerto LVL Floor & Roofelements by Bas Meeuwissen*. Opgehaald van issuu.com/metsagroup1/docs/_2017-06_kerto-ripa_design_and_refe
- Milne, G., & Reardon, C. (2013). *Embodied Energy*. Opgehaald van <https://www.yourhome.gov.au/materials/embodied-energy>
- MMK Holz-Beton-Fertigteile. (z.d.). Opgeroepen op september 22, 2020, van <https://www.holzbetonverbund.at/>
- Nationaal Digitaal Houtbouw Congres. (2020, oktober 1).
- Nijse, R. (2017, november). *Dictaat Draagconstructies I*. TU Delft, Faculteit Bouwkunde, Afdeling Architectural Engineering + Technology, Leerstoel Ontwerpen van Draagconstructies. Opgehaald van http://wiki.bk.tudelft.nl/mw_bk-wiki/images/8/80/Draagconstructies_I.pdf
- Olaf Gipser Architects. (z.d.). *BSH20 'Stories'*. Opgehaald van <https://olafgipser.com/projects/residential-building-bsh/#>
- Olaf Gipser Architects, Heutink & Bouwgroep BSH20A. (z.d.). *Stories Brochure*. Opgehaald van [Stories - Buiksloterham: https://www.stories-buiksloterham.nl/building](https://www.stories-buiksloterham.nl/building)
- ORGA architect. (2020a, april 21). *Emissieloos bouwen doe je met hout*. Opgehaald van <https://www.orga-architect.nl/nieuws/emissieloos-bouwen-met-ecologische-houtbouw/>
- ORGA architect. (2020b, februari 26). *CLT, het nieuwe beton*. Opgehaald van <https://www.orga-architect.nl/nieuws/clt-het-nieuwe-beton/>
- PBL. (z.d.). *Circulaire economie*. Opgeroepen op juni 25, 2020, van Planbureau voor de Leefomgeving: <https://www.pbl.nl/onderwerpen/circulaire-economie>
- Redactie Het Houtblad. (2020a, april 14). *Antwoorden op veelgestelde vragen over houtbouw (longread)*. Opgehaald van Houtwereld: <https://www.houtwereld.nl/architectuur/antwoorden-op-veelgestelde-vragen-over-houtbouw-longread/>
- Redactie Het Houtblad. (2020b, juni 9). *Nog meer antwoorden op vragen over houtbouw (longread)*. Opgehaald van Houtwereld: <https://www.houtwereld.nl/architectuur/nog-meer-antwoorden-op-vragen-over-houtbouw-longread/>
- Rijksoverheid. (z.d.). *Klimaatbeleid | Klimaatverandering*. Opgeroepen op juni 24, 2020, van Rijksoverheid.nl: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/klimaatbeleid>
- ROCKWOOL & ARCADIS. (2018). *Vuistregels brandveiligheid*. Opgehaald van <https://www.rockwool.nl/over-ons/nieuws/update-vuistregels-brandveiligheid/>
- SDG Nederland. (z.d.). *Alles over de Duurzame Ontwikkelingsdoelen*. Opgeroepen op februari 17, 2020, van SDG Nederland: <https://www.sdgnerland.nl/>
- Staatsbosbeheer. (z.d. - a). *Bosbeheer in de praktijk*. Opgeroepen op februari 27, 2020, van <https://www.staatsbosbeheer.nl/over-staatsbosbeheer/dossiers/bos-en-hout/bosbeheer-in-de-praktijk>
- Staatsbosbeheer. (z.d. - b). *Veelgestelde vragen*. Opgeroepen op juni 29, 2020, van <https://www.staatsbosbeheer.nl/over-staatsbosbeheer/dossiers/bos-en-hout/veelgestelde-vragen>
- Starink, G. A. (2015, juni 22). *Powerpoint presentatie Nieman Bouwfysische eigenschappen van kruislaaghout*. Opgehaald van https://www.derix.de/data/5_Gerton%20Starink_Nieman.pdf
- Stora Enso. (2015, mei). *02 Technical Folder Stora Enso Building Solutions CLT | Framing Construction | Wall*. Opgehaald van <https://www.scribd.com/document/286796510/02-Technical-Folder-Stora-Enso-Building-Solutions-CLT>

- Stora Enso. (2020). *Soundproofing for CLT by Stora Enso*. Opgehaald van <https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/product-specifications/wood-products/clt-technical/soundproofing/soundproofing-for-clt-by-stora-enso-en.pdf>
- StructureCraft. (z.d.). *Timber-Concrete Composite | Mass Timber*. Opgeroepen op september 22, 2020, van <https://structurecraft.com/materials/mass-timber/timber-concrete-composite>
- Studio Marco Vermeulen. (2019, februari 14). *Presentatie_SMV_Zuid-Houtland.pdf*. Opgehaald van De Bouwcampus: https://debouwcampus.nl/images/Vernieuwingsopgaven/WonenWerken/Presentatie_SMV_ZuidHoutland.pdf
- Swan Housing Association & Waugh Thistleton Architects. (2019). *NU Build Modular Design Guide*.
- Van der Lugt, P., & Harsta, A. (2020). *Tomorrow's Timber: towards the next building revolution*. Nederland: Material District.
- Van Dorst, R., & Detzel, A. (2013). *DICTAAT & werkboek HOUT versie 13-5 (Bouwen in HOUT & STAAL - cursus bouBHS01c)*. Hogeschool Rotterdam.
- Van Wetering, H. (2019, oktober 15). *De toekomst is van hout*. Opgehaald van Dutch Design Week - VPRO: <https://www.vpro.nl/festivals/ddw/lees/2019/de-toekomst-is-van-hout.html>
- Vermeend, T., & Hauer, D. (2020, juli 2). *Bouwen met CLT – zes lessen uit de praktijk van Urban Climate Architects*. Opgehaald van Architectenweb: <https://architectenweb.nl/nieuws/artikel.aspx?ID=47803>
- Verver, M. W., & Fraaij, A. L. (2015). *Materiaalkunde: de kern van duurzame bouwkunde en civiele techniek*. Groningen/Houten: Noordhoff Uitgevers bv.
- VPRO *Tegenlicht Houtbouwers* (2019). [Film].
- Waugh Thistleton Architects & Architecture Today. (2017, december 12). *Dalston Works*. Opgehaald van Architecture Today: <https://architecturetoday.co.uk/dalston-works/>
- Waugh Thistleton Architects. (2018). *100 Projects UK CLT*. Opgehaald van <https://www.thinkwood.com/wp-content/uploads/2019/08/Think-Wood-Publication-100-Projects-UK-CLT.pdf>
- Waugh Thistleton Architects. (z.d.). *Dalston Works*. Opgehaald van <https://waughthistleton.com/dalston-works/>
- Zee, P. (2018). *Afstudeeronderzoek Verticaal dragend verlijmd kruislaaghout en brandveiligheid*. Hanzehogeschool Groningen. Opgehaald van <https://www.hanze.nl/assets/academie-van-architectuur-bouwkunde-en-civiele-techniek/Documents/Public/Gr.%203%20-%20Afstudeerrapport%20verticaal%20dragend%20verlijmd%20kruislaaghout%20en%20brandveiligheid-%20Paula%20Zee.pdf>