

2019 • 2020

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen  
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## Masterthesis

Gelijmde stalen plaatverbindingen in hout-beton composiet structuren

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Jose GOUVEIA HENRIQUES

BEGELEIDER :

Mevrouw Elif Tuba APPAVURAVTHER SUMICHRAS

Stijn Gielis, Mathias Hendrikx

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



2019 • 2020

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen  
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## Masterthesis

\_Gelijmde stalen plaatverbindingen in hout-beton composiet structuren

**PROMOTOR :**

Prof. dr. ir. Jose GOUVEIA HENRIQUES

**BEGELEIDER :**

Mevrouw Elif Tuba APPAVURAVTHER SUMICHRAST

**Stijn Gielis, Mathias Hendrikx**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde



**KU LEUVEN**



*Deze masterproef werd geschreven tijdens de COVID-19 crisis in 2020.  
Deze wereldwijde gezondheids crisis heeft mogelijk een impact gehad op  
de opdracht, de onderzoekshandelingen en de onderzoeksresultaten.*



## Woord vooraf

Deze thesis is geschreven in het kader van de opleiding master industriële wetenschappen met afstudeerrichting bouwkunde aan de Universiteit Hasselt door Gielis Stijn en Hendrixx Mathias. Het onderwerp voor deze thesis is voortgevloeid uit een eerdere studie voor een bachelorproef binnen de academische bachelor industriële wetenschappen bouwkunde. Deze bachelorproef genaamd: “Investigation of the Shear Capacity of the Notches in Timber – Lightweight Concrete Composite Connections”, was een goede voorbereiding op deze masterproef. Tijdens het schrijven van deze thesis hebben we hulp gekregen van verschillende personen, deze willen we hiervoor graag bedanken.

In de eerste plaats willen we graag onze hoofdpromotor Prof. dr. ir. Gouveia Henriques Jose bedanken, samen met onze copromotor Appavuravther Sumichrast Elif Tuba. Zij hebben onze vorderingen nauwlettend opgevolgd en bijgestuurd waar nodig. Vervolgens willen we ook Wyremblewski Lara bedanken. Zij heeft ons begeleid bij de schrijf-technische aspecten en de vormgeving van de thesis. Tot slot willen we graag onze ouders bedanken omdat zij ons de kans hebben gegeven deze opleiding tot een goed einde te brengen en ons te alle tijde gesteund hebben.



# Inhoudsopgave

<b>Woord vooraf .....</b>	<b>1</b>
<b>Lijst van tabellen.....</b>	<b>5</b>
<b>Lijst van figuren.....</b>	<b>7</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>9</b>
<b>Abstract in English .....</b>	<b>11</b>
<b>1. Inleiding .....</b>	<b>13</b>
<b>2. Literatuurstudie .....</b>	<b>15</b>
2.1. Hout.....	15
2.2. Beton .....	15
2.3. Composietmaterialen .....	15
2.4. Hout-beton composiet.....	16
2.5. Hout-betonverbindingen .....	16
2.6. Hout-betonverbindingsmiddelen.....	17
2.7. Perfobond in staal-beton .....	20
2.8. Perfobond in hout-beton.....	21
<b>3. Analytische berekeningen .....</b>	<b>23</b>
3.1. Analyse beton.....	23
3.2. Analyse staal .....	24
3.3. Analyse hout .....	25
<b>4. Experimentele opstelling .....</b>	<b>27</b>
4.1. Proefstukken.....	27
4.1.1. Parameters van de proefstukken.....	27
4.1.2. Beton .....	27
4.1.3. Hout.....	28
4.1.4. Lijm .....	28
4.1.5. Perfobond .....	28
4.1.6. Productie van de proefstukken .....	29
4.2. Testopstelling.....	30
4.3. Resultaten.....	31
<b>5. Alternatieve testresultaten .....</b>	<b>33</b>
5.1. Verzameling van testen uit de literatuur .....	33
5.2. Vergelijking tussen verschillende hout-betonverbindingen.....	37
<b>6. Beoordeling van analytische methode.....</b>	<b>40</b>
6.1. Validatie analytische methode .....	40



6.2. Extrapolatie analytische methode .....	41
<b>7. Besluit.....</b>	<b>44</b>
<b>Bibliografie .....</b>	<b>46</b>
<b>Bijlagen .....</b>	<b>48</b>

## Lijst van tabellen

Tabel 1: Parameters van de proefstukken.....	27
Tabel 2: Overzicht eigenschappen van geraadpleegde studies .....	36
Tabel 3: Maximale gestandaardiseerde belasting en gestandaardiseerde stijfheid .....	39
Tabel 4: Validatie van analytische berekeningen.....	41
Tabel 5: Extrapolatie voor één zijde van de proefstukken.....	42
Tabel 6: Extrapolatie voor volledige proefstukken.....	43



## Lijst van figuren

Figuur 1: Invloed connector op composietwerking van materialen .....	16
Figuur 2: Stalen deuvelds niet loodrecht op het houtoppervlak .....	17
Figuur 3: INSA-Hilti connector .....	18
Figuur 4: CHS-connector .....	18
Figuur 5: Universele kolomsectie .....	18
Figuur 6: Notches .....	19
Figuur 7: Kracht - verplaatsing diagram voor verschillende verbindingsmiddelen .....	19
Figuur 8: Kracht - verplaatsing diagram.....	20
Figuur 9: Perfobond voor staal-betonverbindingen .....	20
Figuur 10: Perfobond in hout-beton composiet .....	21
Figuur 11: Identificatie parameters voor analytische berekeningen .....	23
Figuur 12: Longitudinale breuken in beton .....	24
Figuur 13: Modelaanname hout.....	26
Figuur 14: Perfobond met perforaties in de houtzijde .....	28
Figuur 15: Perfobond zonder perforaties in de houtzijde.....	29
Figuur 16: Schematische opbouw van een proefstuk.....	29
Figuur 17: Voorbereid stuk hout (links) en afgewerkt proefstuk (rechts).....	30
Figuur 18: Testopstelling push-out testen.....	31
Figuur 19: Configuratie P-C .....	33
Figuur 20: Configuratie M-NC-180 en M-NC-300 .....	34
Figuur 21: Configuratie M-C-1 en P-NC .....	34
Figuur 22: Configuratie M-C-2 .....	35
Figuur 23: Kracht-verplaatsingsdiagrammen reeds uitgevoerd onderzoek.....	37
Figuur 24: Gestandaardiseerde kracht-verplaatsingsdiagrammen .....	38
Figuur 25: Gestandaardiseerde kracht-verplaatsingsdiagrammen tot 1 mm verplaatsing.....	38



## Abstract

Hout-betonverbindingen worden over het algemeen gebruikt als structurele lichtgewicht oplossingen en creëren meer afschuifweerstand in structurele systemen. Dit is een voordeel dat zich uit binnen het ontwerp- en bouwproces in de vorm van een materiaalreductie en creatie van meer openheid in structuren. Deze thesis handelt over de resultaten van een onderzoek naar een verbinding tussen hout en beton met geperforeerde stalen platen die in het hout verlijmd zijn met epoxy lijm. De grootste moeilijkheid van deze verbinding met stalen platen is de hoge mate van stijfheid waarover ze beschikken, met een gebrek aan ductiliteit. De focus van deze thesis ligt op het gedrag van het hout. Hiervoor zijn vijf verschillende configuraties van hout-betonverbindingen met perfobond geproduceerd om deze te onderwerpen aan dubbelzijdige push-out testen. De parameters en geometrie van de configuraties zijn zo geselecteerd dat falen in het hout zou optreden. Een ander aspect binnen deze thesis was het gebruik van verschillende betonsoorten. Omwille van de hoge stijfheid in het systeem is zowel lichtgewicht als normaal beton gebruikt. Door de COVID-19 crisis konden push-out testen niet uitgevoerd worden en zijn ter vervanging bestaande resultaten gebruikt met gelijkenissen ten opzichte van de geproduceerde proefstukken. Voorspelde faalmodellen komen overeen met de push-out testen. De voorspellingen van faalkracht konden niet allemaal geverifieerd worden. Wat wel geverifieerd is, bleek consistent te zijn.



## Abstract in English

Timber–concrete composite connections (TCC) are commonly used as lightweight solutions, providing structural systems with additional shear capacity. This advantage can be useful in design and building processes to reduce the amount of materials and create more open structures.

This thesis presents the results of a scientific investigation carried out on a connection between timber and concrete with perforated steel plates fixed with epoxy glue in to timber. However, the connecting steel plates has a main difficulty, they cause high rigidity resulting in a lack of ductility. The aim of this thesis is to report the behaviour of the timber part. For this purpose, five different configurations of TCC with a perfobond connection have been produced to perform double-side push-out tests. The parameters and geometry of the configurations are selected in order to induce failure in the timber. Another aspect of this thesis is the difference between types of concrete. Because of its stiffness generated in the system, both lightweight and normal density concrete are used. The circumstances associated with COVID-19 crisis led to the fact that the push-out tests could not be conducted. Therefore, results from other, similar investigations had to be used so that the test could be further analysed. Predicted failure modes were found to correspond to the push-out tests. Although the failure load predictions could not all be verified, the performed trials showed to be consistent with similar research results.





## 1. Inleiding

Hout-betonverbindingen worden reeds in de praktijk toegepast met een breed gamma aan verbindingsmiddelen. De meest voorkomende structurelementen, bestaande uit hout-betonverbindingen, zijn vloeren. Het grootste voordeel dat combineren van materialen creëert, is dat elk materiaal optimaal gebruikt kan worden. Een voorwaarde hiervoor is het invoegen van een verbindingsmiddel dat voldoende interactie creëert. Omwille van de hoge afschuifweerstand en treksterkte zijn deze verbindingen doorgaans vervaardigd uit staal. De werking van het totale systeem is sterk afhankelijk van het soort verbindingsmiddel. Opdat materialen samenwerken als één geheel dient een verbinding voldoende sterkte en stijfheid te bezitten, maar eveneens ook de nodige ductiliteit.

Uit onderzoek is gebleken dat geperforeerde staalplaten een van de betere verbindingsmiddelen zijn binnen staal-betonverbindingen. Deze vormen een zeer sterk en stijf geheel van staal en beton. Het probleem kenmerkt zich door het gebrek aan ductiliteit. Het toepassen van deze verbindingsmiddelen biedt systemen in hout-beton composiet structuren met een meer ductiel gedrag. Opdat deze systemen effectief ductiel gedrag vertonen, is de geometrie van de verbindingsmiddelen een bepalende factor.

Onderzoek naar het gedrag van zowel het beton als het staal is reeds uitgevoerd. Het gedrag van het hout in deze systemen is in mindere mate onderzocht. In deze thesis wordt een specifiek type verbindingsmiddel getest in hout-betonverbindingen, met als doel het faalgedrag van hout te bestuderen. Dit werd gedaan door het opstellen van berekeningen die een inschatting dienen te geven van het faalgedrag en deze vervolgens te vergelijken met push-out testen op specifieke configuraties.

Allereerst is de oorsprong, de ontwikkeling en de variëteit aan hout-betonverbindingen besproken in de literatuurstudie. Wegens beperkt uitgevoerd onderzoek naar verbindingen van deze soort, zijn de gedragingen en principes van aanliggende soorten verbindingsmiddelen in acht genomen tot het bekomen van een manier om verwachtingen te staven. Deze zijn in het hoofdstuk analytische berekeningen toegelicht. Alle praktische gegevens van zowel de proefstukken als de testopstelling zijn beschreven binnen het hoofdstuk experimentele opstelling. Hierin zijn de resultaten van de testen weergegeven om vervolgens te vergelijken met de analytische benaderingen. Omwille van later vernoemde redenen zijn deze vergelijkingen niet gemaakt met de testresultaten van deze thesis. Vergelijkingen hiertussen zijn wel gemaakt met andere, reeds uitgevoerde testresultaten. In het hoofdstuk alternatieve testresultaten zijn deze vergelijkbare onderzoeken besproken. Een standaardisatie van bestaande testresultaten creëert de mogelijkheid om te vergelijken met gelijkaardige verbindingsmiddelen. Het effectieve vergelijk tussen deze resultaten is besproken in de beoordeling van analytische methode. Tot slot volgt er nog een besluit dat een overzicht geeft van het resultaat van deze thesis.



## 2. Literatuurstudie

### 2.1. Hout

Hout als constructiemateriaal heeft de voordelen dat het een licht materiaal is dat eenvoudig te verwerken en te repareren is. Hout is ook veelvuldig beschikbaar en inzetbaar over een breed toepassingsveld [1]. Bij belasting op houten structurelementen kunnen hoge doorbuigingen en trillingen optreden omdat er niet voldoende stijfheid aanwezig is. Hierdoor ontstaat het nadeel dat houtstructuren doorgaans verstijvingen nodig hebben. Deze verstijvingen worden gevormd door het toevoegen van extern materiaal of door het vormen van verbindingen met verbindingsmiddelen. Verstijven door extern materiaal kan door een dragende structuur toe te voegen of het aanbrengen van een ontwikkeld houten element, bijvoorbeeld CLT-panelen. Deze elementen zijn zodanig ontwikkeld dat ze weerstand bieden tegen bepaalde fenomenen, zoals trek in een bepaalde richting opvangen. De verbindingsmiddelen kunnen vervaardigd zijn uit hout of staal. Voorbeelden hiervan zijn hardhouten deuvels of schroeven [2].

Plastische vervormingen vormen mogelijk een gevaar in de globale structuur. Overschrijding van drukspanningen in hout geeft aanleiding tot ductiel falen, dit is het gevolg van het samendrukken van de vezels. Bij overschrijden van de trekcapaciteit zal een brosse breuk optreden doordat de trekcapaciteit van de vezels onvoldoende is vanaf een bepaald moment. In gebouwen is dit faalmechanisme niet gewenst omdat brosse breuk geen waarschuwend falen heeft in de vorm van een doorbuiging [3].

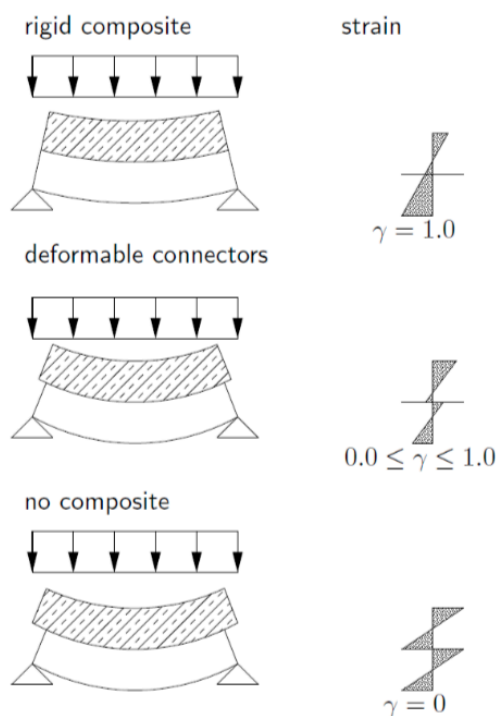
### 2.2. Beton

Het gebruik van beton in constructies resulteert in elementen met een relatief zware massa. Dit heeft als voordelen dat betonelementen in mindere mate onderhevig zijn aan trillingen door gebruiksbelastingen en bij correct dimensioneren zijn doorbuigingen kleiner door het beschikken over een hogere stijfheid. In tegenstelling tot hout is beton effectief in staat om hoge drukspanningen op te vangen, maar de trekcapaciteit is aanzienlijk lager [4].

Wanneer een betonelement opgelegd is aan de uiteinden zal dit doorbuigen met als gevolg dat er een asymmetrisch spanningsverloop ontstaat. Dit zal resulteren in een gedrukte zone aan de bovenzijde van de neutrale as en een zone onderhevig aan trekspanning aan de onderzijde van deze as. De functie van trekwapening is vervolgens om deze getrokken zone te weerhouden van falen, want de trekcapaciteit van beton is verwaarloosbaar in de praktijk.

### 2.3. Composietmaterialen

Composietmaterialen zijn vervaardigd uit meer dan één materiaal met als doel het behalen van specifieke eigenschappen. Opdat deze materialen samenwerken als een geheel, dient een verbinding aanwezig te zijn. figuur 1 geeft een indicatie van de gedragingen van composiet structuren aan de hand van een interactiecoëfficiënt  $\gamma$ . De coëfficiënt wordt gedefinieerd als het quotiënt van de rekken van de composietmaterialen. Een verbindingsmiddel dat voldoende stijf en sterk is, zal resulteren in volledige interactie tussen de materialen. Dit wil zeggen dat het verbindingsmiddel de spanningen van het ene materiaal volledig kan overbrengen naar het andere materiaal. Hierbij is de rek van beide materialen gelijk en is de interactiecoëfficiënt gelijk aan één. Een ander klasse verbindingsmiddel is deze die een ductiel gedrag vertonen. Deze zijn niet in staat om spanningen dermate over te dragen zodat een volledige interactie ontstaat. Het gevolg hiervan is dat vervormingen van het verbindingsmiddel zullen optreden. De materiaalrekken zijn in deze situatie niet langer gelijk aan elkaar. De interactiecoëfficiënt zal een waarde aannemen tussen nul en één. Wanneer er geen verbinding aanwezig is, behoudt elk materiaal zijn oorspronkelijke eigenschappen en zal er geen interactie aanwezig zijn [5].



Figuur 1: Invloed connector op composietwerking van materialen [5, p. 73]

## 2.4. Hout-beton composiet

Een vloersysteem bestaande uit hout en beton is gebaseerd op de eigenschappen van beide materialen: de trekcapaciteit van hout en de drukcapaciteit van beton. Het hout moet zich aan de op trek belaste zijde bevinden, het beton aan de op druk belaste zijde. De opbouw van een composiet vloersysteem bestaat hierdoor uit houten balken met bovenop een betonnen vloerplaat. Voor het realiseren van een samenwerking tussen beide materialen is een verbindingsmiddel noodzakelijk. Combineren van deze materialen genereert een aantal belangrijke voordelen. Ten opzichte van houten vloeren zal het eigengewicht groter zijn waardoor trillingen sterk reduceren, ook akoestisch zal dit een betere prestatie leveren. In vergelijking met betonnen vloeren zal het gedeelte beton dat normaal onderhevig is aan trek vervangen worden door hout, mits een effectieve verbinding tussen beide. Doordat het gedeelte op trek belaste beton niet langer aanwezig is, zal scheurvorming in beton reduceren. Dit wil zeggen dat infiltratie van water of andere vloeistoffen afneemt en dat de kans op schade aan wapening verkleint. Afhankelijk van het soort verbindingsmiddel kan de dikte van klassieke betonnen vloeren tot 50% gereduceerd worden door deze techniek [4], [6 - 11]. Een bijkomend voordeel is de toename van de brandweerstand. Scheuren waardoor de hitte invloed uitoefent op het wapeningsstaal zijn geëlimineerd [10].

## 2.5. Hout-betonverbindingen

Opdat de eigenschappen van beide materialen optimaal benut worden, dient er een verbinding aanwezig te zijn tussen de materialen. Een eerste voorwaarde voor het optimaal benutten van de materialen is dat de neutrale as zich zo dicht mogelijk bij de overgang van beton naar hout bevindt. Met een verbindingsmiddel dat de nodige interactie creëert, ondergaat het beton enkel druk en het hout hoofdzakelijk trek. Een tweede voorwaarde is de stijfheid van het verbindingsmiddel, dit moet voldoende sterk en stijf zijn om spanningen over te dragen. Overigens moet het hout in een vloersysteem het grootste deel van de optredende buigspanningen te allen tijde kunnen weerstaan [4].

Het gedrag op lange termijn is ook een belangrijk gegeven voor het toepassen van hout-betonverbindingen binnen een bouwwerk. Het gedrag van hout wordt meer beïnvloed door verandering van de omgeving dan dat van beton. Met name temperatuur en vochtgehalte zijn kritisch voor het

kruipgehalte van hout. In normale omstandigheden is de invloed van temperatuur te verwaarlozen ten opzichte van de invloed van het vochtgehalte. Het veranderen van het vochtgehalte in hout kan voor afwijkingen van drie tot viermaal de initiële kruip zorgen. Omdat hout en beton niet hetzelfde gedrag vertonen, zullen verschillen in kruipgedrag zich uiten in de vorm van verhoogde interne spanningen. Om te voorkomen dat schade door dit fenomeen optreedt, kunnen hout-betonverbindingen beter niet onderworpen worden aan sterk variërende klimaatcycli [8]. Het is wetenschappelijk aangetoond dat uitzetten van hout en krimpen van beton leiden tot een toename van kip en een afname van onderlinge verschuiving [12].

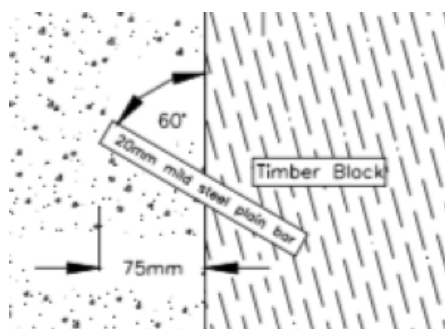
## 2.6. Hout-betonverbindingsmiddelen

Een van de eerste ontwikkelingen van hout-betonverbindingen is toegepast bij bruggen, omstreeks 1930. Hierbij werden balken voorzien van uitsparingen die worden volgestort door beton waardoor de verbinding tot stand komt [5]. Verbindingen tussen hout en beton door middel van stalen connectoren zijn ontwikkeld in de jaren 1930, in de Verenigde Staten aan de Universiteit van Oregon. Wereldwijd zijn soortgelijke verbindingen onderzocht, maar hoofdzakelijk voor structuren in huizen of voor lichte industriële constructies [13]. Voor vloersystemen zijn composietstructuren ontwikkeld wegens een schaarste van staal na de Eerste en Tweede Wereldoorlog. Gedurende de afgelopen 50 tot 60 jaren is er steeds meer gebruik gemaakt van hout-betonverbindingen ter vervanging van gekende staal-betonverbindingen. De toepassingsdomeinen zijn bruggen, renovaties en nieuwbouwprojecten [4].

Intensief onderzoek naar verschillende verbindingsmiddelen voor hout-betonverbindingen is verricht aan het einde van de 20<sup>ste</sup> en begin van de 21<sup>ste</sup> eeuw. De meeste onderzoeken naar deze verbindingsmiddelen zijn uitgevoerd om de sterkte en stijfheid van een soort verbinding te kunnen bepalen [12]. In een onderzoek aan de Universiteit van Firenze [14] classificeert men de verschillende verbindingsmiddelen op basis van de stijfheid van het systeem. In wat volgt, worden onderzochte (relevante) verbindingen aangehaald die elk getest zijn op afschuifweerstand.

Schroeven en nagels zijn verbindingsmiddelen die eenvoudig geplaatst worden over de lengte van een houten balk. Deze verbindingsmiddelen worden maar deels in het hout bevestigd zodat er nog een deel van de schroef of nagel uitsteekt boven de balk. Het uitstekende gedeelte van het verbindingmiddel zal zich in het beton bevinden. Push-out testen hebben aangetoond dat deze verbindingen een ductiel gedrag vertonen en maar een gedeeltelijke interactie kunnen vormen tussen de materialen [12].

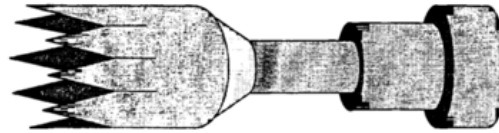
Gladde stalen deuvels, zoals te zien in figuur 2, of deuvels voorzien van schroefdraad zijn ook onderzocht als verbinding. De draagcapaciteit van deuvels met schroefdraad is hoger door de verhoogde uittrekweerstand. Deuvels aangebracht onder een hoek die kleiner is dan loodrecht op het hout bieden meer weerstand dan loodrecht geplaatste deuvels. Alsnog zijn deuvels ductiele verbindingsmiddelen en wordt er geen volledige interactie ontwikkeld [12, 13], [15].



Figuur 2: Stalen deuvels niet loodrecht op het houtoppervlak [13, p. 4]

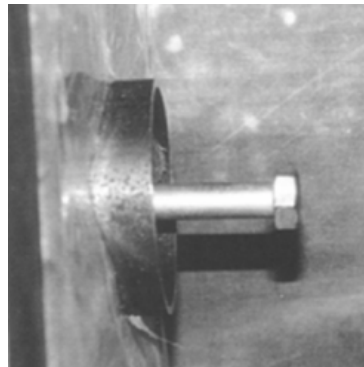
Een alternatief voor deze verbindingsmiddelen zijn INSA-Hilti connectoren, deze zijn ontwikkeld om assemblagetijd te beperken. Met behulp van een persluchtgereedschap worden deze in

het hout gedraaid waarbij de holle getande, cilindrische opening, in figuur 3, zich in het hout verankert [12]. Toepassen van deze connector creëert een andere interne houtstructuur die belast zal worden en waarbij beduidende toenames zijn op vlak van afschuifweerstand en ductiliteit. De connectoren zijn vervaardigd uit gegalvaniseerd staal dat een warmtebehandeling heeft ondergaan. Economisch gezien zijn dit soort verbindingsmiddelen daardoor minder interessant [16].



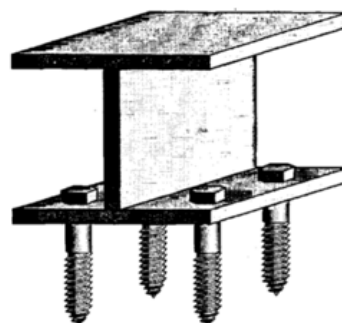
Figuur 3: INSA-Hilti connector [12, p. 16]

CHS-connectoren of cirkelvormige, holle verbindingsmiddelen bestaan uit lage stalen holle cilinders met een schroef in het midden. Zoals aangetoond in figuur 4 is de holle cilinder zowel in het hout als in het beton geplaatst, op deze manier kunnen de afschuifkrachten worden overgedragen. De schroef in het midden voorkomt dat het hout en beton van elkaar loskomen. Uit testen is gebleken dat deze verbindingen een ductiel gedrag vertonen [12, 13].



Figuur 4: CHS-connector [13, p. 6]

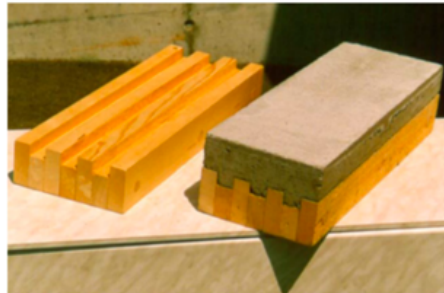
Universele kolomsecties, zoals afgebeeld in figuur 5, bestaan uit een kort gedeelte van een stalen profiel dat verbonden is met het hout door middel van schroeven in de bodemflens. De flenzen vormen een verbinding tussen het hout en beton, het web biedt weerstand tegen afschuiving. Het nadeel van deze verbinding in hout-beton is de bevestiging op hout. Omdat dit met schroeven in het hout verankerd zit, zal falen ook optreden door het bezwijken van de schroeven ten gevolge van afschuiving in combinatie met uittrekking [12, 13]. Gebaseerd op voorgaande besproken verbindingsmiddelen zal de bevestiging door schroeven eerder een ductiel gedrag vertonen.



Figuur 5: Universele kolomsectie [12, p. 22]

Figuur 6 toont een verbinding met *notches*, dit is een verbinding tussen hout en beton in de vorm van een getand oppervlak. Het oppervlak dat onderhevig is aan afschuiving of druk, is in deze verbinding

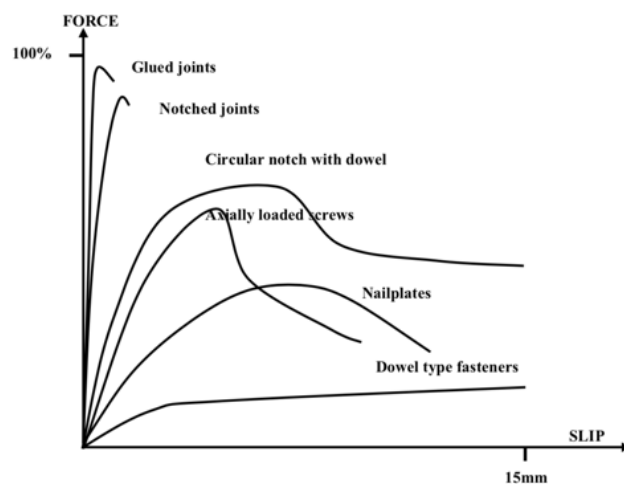
groter dan in voorgaande verbindingen. Testen tonen aan dat deze een grote sterkte en stijfheid hebben. Omdat hout en beton beide niet ductiel falen, zal dit systeem bros falen bij overbelasten. Tevens kunnen de notches voorzien worden van schroeven zodat een betere hechting gevormd wordt, waardoor de uittrekweerstand vergroot [5], [10].



Figuur 6: Notches [5, p. 37]

De efficiëntie van een verbindingsmiddel is afhankelijk van de geometrische eigenschappen van het verbindingsmiddel en van de betonplaat. Notches, al dan niet voorzien van schroeven, en gelijmde verbindingen, blijken verbindingen te zijn met een hoge sterkte en stijfheid [7]. Verbindingen met schroeven, nagels of deuvelformige elementen zijn minder stijf dan verbindingen op basis van contactoppervlakte. De verbindingen met de hoogste stijfheid zijn deze waar een uniforme verbinding gevormd wordt tussen het hout en beton. In vergelijking met hout-betonverbindingen die niet voorzien zijn van connectoren neemt de buigsterkte toe met 40% en de stijfheid verdubbelt [17].

Aan de Technische Universiteit Delft [18] heeft men onderzoek verricht naar de efficiëntie van verbindingsmiddelen tussen hout en beton. Onderzochte verbindingsmiddelen zijn: stalen staven, verlijmde stalen staven, verlijmde stalen profielen, notches in combinatie met staalplaten en/of schroeven, nagelplaten, opgelijmde notches, stalen *mesh*, Hilti-connectoren... Een stalen *mesh* wordt gedefinieerd als een staalplaat die algeheel voorzien is van perforaties, zowel in de houtzijde als in de betonzijde. Uit dit onderzoek is gebleken dat lijm de meest efficiënte verbinding vormt. Hiermee wordt bedoeld dat lijm een dermate interactie creëert waarbij spanningen bijna volledig overgedragen worden tussen hout en staal en dat de structuur hierdoor functioneert als één geheel. Een bekomen classificatie waarin de efficiëntie per verbindingsmiddel ten opzichte van anderen weergegeven is, wordt afgebeeld in figuur 7.

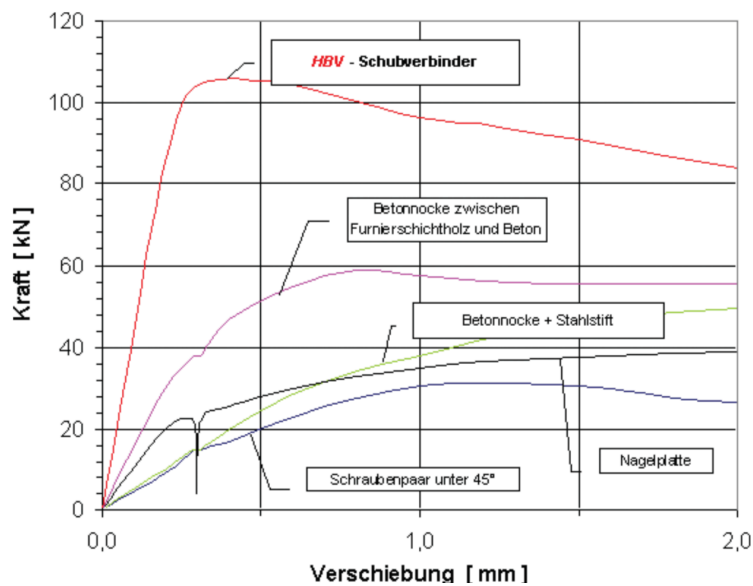


Figuur 7: Kracht - verplaatsing diagram voor verschillende verbindingsmiddelen [18, p. 16]

Een deels gelijkaardige classificatie, voortkomend uit een Duits onderzoek [19], geeft kracht – verplaatsingsdiagrammen van verschillende verbindingen weer met bijhorende waardes van krachten.



Dit is grafisch weergegeven in figuur 8, hierbij wordt eveneens besloten dat gelijmde stalen platen doeltreffende verbindingsmiddelen zijn.

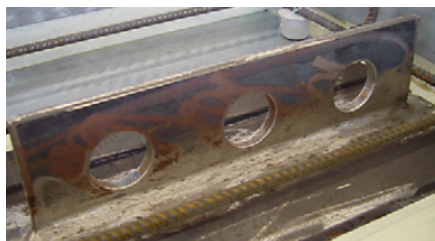


Figuur 8: Kracht - verplaatsing diagram [19, p. 323]

Gelijmde verbindingsmiddelen creëren de meest efficiënte verbinding als het juiste type lijm wordt toegepast. Testen uitgevoerd op verbindingen met als verlijming epoxy lijm, polyurethaan en phenol-resorcinol-formaldehyde op hout tonen aan dat epoxy lijm het meest efficiënt is en ook de sterkste verbinding vormt. Op vlak van verwerkbaarheid is dit type lijm beter verwerkbaar en kan het aangebracht worden in openingen van slechts 2 mm. Ten opzichte van de andere twee lijmsorten is epoxy lijm bovendien onafhankelijk van de houtsoort waarop het dient te hechten en zal eerder het hout falen dan de lijmverbinding [20].

## 2.7. Perfobond in staal-beton

*Perfobond* is een verbindingsmiddel dat oorspronkelijk ontwikkeld is voor staal-betonverbindingen. Het is ontwikkeld door een Duits bedrijf, namelijk Leonhardt, Andrä und Partners. Perfobond is een plaat vervaardigd uit staal en voorzien van een bepaald aantal gaten waarvan de diameter voldoende groot is opdat granulaten hierdoor passen. De plaat wordt bevestigd op een staalprofiel aan de hand van een lasverbinding en het gedeelte met gaten zal omgeven worden door beton. Figuur 9 beeldt een perfobondverbinding af zoals oorspronkelijk ontwikkeld voor staal-betonverbindingen [21]-[23].



Figuur 9: Perfobond voor staal-betonverbindingen [21, p. 467]

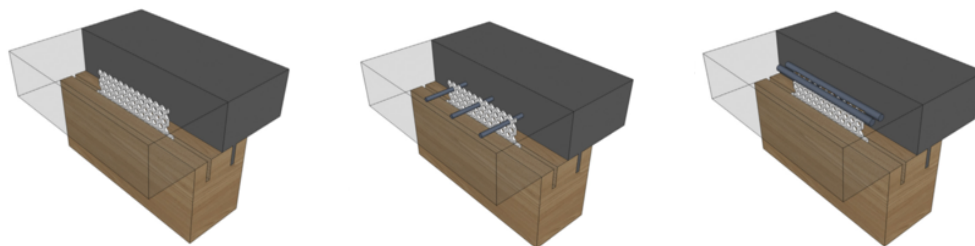
Aan de Universiteit van Minho [21], [23] is onderzoek gevoerd naar perfobondverbindingen tussen staal en lichtgewicht beton zonder wapening. Falen van dit systeem blijkt het gevolg van bezwijken van het beton. Wanneer beton niet voorzien is van wapening zal onaangekondigd falen optreden als gevolg van longitudinaal scheuren. Hierbij is de volledige betonweerstand teniet gedaan. Indien het beton wel voorzien is van wapening zullen scheuren eveneens optreden, maar zal het

betongedeelte wel nog over enig draagvermogen beschikken. Zellner's hypothese [23] stelt dat de perfobond na falen van het beton in de gaten nog een aanzienlijke afschuifweerstand bezit omwille van de wrijving van de gescheurde betonoppervlakten. Maximale drukspanningen worden overschreden in de zone waar perfobond druk uitoefent op het beton. Het gebruik van beton met een hoge druksterkte is aangeraden. Observeren van geteste proefstukken toont aan dat het perfobond slechts kleine vervormingen aan de onderzijde heeft ondergaan. Wanneer geometrische eigenschappen optimaal zijn, zullen perfobondverbindingen beschikken over een grote afschuifcapaciteit. In tegenstelling tot ontwerpnormen zal dit verbindingsmiddel geen ductiel gedrag vertonen en bij gevolg bros falen.

Uit een onderzoek van de Universiteit van Coimbra [24, 25] is gebleken dat perfobond niet over de gehele lengte aangebracht moet worden om een voldoende hoge afschuifweerstand te bekomen. Door meerdere verbindingen met tussenafstand te plaatsen, kan men een hogere mate van elasticiteit bereiken. Een ander voordeel van deze toepassing is het vereenvoudigd productieproces. In plaats van perfobond aan te brengen over een totale lengte van het profiel, is het ook mogelijk de verbindingen in kleinere delen aan te brengen door middel van lassen. Figuur 9 geeft weer hoe dit er mogelijk uit kan zien.

## 2.8. Perfobond in hout-beton

Alternatieven die het mogelijk maken om perfobond toe te passen binnen hout-betonverbindingen bestaan eveneens uit een staalplaat omgeven door beton, maar ook met een gedeelte verlijmd in hout. Perfobond in hout-beton wordt toegepast door een geperforeerde staalplaat te verlijmen in het hout en het overige deel te plaatsen in beton. In figuur 10 worden drie mogelijke uitvoeringen van perfobond in hout-betonverbindingen getoond. Uit onderzoek is gebleken dat toevoegen van wapening doorheen de perfobond resulteert in meer weerstand van het beton. Het aanbrengen van longitudinale wapening op de perfobond resulteert slechts in een kleine toename van de afschuifcapaciteit. Ook is gebleken dat er meer ductiliteit is in vergelijking met staal-betonstructuur. Doordat geschikte lijm over dermate hoge afschuifweerstand beschikte, trad falen in hout op door afschuiving in het hout, net naast de lijmverbinding [7, 8].

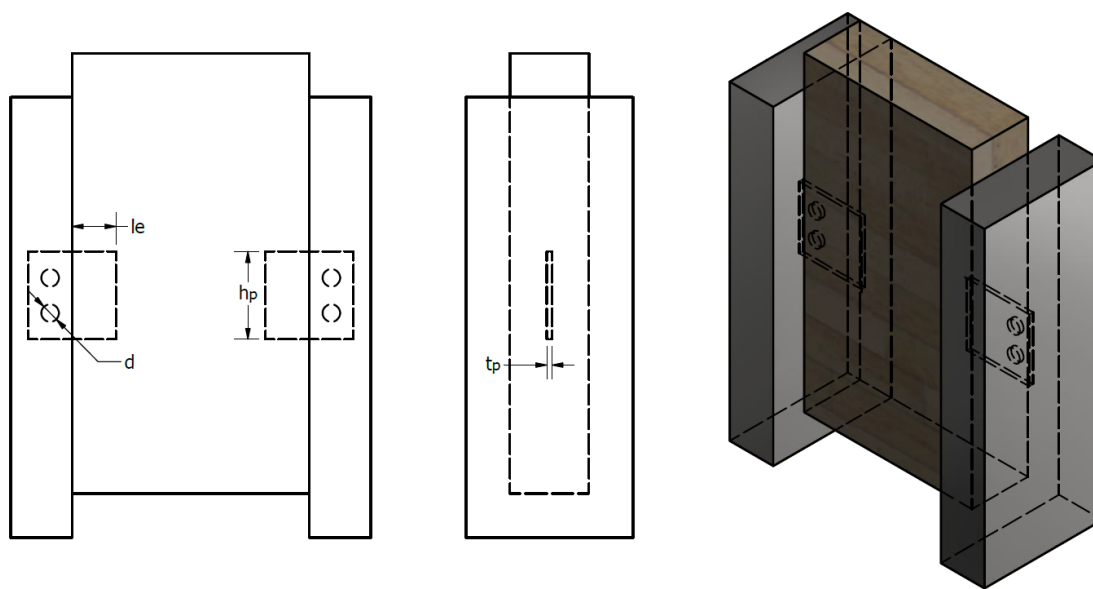


Figuur 10: Perfobond in hout-beton composiet [7, p. 3]



### 3. Analytische berekeningen

In deze sectie zijn analytische berekeningen besproken die mogelijk toepasbaar zijn op hout-beton composiet structuren met perfobondverbinding. De bedoeling van deze sectie is om aan de hand van literatuur tot consequente rekenmethodes te komen waarmee het mogelijk is faalkracht en faalmechanisme te voorspellen. Omwille van de composietstructuur is falen mogelijk in de verschillende materialen van de structuur waardoor er voor elk materiaal berekeningen noodzakelijk zijn. In volgende paragrafen zijn deze berekeningen per materiaal van de composietstructuur besproken. De beschouwde perfobondverbinding, alsook de identificatie van de gebruikte parameters in de berekeningen zijn getoond in figuur 11.



Figuur 11: Identificatie parameters voor analytische berekeningen

#### 3.1. Analyse beton

De eerste analytische berekening is afkomstig uit een onderzoek [23], [26] naar een staal- beton composiet structuur met gebruik van normaalgewicht beton en verschillende geometrie van perfobondconnectoren. Ook bevat dit onderzoek dwarswapening doorheen de gaten van de perfobond. Dit soort wapening is te zien op de tweede configuratie in Figuur 10. De bekomen vergelijking (1) duidt op de lokale weerstand van het beton. Deze vergelijking bevat drie essentiële termen waarbij de eerste term duidt op de lokale druksterkte tussen de perfobond en het beton. De tweede term heeft betrekking op de dwarswapening die doorheen de perfobond wordt aangebracht waardoor er een verdeling is van spanningen evenwijdig met de opgelegde kracht in het beton. De laatste term heeft betrekking op de verdeling van de spanning in het beton door de betonnen deuvels die door de gaten van de perfobond zitten.

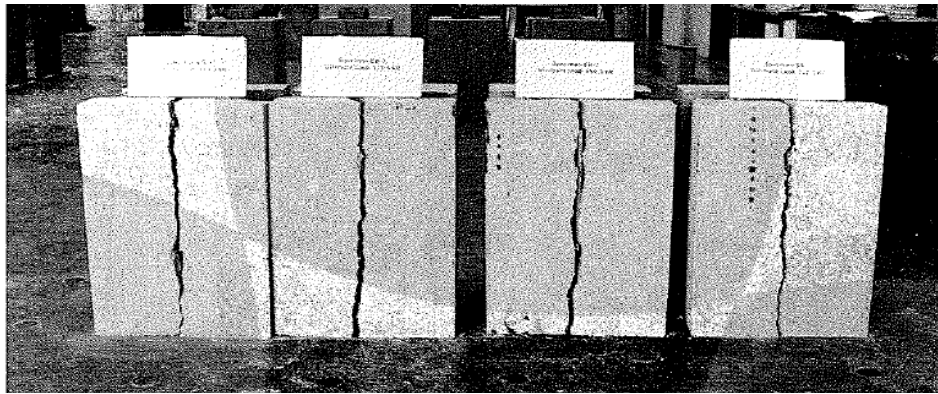
$$N_{\text{lokaal}} = 4,5 * h_p * t_p * f_c' + 0,91 * A_{tr} * f_y + 3,31 * n * d^2 * \sqrt{f_c'} \quad (1)$$

In de vergelijking (1) is  $N_{\text{lokaal}}$  [N] de lokale afschuifweerstand van het beton. De factoren  $h_p$  [mm] en  $t_p$  [mm] zijn respectievelijk de hoogte en dikte van de perfobond zoals getoond in figuur 11. De parameter  $f_c'$  [MPa] is de maximale druksterkte van het gebruikte beton.  $A_{tr}$  [mm<sup>2</sup>] is de totale oppervlakte van dwarswapening die door de gaten per perfobond zijn aangebracht en  $f_y$  [MPa] is de vloeisterkte van de gebruikte dwarswapening. De parameters  $n$  en  $d$  [mm] zijn respectievelijk het aantal gaten en de diameter van deze gaten in de perfobond bij het gedeelte dat in het beton is aangebracht. De coëfficiënten bij iedere term zijn afkomstig uit een regressieanalyse met bekomen waarden uit numerieke analyse.

In een ander onderzoek, verricht door dezelfde auteurs [22, 23], is er een tweede vergelijking (2) tot stand gekomen die de weerstand beschrijft tegen het optreden van een longitudinale breuk,  $N_{\text{long}}$  [N], zoals getoond op figuur 12. De coëfficiënten in (2) zijn eveneens afkomstig uit numerieke analyses. De eerste term in (2) duidt op de afschuifweerstand van het beton en verschilt dus van de eerste term in (1). De tweede term van de vergelijking komt overeen met deze uit (1), met uitzondering van de coëfficiënt. Dit komt doordat de dwarswapening bij (2) zorgt voor een grotere weerstand tegen het longitudinaal splijten van het beton, en dus zorgt voor een spanningsverdeling loodrecht op de richting van de opgelegde kracht. De derde term in (2) komt eveneens overeen met deze in (1) met uitzondering van de coëfficiënt. Bij longitudinale splijting van het beton dient het effect van de betonnen deuvels nu ook loodrecht op de richting van de opgelegde kracht te zijn.

$$N_{\text{long}} = 0,590 * A_{\text{cc}} * \sqrt{f'_c} + 1,233 * A_{\text{tr}} * f_y + 2,871 * n * d^2 * \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

De parameter  $A_{\text{cc}}$  [mm<sup>2</sup>] in (2) is de afschuifoppervlakte per perfobondconnector en is gelijk aan de longitudinale oppervlakte van het beton, verminderd met de oppervlakte van de perfobond connector [22]. De overige parameters zijn eerder besproken bij vergelijking (1).



Figuur 12: Longitudinale breuken in beton [22, p. 620]

### 3.2. Analyse staal

Het faalmechanisme van de perfobond is afschuiving ter hoogte van het contactvlak tussen hout en beton. De perfobond schuift hierbij af als een dunne staalplaat waardoor formule (3) wordt toegepast. Deze formule geeft de afschuifkracht  $V_{\text{pl,Rd,GCS}}$  [N] bij de vloeigrens van de perfobond [27].

$$V_{\text{pl,Rd,GCS}} = \frac{h_p t_p}{1,27} \frac{f_{y,p}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (3)$$

De parameters  $h_p$  [mm] en  $t_p$  [mm] geven respectievelijk de hoogte, evenwijdig aan het afschuifvlak, en de dikte van de perfobond weer. Er wordt bij deze formule dus gebruik gemaakt van de bruto doorsnede van de perfobond. De parameter  $f_{y,p}$  [MPa] is de vloeigrens van het staal waaruit de perfobond vervaardigd is. De coëfficiënt 1,27 wordt toegepast doordat de schuifspanningen niet uniform verdeeld zijn over de volledige rechthoekige doorsnede bij dunne platen. De coëfficiënt  $\sqrt{3}$  wordt gebruikt om de trekspanning  $f_{y,p}$  om te zetten naar een afschuifspanning en is gebaseerd op het Huber-Von-Mises criterium. Ten slotte is er de  $\gamma_{M0}$  die de partiële factor voor de weerstand van de dwarsdoorsnede is, onafhankelijk van de doorsnedeklasse.

Doordat de perfobond mogelijk geperforeerd is ter hoogte van het contactvlak tussen hout en beton, wordt er ook rekening gehouden met de netto doorsnede van de connector. Bij het gebruik van de netto doorsnede is formule (4) toepasbaar. De afschuifweerstand  $V_{\text{u,Rd,NCS}}$  [N] wordt hierbij niet meer berekend aan de hand van de vloeigrens van het gebruikte staal, maar met de uiterste treksterkte van het staal  $f_{u,p}$  [MPa] [27].

$$V_{u,Rd,NCS} = t_p (h_p - n d) \frac{f_{u,p}}{\sqrt{3} \gamma_{M2}} \quad (4)$$

De parameters  $h_p$  [mm] en  $t_p$  [mm] blijven gelijk aan deze in (3). De parameter  $n$  geeft het aantal gaten ter hoogte van de doorsnede weer en  $d$  [mm] de diameter van deze gaten. Indien gaten verschillende diameters hebben op dezelfde doorsnede ter hoogte van het contactvlak, dient de term  $t_p (h_p - n d)$  in (4) vervangen te worden door de netto doorsnede [mm<sup>2</sup>] ter hoogte van deze snede. Tot slot is er de parameter  $\gamma_{M2}$  wat de partiële factor voor de weerstand van op trek belaste dwarsdoorsneden met betrekking tot breuk voorstelt.

### 3.3. Analyse hout

De analyse van het faalmechanisme in hout is gebaseerd op een bijdrage van de lijmverbinding en een bijdrage van de drukspanning in hout. Voor de bijdrage van de drukspanning zijn twee verschillende hypothesen gemaakt op vlak van krachtverdeling in het hout.

Als eerste wordt de bijdrage van de lijmverbinding besproken waarbij is aangenomen dat de perfobond geen verdraaiing ondergaat en de lijm niet faalt vooraleer het hout faalt. Voor deze bijdrage wordt de verlijmde oppervlakte van de perfobond in het hout vermenigvuldigd met de afschuifsterkte van het hout evenwijdig met de vezelrichting. Als verlijmde oppervlakte van de perfobond wordt de bruto oppervlakte beschouwd omdat er wordt aangenomen dat de lijm de perforaties in de perfobond opvult. De kracht die de lijmverbinding dan opneemt,  $F_{lijm}$  [N] wordt met formule (5) bepaald.

$$F_{lijm} = f_{v,k} * h_p * l_e * 2 \quad (5)$$

In formule (5) duidt  $f_{v,k}$  [MPa] op de karakteristieke afschuifsterkte van het hout. De parameters  $h_p$  [mm] en  $l_e$  [mm] geven respectievelijk de hoogte en de indringdiepte van de perfobond weer. De coëfficiënt 2 wordt gebruikt indien de perfobond aan beide zijde verlijmd is met het hout.

Als eerste hypothese voor de bijdrage van de druksterkte wordt de karakteristieke stuiksterkte, evenwijdig met de vezelrichting, van het hout onder de perfobond beschouwd. Deze bijdrage,  $F_{druk,1}$  [N], is bepaald met formule (6).

$$F_{druk,1} = f_{h,0,k} t_p l_e \quad (6)$$

De karakteristieke stuiksterkte  $f_{h,0,k}$  [MPa] uit (6) wordt bepaald met formule (7) waarin de parameter  $\rho_k$  [kg/dm<sup>3</sup>] staat voor de karakteristieke dichtheid van het hout.

$$f_{h,0,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * t_p) * \rho_k \quad (7)$$

Als tweede hypothese is gesteld dat er een spreiding van de drukspanning in het hout plaatsvindt. Indien deze spreiding in rekening wordt genomen, wordt er gebruikt gemaakt van de maximale drukspanning van het hout. De spreiding van de krachten is aangenomen zoals getoond in figuur 13 waarbij de parameters  $x$  en  $y$  bepaald zijn aan de hand van Eurocode 5 [28]. De parameters  $x$  en  $y$  worden respectievelijk berekend met formule (8) en (9) waarin de parameter  $a$  [mm] wordt bepaald zoals in figuur 13.

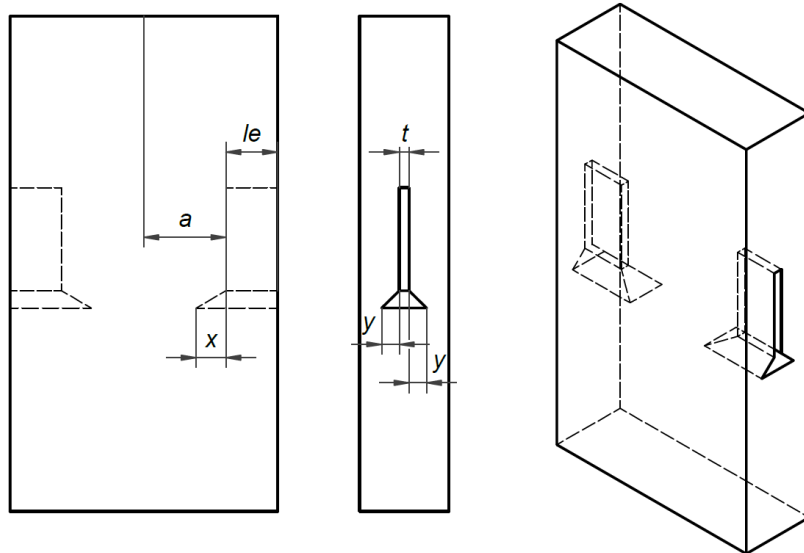
$$x = \min(30 \text{ mm}, a) \quad (8)$$

$$y = \min(30 \text{ mm}, a) \quad (9)$$

De bijdrage van de drukkracht bij hypothese 2,  $F_{druk,2}$  [N], is bepaald met formule (10)

$$F_{druk,2} = f_{ck} (t_p + 2y)(le + x) \quad (10)$$

Voor de maximale toegelaten drukspanning in het hout wordt de karakteristieke druksterkte,  $f_{ck}$  [MPa], beschouwd. De parameters  $t_p$  [mm] en  $le$  [mm] zijn eerder al besproken.



Figuur 13: Modelaanname hout

De kracht waarbij het hout faalt bij een configuratie zoals op figuur 11, wordt berekend als de som van formule (5) en (6) of de som van formule (5) en (10), afhankelijk van welke hypothese wordt gevolgd. Indien er gebruikt wordt gemaakt van een doorlopende perfbond is er geen contactvlak tussen de connector en het hout te beschouwen. Hierbij wordt de faalkracht in hout dan bepaald door gebruik van formule (5).

## 4. Experimentele opstelling

### 4.1. Proefstukken

#### 4.1.1. Parameters van de proefstukken

De belangrijkste gegevens omtrent materiaaleigenschappen en afmetingen van de proefstukken worden samengevat in tabel 1. Deze parameters zijn zo bepaald dat er een representatieve vergelijking gemaakt kan worden met reeds uitgevoerd benaderend onderzoek. Elk van de configuraties heeft een eigen code toegekend gekregen; P staat voor perfobond, 6 en 50 staan respectievelijk voor de dikte en de diepte van de perfobond in het hout, N (nee) of Y (ja) indiceert of er al dan niet perforaties in de perfobond aan de houtzijde zitten, en NWC of LWC geeft het type beton weer. Voor elke configuratie zijn er vijf proefstukken geproduceerd om te testen. In volgende alinea's is voor elk materiaal in tabel 1 een beschrijving gegeven.

Tabel 1: Parameters van de proefstukken

ID	Beton				Hout		Lijm	Perfobond				Proefstukken Aantal
	Type	Sterkteklasse	D x B x H (mm)	Wapening	Type	D x B x H (mm)		Staalklasse	D x B x H (mm)	Gaten betonzijde	Gaten houtzijde	
P-6-50- N-NWC	NWC	60/75	70 x 190 x 500	As,min	GL24h	90 x 270 x 500	Sika Anchorfix 3030	S355	6 x 100 x 100	Ø20	-	5
P-6-50- Y-NWC											Ø5	
P-6-50- N-NWC- 20	20/25	-										
P-6-50- N-LWC	LWC	20/22									-	
P-6-50- Y-LWC											Ø5	

#### 4.1.2. Beton

Zowel lichtgewicht beton (LWC) als normaalgewicht beton (NWC) wordt onderzocht. De reden hiervoor zijn de verschillende toepassingsdomeinen van hout-beton composiet structuren. Binnen de renovatiesector is een bijdrage aan sterkte en stabiliteit van een structuur prioritair. Bestaande structuren kunnen niet altijd de verhoogde belastingen hiervan weerstaan. Het voordeel dat lichtgewicht beton biedt, is namelijk een reductie van het eigengewicht. Lichtgewicht beton speelt eveneens een belangrijke rol binnen de nieuwbouwsector. Men probeert steeds grotere overspanningen te realiseren met als doel het bekomen van een meer open structuur. In vloersystemen blijft het eigengewicht hiervoor in de meeste gevallen een beperkende factor. Het gebruik van lichtgewichtbeton is dan opportuun om grotere overspanningen mogelijk te maken.

Ondanks de voordelen van lichtgewichtbeton is er ook normaalgewicht beton met een hoge druksterkteklasse gebruikt. Dit omdat een hogere sterkteklasse van beton meer spanningen kan weerstaan die de verbindingsmiddelen in het beton genereren. Deze eigenschap kan slechts benut worden indien het verbindingsmiddel in staat is om dermate grote spanningen over te dragen tussen de gebruikte materialen. Door de grote sterkte van dit beton kan de betondikte eveneens beperkt blijven waardoor ook het eigengewicht reduceert. Een bijkomend voordeel van dit beton is dat het minder vervormingen zal toelaten. Lichtgewicht beton heeft een lagere hardheid dan het normaalgewicht beton. Hierdoor zal de perfobond makkelijker vervormen in het lichtgewicht beton waardoor grotere doorbuigingen van een vloersysteem kunnen ontstaan. Om dit effect te analyseren is er ook een configuratie met normaalgewicht beton getest met dezelfde sterkteklasse als het lichtgewicht (P-6-N-NWC-20). Alle betonplaten zijn voorzien van minimum wapening om optreden van plotseling falen te voorkomen. Minimum wapening is bepaald aan de hand van [29].



### 4.1.3. Hout

De afmetingen van het gebruikte hout zijn afgestemd op de afmetingen van bestaande houten vloersystemen. Het hout dat gebruikt is, beschikt over gebruikelijke afmetingen waardoor het eenvoudig is te verkrijgen. De afmetingen van de uitgefreesde sleuf zijn bepaald in samenspraak met de fabrikant van de lijm, namelijk Sika. Zij hebben de afmetingen van de sleuf bevestigd in functie van het type lijm opdat dit optimaal gebruikt wordt. Naarmate de sleuf breder wordt gemaakt ten opzichte van de perfobond, vergroot de kans dat er glijding ontstaat in de lijmverbinding. Anderzijds zou in een te smalle sleuf de kans verhogen dat de lijm niet uniform verdeeld wordt in de gleuf. Een niet uniforme verdeling van de lijm resulteert in een minder goede hechting.

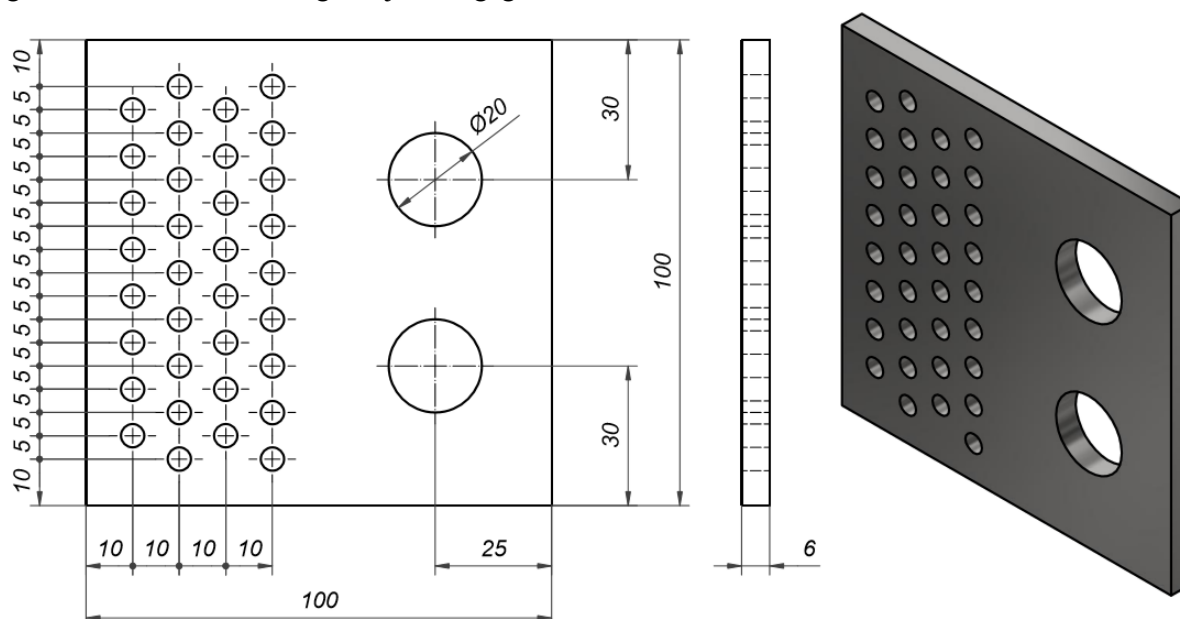
### 4.1.4. Lijm

De gebruikte lijm is Sikadur Anchorfix 3030 en is bepaald in samenspraak met lijmproducent Sika. Deze lijm is een hoogwaardige, thixotrope, twee-componenten verankeringslijm op basis van epoxy lijm en wordt gebruikt voor het verlijmen van draadstangen en wapeningsstaven in beton, hout, hol en vol metselwerk, natuursteen, kunststeen en massieve steen. Het is ook een vuurbestendige lijm wat de brandweerstand van vloersystemen ten goede komt. Bovendien verloopt de uitharding krimpvrij zodat er geen holtes ontstaan tussen perfobond en hout [30].

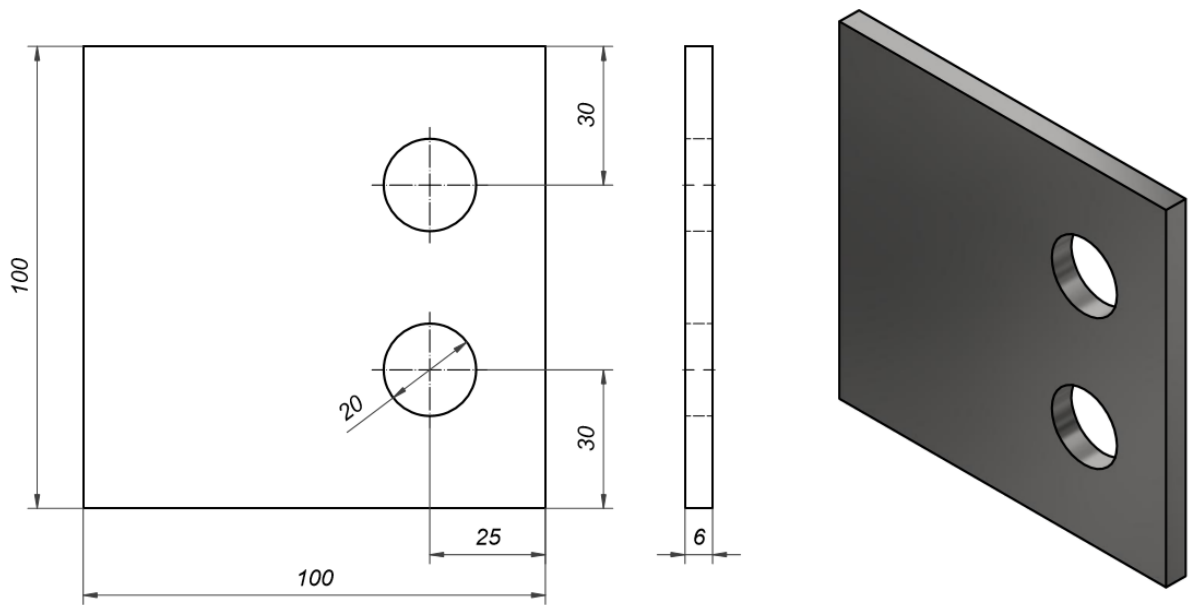
### 4.1.5. Perfobond

Reeds uitgevoerd onderzoek van hout-betonverbindingen handelt hoofdzakelijk over doorlopende verbindingen over de gehele lengte. Omwille van de eerder aangehaalde problematiek inzake de stijfheid en ductiliteit is in deze thesis gekozen voor onderzoek van onderbroken connectoren. Deze methode heeft het voordeel dat de effectieve verbinding tussen hout en beton niet enkel wordt ontwikkeld door de perforaties in de perfobond, maar ook door die zijden van de perfobond die loodrecht op de optredende afschuifkracht staan. Oftewel het boven- en ondervlak van de connector in figuur 14 en 15. Een bijkomende voordeel van dit onderbroken systeem is reductie van materiaal, zowel voor staal als voor lijm.

Een tweede parameter van de perfobond die wordt onderzocht is het al dan niet perforeren van het gedeelte van de staalplaat dat in het hout verlijmd wordt. Hierbij wordt onderzocht of perforaties de lijmverbinding bevorderen en hierdoor dus een betere verbinding vormen tussen het hout en de perfobond. De configuraties van de toegepaste verbindingsmiddelen zijn weergegeven in figuur 14 en figuur 15 waarin de afmetingen zijn weergegeven in millimeter.



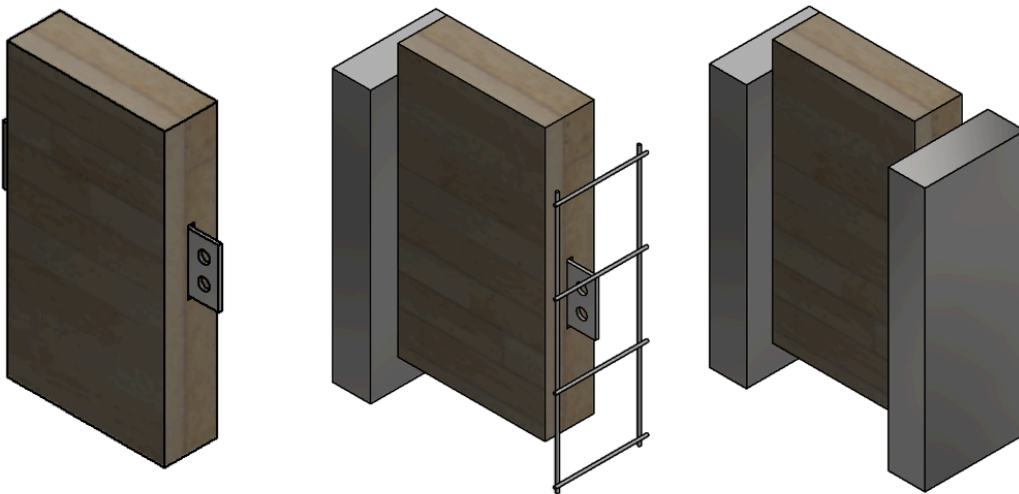
Figuur 14: Perfobond met perforaties in de houtzijde



Figuur 15: Perfobond zonder perforaties in de houtzijde

#### 4.1.6. Productie van de proefstukken

Het vervaardigen van de proefstukken bestond uit een reeks stappen die met de nodige precisie en vakkundigheid uitgevoerd zijn. In wat volgt wordt de gehanteerde werkwijze toegelicht aan de hand van figuur 16.



Figuur 16: Schematische opbouw van een proefstuk

Allereerst zijn de bekistingen gemaakt voor het storten van het beton. Het ontwerp hiervan is uitgetekend in Autodesk Inventor waaruit vervolgens een zaagplan is opgesteld. Aan de hand van dit zaagplan heeft een schrijnwerkerij de platen uit betonplex op maat gezaagd. Bijkomend is er ook geëxpandeerd polystyreen gebruikt om de onregelmatigheden uit te kisten. Dit polystyreen is 50 mm dik en is steeds naast en onder het hout aangebracht. Er is gekozen voor polystyreen omdat dit het gewicht van de bekistingen beperkt en de waterdichtheid van dit materiaal zorgt ervoor dat vers beton geen vocht verliest. Bovendien kan het op maat worden versneden zodat dit in de bekisting geklemd wordt en tijdens het ontkisten eenvoudig kan verwijderd worden.

De volgende stap was het voorbereiden van het hout en de stalen connectoren. Hierbij is het hout op maat besteld en was het enkel nog noodzakelijk de sleuven aan te brengen. Dit is gebeurd door middel van een CNC-gestuurde machine die de sleuven heeft uitgefreesd aan beide kanten van het hout.

De sleuven zijn hierbij ook ontdaan van resten houtmeel door middel van perslucht. De stalen platen zijn ook op maat besteld waarbij de uitsparingen zijn gemaakt met behulp van lasersnijden.

Daaropvolgend is de perfobond in de sleuven van het hout gelijmd. Het aanbrengen van de lijm gebeurde handmatig met een siliconepistool waarbij de spuitkop zorgde voor een goede menging van de twee-componentlijm op basis van epoxy. Het hout met verlijmded verbindingsmiddelen wordt afgebeeld in figuur 17 (links).

Als volgende stap is de staalwapening op maat versneden en zijn hierop de nodige afstandshouders aangebracht. Deze wapening is dan samen met het hout, waarin de perfobond verlijmd is, in de bekisting geplaatst. In bijlage A is hiervan een schets getoond waarbij de bekistingsplaat aan de voorzijde en linkerzijde is weggelaten, alsook de polystyreenplaat aan de voorzijde van het hout om de structuur te verduidelijken.

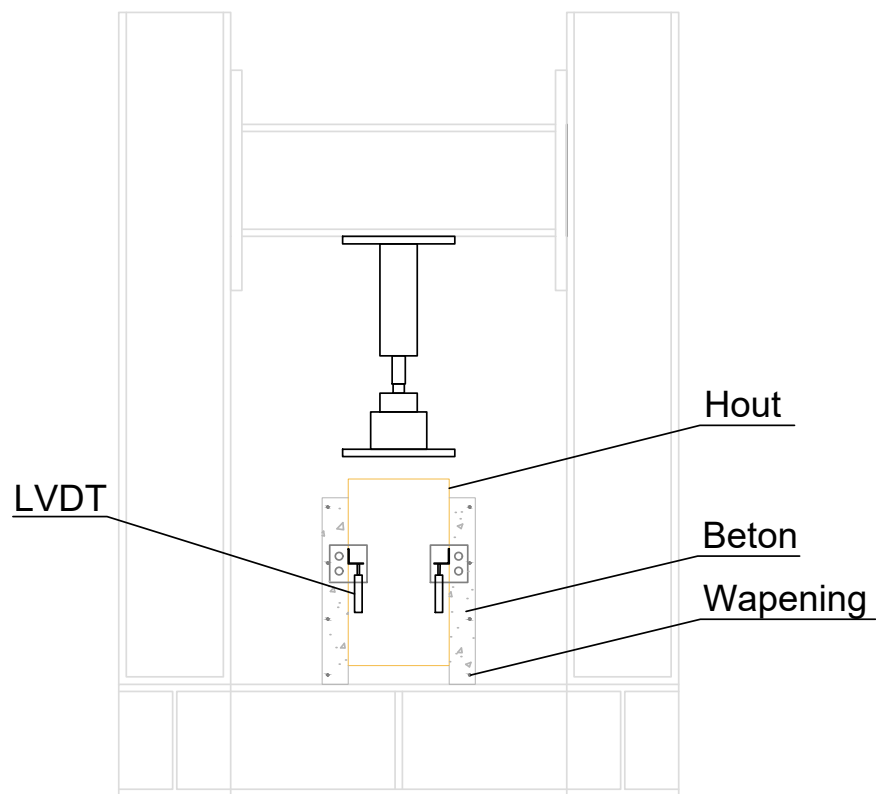
De laatste stap voor het produceren van de proefstukken was het maken van het beton en het vullen van de bekisting, waarbij het beton steeds voldoende werd getrild. Nadat de proefstukken voldoende waren uitgehard zijn ze ontkist, het eindresultaat hiervan is zichtbaar in figuur 17 (rechts).



Figuur 17: Voorbereid stuk hout (links) en afgewerkt proefstuk (rechts)

#### 4.2. Testopstelling

Het uitvoeren van de push-out testen gaat analoog aan de voorschriften uit de standaard EN26891 [31]. Volgens deze standaard dienen de proefstukken belast te worden met een beginlast gelijk aan 40% van de verwachte faallast en dit gedurende 30 seconden. Vervolgens dient de belasting af te nemen tot 10% van deze verwachte faallast, eveneens 30 seconden. Na het uitvoeren van deze handelingen kan elk proefstuk onderworpen worden aan een gradueel stijgende belasting totdat falen optreedt of een relatieve verplaatsing van 15 mm is bereikt. Het toenemen van deze last gebeurt aan een snelheid van 20% van de verwachte faallast per minuut met een deviatie van 25% totdat 70% van deze verwachte faallast behaald wordt. Eens de 70% bereikt is, kan de belasting toenemen met een constante snelheid. Meten van de relatieve vervorming tussen het hout en beton gebeurt met behulp van lineair variabele differentieeltransformatoren (LVDT's). Elk proefstuk beschikt over vier LVDT's, twee aan elke zijde zoals weergegeven in figuur 18. Bevestigen van deze meettoestellen op het hout kan door middel van kleine schroeven die geen merkbare invloed hebben op het gedrag van het hout. Bevestiging van het L-profiel op het beton kan met behulp van lijm. Het risico dat het gedrag van beton beïnvloed wordt door het boren van gaten is op deze manier vermeden. De kracht – verplaatsingsdiagrammen worden gegenereerd per zijde door het gemiddelde resultaat te nemen van twee LVDT's gelegen aan dezelfde betonplaat. De hydraulische pers zal voorzien worden van een voldoende brede verdeelplaat opdat de lasten op het hout zo uniform mogelijk worden aangebracht. De volledige testopstelling is getoond in figuur 18.



Figuur 18: Testopstelling push-out testen

#### 4.3. Resultaten

In deze paragraaf zijn geen resultaten getoond wegens onvoorziene omstandigheden. Na het produceren van de proefstukken was er de uitbraak van het COVID-19 virus. Als gevolg van de verstrengde maatregelen die de overheid heeft genomen op 17 maart 2020, sloot de Universiteit Hasselt de deuren op 18 maart 2020 voor bijna al het personeel en alle studenten. De uitvoering van de testen in het labo is hierdoor onmogelijk geworden waardoor resultaten onbestaande zijn.



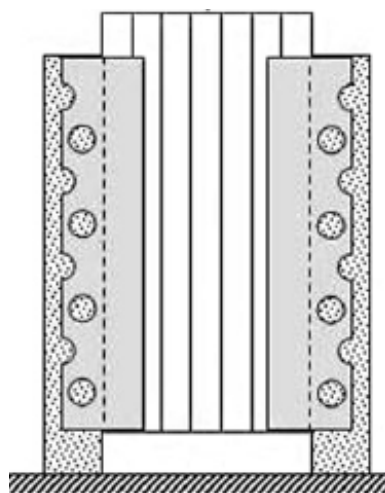
## 5. Alternatieve testresultaten

Door de onvoorziene omstandigheden, beschreven in paragraaf 4.3, zijn er testresultaten uit bestaande literatuur geanalyseerd. De literatuur die hiervoor is geraadpleegd bevat telkens push-out testen van hout-beton composiet structuren met een gelijkaardige metaalplaat als connector.

### 5.1. Verzameling van testen uit de literatuur

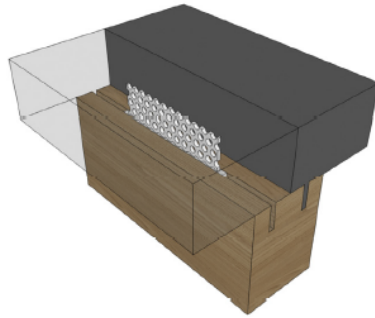
Ondanks het feit dat de geraadpleegde literatuur allemaal push-out testen bevatten van hout-beton composiet structuren, zijn er significante verschillen tussen deze testen. Dit komt doordat de testen afhankelijk zijn van tal van materiaalparameters en afmetingen. In wat volgt zijn de geraadpleegde onderzoeken weergegeven met hun voornaamste eigenschappen. In tabel 2 is een volledig overzicht van de eigenschappen per studie terug te vinden.

Een onderzoek van Miotto et al. [32] beschrijft tweezijdige push-out testen, verricht op een continu doorlopende perFOBOND als verbinding tussen hout en beton, het faalmechanisme en bijhorende krachten. Hierin zijn vijf configuraties van proefstukken getest en vergeleken met een numerieke simulatie in de software ANSYS om de bekomen resultaten te staven. De geometrie van de proefstukken is te zien in figuur 19, de gedetailleerde geometrie met afmetingen staat in bijlage B1. Dit proefstuk zal in deze thesis vervolgens vernoemd worden als P-C, wat staat voor perFOBOND en continu. Het resultaat van deze testen is dat het beton faalt doordat het in de longitudinale richting, parallel aan de perFOBOND, scheurt.



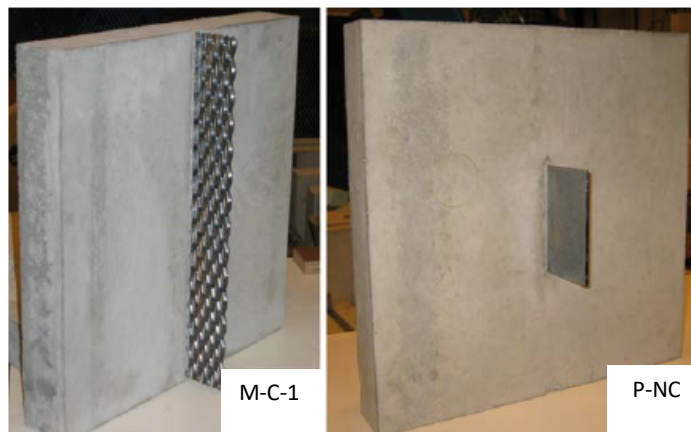
Figuur 19: Configuratie P-C [32, p. 218]

Een tweede gelijkaardig onderzoek werd verricht door Otero-Chansz et al. [7]. Dit bevat de resultaten van eenzijdige push-out testen waarbij de verbinding tussen hout en beton vervaardigd was als twee evenwijdige, geperforeerde staalplaten. Deze platen zaten in het hout verlijmd in een sleuf die door het volledige hout liep. Omwille van de vormgeving van de platen kan deze niet als perFOBOND gedefinieerd worden. De plaat is volledig uitgevoerd als een stalen mesh. Binnen dit onderzoek zijn verschillende configuraties getest waarvan twee geanalyseerd zijn in deze thesis, namelijk T1/180 en T1/300. In het verdere verloop worden deze benoemd als respectievelijk M-NC-180 en M-NC-300. De afkorting staat voor mesh die een niet continu verloop heeft over de gehele lengte. De gedetailleerde geometrie hiervan wordt in bijlage B2 getoond, de globale geometrie is getoond in figuur 20. Beide configuraties falen in het houtgedeelte, in het oppervlak net naast de verlijming van de connector.



Figuur 20: Configuratie M-NC-180 en M-NC-300 [7, p. 3]

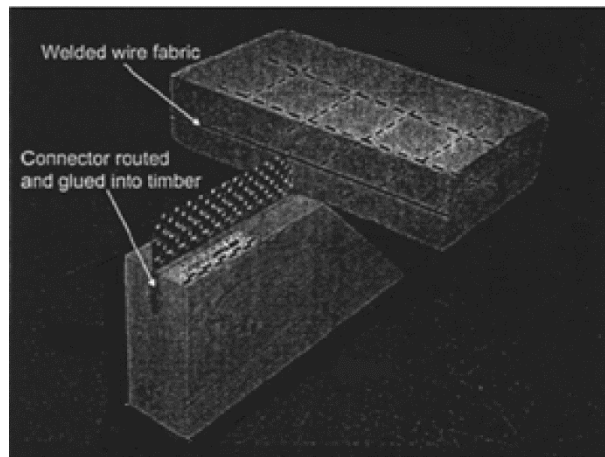
Het derde onderzoek dat uitgevoerd is door Lukaszewska et al. [9] handelt eveneens over enkelzijdige push-out testen op verschillende configuraties. De configuraties genaamd SM en GSP worden respectievelijk hernoemd in het verdere verloop van de thesis als M-C-1 en P-NC. Analoog aan voorgaande afkortingen staan deze voor een continu verlopende stalen mesh en een niet continu verlopende perfobond. Beide configuraties zijn getoond in figuur 21, met meer details in bijlage B3. In M-C-1 trad falen op door vloeien en vervolgens scheuren van het verbindingsmiddel, met voorafgaand het uittrekken van de mesh uit het beton. In P-NC trad lokaal falen van het beton op. Door het ontstaan van een moment om de verbinding werd druk gegenereerd in de betonplaat die leidde tot breuk.



Figuur 21: Configuratie M-C-1 en P-NC [9, p. 1540]

Een vierde vergelijkbaar onderzoek in de vorm van een eindige elementen analyse door Al-Sammari et al. [33] over een continue stalen mesh als verbinding, toont de analogie met push-out testen aan. Een theoretisch model van de betreffende hout-betonverbinding werd vergeleken met testresultaten analoog uitgevoerd als voorgaande onderzoeken. Het faalmechanisme bekomen uit de eindige elementenmethode is vloeien van het staal. De mesh die bestudeerd is, was over de gehele lengte van het proefstuk aangebracht. Deze configuratie wordt verder benoemd als M-C-2-EE.

Als vijfde en tevens laatste vergelijkbare onderzoek is een studie van Clouston et al. [8] waarin zes enkelzijdige push-out testen zijn uitgevoerd. De geteste configuratie bestond uit een verbinding van een continue stalen mesh en wordt getoond in figuur 22. De afmetingen van de geometrie zijn getoond in bijlage B4. Deze zal verder vernoemd worden als M-C-2, het cijfer twee toont aan dat het om een gelijkvormige mesh gaat als in voorgaand onderzoek. Het resulterende faalmechanisme was steeds vloeien van staal wat daarna leidde tot breuk van de mesh.



Figuur 22: Configuratie M-C-2 [8, p. 1406]



Tabel 2: Overzicht eigenschappen van geraadpleegde studies

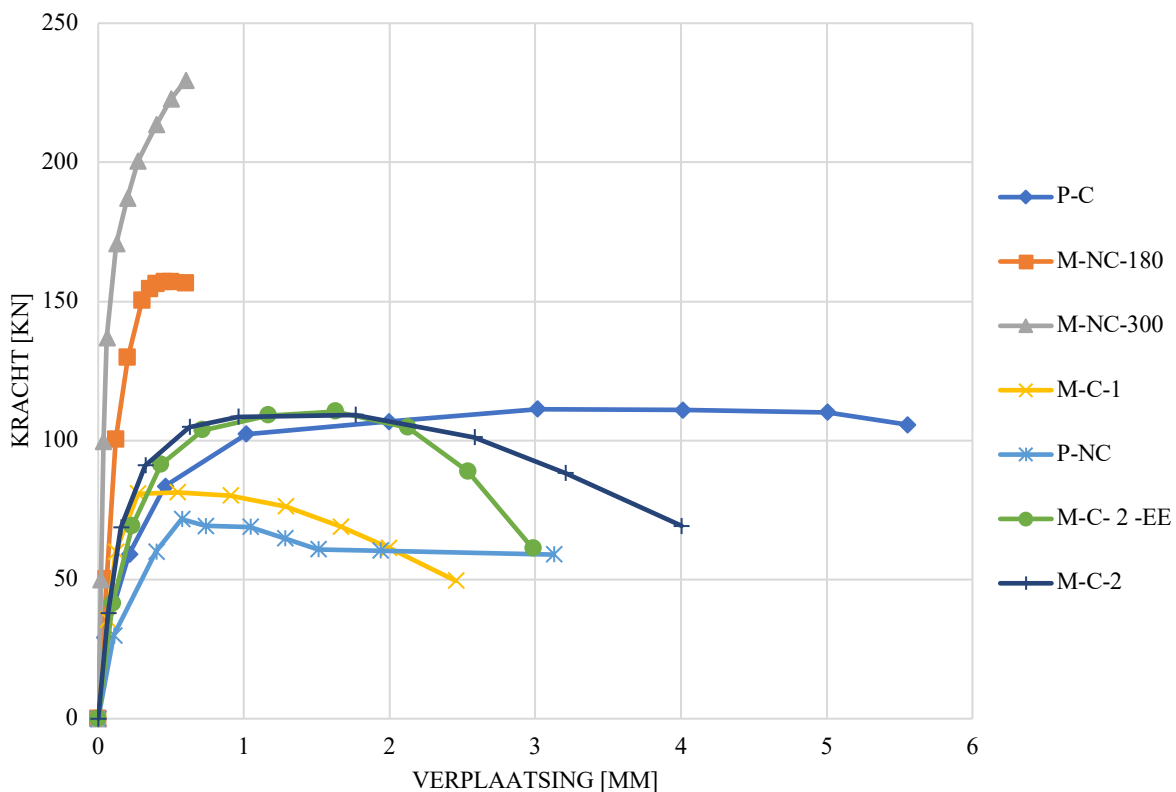
Referentie	Hout	Beton	Perfobond	Lijm	Dwarswapening	Kser (gemiddeld)	Fmax (gemiddeld)	Verplaatsing bij 80% belasting van	Faalmechanisme
P-C	$F_{v,k} = 7,5 \text{ Mpa}$	$f_c = 33,9 \text{ MPA}$	$f_y = 500 \text{ Mpa}$ continu: 450 mm gaten: $\Phi 32 \text{ mm}$ $t = 4,75 \text{ mm}$	epoxylijm 50x450 mm <sup>2</sup>	Dwarswapening CA60 diameter: 4,2 mm	339 kN/mm	153,4 kN	4 mm	Betonfalen door longitudinale scheur
M-NC-180	GL28h	Vezelversterkt beton $f_c = 24,9 \text{ MPA}$	$f_y = 294 \text{ Mpa}$ $h = 180 \text{ mm}$ in beton $h = 200 \text{ mm}$ in hout gaten: $\Phi 10$ $t = 5 \text{ mm}$	epoxylijm 40x200 mm <sup>2</sup>		838,1 kN/mm	170,2 kN	0,25 mm	Afschuiving in hout
M-NC-300	GL28h	Vezelversterkt beton $f_c = 24,9 \text{ MPA}$	$f_y = 294 \text{ Mpa}$ $h = 300 \text{ mm}$ in beton $h = 320 \text{ mm}$ in hout gaten: $\Phi 10$ $t = 5 \text{ mm}$	epoxylijm 40x320 mm <sup>2</sup>		2939,0 kN/mm	240,3 kN	0,15 mm	Afschuiving in hout
M-C-1	GL28h	C20/25	$f_y = 235 \text{ Mpa}$ continu: 400 mm $t = 3 \text{ mm}$	epoxylijm StoBPe 465/464 50x400 mm <sup>2</sup>		396,0 kN/mm	81,2 kN	0,2 mm	Vloeien en scheuren van staal
P-NC	GL28h	C20/25	$f_y = 235 \text{ Mpa}$ $h = 115 \text{ mm}$ $t = 3 \text{ mm}$	epoxylijm StoBPe 465/464 70x115 mm <sup>2</sup>		130,9 kN/mm	64,4 kN	0,5 mm	Vloeien van staal
M-C-2-EE	GL24h	Klasse B25 $f_{c,min} = 30 \text{ Mpa}$	$f_y = 248 \text{ Mpa}$ continu: 400 mm $t = 2 \text{ mm}$	epoxylijm 50x400 mm <sup>2</sup>		401,54 kN/mm	110,8 kN	0,3 mm	Vloeien en scheuren van staal
M-C-2	GL24h	Klasse B25 $f_{c,min} = 30 \text{ Mpa}$	$f_y = 235 \text{ Mpa}$ continu: 400 mm $t = 2 \text{ mm}$	epoxylijm 50x400 mm <sup>2</sup>		415,46 kN/mm	111,62 kN	0,6 mm	Vloeien en scheuren van staal

## 5.2. Vergelijking tussen verschillende hout-betonverbindingen

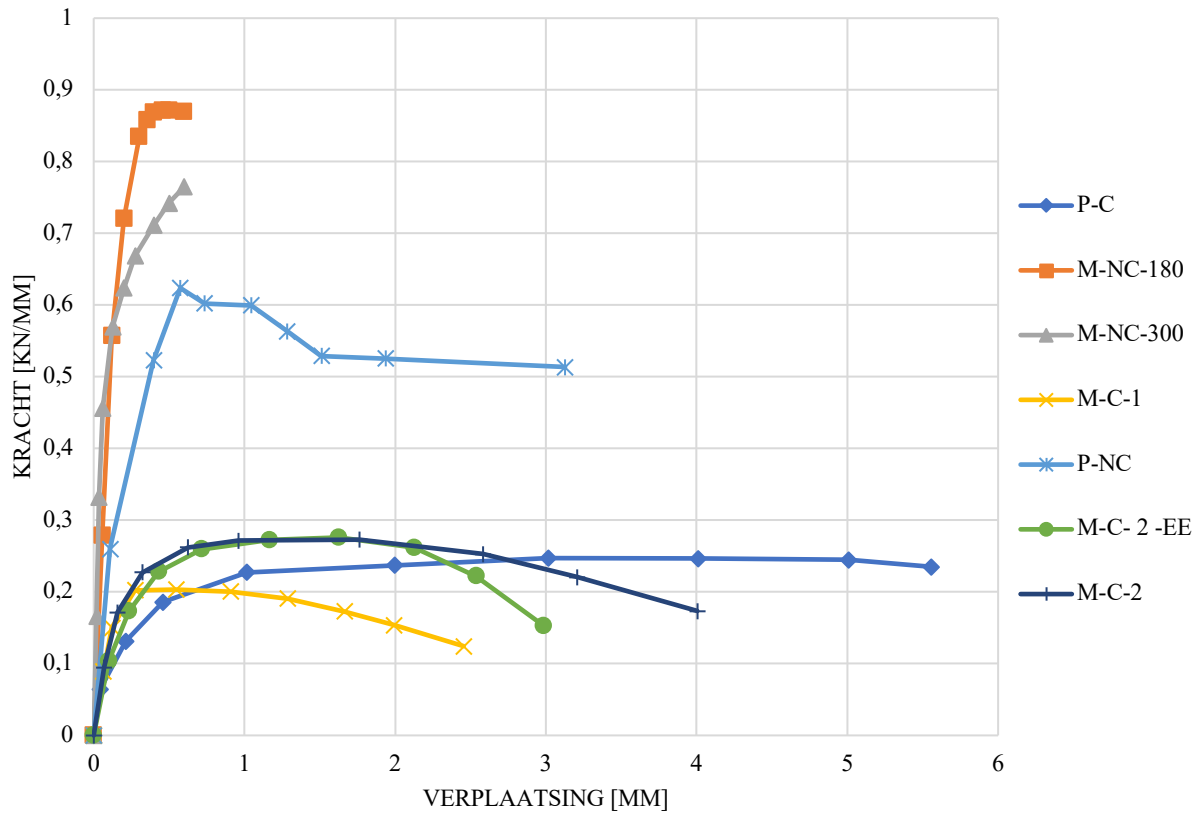
Een standaardisatie van de kracht-verplaatsingsdiagrammen uit de onderzoeken beschreven in voorgaande paragraaf, biedt de mogelijkheid tot het vergelijkbaar maken van de soorten verbindingsmiddelen. Het standaardiseren is gedaan ten opzichte van M-NC-180. Deze is als referentie gekozen omdat deze thesis als doel heeft het faalgedrag van de houtzijde te bestuderen bij een geometrie met een discontinue perfobond. Dit komt overeen met het faalmechanisme en geometrie van M-NC-180.

Voor elke configuratie is er ten opzichte van de M-NC-180 een standaardisatiefactor bepaald op basis van de materiaaleigenschap van het falende materiaal. De standaardisatiefactoren zijn voor iedere configuratie terug te vinden in bijlage C. Bij een faalmechanisme in beton is de betondruksterkte genomen om de standaardisatiefactor te bepalen. Bij hout is dit gedaan op basis van de afschuifsterkte van het betreffende hout, en bij het verbindingsmiddel op basis van de vloeigrens van het betreffende staal. De gestandaardiseerde kracht-verplaatsingsdiagrammen zijn in figuur 23 getoond.

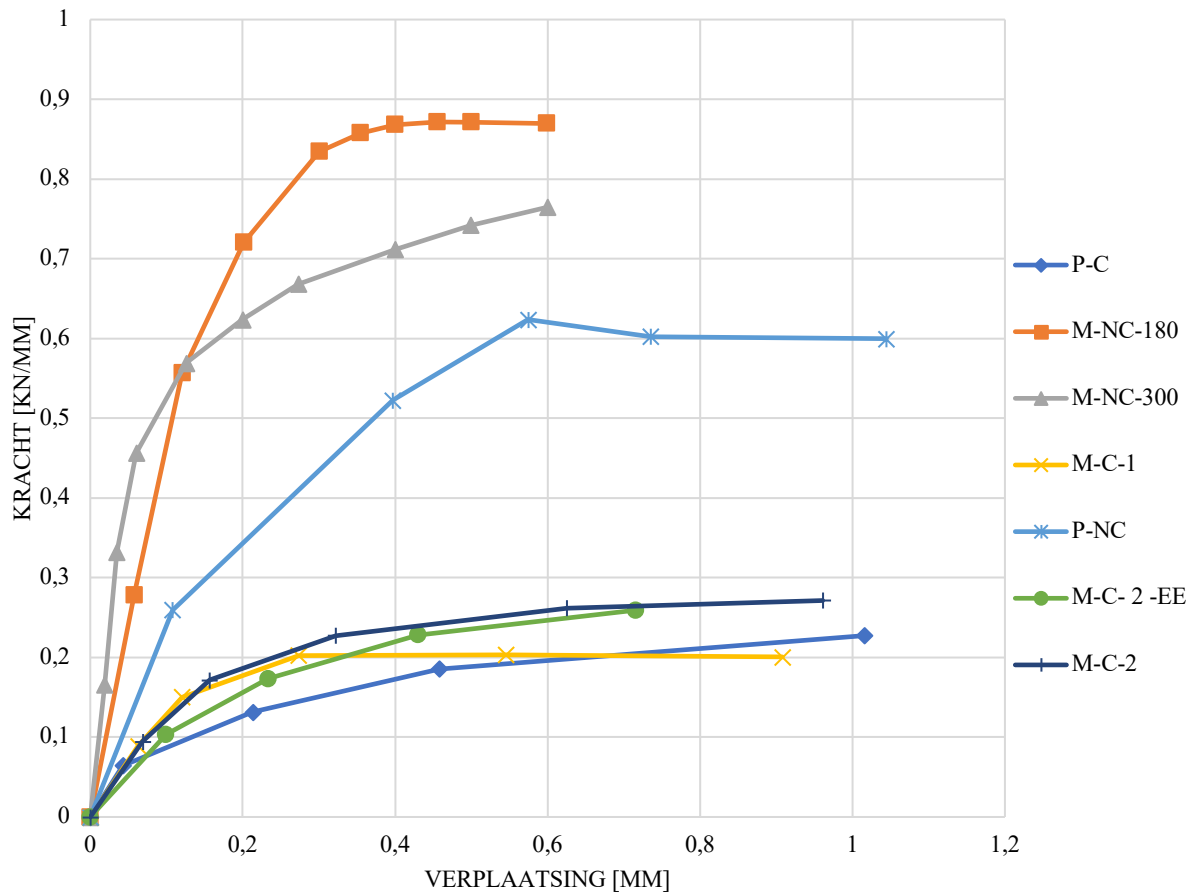
Na het toepassen van de standaardisatiefactoren is de aangebrachte kracht ook verschaald op basis van de lengte van de verbinding. Dit zodat men continue en niet continue verbindingsmiddelen kan vergelijken. Deze gestandaardiseerde resultaten met verschaling zijn getoond in figuur 24. In figuur 25 zijn eveneens de gestandaardiseerde grafieken te zien, maar tot een maximale verplaatsing van ongeveer 1 mm zodat de stijfheid onderling kan beoordeeld worden. In tabel 3 is een overzicht getoond van de maximale gestandaardiseerde belasting in kN/mm per configuratie. In deze tabel 3 is eveneens de waarde van de stijfheid getoond die gestandaardiseerd is op basis van de lengte van de connector. De oorspronkelijke stijfheid per configuratie is terug te vinden in voorgaande tabel 2.



Figuur 23: Kracht-verplaatsingsdiagrammen reeds uitgevoerd onderzoek



Figuur 24: Gestandaardiseerde kracht-verplaatsingsdiagrammen



Figuur 25: Gestandaardiseerde kracht-verplaatsingsdiagrammen tot 1 mm verplaatsing

Tabel 3: Maximale gestandaardiseerde belasting en gestandaardiseerde stijfheid

Referentie	Fmax [kN/mm]	Kser [kN/mm/mm]
P-C	0,247	136
M-NC-180	0,872	838
M-NC-300	0,765	1763
M-C-1	0,203	178
P-NC	0,624	205
M-C-2-EE	0,276	181
M-C-2	0,273	187

De geteste proefstukken, bestaande uit continue verbindingsmiddelen, worden in bovenstaande grafieken duidelijk in elkaars omgeving afgebeeld. Deze zijn P-C, M-C-1, M-C-2 en M-C-2-EE. De eerste vergelijking legt de focus op M-C-1 en M-C-2. Beide configuraties bevatten het stalen mesh als verbindingsmiddel en zijn daardoor goed te vergelijken. Dit blijkt ook uit de grafieken doordat ze gelijkvormig zijn en de stijfheden tot een belasting van 0,2 kN/mm quasi gelijk zijn. Beide configuraties hebben gelijke materiaaleigenschappen wat hout en staal betreft, het beton in M-C-1 is echter van een lagere sterkteklasse. Dit is mogelijks de oorzaak voor het verschil in faalkracht tussen beide configuraties. Door de lagere betonklasse is de mesh uit het beton getrokken door het optredende moment bij de enkelzijdige push-out testen. Dit heeft geleid tot buigmomenten die aangrijpen op het verbindingsmiddel waardoor deze niet meer op pure afschuiving wordt belast. Dit leidt tot sneller vloeien en scheuren van het mesh. Indien men deze configuraties vergelijkt met M-C-2-EE zijn er overeenkomsten zichtbaar. Dit is geen nieuw gegeven, want de betreffende eindige-elementenmethode benadert de realiteit zeer goed.

Wanneer het stalen mesh vergeleken wordt met P-C, waarin een continue perfbond verwerkt is, kan gesteld worden dat deze over een lagere stijfheid beschikt. De materiaaleigenschappen van het beton voor al deze proefstukken zijn gelijkaardig. De afschuifsterkte van hout en de staalklasse van het staal zijn beduidend groter voor P-C. Ondanks deze materiaaleigenschappen is een lagere stijfheid toch waarneembaar. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat de lijmverbinding plaatsvindt op een vlakke staalplaat die niet geperforeerd is. Dit kan de stijfheid van de lijmverbinding beïnvloeden. Bij P-C treedt falen niet meer op in de connector doordat de connector een grotere netto staalsectie bezit en vervaardigd is uit staal van een hogere klasse. Het falen vindt plaats in de betonzijde, nochtans is de breuk niet bros. Dit kan verklaard worden door de dwarswapening die doorheen de gaten van de perfbond is aangebracht waardoor krachten beter verdeeld worden doorheen de volledige betonsectie.

Inzake P-NC is het opmerkelijk dat deze sterk en stijf is ten opzichte van al vorige behandelde configuraties. Dit blijkt zo te zijn indien gestandaardiseerde waardes met eveneens een verscaling op basis van de lengte van het verbindingsmiddel vergeleken worden. Wanneer P-NC niet verschaald wordt op basis van verbindinglengte, blijkt deze zwakker en minder stijf te zijn. Dit is te verklaren doordat deze configuratie faalt in de verbinding. Deze verbinding loopt niet door over de volledige lengte waardoor een beperkte staalsectie wordt gecreëerd. Doordat deze verbinding niet over de volledige lengte doorloopt, wordt echter wel een stijve verbinding tussen hout en beton bekomen. De P-NC is het best te vergelijken met M-C-1 wegens de materiaaleigenschappen die identiek zijn. Hierbij is het duidelijk dat de P-NC stijver en sterker is als de kracht wordt uitgedrukt in kN/mm. Indien de kracht wordt uitgedrukt in kN blijkt het verschil tussen beide connectoren niet meer significant verschillend.

Tot slot worden M-NC-180 en M-NC-300 nog besproken. Belangrijk om te weten is dat deze verbindingen gevormd werden door middel van twee perfbondverbindingen per afschuifzijde. Er kan geconcludeerd worden dat een niet continue perfbond dus een stijver en sterker geheel vormt in tegenstelling tot de andere aangehaalde verbindingen, mits deze over eenzelfde netto staalsectie zouden beschikken. De M-NC-180 en M-NC-300 faalde door afschuiving in het hout en uit de grafieken blijkt ook dat dit heeft geleid tot een brosse breuk aangezien er weinig vervormingen zijn opgetreden.

## 6. Beoordeling van analytische methode

### 6.1. Validatie analytische methode

De analytische berekeningen uit hoofdstuk 3 worden geverifieerd met de resultaten uit de vergelijkbare onderzoeken in hoofdstuk 5. Het resultaat van de verificatie is weergegeven in tabel 4 en zal vervolgens worden besproken. Hierbij is ook een procentuele afwijking bepaald als het verschil tussen de experimentele en theoretische faalkracht ten opzichte van de theoretische faalkracht. Bijlage D - tabel 8 toont een overzicht van alle berekende faalkrachten per configuratie en per gebruikte formule.

Tabel 4: Validatie van analytische berekeningen

ID	Experimentele faalkracht [kN]	Theoretische faalkracht [kN]	Experimenteel faalmechanisme	Theoretisch faalmechanisme	Procentuele afwijking faalkrachten
P-C	153,4	140,1	Longitudinale betonscheur	Longitudinale betonscheur	8,67
M-NC-180	170,2	169,6	Afschuiven hout	Afschuiven hout	0,35
M-NC-300	240,3	240,6	Afschuiven hout	Afschuiven hout	0,12
M-C-1	81,2	109,7	Afschuiven connector	Afschuiven connector	35,10
P-NC	64,6	38,8	Lokaal falen beton	Lokaal falen beton	39,94
M-C-2	111,6	98,4	Afschuiven connector	Afschuiven connector	11,83

Het valideren van formules (1) en (2), die respectievelijk de weerstand tegen lokaal falen en longitudinaal scheuren van beton weergeven, is gebeurd aan de hand van configuraties P-C en P-NC. Bij P-C trad falen van beton op door het longitudinaal scheuren van het beton zoals getoond in Figuur 12. Formule (2) geeft hierbij een onderschatting van 8,67%, wat mogelijks te verklaren is door het feit dat enkel de volledige gaten in de perfobond in rekening zijn gebracht. De halve gaten die zich op de zijkant van de perfobond bevinden zijn niet in rekening genomen omdat formule (2) niet toelaat deze in rekening te nemen. Het toepassen van formule (1) op P-C geeft een faalkracht die hoger ligt dan het werkelijk bekomen resultaat uit de testen, wat in overeenstemming is met het faalmechanisme. Bij het toepassen van formule (1) op de configuratie P-NC is gebleken dat deze niet representatief is voor deze configuratie. Hierbij treedt een afwijking op van 39,94%. Dit is mogelijks door de gebruikte vorm van connector die niet overeenstemt met het toepassingsgebied van de formules. Ondanks de afwijking, volgt wel het juiste faalmechanisme uit de berekeningen. Omdat bij deze configuratie geen wapening of gaten zijn gebruikt, kan de afwijking te wijten zijn aan de coëfficiënt 4,5 in formule (1). Het kalibreren van deze coëfficiënt op basis van de resultaten voor de configuratie P-NC leidt tot een coëfficiënt 7,489. Deze coëfficiënt dient verder onderzocht te worden in een parameterstudie. Uit configuraties M-NC-180, M-NC-300, M-C-1 en M-C-2 is gebleken dat de formules eveneens niet representatief zijn voor het stalen mesh als verbindingsmiddel.

Voor staal kan enkel de formule (4) gevalideerd worden met behulp van de geanalyseerde onderzoeken. Dit omdat formule (3) van toepassing is binnen ontwerpcontext waarbij falen wordt beschouwd als vloeien van het staal terwijl het faalmechanisme in de vergeleken onderzoeken breuk van verbinding is. Breuk als faalmechanisme wordt weergegeven door formule (4). Het toepassen van deze formule op configuraties M-C-1 en M-C-2, waarbij het faalmechanisme effectief breuk in de verbinding is, leidt tot een afwijking van respectievelijk 35,1% en 11,8%. Hierbij is het belangrijk om te weten dat van het stalen mesh experimentele gegevens ontbreken. Zowel de correcte netto staalsectie, alsook de correcte waarde voor  $f_u$ , zijn niet gekend. Bij de andere configuraties blijkt de formule correct aan te geven dat er geen falen in het staal verwacht wordt.

Bij de validatie van de analyse voor hout is configuratie P-C, M-C-1 en M-C-2 gebruikt om enkel de bijdrage van de lijmverbinding te verifiëren. De configuraties bevatten een continue verbinding waardoor er geen bijdrage geleverd wordt door hout dat op druk belast wordt onder de connector en

enkel de lijmverbinding krachten overbrengt. Hiervoor wordt formule (5) toegepast waaruit blijkt dat het hout niet faalt, wat in overeenstemming is met de bevindingen uit de onderzoeken. Vervolgens is de analyse op M-NC-180 en M-NC-300 uitgevoerd waarbij het falen optreedt door het afschuiven van het hout net naast de lijmverbinding. Dit bevestigt de beginveronderstelling dat de lijm niet faalt voordat het hout afschuift nabij de lijmverbinding. Ook de analyse wordt hierbij bevestigd doordat de afwijking met de resultaten van M-NC-180 en M-NC-300 respectievelijk 0,35% en 0,12% is van de berekende waarde. Configuratie P-NC betreft geen continue verbinding waardoor niet enkel de lijmverbinding van belang is voor bepaling van het gedrag van het hout. Hierbij bleek dat de bijdrage van formule (5) en (6) niet voldoet, waardoor afgeleid wordt dat de bijdrage van de stuksterkte een onderschatting is. De methode waarbij formule (5) en (10) gebruikt wordt, valt niet te falsificeren doordat P-NC niet faalt in hout. Wel kan worden bevestigd dat de aanname van een krachtspreiding klopt.

## 6.2. Extrapolatie analytische methode

De formules voor staal, beton en hout worden gebruikt om een inschatting te maken van de resultaten van de push-out testen van geproduceerde proefstukken voor deze thesis. De formules zijn gevalideerd in paragraaf 6.1. op basis van de beschouwde resultaten uit bestaande literatuur.

Bij het voorspellen van het faalmechanisme is er nog de onzekerheid omtrent de correctheid van de bijdrage van formule (6) en (10). Hierdoor is een inschatting van het exacte faalmechanisme moeilijk. De bijhorende berekende faallasten kunnen eveneens niet eenduidig bepaald worden wegens de afwijkingen die bekomen worden in vorige paragraaf. Tabel 5 toont de resultaten van het extrapoleren van de gebruikte formules op de proefstukken binnen deze thesis op één zijde van de configuratie. In tabel 6 zijn vervolgens de waardes weergegeven voor de volledige configuraties waarbij beide zijden in rekening zijn gebracht.

Tabel 5: Extrapolatie voor één zijde van de proefstukken

Materiaal	Faalmechanisme	P-6-50-NWC	P-6-50-LWC	P-6-50-N-NWC-20
Beton	Lokaal falen van beton (1)	225,4 kN	71,8 kN	80,74 kN
	Longitudinaal falen van beton (2)	173,2 kN	93,8 kN	100,0 kN
Staal	Falen van de perfobond (4)	190,5 kN	190,5 kN	190,5 kN
Hout	Bijdrage formule (5)	35,0 kN	35,0 kN	35,0 kN
	Bijdrage formule (6)	8,9 kN	8,9 kN	8,9 kN
	Falen t.g.v. afschuiving i.c.m. stuk rechtstreeks op het contactoppervlak (5) + (6)	43,9 kN	43,9 kN	43,9 kN
	Bijdrage formule (5)	35,0 kN	35,0 kN	35,0 kN
	Bijdrage formule (10)	156,7 kN	156,7 kN	156,7 kN
	Falen t.g.v. afschuiving i.c.m. druk op het geprojecteerde oppervlak (5) + (10)	191,7 kN	191,7 kN	191,7 kN

Tabel 6: Extrapolatie voor volledig proefstuk

Materiaal	Faalmechanisme	P-6-50-NWC	P-6-50-LWC	P-6-50-N-NWC-20
Beton	Lokaal falen van beton (1)	450,8 kN	143,6 kN	161,5 kN
	Longitudinaal falen van beton (2)	346,3 kN	187,6 kN	200,0 kN
Staal	Falen van de perfobond (4)	381,1 kN	381,1 kN	381,1 kN
Hout	Bijdrage formule (5)	70,0 kN	70,0 kN	70,0 kN
	Bijdrage formule (6)	17,8 kN	17,8 kN	17,8 kN
	Falen t.g.v. afschuiving i.c.m. stuik rechtstreeks op het contactoppervlak (5) + (6)	87,8 kN	87,8 kN	87,8 kN
	Bijdrage formule (5)	70,0 kN	70,0 kN	70,0 kN
	Bijdrage formule (10)	313,4 kN	313,4 kN	313,4 kN
	Falen t.g.v. afschuiving i.c.m. druk op het geprojecteerde oppervlak (5) + (10)	383,4 kN	383,4 kN	383,4 kN

Ondanks de verschillen tussen de vijf configuraties die in tabel 1 zijn weergegeven, zijn er wat de berekeningen betreffen maar drie verschillende configuraties. Dit is te wijten aan het niet in rekening brengen van de perforaties in de perfobond aan de houtzijde omdat wordt aangenomen dat de lijm niet faalt waardoor de faalkracht hierdoor niet wordt beïnvloedt. De resultaten voor de proefstukken vervaardigd uit hogesterktebeton, P-6-50-NWC, bieden duidelijk meer betonweerstand, zowel op vlak van lokaal als longitudinaal falen. Wat betreft het gedrag van het staal en het hout zijn de resultaten voor de configuraties gelijk.





## 7. Besluit

Deze thesis behandelt het onderzoek naar een verbinding tussen hout en beton met geperforeerde stalen platen, perfobond genaamd, die met behulp van epoxy lijm in hout verlijmd worden. In de literatuur wordt de staal-betonverbinding uitvoerig besproken waarbij ook formules zijn opgesteld om de faalkracht van deze verbindingen te begroten. Voor de hout-staalverbinding is dit niet het geval. Het doel van deze thesis was dan ook om meer inzicht te krijgen in het gedrag van hout in hout-beton composiet structuren. Hiervoor zijn ook formules opgesteld om voorspellingen van faalkrachten en bijhorende faalmechanismen te kunnen doen. Om dit te bestuderen is een literatuurstudie uitgevoerd om te onderzoeken wat de beschikbare soorten verbindingsmiddelen zijn. Op basis van deze studie werden vijf configuraties bepaald die experimenteel getest zouden worden. Hiervan zijn geen resultaten bekomen wegens de uitbraak van COVID-19. Als gevolg hiervan zijn alternatieve testresultaten uit reeds uitgevoerd onderzoek in acht genomen en zijn deze resultaten gestandaardiseerd om zo een vergelijkbare studie op te stellen. Deze gestandaardiseerde resultaten zijn vergeleken met de opgestelde formules, waarna deze formules zijn geëxtrapoleerd naar de vijf configuraties die initieel getest zouden worden binnen deze thesis.

Uit de standaardisatie van resultaten van bestaande push-out testen kan geconcludeerd worden dat er een duidelijk verschil is tussen het toepassen van continue en niet continue verbindingsmiddelen. De configuraties P-NC, M-NC-180 en M-NC-300 bestaan uit een niet continue connector en beschikken over een hogere stijfheid dan de andere behandelde configuraties. Naar ductiliteit toe is gebleken dat falen in hout een zeer nadelige situatie is. Falen in hout leidt tot breuken waarbij weinig vervorming aan vooraf gaat. In beton kan eveneens brosse breuk optreden, maar dit wordt sterk gereduceerd door gebruik van wapening. Indien falen in de connector plaatsvindt, blijkt de verbinding meer ductiel te zijn omwille van het vloeien van de connector voordat deze scheurt.

De gevalideerde analyses in deze thesis blijken conform te zijn met de testresultaten van bestaande push-out testen. De formules die gebruikt zijn om de faalkracht tussen de connector en het beton te begroten, blijken consistent te zijn met de resultaten bekomen bij push-out testen van hout-beton composiet structuren. Wat de connector zelf betreft, blijkt de toegepaste formule inconsistent te zijn met de resultaten indien een stalen mesh gebruikt wordt als connector. Hierbij dient wel de kanttekening gemaakt te worden dat er te weinig informatie beschikbaar was om alle karakteristieken en geometrie van het mesh in rekening te brengen. Omdat de perfobond geen speciale geometrie bevat, zal de gebruikte formule voor staal hierbij normaliter wel toegepast kunnen worden. De gebruikte formules en hypothesen voor hout konden niet volledig gevalideerd worden. Er is wel gebleken dat het gebruik van formule (5) + (6) leidt tot een onderschatting van de faalkracht en formule (5) + (10) leidt tot een overschatting. Er is ook aangetoond dat de bijdrage van formule (5) consistent is met de experimenten. Dit leidt tot het besluit dat de drukkracht die perfobond in het hout genereert groter is dan enkel de stuiksterkte onder de perfobond, maar kleiner is dan de maximale drukspanning over het gespreide oppervlak met geometrie zoals met formule (8) en (9) bepaald. Ondanks het feit dat niet alle analyses zijn geverifieerd, is dit in de toekomst wel mogelijk door het testen van de geproduceerde proefstukken voor deze thesis.

Tot slot duidt de extrapolatie er op dat de proefstukken P-6-50-N-NWC en P-6-50-Y-NWC zullen falen in het hout. Hierbij wordt falen ten gevolge van afschuiving in combinatie met druk op het geprojecteerde oppervlak als een uiterste grens gesteld waarvan wordt aangenomen dat deze niet zal gehaald worden. Hierdoor zal de perfobond niet falen. Bij de overige configuraties ligt de faalkracht van beton tussen de twee gestelde faalgrenzen van hout waardoor er niet met zekerheid een faalmechanisme kan voorspeld worden.



## Bibliografie

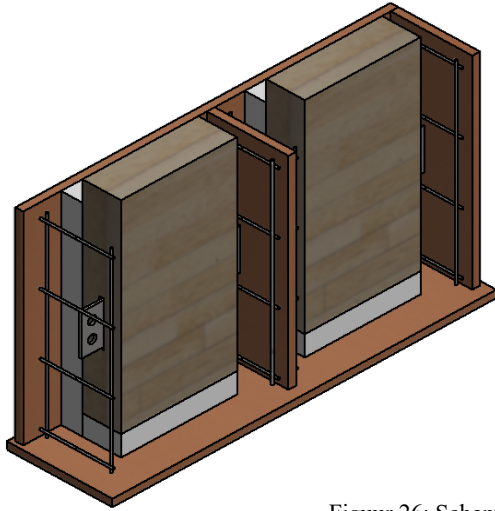
- [1] T. Goverse, M. P. Hekkert, P. Groenewegen, E. Worrell en R. E. Smits, „Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints,” *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 53-74, 2001.
- [2] A. Gubana, „State-of-the-Art Report on high reversible timber to timber strengthening interventions on wooden floors,” *Construction and Building Materials*, nr. 97, pp. 25-33, 2015.
- [3] J. Estévez-Cimadevila, D. Otero-Chans, E. Martín-Gutiérrez en F. Suárez-Riestra, „Self-tensioning system for long-span wooden structural floors,” *Construction and Building Materials*, nr. 102, pp. 852-860, 2016.
- [4] D. Yeoh, M. Fragiaco, M. De Franceschi en K. H. Boon, „State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 137, nr. 10, pp. 1085-1095, 2011.
- [5] A. Dias, J. Schänzlin en P. Dietsch, „Design of timber-concrete composite structures,” in *A state-of-the-art report by COST*, Aachen, Germany, 2018.
- [6] P. Clouston en A. Schreyer, „Design and Use of Wood–Concrete Composites,” *PRACTICE PERIODICAL ON STRUCTURAL DESIGN AND CONSTRUCTION*, nr. 13, pp. 167-174, 2008.
- [7] D. Otero-Chans, J. Estévez-Cimadevila, F. Suárez-Riestra en E. Martín-Gutiérrez, „Experimental analysis of glued-in steel plates used as shear connectors in Timber-Concrete-Composites,” *Engineering Structures*, nr. 170, pp. 1-10, 2018.
- [8] P. Clouston, A. Bathon, Leander en A. Schreyer, „Shear and Bending Performance of a Novel Wood–Concrete Composite System,” *Journal of Structural Engineering*, nr. 131, pp. 1404-1412, 2005.
- [9] E. Lukaszewska, H. Johnsson en M. Fragiaco, „Performance of connections for prefabricated timber–concrete composite floors,” *Materials and Structures*, nr. 41, pp. 1533-1550, 2008.
- [10] R. Gutkowski, K. Brown, A. Shigidi en J. Natterer, „Laboratory tests of composite wood–concrete beams,” *Construction and Buildingmaterials*, nr. 22, pp. 1059-1066, 2008.
- [11] L. A. Bathon en P. Clouston, „Experimental and Numerical Results on Semi Prestressed Wood-Concrete Composite Floor Systems For Long Span Applications,” 2014.
- [12] C. A. Weaver, „Behaviour of FRP-reinforced Glulam-Concrete Composite Bridge Girders,” University of Maine, Maine, 2002.
- [13] M. F. Benítez, „Development and testing of timber/concrete shear connectors,” in *Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology*, Chili, 2008.
- [14] A. Ceccotti, „Timber Concrete Composite Structures,” in *Timber Engineering STEP 2*, pp. 1-12.
- [15] D. Denouwe Djoubissie, A. Messan, E. Fournely en A. Bouchaïr, „Experimental study of the mechanical behavior of timber-concrete shear T connections with threaded reinforcing bars,” *Engineering Structures*, nr. 172, pp. 997-1010, 2018.
- [16] B. Faggiano, A. Marzo, A. Formisano en F. Mazzolani, „Innovative steel connections for the retrofit of timber floors in ancient buildings: A numerical investigation,” *Computers and Structures*, nr. 87, pp. 1-13, 2009.
- [17] W. G. Davids, „Nonlinear Analysis of FRP-Glulam-Concrete Beams With Partial Composite Action,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 8, nr. 127, pp. 967-971, 2001.
- [18] A. M. P. G. Dias, „Mechanical behaviour of timber-concrete joints,” 2005.
- [19] L. A. Bathon en O. Bletz, „Holz-Beton-Verbundsystem mit eingeklebten HBV-Schubverbindern,” *Bautechnik*, vol. 5, nr. 82, pp. 322-327, 2005.
- [20] D. Yeboah, S. Taylor, D. McPolin, R. Gilfillan en S. Gilbert, „Behaviour of joints with bonded-in steel bars loaded parallel to the grain of timber elements,” *Construction and Building Materials*, nr. 25, pp. 2312-2317, 2011.

- [21] I. Valente en P. J. Cruz, „Experimental analysis of Perfobond shear connection between steel and lightweight concrete,” *Journal of Constructional Steel Engineering*, vol. 60, nr. 3-5, pp. 465-479, 2004.
- [22] E. Oguejiofor en M. Hosain, „A parametric study of perfobond rib shear connectors,” 1993.
- [23] I. B. Valente en P. J. Cruz, „Experimental analysis of shear connection between steel and lightweight concrete,” *Journal of Constructional Steel Research*, nr. 65, pp. 1954-1963, 2009.
- [24] J. da C. Vianna, L. F. Costa-Neves, P. da S. Vellasco en S. A. L. de Andrade, „Structural behaviour of T-Perfobond shear connectors in composite griders: An experimental approach,” *Engineering Structures*, 2008.
- [25] J. da C. Vianna, L. F. Costa-Neves, P. da S. Vellasco en S. A. L. de Andrade, „Experimental assessment of Perfobond and T-Perfobond shear connectors’ structural response,” *Journal of Constructional Steel Research*, 2008.
- [26] E. Oguejiofor en M. Hosain, „Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rib connectors,” *Computers and Structures*, vol. 4, nr. 62, pp. 617-624, 1997.
- [27] BCSA/SCI Connections Group , in *Joints in Steel Construction: Simple Joints to Eurocode 3*, The Steel Construction Institute, The British Constructional Steelwork Association Limited, 2017.
- [28] Bureau voor Normalisatie, „Eurocode 5: Ontwerp en berekening van houtconstructies - Deel 1-1: Algemeen - Gemeenschappelijke regels en regels voor gebouwen,” 2005.
- [29] CEN, „CEN/TC250/SC 5,” 2019.
- [30] Sika, „Sika Belgium NV,” [Online]. Available: <https://bel.sika.com/nl/group.html>.
- [31] NBN , „EN 26891: Timber structures - Joints made with mechanical fasteners,” 2009.
- [32] J. L. Miotto en A. A. Dias, „Evaluation of perforated steel plates as connection in glulam–concrete composite structures,” *Construction and Building Materials*, nr. 28, pp. 216-223, 2012.
- [33] A. T. Al-Sammari, P. L. Clouston en S. F. Brena, „Finite-Element Analysis and Parametric Study of Perforated Steel Plate Shear Connectors for Wood–Concrete Composites,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 10, nr. 144, 2018.

## Bijlagen

<b>Bijlage A: Schematische en stortklare bekisting</b> .....	<b>50</b>
<b>Bijlage B: Geometrie alternatieve testresultaten</b> .....	<b>501</b>
Bijlage B1: Configuratie P-C.....	501
Bijlage B2: Configuratie M-NC-180 en M-NC-300.....	501
Bijlage B3: Configuratie M-C-1 (a) en P-NC (b) .....	52
Bijlage B4: Configuratie M-C-2 .....	52
<b>Bijlage C: Standaardisatie kracht-verplaatsingsdiagrammen</b> .....	<b>53</b>
<b>Bijlage D: Analytische faalkrachten</b> .....	<b>54</b>

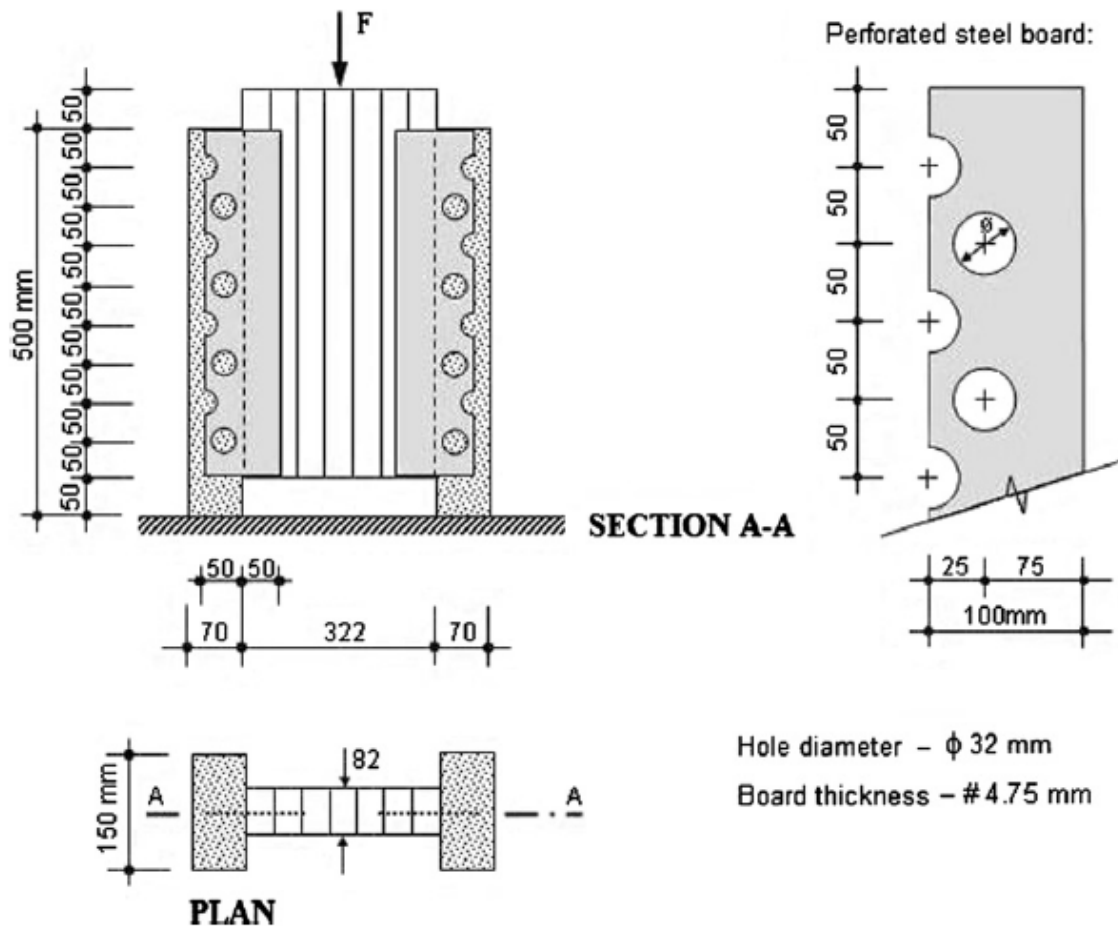
Bijlage A: Schematische en stortklare bekisting



Figuur 26: Schematische en stortklare bekisting

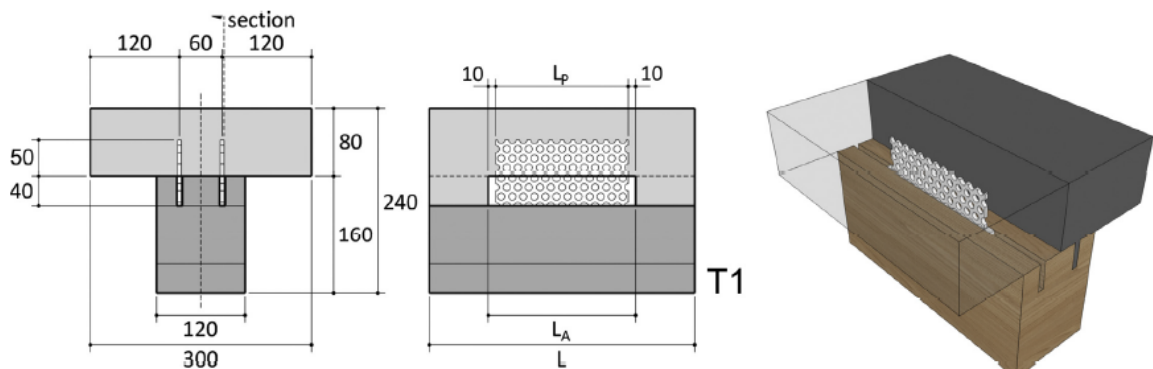
Bijlage B: Geometrie alternatieve testresultaten

Bijlage B1: Configuratie P-C



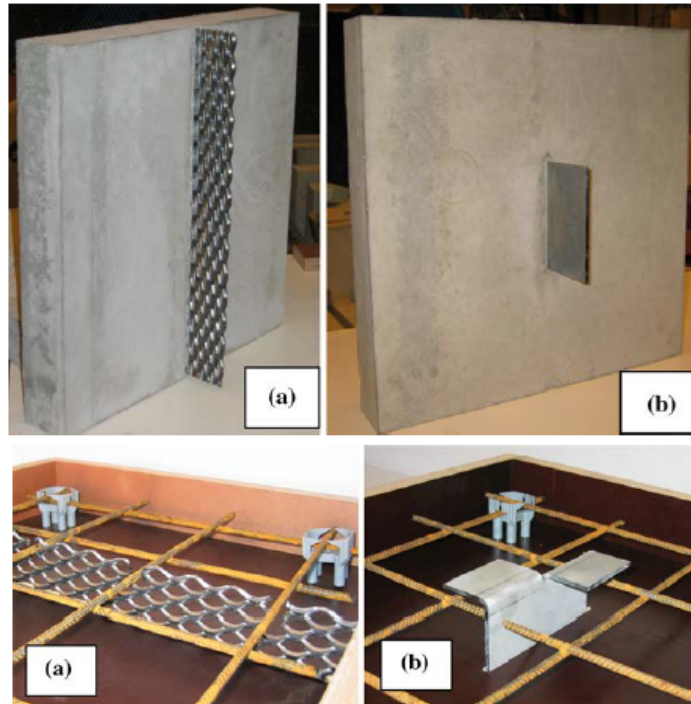
Figuur 27: Configuratie P-C [32, p. 218]

Bijlage B2: Configuratie M-NC-180 en M-NC-300



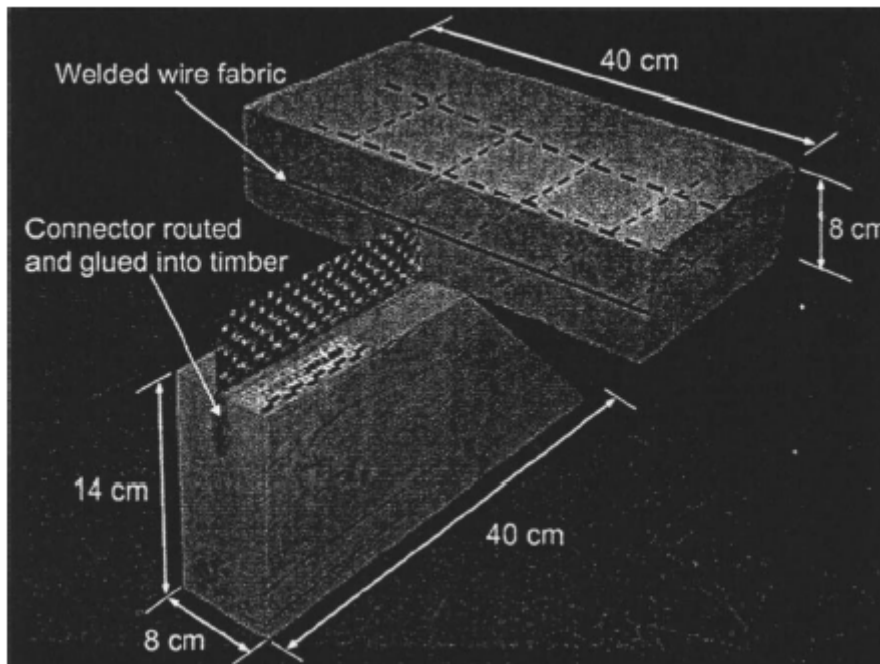
Figuur 28: Configuratie M-NC-180 en M-NC-300 [7, p. 3]

Bijlage B3: Configuratie M-C-1 (a) en P-NC (b)



Figuur 29: Configuratie M-C-1 (a) en P-NC (b) [9, p. 1540]

Bijlage B4: Configuratie M-C-2



Figuur 30: Configuratie M-C-2 [8, p. 1406]



## Bijlage C: Standardisatie kracht-verplaatsingsdiagrammen

In tabel 7 zijn de standaardisatiefactoren te zien. Hierbij is er telkens gestandaardiseerd op basis van de materiaaleigenschappen van het falende materiaal. Deze materiaaleigenschappen zijn vetgedrukt aangegeven.

Tabel 7: Standardisatiefactoren

Referentie	hp [mm]	fc [Mpa]	fy [Mpa]	fv [Mpa]	Standardisatiefactoren		
					fc/fc,M-NC-180	fy/fy,M-NC-180	fv/fv,M-NC-180
P-C	450	<b>33,9</b>	500	7,5	1,356		
M-NC-180	180	C20/25	249	<b>3,5</b>			1
M-NC-300	300	C20/25	249	<b>3,5</b>			1
M-C-1	400	<b>C20/25</b>		3,5	1		
P-NC	115	<b>C20/25</b>		3,5	1		
M-C-2-EE	400	30	248	<b>3,5</b>		1,004	
M-C-2	400	30	235	<b>3,5</b>		1,060	

## Bijlage D: Analytische faalkrachten

Tabel 8: Analytische faalkrachten

	P-C	M-NC-180	M-NC-300	M-C-1	P-NC	M-C-2
Beton	formule (1)	426,2 kN	-	-	38,8 kN	-
	formule (2)	<b>140,0 kN</b>	-	-	53,8 kN	-
Staal	formule (4)	618,1 kN	181,0 kN	248,9 kN	<b>109,7 kN</b>	71,7 kN
	formule (5)	337,5 kN	<b>169,6 kN</b>	<b>240,0 kN</b>	140,0 kN	-
Hout	formule (5)+(6)	-	-	-	63,3 kN	-
	formule (5)+(10)	-	-	-	265,6 kN	-
Faalkracht	140,0 kN	169,6 kN	240,6 kN	109,7 kN	-	98,4 kN