

2019 • 2020

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Gelijmde deugelverbindingstypes in hout-beton composieten

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Jose GOUVEIA HENRIQUES

BEGELEIDER :

Mevrouw Elif Tuba APPAVURAVTHER SUMICHRAST

Dries Detré, Glenn Ernens

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 deuvolverbindingstypes in hout-beton composieten

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Jose GOUVEIA HENRIQUES

BEGELEIDER :

Mevrouw Elif Tuba APPAVURAVTHER SUMICHRAS

Dries Detré, Glenn Ernens

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 kadert in de gezamenlijke opleiding tot industrieel ingenieur bouwkunde van de U Hasselt en KU Leuven. Voor aanvang van dit werk willen wij graag een dankwoord richten aan allen die ons geholpen hebben om deze thesis te realiseren.

Allereerst willen we graag onze promotor Prof. dr. ir. Jose Alexandre Gouveia Henriques bedanken voor de begeleiding, toelichtingen en adviezen gedurende het hele project. Verder ook een woord van dank aan onze begeleidster ir. Elif Tuba Appavuravther Sumichrast, die gedurende het hele academiejaar klaar stond voor ons en assistentie bood tijdens het labowerk. Ook willen we graag vermelden dat we zeer dankbaar zijn dat beiden tijdens een moeilijke periode in onze studieloopbaan, namelijk de COVID-19 crisis, flexibel opgesteld stonden, transparant communiceerden en hulp boden waar nodig. Ondanks het feit dat deze pandemie een annulatie van onze testen teweeg bracht, konden we alsnog in juni 2020 onze thesis verdedigen mits de nodige aanpassingen van de doelstellingen en methodes.

Ook een woord van dank aan Norbord te Genk voor de vrije bijdrage van OSB platen. Verder willen we ook het bedrijf Sika bedanken voor het deskundige advies i.v.m. de gebruikte lijm.

Detré Dries
Ernens Glenn

8 juni 2020

Inhoudsopgave

Woord vooraf.....	1
Lijst van tabellen.....	5
Lijst van figuren	7
Verklarende woordenlijst	9
Abstract.....	11
Abstract in English.....	13
1. Inleiding.....	15
1.1. Situering.....	15
1.2. Scope en doelstellingen	16
1.3. Opbouw thesis	17
2. Literatuurstudie	19
3. Analytische methode	27
4. Materialen en methode.....	31
4.1. Configuratie proefstukken	31
4.2. Productieproces proefstukken	34
4.3. Testen.....	36
5. Analyse de uvelverbindingstypes in HBC	39
5.1. Alternatieve proefresultaten.....	39
5.2. Discussie proefresultaten	42
5.3. Analytische benadering proefresultaten	43
5.4. Discussie analytische resultaten en proefresultaten	44
6. Analytische benadering experimentele proefstukken.....	47
7. Besluit	49
Bibliografie	51

Lijst van tabellen

Tabel 1: Faalwaarde formules van mogelijke bezwijkmechanismen in HBC	29
Tabel 2: Configuratie experimentele proefstukken	32
Tabel 3: Omschrijving alternatieve cases	39
Tabel 4: Resultaten uit kracht-verplaatsingsgrafieken	41
Tabel 5: Faalwaarde en slipmodulus ratio's t.o.v. referentiewaardes	41
Tabel 6: Faalwaarde en slipmodulus ratio's t.o.v. gelijkwaardige proefstukken.....	41
Tabel 7: Resultaten analytische benadering faalwaardes cases.....	43
Tabel 8: Resultaten analytische benadering slipmodulussen cases	43
Tabel 9: Samenvatting faalwaardes analytische benadering en praktijk	44
Tabel 10: Samenvatting slipmodulussen analytische benadering en praktijk	46
Tabel 11: Resultaten analytische benadering experimentele proefstukken.....	47

Lijst van figuren

Figuur 1: Hout-beton composiet vloersysteem.....	15
Figuur 2: Klassieke schroefverbinding tussen hout en beton	16
Figuur 3: Verschillende types composiet werking in HBC	20
Figuur 4: Verdeling huidig onderzoek van verbindingsmiddelen in HBC	21
Figuur 5: Verdeling huidig onderzoek van deugelverbindingstypes in HBC.....	22
Figuur 6: Theoretische kracht-verplaatsingsgrafieken van verbindingstypes in HBC	23
Figuur 7: Rangschikking verbindingstypes in HBC volgens stijfheid	24
Figuur 8: Invloed van gebruik tussenlaag in HBC	24
Figuur 9: Mogelijke bezwijkmechanismen van HBC	27
Figuur 10: Standaard configuratie van proefstuk zonder tussenlaag.....	31
Figuur 11: Standaard configuratie van proefstuk met tussenlaag	31
Figuur 12: Configuratie proefstuk 1	32
Figuur 13: Configuratie proefstuk 2	32
Figuur 14: Configuratie proefstuk 3	33
Figuur 15: Configuratie proefstuk 4	33
Figuur 16: Configuratie proefstuk 5	33
Figuur 17: Configuratie wapeningsnet	34
Figuur 18: ASSY-Plus-FT cilinderkopschroef.....	34
Figuur 19: Uitvoeringsdetail gelijmde wapeningsstaaf in proefstuk met tussenlaag	35
Figuur 20: Afgewerkt proefstuk.....	36
Figuur 21: Laadprocedure push-out tes.....	37
Figuur 22: Geïdealiseerde kracht-verplaatsingsgrafiek met meetpunten	37
Figuur 23: Testopstelling push-out test.....	38
Figuur 24: Kracht-verplaatsingsgrafieken voor geheel systeem.....	40
Figuur 25: Kracht-verplaatsingsgrafieken per verbindingsmiddel.....	40

Verklarende woordenlijst

EC 5	Eurocode 5
Foamcutter	Toestel dat computergestuurde sneden maakt met behulp van een warmtedraad
GLULAM	Glued Laminated Timber
HBC	Hout-Beton Composieten
Laadcapaciteit	Belasting dat een systeem kan dragen
Lag schroef	Klassiek type schroef
LVDT	Linear Variable Differential Transformator
Notched	Een type verbinding bestaande uit geblokte of getande structuren in hout
OSB 3	Oriented Strand Board type 3
Push-out test	Test gebaseerd op afschuiving in verbinding van proefstuk
Sleeper schroef	Type schroef gebruikt in spoorwegaanbouw
TCC	Timber-Concrete Composite

Abstract

De renovatie- en nieuwbouwsector maken steeds meer gebruik van hout-beton composieten (HBC) omwille van hun voordelen zoals een verhoogde stijfheid en draagcapaciteit. Er ontbreken echter gestandaardiseerde ontwerpvoorschriften waardoor het ontwerp en gebruik van HBC niet optimaal gebeurt. Deze thesis onderzoekt of er naast de gekende staal-op-hout ook hout-op-hout bezwijkmechanismen kunnen optreden, omdat deze mogelijk een invloed hebben op het ontwerp van HBC.

De thesis maakte gebruik van een analytische methode om mogelijke bezwijkmechanismen vast te stellen die gebaseerd zijn op zowel staal-op-hout- alsook hout-op-houtverbindingen uit EC 5. Hierna volgde een beschrijving van de materialen en het productieproces van de GLULAM-lichtgewicht beton proefstukken die nodig waren om push-out testen uit te voeren. De proefstukken maakten onder andere gebruik van schroeven, wapeningsstaven, lijm en tussenlagen om hun invloeden te analyseren. Door de COVID-19 crisis konden de push-out testen echter niet plaatsvinden. Hierdoor werden testresultaten uit de literatuur gebruikt om de uvelverbindingstypes te analyseren om zo de geschiktheid van de analytische methode te controleren. Tot slot werd deze methode toegepast op de oorspronkelijke proefstukken waarvan de resultaten dienen als schatting voor de niet uitgevoerde testen.

De analytische methode is geschikt om faalwaardes en bezwijkmechanismen in te schatten. De alternatieve testresultaten tonen dat zowel staal-op-hout alsook hout-op-hout bezwijkmechanismen kunnen optreden in HBC.

Abstract in English

Renovation and new building projects are using more and more timber-concrete composites (TCC) due to their advantages like an increased stiffness and load capacity. However, there is a lack of design rules causing an inefficient design and usage of TCC. This thesis investigates if besides the known steel-to-timber failure modes also timber-to-timber failure modes can occur, which will possibly have an impact on the design of TCC.

This thesis used an analytical method to determine possible failure modes based on both steel-to-timber and timber-to-timber connections of EC 5. Next, a description of the materials and manufacturing process of the GLULAM-lightweight concrete specimens is performed, which was required to execute push-out tests. These specimens made use of screws, rods, glue and interlayers to analyse the influence of different parameters. Due to the COVID-19 crisis the push-out tests had been cancelled. Therefore, test results from literature were used to analyse dowel type connections to verify the suitability of the referred analytical approach. At last, the latter was applied to predict the load capacity of the original specimens of the unexecuted push-out tests.

The analytical method is suitable to estimate the failure load and failure modes. The alternative test results show that both steel-to-timber and timber-to-timber failure modes can occur in TCC.

1. Inleiding

1.1. Situering

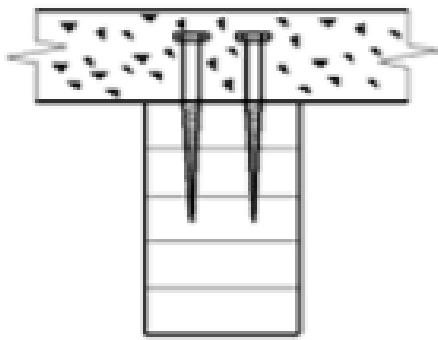
Hout-beton composieten (HBC) worden al ruim 80 jaar gebruikt bij de bouw van bruggen en vloersystemen. Ze zijn ontstaan uit de evolutie van hout-op-hout en staal-op-hout composieten. HBC systemen maken gebruik van de typische karakteristieke eigenschappen van beide materialen, namelijk: beton belast op druk en hout belast op trek. Naast het feit dat deze systemen voordelen bieden op gebied van mechanische prestaties zoals sterkte en stijfheid, hebben ze ook een beperking: ze werken enkel als volwaardig composiet systeem indien er een geschikte verbinding tussen beide materialen gebruikt is. Bovendien moet deze verbinding liefst zo sterk en zo stijf mogelijk zijn. Figuur 1 geeft een impressie van een hout-beton vloersysteem en Figuur 2 toont een klassieke schroefverbinding in HBC. De schroef wordt eerst deels bevestigd in het hout en in een latere fase wordt er rond het uitstekende deel van de schroef beton gestort.

Het kiezen van een verbinding is echter niet eenvoudig omwille van verscheidene redenen: ten eerste bestaan er vier groepen van verbindingstypes, namelijk deugelverbindingstypes, *notched* type verbindingen, *notched* type verbindingen gecombineerd met stalen verbindingmiddelen en overige verbindingssystemen. Bovendien bevat elke groep verschillende types. Een voorbeeld hiervan is de groep van deugelverbindingstypes die onder meer schroeven, nagels, bouten en deugels bevat. Verder worden verbindingmiddelen meestal mechanisch verankerd, maar er bestaat ook een gelijmde verankeringsmethode die veel potentieel vertoont op gebied van sterkte en stijfheid. Deze gelijmde methode wordt momenteel vooral gebruikt in de onderzoekswereld en niet in de praktijk, omdat het ontwerp en gebruik ervan nog niet gestandaardiseerd zijn. Ten slotte bevat elk hout-beton composiet ook nog eens enkele randvoorwaarden zoals: houttype, betontype, geometrische dimensies en externe factoren. Een voorbeeld van een externe factor is een tussenlaag tussen hout en beton die dient als verloren bekisting bij het storten van de beton. Dit systeem wordt reeds frequent toegepast in de praktijk omwille van zijn gebruiksvoordelen, maar de gevolgen voor de stijfheid en sterkte van het systeem zijn nog niet volledig gekend.

Hout-beton composieten en verbindingmiddelen zijn al uitgebreid onderzocht maar er blijven nog steeds leemtes in de literatuur achter. Hierdoor bestaan er momenteel nog geen gestandaardiseerde ontwerpvoorschriften. Bovendien zijn de beschikbare ontwerpmethodieken te gelimiteerd wat leidt tot inefficiënte ontwerpen en overtollig materiaalgebruik. Zo wordt er in de huidige ontwerpmethodiek enkel rekening gehouden met bezwijkmechanismen volgens staal-op-houtverbindingen en worden de bezwijkmechanismen van hout-op-houtverbindingen niet in overweging genomen terwijl deze in de praktijk wel kunnen optreden. Deze limitatie van de huidige ontwerpmethodieken leidt in het beste geval tot overdimensionering van hout-beton verbindingen tijdens het ontwerp en in het slechtste geval tot onverklaarbaar falen van het systeem in de praktijk.



Figuur 1: Hout-beton composiet vloersysteem [6, p. 1]



Figuur 2: Klassieke schroefverbinding tussen hout en beton [7, p. 16]

1.2. Scope en doelstellingen

Deze thesis onderzoekt de optredende bezwijkmechanismen van de uvelverbindingstypes in hout-lichtgewicht beton composieten aan de hand van push-out testen en een analytische methode. De experimentele analyse gebeurt aan de hand van proefstukken die verschillende verbindingmiddelen bevatten zoals schroeven, gelijmde schroeven en gelijmde wapeningsstaven. Verder wordt er in enkele proefstukken ook gebruik gemaakt van een tussenlaag tussen hout en beton. Daarnaast focust de analytische methode zich op een theoretische benadering van de faalwaarden en de bezwijkmechanismen in de proefstukken.

Het hoofddoel van deze thesis is het verifiëren van het bestaan van hout-op-hout bezwijkmechanismen in HBC naast de reeds gekende staal-op-hout bezwijkmechanismen. Dit gebeurt aan de hand van analyses van proefstukken die een push-out test ondergaan. Daarnaast kunnen de push-out testen ook gebruikt worden om inzicht te verkrijgen op de invloed van ontwerpparameters op de sterkte en de stijfheid van het systeem. Dit inzicht kan verkregen worden met behulp van kracht-verplaatsingsgrafieken die rechtstreeks uit de push-out testen voortvloeien. Hieruit kan namelijk zowel de sterkte alsook de stijfheid van de verbinding bepaald worden. Tot slot wordt er gebruik gemaakt van een analytische methode die betracht faalwaardes en bezwijkmechanismen correct te benaderen. Aan de hand van de resultaten tracht deze thesis een antwoord te vinden op de volgende onderzoeksvragen:

1. Wat is de invloed van het gebruik van lijm op de sterkte en stijfheid van het systeem?
2. Wat is de invloed van het gebruik van een tussenlaag op de sterkte en stijfheid van het systeem?
3. Welke bezwijkmechanismen treden er op?
4. Faalt het systeem volgens de gekende staal-op-hout bezwijkmechanismen of treden er ook hout-op-hout bezwijkmechanismen op?
5. Welke resultaten kan de analytische methode correct inschatten?

Niet alle doelstellingen zijn volbracht omwille van de COVID-19 crisis anno maart 2020. De hieruit volgende maatregelen stonden niet langer toe testen in het labo uit te voeren, waardoor de resultaten van de push-out testen ontbreken. De thesis vervangt hierdoor de ontbrekende testresultaten door alternatieve testresultaten uit de literatuur. De reeds ontworpen analytische methode is ter vervanging ook toegepast op proefstukken uit deze literatuur. Tot slot is de analytische methode ook toegepast op de oorspronkelijke proefstukken van deze thesis. De resultaten dienen echter niet langer als analytische benadering van de push-out testen, maar wel als analytische schatting van de nog uit te voeren testen. Door deze wijzigingen onderzoekt de thesis enkel nog de laatste drie vragen van de eerder vernoemde onderzoeksvragen. Dit betekent dat onderzoeksvraag 1 en 2 geschrapt werden.

1.3. Opbouw thesis

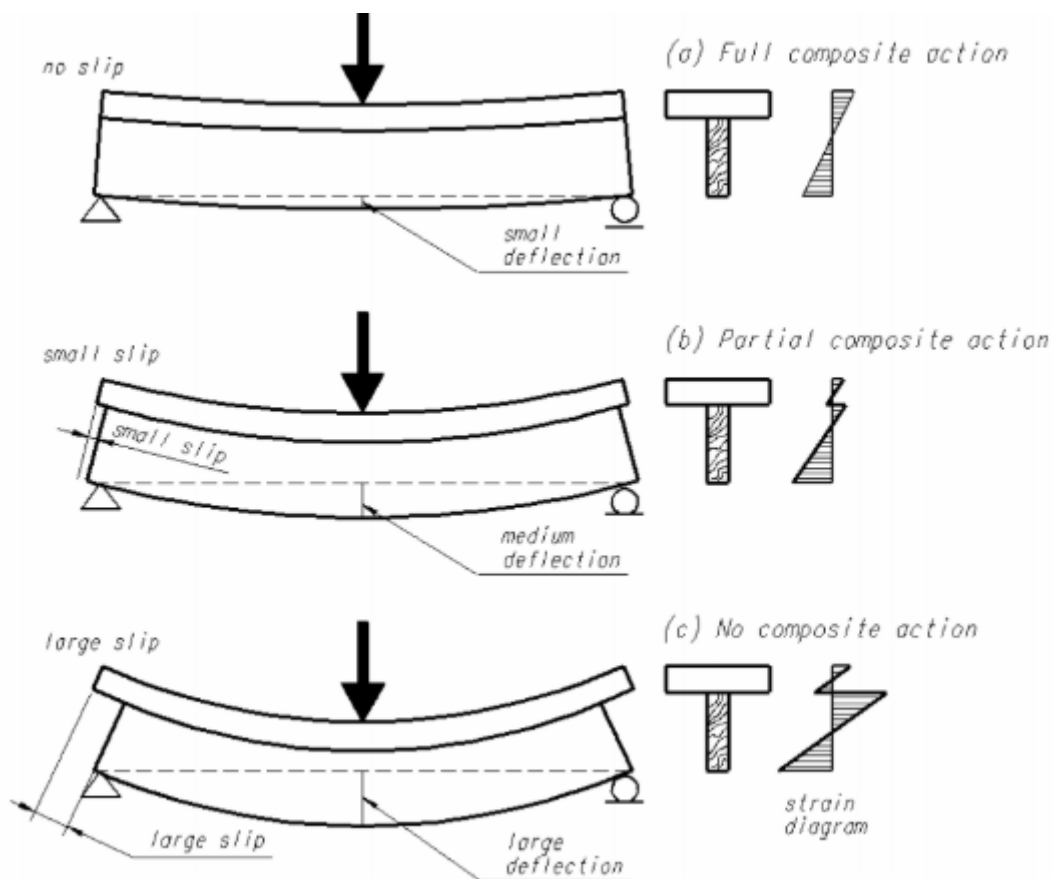
De thesis start met een literatuurstudie die zich eerst focust op de oorsprong en de kenmerken van HBC. Verder besteedt de studie ook aandacht aan het belang van composietwerking en hoe verbindingsmiddelen hierin een cruciale rol vertolken. Hierna volgt een beschrijving van de eigenschappen van gelijmde verbindingen en de implicaties van het gebruik van een tussenlaag. Het volgende hoofdstuk 'Analytische methode' geeft eerst een visueel overzicht van alle mogelijke bezwijkmechanismen uit EC 5 die kunnen optreden. Het betreft zowel bezwijkmechanismen van staal-op-houtverbindingen alsook hout-op-houtverbindingen. Dit onderdeel beschrijft vervolgens ook de formules met bijhorende aannames en extra berekeningen om de bezwijkmechanismen analytisch te kunnen bepalen. Hoofdstuk 4 'Materialen en methode' presenteert alles omtrent de uitgevoerde testen en benodigde materialen. Dit begint met het opsommen van de benodigde materialen om de proefstukken samen te stellen in onderdeel 4.1. Hierna komt het volledige productieproces van de proefstukken aan bod. Tot slot bespreekt onderdeel 4.3 alle testen en bijhorende resultaten. Hoofdstuk 5 'Analyse de uvelverbindingstypes in HBC' analyseert vijf proefstukken met bijhorende testresultaten uit verschillende literaire bronnen. Onderdeel 5.1 'Alternatieve proefresultaten' stelt deze vijf cases voor waarna het volgende onderdeel een vergelijkende analyse tussen deze cases maakt op gebied van sterkte en stijfheid. Deze analyse is gebaseerd op kracht-verplaatsingsgrafieken. Hierna benadert onderdeel 5.5 de testresultaten analytisch door middel van de methode uit hoofdstuk 3. Tot slot maakt onderdeel 5.6 opnieuw een vergelijkende analyse tussen de resultaten van de analytische benadering en de testresultaten van de push-out testen. Het volgende hoofdstuk 'Analytische benadering experimentele teststukken' gebruikt opnieuw de analytische methode van hoofdstuk 3 om de oorspronkelijke proefstukken van deze thesis analytisch te benaderen. Tot slot presenteert hoofdstuk 7 een conclusie die een antwoord formuleert op de onderzoeksvragen van deze thesis.

2. Literatuurstudie

Hout-beton composieten vinden hun oorsprong in het naoorlogse tijdperk. Door het tekort aan ijzer zochten de mensen naar andere alternatieven waardoor de voorlopers van de huidige HBC tot stand kwamen [1]. In het begin werden deze composieten vooral gebruikt om oude houten vloeren te renoveren. Hierbij werd bovenop de oorspronkelijke houten vloer een laag beton gestort die met elkaar verbonden werden met behulp van verbindingsmiddelen om een composiet werking te garanderen. In de loop der tijd werden dergelijke composiet structuren ook gebruikt als brugdek en later ook als vloersysteem in nieuwbouwhuizen [2]. Sinds enige tijd wordt er ook een wapeningsnet voorzien in de betonlaag om betonscheuren te beperken.

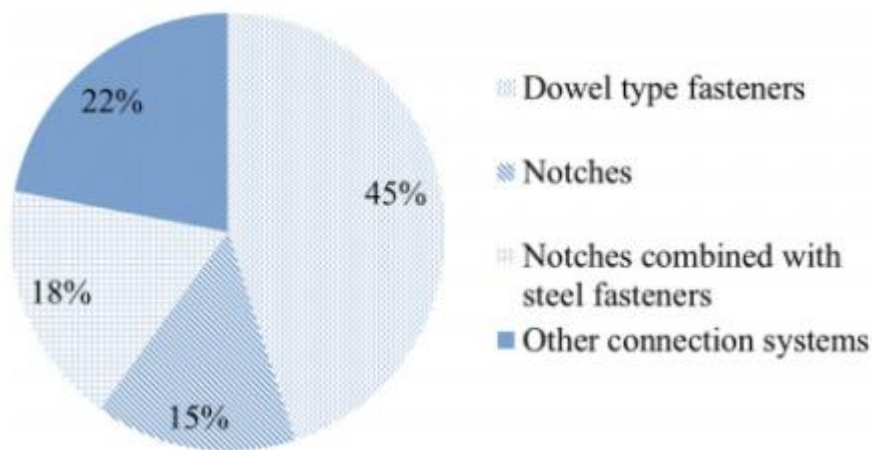
De toepassing van HBC heeft vele voordelen in vergelijking met het afzonderlijk gebruiken van beide materialen. In de composiet structuur bevindt het hout zich onderaan en het beton zich bovenaan wat als gevolg heeft dat beide materialen hun mechanische eigenschappen zo efficiënt mogelijk benutten: hout op buiging en trek, beton op druk. In vergelijking met het afzonderlijk gebruik van hout, bekomt men met HBC betere structurele eigenschappen zoals een hogere sterkte en stijfheid. Verder zorgt de composiet werking ook voor een kleinere doorbuiging en betere prestaties op gebied van vibraties door de hogere buigstijfheid modulus. Ook heeft HBC een positief effect op niet-structurele eigenschappen zoals akoestische, thermische en brandwerende prestaties [3]. Daarbovenop wordt het hout in HBC in open lucht ook afgeschermd van regen en direct zonlicht [2]. Bovendien heeft HBC ook voordelen ten opzichte van het gebruik van beton als afzonderlijk materiaal. HBC bekomt lagere eigengewichten wat leidt tot kleinere benodigde funderingen. Daarnaast is het gebruik van extra stut- en bekistingswerk ook overbodig indien men gebruik maakt van een houten tussenlaag bovenop de houten balk. Deze laag fungeert dan als verloren bekisting. Doordat er geen stut- en bekistingswerken noodzakelijk zijn wordt er ook bespaard op kosten. Een laatste troef die deze toepassing biedt, is een vermindering van de hoeveelheid beton die oorspronkelijk nodig was. Doordat er minder beton nodig is, is er sprake van een positief effect op de milieuvervuiling aangezien de betonproductie een groot aandeel heeft in de productie van koolstofdioxide in de wereld [4]. Daarnaast is hout een duurzame en milieuvriendelijke grondstof die over veel goede sterkte eigenschappen beschikt. De vele voordelen van HBC kunnen pas ten volle benut worden indien er een composiet werking optreedt.

De composiet werking van HBC is gelimiteerd door een onder- en bovengrens. De ondergrens wordt gekenmerkt door de volledige afwezigheid van een composiet werking tussen de onderdelen. Hier is geen krachtoverdracht aanwezig tussen beide materialen. De elementen hebben individuele neutrale assen en er treedt een discontinue buigspanning op de tussenlaag op zoals weergegeven in Figuur 3c. De bovengrens van dit systeem wordt beschreven als een volledige composiet werking tussen de onderdelen. Indien dit verkregen wordt vereenvoudigen de berekeningen drastisch en verbetert de mechanische werking van het systeem. Er kan namelijk geen slip optreden op het contactvlak en het beton kan omgevormd worden naar een equivalente houtdoorsnede met een gemeenschappelijk zwaartepunt. Dit betekent dat de doorsnede bestaat uit één geheel met één neutrale as en identieke buigspanningen zoals weergegeven in Figuur 3a. Tussen deze twee grenzen is er een tussenzone waar men spreekt over een semi-composiet werking waarbij slip tussen beide materialen kan optreden zoals getoond in Figuur 3b. De verkregen composiet werking bij een HBC zal sterk afhangen van de gebruikte verbindingsmiddelen en of er al dan niet een tussenlaag van hout gebruikt wordt. Er wordt altijd gestreefd naar het gebruik van een geschikte verbinding om een volledige composiet werking te bekomen. Echter is dit vaak een geïdealiseerd model en zullen de meeste HBC systemen zich in de tussenzone bevinden zoals Akasah [5] in zijn werk beschreef. Hieruit kan er besloten worden dat het optreden van de composiet werking afhankelijk is van de verbinding tussen beide materialen. Dit leidt ertoe dat de keuze van een juist verbindingsmiddel een kritische rol speelt in het ontwerp van een HBC systeem.



Figuur 3: Verschillende types composiet werking in HBC [7, p. 28]

De keuze van verbindingmiddelen heeft invloed op verschillende fases van HBC. Enerzijds hebben ze een directe impact op de uitvoering van een hout-beton composiet systeem, omdat het aantal verbindingmiddelen in verhouding is met de optredende afschuifkracht. Dit betekent dat er ter hoogte van steunpunten meer verbindingselementen nodig zijn dan in het midden van de overspanning, omdat hier geen afschuifkracht aanwezig is bij een opgelegde balk belast met een gelijkmatig verdeelde belasting. Afhankelijk van de keuze zal de uitvoering dus arbeidsintensiever worden. Anderzijds heeft de keuze van een verbindingselement in de ontwerpfase reeds een belangrijke invloed. Men tracht namelijk een systeem te ontwerpen met verbindingselementen die idealiter aan de volgende eisen voldoen: i) sterk genoeg om afschuifkrachten op het contactvlak op te nemen, ii) stijf genoeg om de krachten over te dragen met een beperkte slip op het contactvlak, iii) ductiel genoeg om alle krachten laten over te dragen en te vermijden dat het verbindingmiddel zelf faalt [6]. Het ideale verbindingstype is tot op heden echter nog niet gevonden, omdat er allerlei randvoorwaarden meespelen die naargelang de toepassing van HBC kunnen veranderen. Dit betekent dat er in ieder ontwerp nood is aan een andere verbindingconfiguratie. Er is reeds veel onderzoek gedaan om de eigenschappen van verbindingmiddelen in kaart te brengen. Desondanks bestaan er nog steeds veel leemtes in de literatuur, omdat de variëteit aan verbindingselementen zeer ruim is. Het reeds uitgevoerde onderzoek heeft Dias [6] in zijn werk weergegeven in een taartdiagram zoals getoond in Figuur 4. Dit diagram geeft een overzicht van de kwantiteit van onderzoek van ieder type verbindingselement. Hierdoor kunnen leemtes in de literatuur duidelijker weergegeven worden waardoor nieuwe onderzoeken doelgerichter te werk kunnen gaan.

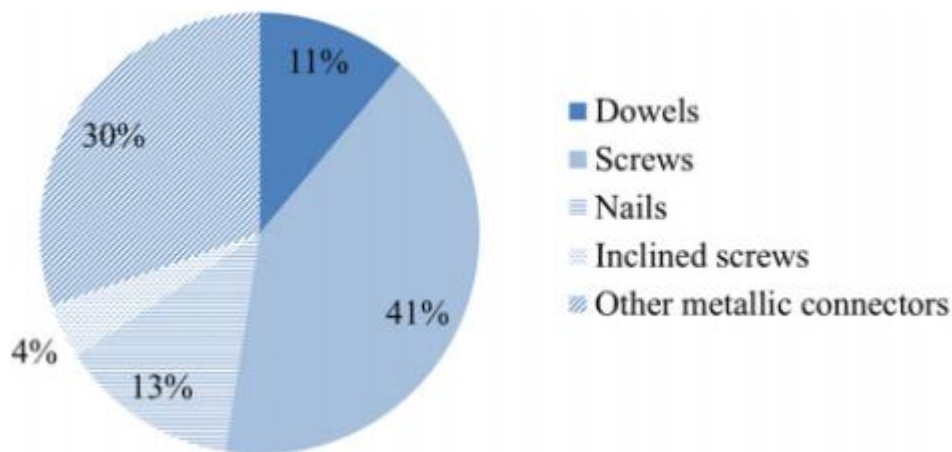


Figuur 4: Verdeling huidige onderzoek van verbindingssystemen in HBC [6, p. 34]

Figuur 4 toont aan dat het meeste onderzoek focust op de uvelverbindingstypes. Dit geeft geen directe relatie weer tussen onderzoek en praktijk, maar het is wel een goede indicatie dat de uvelverbindingstypes het meest courant gebruikt worden op werven. Dit ligt vooral aan de lage kostprijs en de lage arbeidsintensiviteit. Daarnaast mag de macht der gewoonte van gebruikers ook niet onderschat worden. De uvelverbindingstypes zijn namelijk het langst in gebruik en zijn dus ook het meest vertrouwd bij zijn gebruikers. Deze gebruikers zien vooral de voordelen van deze systemen en houden geen rekening met het potentiële voordeel van andere systemen. Hierdoor is de onderzoekswereld echter nog meer gaan focussen op het optimaliseren van dit type verbindingen en zijn innovatieve onderzoeken achterwege gebleven.

Zoals eerder aangegeven is de keuze van een verbindingstype afhankelijk van de randvoorwaarden. Dit komt omdat alle types hun eigen karakteristieke eigenschappen hebben, die afhankelijk van de omgeving het best gebruikt kunnen worden in bepaalde situaties. De volgende reeks van verbindingstypes zijn de meest courant gebruikte: schroeven, nagels, bouten, nietjes, deuvels, wapeningsstaven, notched en gelijkde verbindingen. Een analyse van deze verbindingssystemen leidt tot enkele vaststellingen.

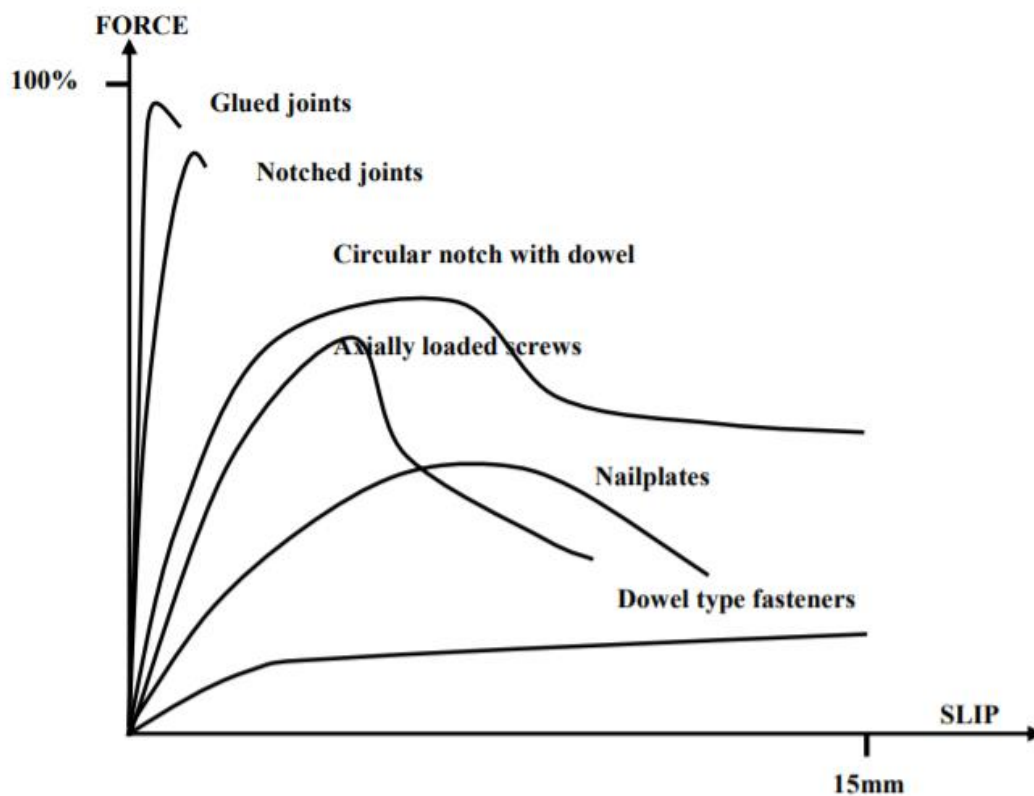
De uvelverbindingstypes zoals deuvels, schroeven, nagels, wapeningsstaven, bouten en nietjes worden in de praktijk het vaakst verkozen. Deze types zijn namelijk economisch interessant, omdat ze een lage aankoopprijs combineren met een lage arbeidsintensiviteit. Onderzoek naar de mechanische werking van deze type verbindingen stelt vast dat deze types voornamelijk werken op buiging en afschuiving. Figuur 5 geeft een overzicht van het onderzoek dat tot op heden gevoerd is naar de uvelverbindingstypes. Hieruit blijkt dat onderzoeken zich vooral focussen op schroeven. Enerzijds is dit te wijten aan het feit dat dit type verbinding makkelijk en snel te plaatsen is wat resulteert in een grote vraag vanuit de praktijk naar meer en betere soortgelijke types. Anderzijds toont onderzoek ook aan dat schroeven hoge axiale krachten kunnen opvangen wat een positief effect heeft op de weerstand tegen afscheiding van beide materialen. Hierdoor is dit type zowel theoretisch alsook praktisch gezien een zeer bruikbaar verbindingmiddel.



Figuur 5: Verdeling huidig onderzoek van deuvolverbindingstypes in HBC [6, p. 35]

Notched verbindingen combineren zowel eenvoud als goede mechanische prestaties, vooral op gebied van stijfheid. Dit type verbinding wordt echter minder snel gekozen in de praktijk, omdat ze een hoge economische kost hebben. De getande of geblokte structuur moet namelijk ofwel handmatig ofwel met een computergestuurde zaag uitgevoerd worden. Verder hebben notched verbindingen ook enkele andere nadelen die hun lage toepassingsgraad kunnen verklaren. Deze systemen worden namelijk gekenmerkt door het frequent optreden van een brose breuk. Bovendien hebben ze ook een lage weerstand tegen axiale krachten.

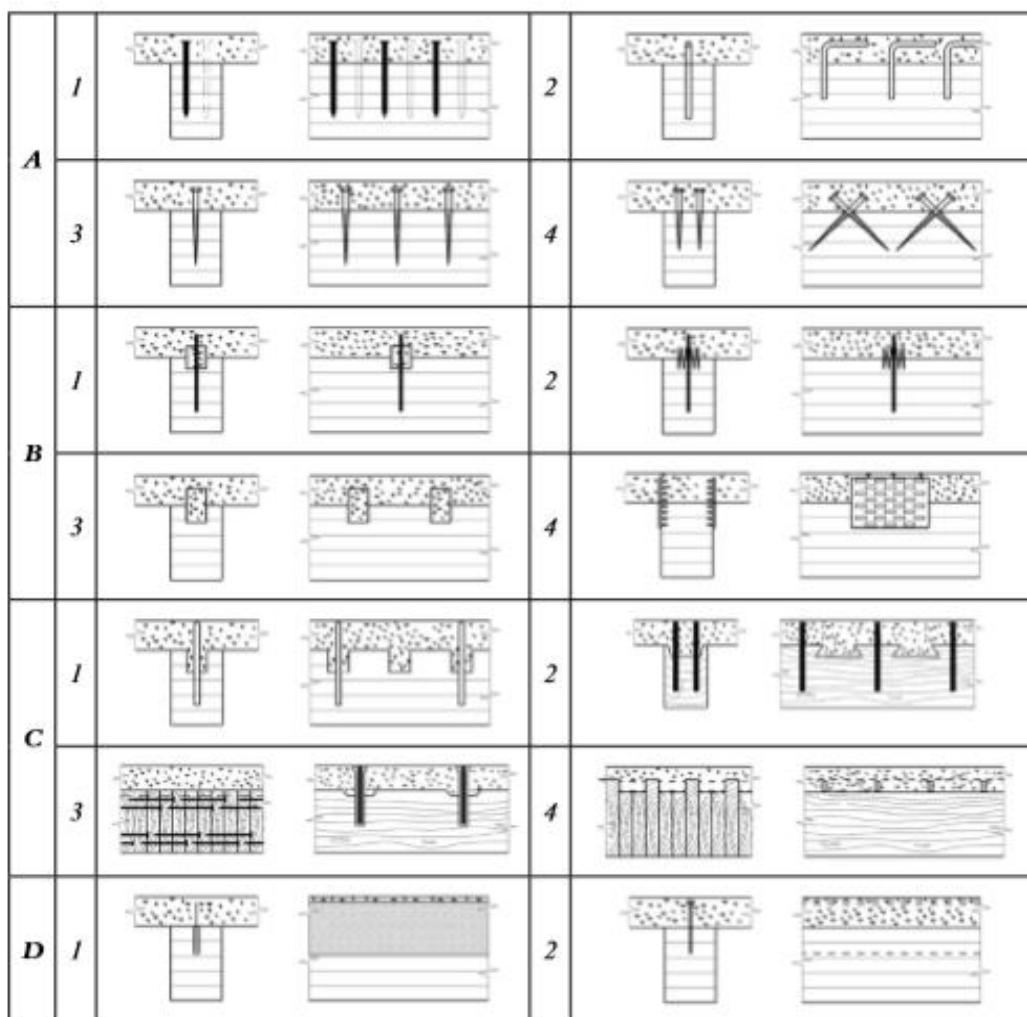
Gelijmde verbindingen zijn tot nog toe weinig onderzocht. In Figuur 4 behoren de gelijmde verbindingen tot de groep van 'other connection systems'. Dit betekent dat minder dan 15% van alle bestaande onderzoeken zich focussen op gelijmde verbindingen. Het lage onderzoekspercentage is te wijten aan de lange termijn prestaties die in het eerste opzicht niet aan de verwachtingen voldoen. Desondanks hebben gelijmde verbindingen veel potentieel. Uit het beperkte onderzoek dat uitgevoerd is, zoals dat van Lukaszewska [7], bleek dat gelijmde verbindingen beter reageren op laad-en-los cycli en betere mechanische eigenschappen vertoonden dan dezelfde verbindingstypes zonder lijm. Daarnaast beschreef Lukaszewska ook dat gelijmde gebogen deuvolverbindingen in beton hun buigsterkte tot wel twee keer groter was dan de buigsterkte van de houten balken. Ook Cecotti [8] deed al testen op gelijmde verbindingen in HBC. Hij werkte met gegolfde wapeningsstaven. Uit zijn testen kon hij besluiten dat gelijmde verbindingen zeer stijf zijn. Dit komt overeen met de samenvattende grafiek van Dias in Figuur 6. Hieruit kan geconcludeerd worden dat gelijmde verbindingen (Engels: glued joints) zeer grote krachten kunnen weerstaan en zeer kleine verplaatsingen hebben in vergelijking met deuvolverbindingstypes die mechanisch verbonden zijn. Deze kleine verplaatsingen leiden tot hoge slipmodulussen. Verder toont de grafiek aan dat gelijmde verbindingen weinig tot geen plastische vervormingscapaciteit hebben in tegenstelling tot de deuvolverbindingstypes. Dit is een belangrijk ontwerpaspect, omdat brose breuken te alle tijden vermeden moeten worden. Gelijmde verbindingen vragen bovendien ook nog enkele andere aandachtspunten tijdens het ontwerp en de uitvoering. Volgens Lukaszewska [7] moeten er enkele belangrijke factoren in rekening worden gebracht indien men een gelijmde verbinding in HBC gebruikt. Deze effecten zijn de omgevingsomstandigheden voor en na binding, de vochtigheidsgraad en de trekkrachtvariabiliteit van het hout, de herhalende lasten, de compatibiliteit van lijm en beton en het lange termijn gedrag.



Figuur 6: Theoretische kracht-verplaatsingsgrafieken van verbindingstypes in HBC [1, p. 26]

Figuur 7 toont een rangschikking van verbindingsmiddelen volgens toenemende stijfheid. Groep A bevat de minst stijve verbindingen en groep D de stijfste verbindingen. Deze rangschikking geeft aan dat gelijmde verbindingen en notched verbindingen de hoogste stijfheid opleveren wat exact overeenkomt met de bevindingen uit Figuur 6. De combinatie van sterkte en stijfheid maakt gelijmde verbindingen interessant voor toekomstig onderzoek.

HBC maken vaak gebruik van een tussenlaag tussen de houten balken en de betonplaat. Er bestaan verschillende types tussenlagen zoals houtvezel-, multiplex- en triplexplaten. Deze toepassing heeft echter voor- en nadelen. De tussenlaag wordt via verbindingsmiddelen verbonden met de houten balk en de betonplaat en fungeert als een verloren bekisting tijdens het storten van de beton. Hierdoor kan de onderliggende ruimte sneller in gebruik genomen worden aangezien er geen stutten moeten geplaatst worden om de bekisting te ondersteunen. Verder zorgt de houten tussenlaag ervoor dat de houten balk geen water uit het beton kan onttrekken. Indien deze overdracht van water zou plaatsvinden, zou dit leiden tot een daling van de sterkte-eigenschappen van zowel de betonplaat alsook de houten balk. Er is echter wel een nadeel verbonden aan het toepassen van een tussenlaag. Volgens Moshiri [9] zal er een reductie in stijfheid zijn van 20 tot 40% en een daling in sterkte tussen 7 en 15% indien men werkt met een schroefverbinding. Deze waarneming wordt door verschillende onderzoeken bevestigd [2], [6], [10]. Dias stelde een vergelijkende tabel op gebaseerd op resultaten uit andere onderzoeken. Figuur 8 toont deze tabel en geeft de procentuele daling van de belastingscapaciteit en stijfheid weer bij het gebruik van een tussenlaag. Hieruit blijkt dat onafhankelijk van het type verbindingsmiddel zowel de belastingscapaciteit alsook de stijfheid daalt. De dalingen variëren respectievelijk tussen 8 en 30 % en tussen 22 en 50%. Deze tabel bevestigt daarmee ook de bevindingen van Moshiri [9].



Figuur 7: Rangschikking verbindingstypes in HBC volgens stijfheid [7, p. 10]

Connection Type	Reference	L.C.C.	STIFF
Nails	[Dias, 1999]	13%	27%
Inclined screws	[Van der Linden, 1999]	30%	50%
Notches combined with dowels	[Van der Linden, 1999]	30%	22%
Dowels	[Dias, 2005]	8%	35%
Notches	[Dias, 2005]	16%	34%
Inclined Screws	[Jorge, 2005]	-	30%

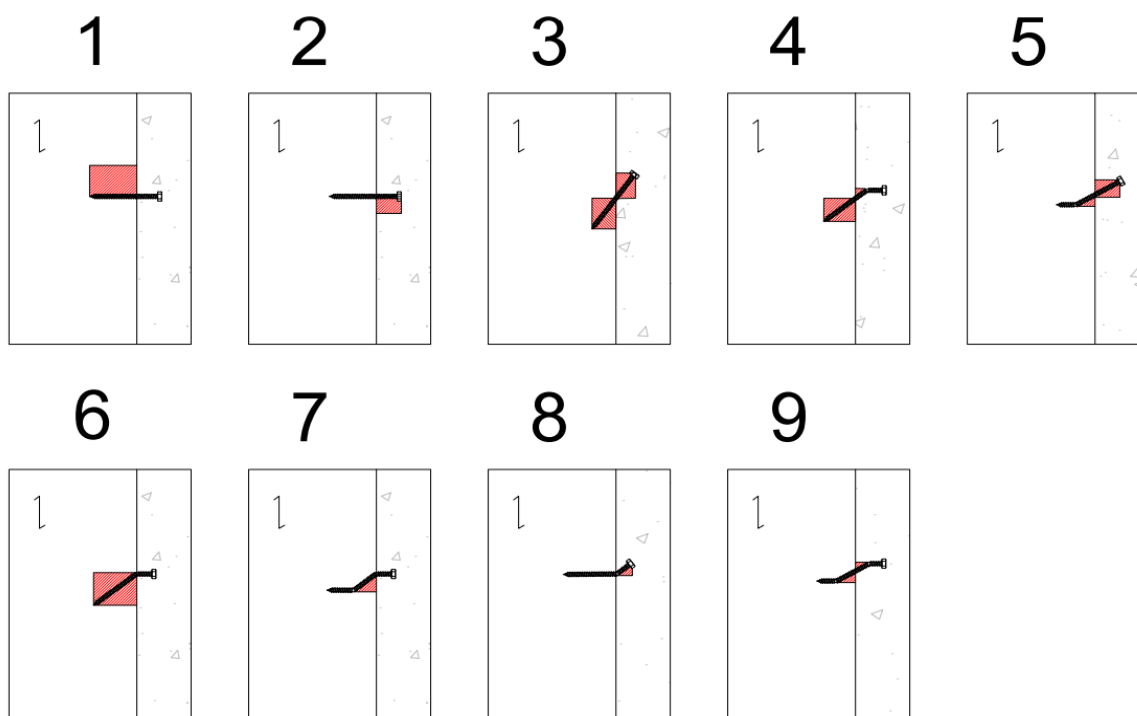
Figuur 8: Invloed van gebruik tussenlaag in HBC [6, p. 63]

Tegenwoordig bestaat er een grote variëteit aan betontypes zoals lichtgewicht beton, zelfverdichtend beton, vezelbeton en normaalgewicht beton. Voor HBC kan het gebruik van lichtgewicht beton enkele voordelen met zich meebrengen. Lichtgewicht beton heeft per definitie een lager eigengewicht in vergelijking met normaalgewicht beton met dezelfde sterkte. Het toepassen van dit type beton in plaats van normaal beton leidt bij onbetreedbare vloeren tot lagere belastingen op de fundering. Hierdoor kan de fundering kleiner uitgevoerd worden. Bij betreedbare vloeren zorgt deze toepassing voor een hogere resterende belastingscapaciteit. Steinberg [4] deed hier reeds onderzoek naar en kon

vaststellen dat er een vermindering van 15% in eigengewicht is bij gebruik van een lichtgewicht beton met een dichtheid van 1600 kg/m^3 in plaats van een normaal gewicht beton met een eigengewicht van 2300 kg/m^3 met dezelfde sterkte-eigenschappen. Verder vermeldde Steinberg dat de E-modulus van een lichtgewicht beton leidt tot een lagere effectieve buigstijfheid van het systeem. Hierdoor moeten de verbindingsmiddelen dichter bij elkaar geplaatst worden in vergelijking met verbindingsmiddelen in normaalgewicht beton om dezelfde buigstijfheid te garanderen. Het ontwerp maakt dus een afweging tussen lichtgewicht beton met meer verbindingsmiddelen of normaalgewicht beton met een hoger eigengewicht van de structuur als gevolg. Yeoh [11] beweerde echter dat er een hogere sterkte van lichtgewicht beton nodig was om de efficiëntie van de verbinding ten volste te benutten. In renovatieprojecten biedt het gebruik van lichtgewicht beton een oplossing wanneer de originele houten draagstructuur niet sterk genoeg is om de hogere belasting van een normaalgewicht beton te dragen.

3. Analytische methode

In de literatuur beschouwd men het gedrag van hout-beton composieten gelijkaardig aan staal-op-hout composieten zoals beschreven in EN 1995-1-1 [12]. Dit betekent dat het beton beschouwd wordt als een stijf materiaal. Hierdoor worden de berekeningen en de analyse van hout-beton composieten ook gebaseerd op EN 1995-1-1 deel 8.2.3 [12]. Gezien het feit dat er met lichtgewicht beton gewerkt wordt in plaats van normaal gewicht beton, kan deze aanname uit de literatuur uitgebreid worden. Dit komt omdat lichtgewicht beton zich niet als een stijf materiaal gedraagt, maar wel als een semi-stijf materiaal. Met als gevolg dat ook de berekeningen en analyses van hout-op-hout composieten in rekening gebracht moeten worden. Concreet betekent dit dat er in Eurocode 5 zowel naar hout-op-hout alsook staal-op-hout verbindingen gekeken wordt om de karakteristieke belastingscapaciteit van de verbindingen te berekenen. In totaal zijn er een twintigtal bezwijkmechanismen mogelijk volgens Eurocode 5 [12]. Hierin kunnen nog enkele bezwijkmechanismen geschrapt worden. Zo bevat de verbinding in HBC slechts één afschuifvlak waardoor de bezwijkmechanismen met twee afschuifvlakken niet langer van toepassing zijn. Verder beschrijft het onderdeel staal-op-hout verbindingen ook dunne staalplaten verbonden met hout. Indien er gekeken wordt naar de geometrie bij HBC kan er vastgesteld worden dat ook de bezwijkmechanismen van dunne staalplaten niet van toepassing zijn. Dit reduceert de mogelijke optredende bezwijkmechanismen tot acht varianten. Hiervan zijn er vijf afkomstig van het hout-op-hout model en drie van het staal-op-hout model. Hierbij kan er echter een nieuw bezwijkmechanisme toegevoegd worden dat niet in de Eurocode beschreven staat. Dit is te wijten aan het feit dat het quasi onmogelijk is dat andere types verbindingen alle mogelijke bezwijkmechanismen in HBC reeds kunnen omvatten. Het nieuwe bezwijkmechanisme bezwijkmechanisme 8 in Figuur 9, is het tegengestelde van bezwijkmechanisme 6. Bezwijkmechanisme 8 beschouwt namelijk stuik in het beton in combinatie met een plastisch scharnier ter hoogte van het tussenvlak tussen hout en beton. Dit brengt het totale aantal bezwijkmechanismen op negen. Figuur 9 presenteert een voorstelling van deze negen bezwijkmechanismen naar analogie met de Eurocode. Hierbij zijn bezwijkmechanismen 1 tot 5 en 9 gebaseerd op hout-op-hout verbindingen. De bezwijkmechanismen 6 tot 8 zijn op hun beurt afkomstig van de staal-op-hout verbindingen.



Figuur 9: Mogelijke bezwijkmechanismen van HBC

Bij ieder bezwijkmechanisme hoort een bezwijkformule. Deze formules staan toe een faalwaarde te berekenen per gebruikt verbindingsmiddel in een hout-beton composiet systeem. De bezwijkformules zijn allen te vinden in Eurocode 5 [12] en worden gepresenteerd in Tabel 1. Enkel de formule van bezwijkmechanisme 8 is ontworpen in analogie met de bezwijkformule van bezwijkmechanisme 6. Deze formules kunnen niet rechstreeks ingevuld worden. Hierbij zijn er zowel voorbereidende calculaties alsook aannames nodig. De volgende parameters komen aan bod in de negen vergelijkingen: f_h is afhankelijk van het bezwijkmechanisme gelijk aan de karakteristieke stuiksterkte van het hout of het beton (N/mm^2), t staat voor de dikte van hout of beton afhankelijk van het gebruikte subscript (mm), d is de diameter van het verbindingsselement (mm), β is de verhouding van de karakteristieke stuiksterkte van beton en hout, M_y is het karakteristieke vloeimoment van het verbindingsselement (Nmm) en F_{ax} is de karakteristieke axiale uittreksterkte van het verbindingsselement (N). Verdere berekeningen of aannames moeten gespecificeerd worden per hout-beton composiet. Deze berekeningen zijn gebaseerd op EN 1995-1-1 [12]. Ook de beperkte Eurocode 5 voor hout-beton composieten is gebruikt om de stuiksterkte van beton te bepalen [13]. Bovendien volgen gelijmde staafverbindingen een licht gewijzigde berekening. CEN/TC 250/SC 5 [14] is een technische specificatie die in ontwikkeling is, maar reeds meer kenmerkende formules voor gelijmde staafverbindingen beschrijft. Deze technische specificatie omschrijft namelijk een gewijzigde formule voor de faalwaarde van bezwijkmechanisme 7. Deze formule (1) wordt beschreven als:

$$F_{v,Rk} = d * f_{h,k} * \left(\sqrt{e^2 + \frac{2 * M_{y,Rk}}{d * f_{h,k}}} - e \right) \quad (1)$$

De excentriciteit e speelt bij de meeste proefstukken geen rol en mag dus verwaarloosd worden. Deze parameter heeft echter wel een invloed bij proefstukken met een tussenlaag. Indien er een tussenlaag aanwezig is, wordt de excentriciteit e gelijk genomen aan de dikte van de tussenlaag. Verder ondervindt ook de karakteristieke uittreksterkte F_{ax} een wijziging in zijn berekening. F_{ax} kan berekend worden uit het minimum van de uittreksterkte uit hout, beton en de treksterkte van het verbindingsmiddel zelf. Hierbij kan de uittreksterkte uit het beton bepaald worden volgens EN 1992-1-1 deel 8.4.2 [15]. Vervolgens kan de uittreksterkte uit hout bepaald worden aan de hand van formule (2) afkomstig uit de eerder vernoemde technische specificatie:

$$F_{ax} = \min \begin{cases} F_{ax,rod} \\ F_{ax,b} \end{cases} \quad (2)$$

Met: $F_{ax,rod} = A_s * f_{y,k}$

$$F_{ax,b} = \pi * d * l_{b,eff} * f_{k,1,k}$$

Tot slot bespreekt deze norm ook de stuiksterkte van het hout $f_{h,1,k}$. De norm schrijft voor dat deze waarde berekend wordt volgens de formule uit EC 5, maar daarna verhoogd mag worden met een bepaalde factor. Indien de verbindingsmiddelen loodrecht op de vezelrichting van het hout zijn ingeplant, bedraagt deze factor 1,25. Verder zijn er geen andere wijzigingen besproken. Dit betekent dat de overige berekeningen van gelijmde staafverbindingen de berekeningsmethode van normale verbindingen volgen. Een andere vaststelling is dat de huidige normering geen rekening houdt met de invloed van de aanwezigheid van een tussenlaag. Bovendien bestaat er nog geen regelgeving omtrent de gelijmde bevestigingsmethode van schroeven.

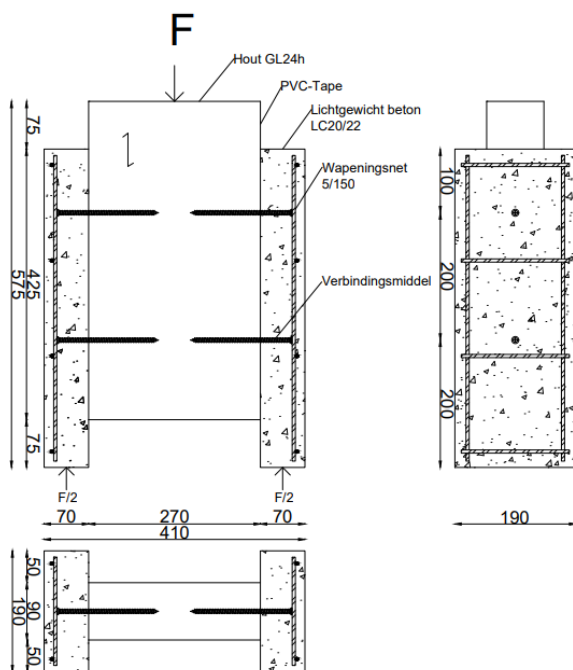
Tabel 1: Faalwaarde formules van mogelijke bezwijkmechanismen in HBC

Nr.	Formule	Beschrijving faalmodus
1.	$f_{h,1,k} * t_1 * d$	Stuik van het hout
2.	$f_{h,2,k} * t_2 * d$	Stuik van het beton
3.	$\frac{f_{h,1,k} * t_1 * d}{1 + \beta} * \left[\sqrt{\beta + 2 * \beta^2 * \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2\right) + \beta^3 * \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2} - \beta * \left(1 + \frac{t_2}{t_1}\right) \right] + \frac{F_{ax,rk}}{4}$	Stuik van het hout en het beton met rotatie rond contactvlak
4.	$1,05 * \frac{f_{h,1,k} * t_1 * d}{2 + \beta} * \left[\sqrt{2 * \beta * (1 + \beta) + \frac{4 * \beta * (2 + \beta) * M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} * (t_1)^2 * d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,rk}}{4}$	Stuik van het hout en het beton met vorming van een plastisch scharnier in het beton
5.	$1,05 * \frac{f_{h,1,k} * t_2 * d}{1 + 2 * \beta} * \left[\sqrt{2 * \beta^2 * (1 + \beta) + \frac{4 * \beta * (1 + 2 * \beta) * M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} * (t_2)^2 * d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,rk}}{4}$	Stuik van het hout en het beton met vorming van plastisch scharnier in het hout
6.	$f_{h,1,k} * t_1 * d * \left[\sqrt{2 + \frac{4 * M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} * (t_1)^2 * d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,rk}}{4}$	Stuik van het hout met vorming van een plastisch scharnier in het contactvlak
7.	$2,3 * \sqrt{M_{y,Rk} * f_{h,1,k} * d} + \frac{F_{ax,rk}}{4}$	Stuik van het hout met vorming van 2 plastische scharnieren: 1 in het hout en 1 in het contactvlak
8.	$f_{h,2,k} * t_2 * d * \left[\sqrt{2 + \frac{4 * M_{y,Rk}}{f_{h,2,k} * (t_2)^2 * d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,rk}}{4}$	Stuik van het beton met vorming van een plastisch scharnier in het contactvlak
9.	$1,15 * \sqrt{\frac{2 * \beta}{1 + \beta}} * \sqrt{2 * M_{y,Rk} * f_{h,1,k} * d} + \frac{F_{ax,rk}}{4}$	Stuik van het hout en het beton met vorming van 2 plastische scharnieren: 1 in het hout en 1 in het beton

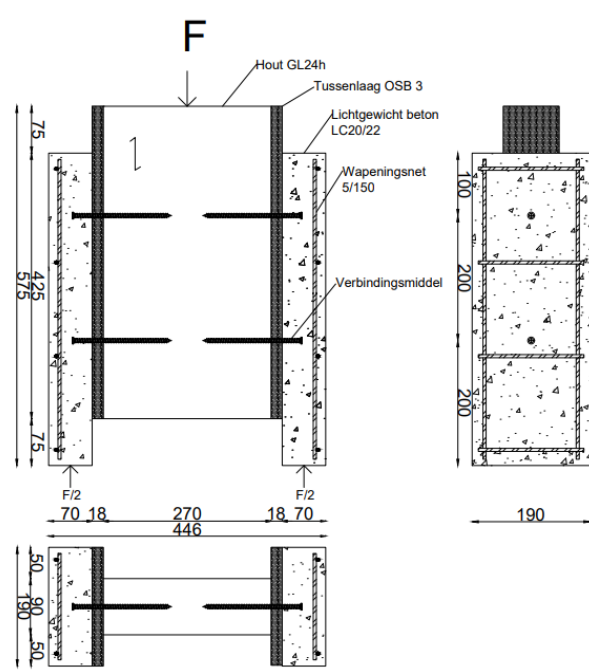
4. Materialen en methode

4.1. Configuratie proefstukken

De proefstukken bestaan uit een centraal houten element met aan weerszijden een betonlaag. De onderzijde van het hout bevindt zich 75 mm hoger dan het beton. De verbinding in het proefstuk wordt belast op afschuiving door een kracht uit te oefenen bovenop de houten balk. De houten balk is verbonden met de betonlagen door middel van twee verbindingsmiddelen aan weerszijden van het element. Verder bevat elke betonlaag een wapeningsnet dat dient als minimumwapening om krimp-scheuren te beperken. Bovendien bevatten enkele proefstukken ook een tussenlaag tussen hout en beton. Figuur 10 toont een standaard configuratie van een proefstuk zonder tussenlaag. Hierbij is er een PVC-tape aanwezig op de twee zijden van het houten element die in contact staan met de betonlaag. Deze tape vermijdt waterabsorptie uit het beton door het hout. Vervolgens toont Figuur 11 een standaard configuratie met tussenlaag. Hier is deze tape niet noodzakelijk, omdat de tussenlaag het hout reeds beschermt tegen waterabsorptie. Beide figuren tonen de materiaaltypes en afmetingen die in alle proefstukken hetzelfde zijn. De eigenschappen die per configuratie verschillend zijn, zijn niet opgenomen in de standaard configuratie. Deze elementen worden later systematisch besproken.



Figuur 10: Standaard configuratie van proefstuk zonder tussenlaag



Figuur 11: Standaard configuratie van proefstuk met tussenlaag

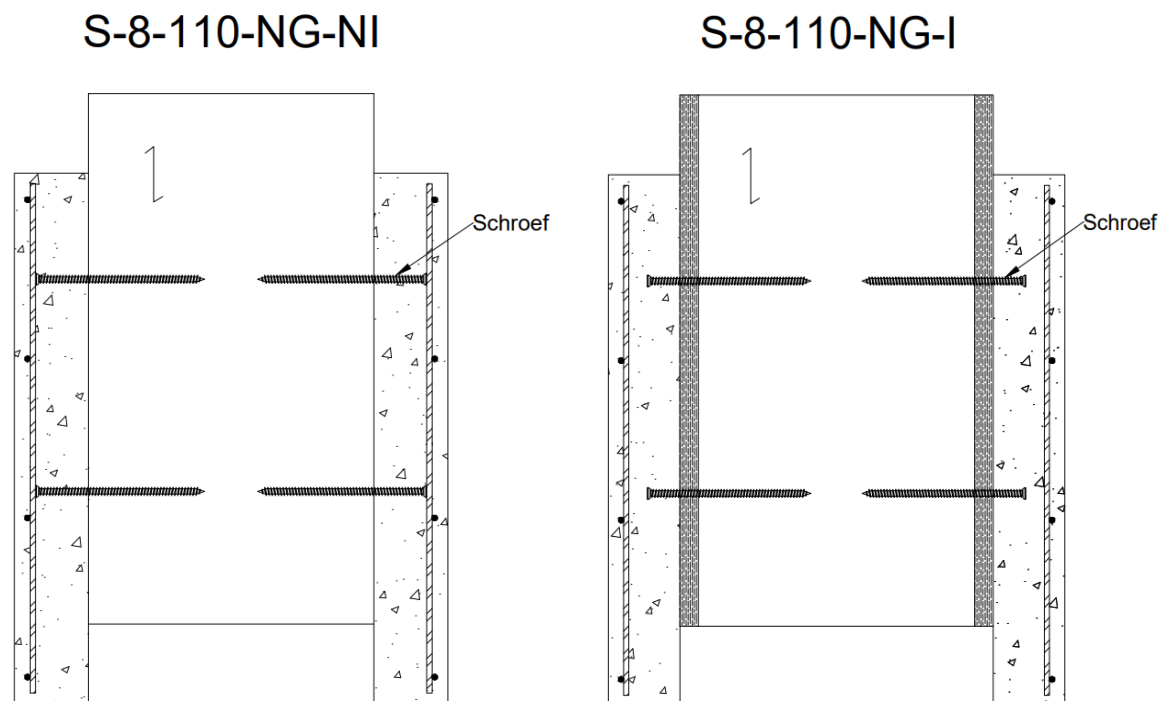
Er zijn vijf verschillende proefstukken die elk een andere configuratie hebben. De verschillen tussen de proefstukken worden gemaakt op basis van drie factoren. De eerste factor betreft het type verbindingsmiddel, dit zijn ofwel schroeven ofwel wapeningsstaven. Vervolgens maakt het verbindingsmiddel gebruik van een mechanische bevestigingsmethode of een gelijmde bevestigingsmethode. Ten slotte bevatten enkele proefstukken een tussenlaag tussen het hout en het beton. Van elke configuratie werden er minstens vijf proefstukken gemaakt om gemiddelde resultaten te bekomen. Tabel 2 toont een overzicht van de vijf verschillende configuraties. Hierbij krijgt elke configuratie een ID-label. Dit label bevat eerst een verwijzing naar het type verbindingsmiddel namelijk schroef S of wapeningsstaaf R (Engels: Rod). Het volgende getal duidt op de diameter die in alle configuraties gelijk is aan 8 mm. Daarnaast verwijst 110 mm naar de penetratielengte van het

verbindingsmiddel in het hout. Verder geeft het label aan of het verbindingsmiddel niet gelijmd NG of gelijmd G bevestigd wordt. Tot slot volgt men hetzelfde principe voor het gebruik van een tussenlaag I of geen tussenlaag NI (Engels: (No) Interface).

Tabel 2: Configuratie experimentele proefstukken

Nr.	ID-label	Beton		Verbindingsmiddel			Hout	Lijm	Tussenlaag	
		Type	Gewapend	Type	Diameter	Lengte	Type	Gelijmd	Aanwezig	Materiaal
1	S-8-110-NG-NI	LC 20/22	Ja	Schroef	8 mm	160 mm	GL24h	Nee	Nee	-
2	S-8-110-NG-I							Ja		-
3	S-8-110-G-I			Wapeningsstaaf				Ja	OSB 3	
4	R-8-110-G-NI							Nee	-	
5	R-8-110-G-I							Ja	OSB 3	

Het eerste proefstuk uit Tabel 2 is de meest elementaire configuratie. Dit proefstuk bevat een schroefverbinding zonder tussenlaag en zonder lijm. De schematische configuratie wordt getoond in Figuur 12. Het volgende proefstuk is gebaseerd op proefstuk 1, maar bevat één wijziging. Er wordt namelijk aan weerszijden van het houten element een tussenlaag toegevoegd. Deze tussenlaag bestaat uit een OSB 3 plaat. Door het toevoegen van een tussenlaag en het behouden van de verbindingconfiguratie kan de invloed van een tussenlaag op de sterkte en stijfheid van de schroefverbinding geanalyseerd worden. Figuur 13 presenteert de configuratie van proefstuk 2.

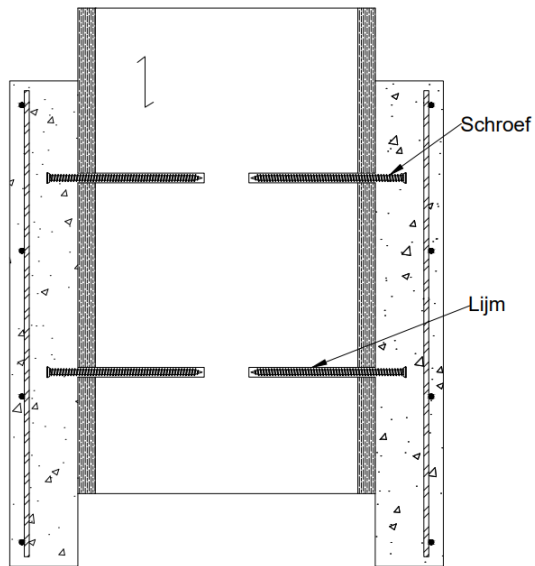


Figuur 12: Configuratie proefstuk 1

Figuur 13: Configuratie proefstuk 2

Het derde proefstuk, getoond in Figuur 14, maakt gebruik van een gelijmd schroefverbinding in het hout. Dit proefstuk is vergelijkbaar met proefstuk 2 aangezien beide configuraties met een tussenlaag van OSB 3 voorzien zijn. Aan de hand van de testen kan de invloed van het gebruik van een gelijmd schroefverbinding vergeleken worden met de geschroefde schroefverbinding.

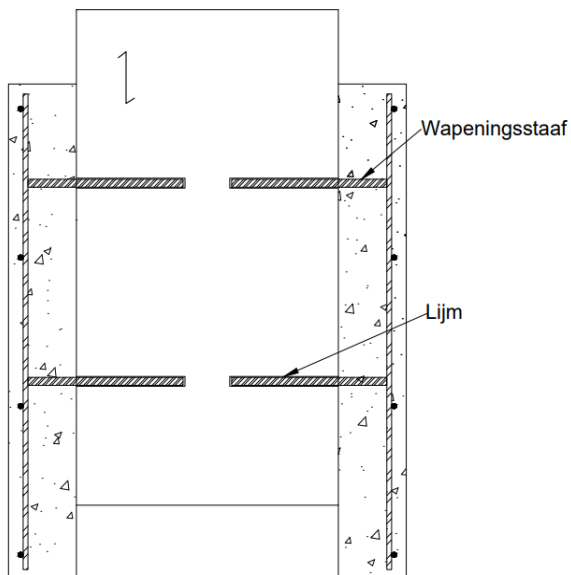
S-8-110-G-I



Figuur 14: Configuratie proefstuk 3

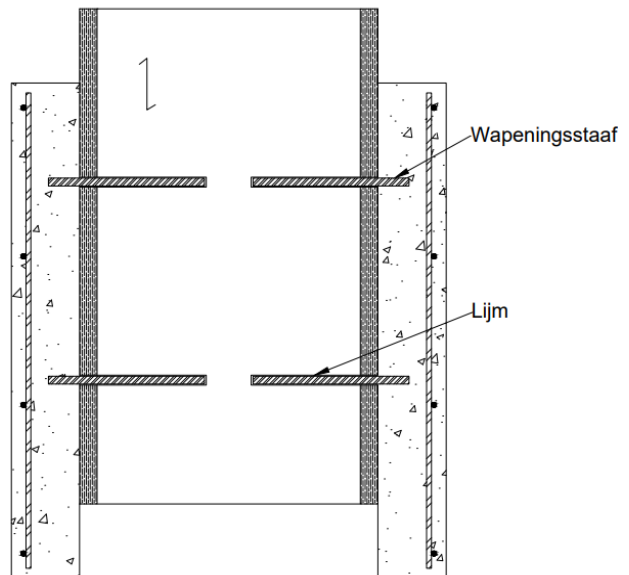
De overige twee proefstukken maken beiden gebruik van gelijmde wapeningsstaven. Het verschil tussen proefstuk 4 en 5 is opnieuw de aanwezigheid van een tussenlaag. Hierdoor kan ook het effect van de tussenlaag bij gelijmde wapeningsstaafverbindingen geanalyseerd worden. Figuur 15 en Figuur 16 presenteren respectievelijk de configuratie van proefstuk 4 en 5.

R-8-110-G-NI



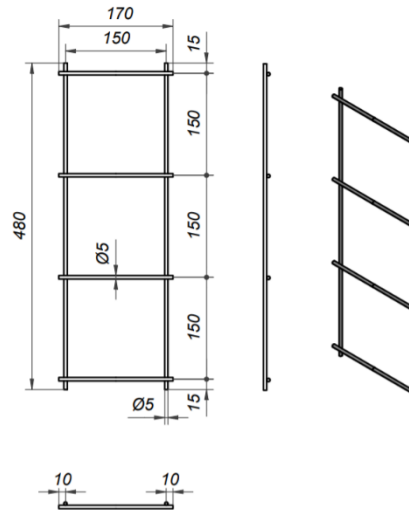
Figuur 15: Configuratie proefstuk 4

R-8-110-G-I



Figuur 16: Configuratie proefstuk 5

Alle proefstukken maken gebruik van een GLULAM houten element van het type GL24h met een breedte van 270 mm, een hoogte van 500 mm en een dikte van 90 mm. GL24h hout is opgebouwd uit homogene gelijmde gelamelleerde stukken hout met een druksterkte van 24 N/mm². Het beton in elk proefstuk is een zelfverdichtend lichtgewicht beton met een druksterkte van 20/22 N/mm². Dit beton heeft exact dezelfde prestaties en sterkte-eigenschappen als een traditioneel beton. De betonlagen hebben een hoogte van 500 mm, een breedte van 190 mm en een dikte van 70 mm. Om te voldoen aan de eisen van de minimum wapening bevat elke betonlaag een wapeningsnet met mazen van 150 op 150 mm en staafdiameters van 5 mm. Figuur 17 toont de geometrie van het gebruikte wapeningsnet.



Figuur 17: Configuratie wapeningsnet

Drie configuraties bevatten een tussenlaag uit OSB 3 met een dikte van 18 mm. Deze tussenlaag heeft een afmeting van 500 mm op 190 mm. De proefstukken met schroeven maken gebruik van ASSY-Plus-FT cilinderkopschroeven S355. De schroeven, getoond in Figuur 18, hebben een diameter van 8 mm en een lengte van 160 mm. Hun penetratielengte in het hout is in alle proefstukken gelijk aan 110 mm. De specificaties zijn terug te vinden in het ETA-document [16]. De wapeningsstaven in de proefstukken hebben eveneens een diameter van 8 mm en een lengte van 160 mm. De penetratielengte in het hout bedraagt opnieuw 110 mm. De onderlinge verticale afstand van de verbindingselementen bedraagt 200 mm. De staven zijn van het staaltype S355.



Figuur 18: ASSY-Plus-FT cilinderkopschroef

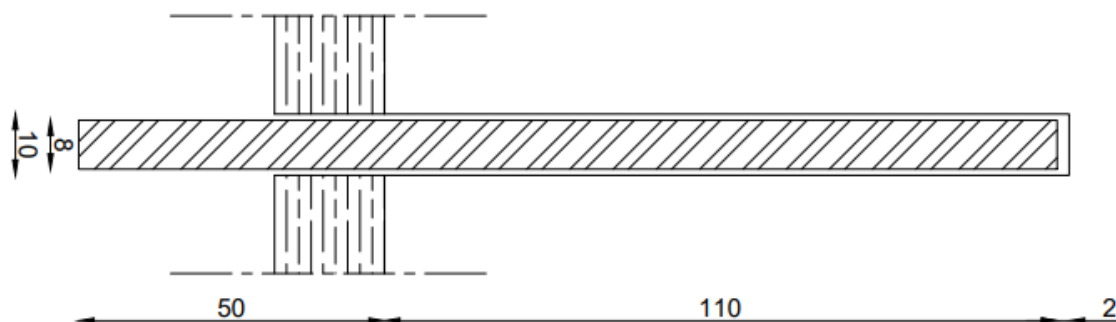
Zoals reeds vermeld bevatten enkele proefstukken lijm. De gebruikte lijm, AnchorFix-3030, wordt omschreven als een op epoxyhars gebaseerde, hoogwaardige, thixotrope, 2-componenten verankeringslijm. Deze lijm is geschikt voor het verankeren van draadstangen, bouten en wapeningsstaven in allerlei toepassingen en ondergronden. Na zeven dagen bereikt deze verankeringslijm een druksterkte van 95 N/mm², een treksterkte van 23 N/mm² en een buigsterkte van 45 N/mm².

4.2. Productieproces proefstukken

De proefstukken zijn gemaakt in het Technologiecentrum van Universiteit Hasselt. Het productieproces startte met het assembleren van bekistingen. De bekistingen bestonden uit betonplex platen met een dikte van 18 mm die aan elkaar geschroefd werden. Eén kist was verdeeld in twee compartimenten met een tussenschot zodat er twee proefstukken gemaakt konden worden uit één

kist. Vervolgens werden alle naden gedicht met behulp van een universele silicone zodat er geen water, afkomstig van het beton, uit de bekisting kon lekken. Indien dit niet wordt gedaan, is de kans reëel dat er grindnestvorming optreedt in het beton.

De volgende stap van het productieproces bestond uit de fabricage van het centrale houten element met bijhorende verbindingsmiddelen. Alle houten elementen werden eerst gemarkeerd zodat de exacte locatie van het verbindingsmiddel gekend was. Hierna werden de verbindingsmiddelen zonder lijm in de houten balk geschroefd. De proefstukken met gelijmde verbindingen dienden voorgeboord te worden. Het voorboren gebeurde met een houtboor met diameter 10 mm zodat er aan weerszijden van het verbindingsmiddel een ruimte van 1 mm voorzien werd voor de lijm. De voorboring reikte tot een diepte van 112 mm. Dit kwam neer op de penetratielengte van 110 mm van het verbindingsmiddel met bijkomend opnieuw 2 mm voor de opvulling van lijm. Het was belangrijk om de schroeven en de wapeningsstaven al draaiend in te brengen zodanig dat de lijm het verbindingsmiddel volledig omhulde. Hierdoor konden reeds bestaande of potentiële luchtbellens en holttes vermeden worden. Bij de proefstukken met een tussenlaag moest er een extra handeling uitgevoerd worden. Hier werd naast de voorboring van het houten element, ook een voorboring in de OSB plaat voorzien. Deze voorboring gebeurde conform de locatie en de grootte van de voorboring van het houten element, maar penetreerde de plaat echter volledig. Vervolgens werd de OSB plaat op de houten balk gelegd. Beide voorboorgaten bevonden zich zodanig boven elkaar en konden hierna opgevuld worden met lijm. Ten slotte kon de schroef of wapeningsstaaf op dezelfde wijze geplaatst worden zoals eerder besproken. Figuur 19 toont een detail van deze uitvoeringsmethode. Nadat de verbindingsmiddelen verankerd waren in het hout, werden de houten balken zonder tussenlaag afgeplakt met PVC-tape zoals reeds eerder besproken is.



Figuur 19: Uitvoeringsdetail gelijmde wapeningsstaaf in proefstuk met tussenlaag

Vervolgens werden er piepschuim opvulstukken op maat gesneden met een *foamcutter*. Deze opvulstukken waren noodzakelijk om de ruimtes tussen het hout en de bekisting op te vullen zodat het beton deze ruimtes niet kon opvullen. Dit was onder meer nodig aan de onder- en zijkanten van het houten element. Nadien werden de wapeningsnetten op maat geslepen. Om het wapeningsnet op zijn correcte plaats te houden in de bekisting werd er gewerkt met vier stervormige afstandhouders met een radius van 15 mm. Deze afstandhouders werden bevestigd aan de bovenste en onderste horizontale staaf zodat het wapeningsnet rechtop bleef staan tegen de bekisting. Mede door het gebruik van de afstandhouders werd een betondekking van 15 mm gegarandeerd.

Het bereiden van het beton was de laatste stap in het productieproces. Aangezien er gewerkt werd met zelfverdichtend beton, was het niet noodzakelijk om de beton na te trillen. Na een paar dagen uitharden konden de proefstukken reeds ontkist worden. Figuur 20 toont een proefstuk na ontkisting.



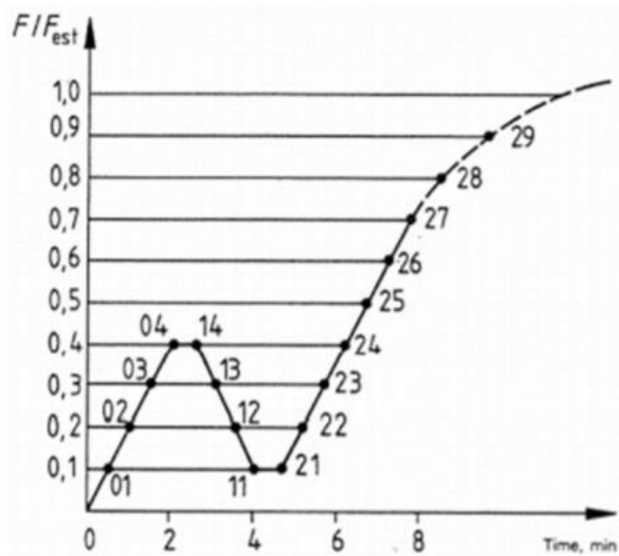
Figuur 20: Afgewerkt proefstuk

4.3. Testen

De testfase bestaat uit verschillende onderdelen. Eerst worden er ondersteunende testen uitgevoerd, namelijk betondrukproeven. Hierbij zijn er kubussen nodig afkomstig uit elke lading beton van de fabricage van de proefstukken. De kubussen ondergaan een drukproef na 1, 7, 14 en 28 dagen. Het doel van deze drukproeven is het bepalen van de druksterkte van het gebruikte beton. Deze sterkte is af te leiden uit een grafiek waarin de toename van de druksterkte voorgesteld wordt in functie van de tijd. Deze test controleert of het beton voldoet aan de theoretisch voorgeschreven sterkte. De procedure en de omstandigheden van deze testen zijn beschreven in EN 12390-3 [17].

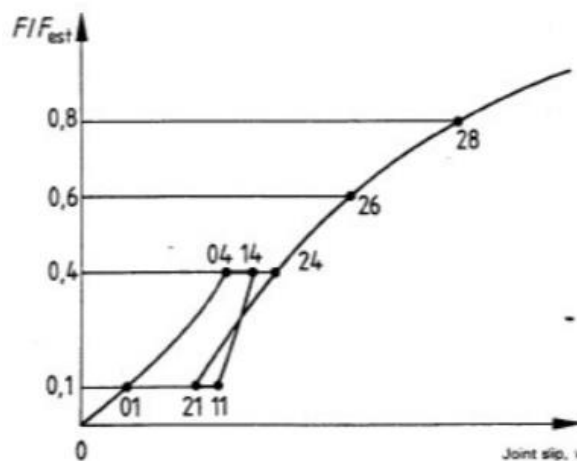
Hierna kan er overgegaan worden naar de push-out testen. Deze testen staan toe een analyse van de stijfheid en sterkte van een verbinding te verwezenlijken. De push-out testen kunnen pas plaatsvinden nadat het beton van een proefstuk is uitgehard, meer bepaald na 28 dagen. De aanvankelijke norm EN 26891 [18] beschrijft de regelgeving en principes om een push-out test uit te voeren bij hout-op-hout verbindingen. Sinds enige tijd beschrijft de technische specificatie voor hout-beton composieten [13] ook push-out testen. Deze beschrijving is gebaseerd op de oorspronkelijke norm EN 26891, maar geeft ook verdere specificaties voor testen op hout-beton composieten.

In deze normen zijn alle parameters van de laadprocedure gebaseerd op een initieel berekende maximum belasting F_{est} . Deze maximum belasting wordt in eerste instantie analytisch ingeschat aan de hand van de faalmodus. Deze methode staat beschreven in hoofdstuk 3. In iedere test moet deze maximum belasting hetzelfde blijven. De waarde moet enkel aangepast worden indien de gemiddelde waarde van de maximum belasting die in de testen bekomen wordt meer dan 20% afwijkt van de geschatte faalbelasting F_{est} . Het verloop van de aan te brengen kracht kan afgelezen worden in Figuur 21. De kracht wordt aangebracht tot 40% van de faalbelasting F_{est} met een constante snelheid van 20% F_{est} per minuut $\pm 25\%$ en dit gedurende 30 seconden. Daarna moet de belasting gereduceerd worden tot 10% van de maximum belasting F_{est} aan dezelfde snelheid met opnieuw een duur van 30 seconden. Vervolgens moet de belasting terug toenemen aan dezelfde snelheid als voorheen tot 70% van de faalbelasting is bereikt. Vanaf dit punt eindigt de test als het proefstuk faalt of wanneer de verplaatsing gelijk is aan 15 mm. De test dient uitgevoerd te worden met een constante verplaatsing zodat de maximum belasting of verplaatsing van 15 mm is bereikt na drie tot vijf extra minuten. Het uitvoeren van een test zal in totaal 10 tot 15 minuten bedragen.



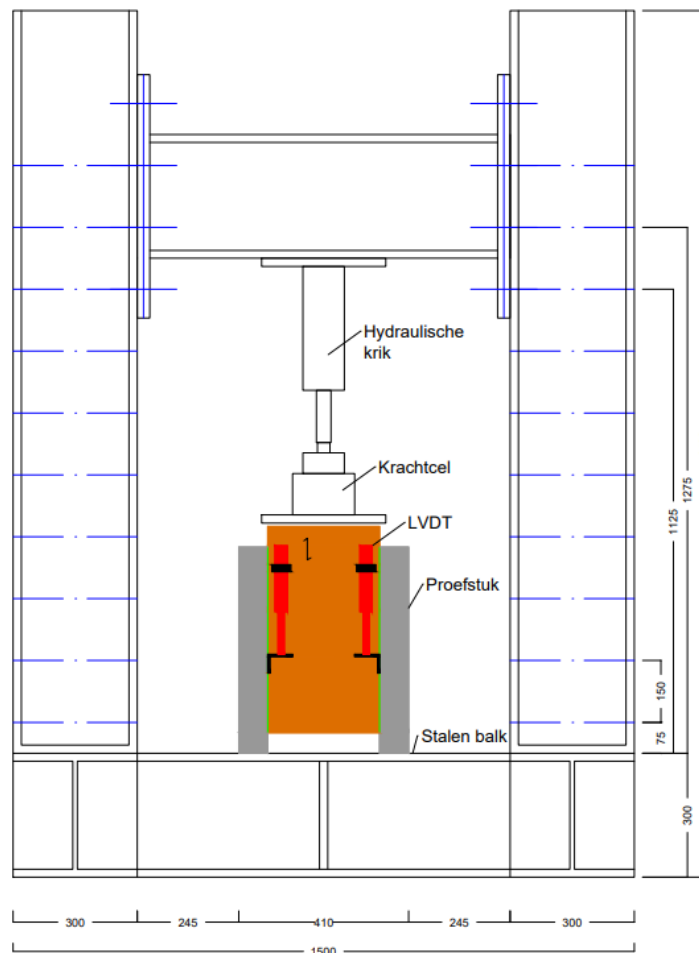
Figuur 21: Laadprocedure push-out test [18, p. 3]

De verplaatsingen worden geregistreerd d.m.v. vier LVDT's. De metingen dienen uitgevoerd te worden op basis van Figuur 22. In totaal zijn er acht cruciale punten waarop de verplaatsing geregistreerd moet worden volgens de norm namelijk 01, 04, 14, 11, 21, 24, 26 en 28. Het aantal uitgevoerde testen moet overeenkomen met EN 14358 [19].



Figuur 22: Geïdealiseerde kracht-verplaatsingsgrafiek met meetpunten [18, p. 3]

De volledige testopstelling van de push-out test wordt getoond in Figuur 23. De testopstelling bestaat uit een hydraulische krik, een stalen frame, een laadcel en het proefstuk met LVDT's. De krik is bevestigd aan een stalen frame en stuurt de laadcel aan. De laadcel oefent vervolgens een kracht uit op de bovenzijde van het houten element van het proefstuk. Het proefstuk steunt enkel op de betonlagen die op een hun beurt steunen op een stijve staalbalk. Ieder proefstuk wordt uitgerust met vier LVDT's. Deze meetapparatuur zet de verplaatsing van het houten element t.o.v. de betonlagen om in een elektrisch signaal. Hiermee kan de uitgeoefende drukkracht in functie van de verplaatsing in kaart gebracht worden. Op basis van de bekomen grafieken kan er berekend worden wat de sterkte en stijfheid van het systeem is.



Figuur 23: Testopstelling push-out test

Het volgende hoofdstuk 'Resultaten' ontbreekt in deze scriptie door de maatregelen omtrent de COVID-19 crisis. De volgende opsomming geeft een overzicht van de activiteiten die reeds afgewerkt waren op het moment van de uitbraak:

- configuraties tekenen,
- proefopstelling tekenen,
- materialen bestellen,
- proefstukken voorbereiden,
 - assembleren van de mallen,
 - monteren van de houten elementen en bijhorende verbindingselementen (geschroefd of gelijmd),
 - plaatsen van de tussenlagen indien nodig,
 - storten van het beton.
- betonkubussen maken.

Wegens de maatregelen werd de laatste stap in het proces geannuleerd, namelijk het uitvoeren van de push-out testen. Hierdoor ontbreken alle testresultaten. Er zijn daarom enkele aanpassingen gebeurd in de structuur en focus van deze scriptie. Deze aanpassingen worden beschreven in onderdeel 1.2 'Scope en doelstellingen'.

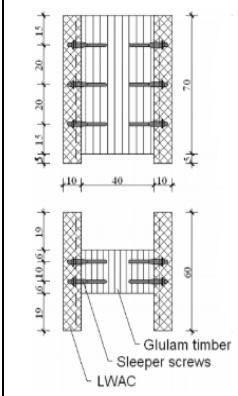
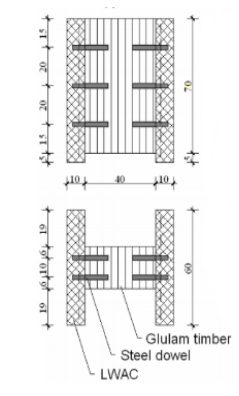
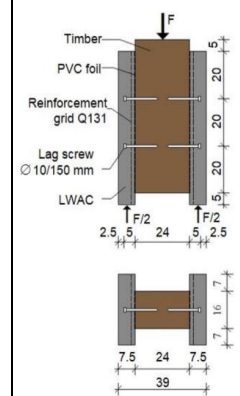
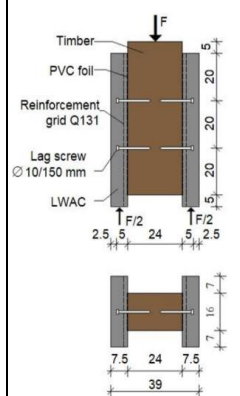
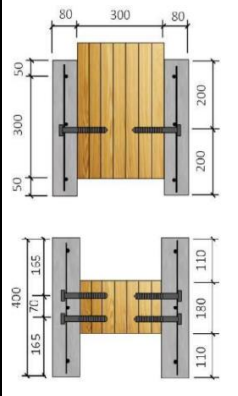
5. Analyse deuvolverbindingstypes in HBC

Dit hoofdstuk analyseert deuvolverbindingstypes in HBC uit de literatuur ter vervanging van de ontbrekende push-out testresultaten van hoofdstuk 4. Aan de hand van vijf verschillende cases uit drie verschillende bronnen [20]-[22] zullen er vergelijkende analyses uitgevoerd worden. Eerst zullen de proefresultaten rechtstreeks met elkaar vergeleken worden. Deze analyse gebeurt zowel op het niveau van het gehele systeem alsook de resultaten per verbindingsmiddel. Hierna zullen de resultaten benaderd worden met behulp van de analytische methode uit hoofdstuk 3. Deze benadering staat toe een vergelijkende analyse te maken tussen praktische waardes en analytische waardes. Deze analyses behandelen faalwaardes, bezwijkmechanismen en slipmodulussen.

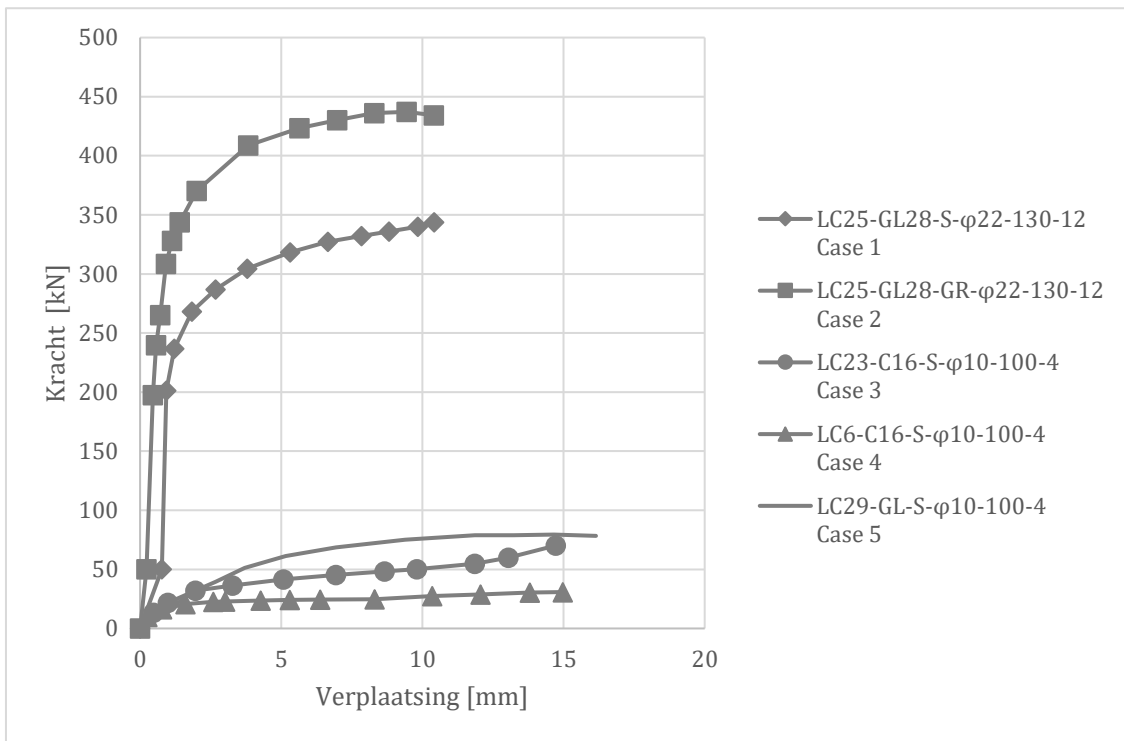
5.1. Alternatieve proefresultaten

Het onderzoek maakt nu gebruik van alternatieve testresultaten van vijf verschillende cases. Hierbij focust het onderzoek zich op deuvolverbindingstypes en betracht het verder enkel cases te onderzoeken die in de lijn van het oorspronkelijk onderzoek liggen. Zo bestaan alle cases uit lichtgewicht beton en is er in elke case gebruik gemaakt van push-out testen. Dit betekent dat de verbindingsmiddelen op afschuiving getest werden. In Tabel 3 volgt er een overzicht van de verschillende cases met bijhorende ID-labels en schematische voorstellingen van de configuraties. Deze labels zijn zo specifiek mogelijk omschreven naargelang de gegevens die in de literatuur beschreven zijn. Het label bevat eerst een verwijzing naar het type beton met bijhorende druksterkte. Het volgende element duidt op het type hout met bijhorende buigsterkte. Indien de buigsterkte niet besproken werd in de papers, is er gebruik gemaakt van de houtdichtheid om verdere berekeningen te volbrengen. Hierna volgt een verwijzing naar het type verbindingsmiddel. Dit kan ofwel een schroef S ofwel een gelijmde staaf GR (Engels: Glued Rod) zijn. Het volgende getal geeft de diameter van het verbindingsmiddel aan. Dit wordt gevolgd door de penetratielengte van het verbindingsmiddel in het hout. Tot slot toont het laatste getal het aantal verbindingsmiddelen in het gehele proefstuk.

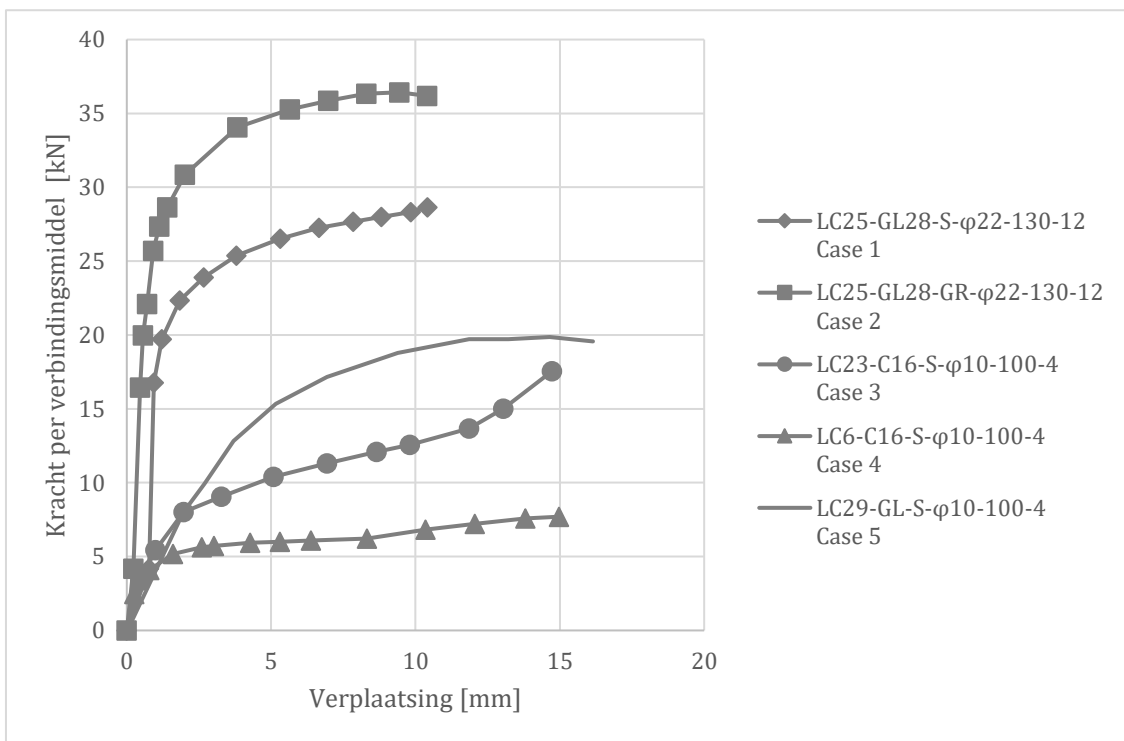
Tabel 3: Omschrijving alternatieve cases

Case 1 [20, p. 2]	Case 2 [20, p. 2]	Case 3 [21, p. 5]	Case 4 [21, p. 5]	Case 5 [22, p. 170]
LC25-GL28h-S-φ22-130-12	LC25-GL28h-GR-φ22-130-12	LC23-C16-S-φ10-100-4	LC6-C16-S-φ10-100-4	LC29-GL-S-φ10-100-4
				

Alle cases beschrijven hun resultaten van de push-out testen in de vorm van kracht-verplaatsingsgrafieken per proefstuk. Op basis van deze grafieken wordt een gemiddelde grafiek opgesteld met behulp van het programma PlotDigitizer. Er wordt dus geen gebruik gemaakt van exacte waardes. Figuur 24 toont de gemiddelde kracht-verplaatsingsgrafiek van elke case voor het gehele systeem. Hierna presenteert Figuur 25 de kracht-verplaatsingsgrafieken per verbindingsmiddel.



Figuur 24: Kracht-verplaatsingsgrafieken voor geheel systeem



Figuur 25: Kracht-verplaatsingsgrafieken per verbindingsmiddel

Met behulp van Figuur 24 en Figuur 25 kunnen enkele belangrijke parameters bepaald worden. De eerste parameter is de maximale belasting F_{max} die rechtstreeks uit de grafiek kan afgelezen worden. De volgende is de slipmodulus K_{slip} . Deze parameter is ofwel reeds bepaald in de bijhorende paper ofwel berekend met behulp van formule (3) uit EN 26891 [18]:

$$K_{slip} = \frac{0,4 \cdot F_{est} - 0,1 \cdot F_{est}}{v_{0,4} - v_{0,1}} \quad (3)$$

Hierbij moet er rekening gehouden worden met het feit dat deze berekeningen gebaseerd zijn op waarden uit een gemiddelde grafiek. Deze grafiek is naar best mogelijk vermogen ingeschat omdat er geen exacte waarden gekend zijn. Beide parameters kunnen ook per verbindingsmiddel berekend worden door de bekomen waarde te delen door het aantal verbindingsmiddelen. Tot slot kan ook de verplaatsing Δu op $0,8 \cdot F_{\max}$ in dalende richting berekend worden. Deze waarde is hetzelfde bij een berekening voor het hele systeem alsook bij een berekening per verbindingsmiddel. Tabel 4 geeft een overzicht van de resultaten.

Tabel 4: Resultaten uit kracht-verplaatsingsgrafieken

Case	Totaal			Per verbindingsmiddel		
	F_{\max} [kN]	K_{slip} [kN/mm]	Δu [mm]	F_{\max} [kN]	K_{slip} [kN/mm]	Δu [mm]
1	340,0	26,6*	10	28,3	2,2*	10
2	440,0	42,3*	10	36,7	3,5*	10
3	54,0	3,4	15	13,5	0,9	15
4	30,9	5,2	15	7,7	1,3	15
5	85,3	4,2	16	21,3	1,1	16

* Deze waarden konden niet rechtstreeks uit de bijhorende paper gehaald worden en zijn berekend volgens formule (3).

Tabel 4 staat toe bijkomende berekeningen uit te voeren. Deze verdere analyses bouwen verder op de resultaten per verbindingsmiddel. Zo kan er een ratio berekend worden tussen twee maximale belastingen of twee slipmodulussen. Er kunnen twee types vergelijkende analyses gemaakt worden waarbij elk type zowel de belasting alsook de slipmodulus vergelekt. Eerst wordt een vergelijking gemaakt tussen een referentiecasse en elke andere case. De referentiecasse is vrij te kiezen en er werd gekozen voor case 1. Daarna kunnen er extra vergelijkingen gemaakt worden tussen case 1 en 2 en tussen case 3 en 4. Deze laatste vergelijkingen zijn interessant omdat deze cases telkens dezelfde proefstukconfiguratie hebben met uitzondering van slechts één enkele parameter. Dit in tegenstelling tot het eerste type vergelijking waarbij alle cases vergeleken worden terwijl deze meerdere verschillende parameters in hun configuraties bevatten. Tabel 5 toont deze berekende ratio's van het eerste type vergelijking per verbindingsmiddel. Vervolgens presenteert Tabel 6 het tweede type vergelijking per verbindingsmiddel met het subscript verwijzend naar het nummer van de case.

Tabel 5: Faalwaarde en slipmodulus ratio's t.o.v. referentiewaardes

Case (i)	$F_{\max,i}/F_{\max_ref,1}$	$K_{\text{slip},i}/K_{\text{slip_ref},1}$
1	1,000	1,000
2	1,294	1,590
3	0,476	0,385
4	0,273	0,586
5	0,752	0,478

Tabel 6: Faalwaarde en slipmodulus ratio's t.o.v. gelijkwaardige proefstukken

$F_{\max,1}/F_{\max,2}$	$K_{\text{slip},1}/K_{\text{slip},2}$	$F_{\max,3}/F_{\max,4}$	$K_{\text{slip},3}/K_{\text{slip},4}$
0,773	0,629	1,748	0,658

5.2. Discussie proefresultaten

De eerste analyse baseert zich op resultaten op het niveau van het gehele systeem. Hierbij kan vastgesteld worden dat case 1 en 2 de hoogste laadcapaciteit bereiken. Dit komt omdat er in beide cases gebruik wordt gemaakt van twaalf verbindingsmiddelen in tegenstelling tot de andere cases waarin dit aantal slechts vier bedraagt. Bovendien heeft het onderlinge verschil tussen beide cases te maken met het type verbindingsmiddel. Case 1 maakt gebruik van laagwaardige *sleeper* schroeven, terwijl er in case 2 deuvels gehanteerd worden. Deze deuvels bereiken een hogere ultieme treksterkte $f_{u,k}$ dan de schroeven. Dit leidt tot een hoger vloeimoment M_y dewelke een belangrijke rol speelt in het bijhorend optredend bezwijkmechanisme.

Vervolgens kunnen ook de slipmodulussen vergeleken worden. Hieruit blijkt opnieuw dat case 1 en case 2 de hoogste slipmodulussen hebben. Dit betekent dat de proefstukken met het meeste aantal schroeven zich ook het stijfste gedragen. Hierbij kan wel vastgesteld worden dat case 2 met de gelijmde deuvels een stijfheid heeft die 1,5 maal hoger ligt dan case 1 met de schroeven. Dit strookt met de gekende tendensen uit de literatuur waarbij gelijmde verbindingen hogere stijfheden halen.

De tweede analyse focust zich op de resultaten per verbindingsmiddel. Hieruit wordt duidelijk dat opnieuw case 1 en case 2 de grootste faalwaarde per verbindingsmiddel hebben. Het onderlinge verschil is opnieuw te wijten aan de materiaaleigenschappen van beide types verbindingen. Case 1 en 2 hebben de grootste faalwaarde omdat ze gebruik maken van verbindingsmiddelen met diameter 22 mm, terwijl de diameter bij de andere cases slechtst 10 mm groot is. Vervolgens is de penetratielengte in het hout voor beide cases gelijk aan 130 mm. Dit is 30 mm meer dan de andere drie cases wat leidt tot een hogere uittreksterkte F_{ax} . Tot slot kan er ook vastgesteld worden dat de ultieme treksterktes $f_{u,k}$ van case 1 en 2 volgens de literatuur hoger liggen dan de andere cases. Dit resulteert in hogere vloeimomenten M_y van het verbindingsmiddel dewelke enkel een prominente rol speelt in het optredend bezwijkmechanisme. Ook case 3 en 4 kunnen onderling vergeleken worden waaruit blijkt dat een hogere betonsterkte resulteert in een hogere faalwaarde. Tot slot tonen de resultaten aan dat de faalwaarde van case 5 het dichtste aansluit bij de hoge faalwaardes van case 1 en 2. Dit is mogelijk te wijten aan de hoge hout- en betonsterkte.

Verder kunnen de slipmodulussen per verbindingsmiddel vergeleken worden. Hieruit blijkt dat case 2 een hogere slipmodulus heeft dan case 1. Dit is merkwaardig aangezien ze beiden evenveel verbindingsmiddelen gebruiken, dezelfde diameters en hetzelfde houttype hebben. Verder zien we dat case 3 de laagste slipmodulus heeft. Dit is opnieuw een opvallend resultaat aangezien case 3 en case 4 enkel een verschillend betontype gebruiken en deze parameter geen invloed uitoefent volgens de bestaande formules. Volgens de analytische formules zouden beide cases eenzelfde stijfheid moeten hebben, terwijl in praktijk case 3 slechts een stijfheid van 65 % haalt ten opzichte van case 4. Deze procentuele waarde moet echter genuanceerd worden aangezien het absolute verschil tussen beide resultaten slechtst 0,4 kN/mm bedraagt. Een kleine afwijking tijdens de opbouwphase of testfase van een proefstuk kan rechtstreeks leiden tot afwijkingen van deze grootteorde. Een laatste opvallend resultaat is de lage slipmodulus van case 5. Indien case 3, 4 en 5 zich in de praktijk zouden gedragen volgens de analytische formules dan heeft case 5 de hoogste slipmodulus. Deze case heeft namelijk de hoogste houtsterkte en de diameters zijn voor alle drie de cases gelijk. Dit blijkt echter niet het geval. De stijfheid van case 5 bevindt zich in het midden tussen case 3 en 4. Hier kan echter opnieuw verwezen worden naar de kleine absolute verschillen tussen de resultaten. Indien hier mee rekening gehouden wordt, hebben case 2, 3 en 4 bij benadering dezelfde stijfheid.

5.3. Analytische benadering proefresultaten

Aan de hand van de gegevens uit de vijf cases kan er een analytische benadering uitgevoerd worden om de proefresultaten theoretisch te verifiëren. Deze verificatie zal gebeuren aan de hand van de analytische methode uit hoofdstuk 3 die gebaseerd is op negen mogelijke bezwijkmechanismen. De benodigde gegevens zijn voor elke case bepaald aan de hand van de literatuur of ingeschat volgens waarden uit gelijkwaardig onderzoek uit andere literatuur. Tabel 7 geeft een overzicht van de faalwaarden F_{max} per verbindingsmiddel voor alle bezwijkmechanismen. Er is per case één waarde gemarkeerd. Dit is de laagste faalwaarde volgens het analytisch model, wat betekent dat deze waarde met bijhorend bezwijkmechanisme zal optreden volgens dit model. Bovendien wordt ook de verwachte maximale belasting van het gehele systeem F_{max_totaal} weergegeven. Deze waarde representeert de maximale belasting die tijdens de push-out test op het proefstuk kan geplaatst worden.

Tabel 7: Resultaten analytische benadering faalwaardes cases

Bezwijkmechanisme	F_{max} [kN]				
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
1	62,9	75,8	22,6	22,6	31,6
2	67,5	81,4	25,4	7,3	38,1
3	35,2	41,0	14,8	11,3	18,0
4	40,6	52,0	14,7	12,3	17,1
5	37,4	49,3	13,7	8,6	16,7
6	42,6	55,0	15,5	14,8	18,2
7	52,7	75,6	14,6	14,0	15,6
8	56,1	78,0	17,6	9,3	21,6
9	46,5	66,1	13,0	10,4	13,5
F_{max_totaal} [kN]	422,4	492	52	29,2	54

Bovendien kan ook de slipmodulus K_{slip} per verbindingsmodulus analytisch bepaald worden. Dit kan gebeuren op basis van formule (4) volgens EN 1995-1-1 [13]:

$$K_{slip} = \rho_m^{1.5} * \frac{d}{23} \quad (4)$$

Hierbij moet er rekening gehouden worden met het feit dat het resultaat van deze formule verdubbeld moet worden voor hout-beton composieten. Tabel 8 presenteert de resultaten.

Tabel 8: Resultaten analytische benadering slipmodulussen cases

Case	K_{slip} [kN/mm]
1	16,5
2	16,5
3	6,5
4	6,5
5	10,8

5.4. Discussie analytische resultaten en proefresultaten

5.4.1. Faalwaardes

De faalwaardes volgens de analytische methode kunnen vervolgens vergeleken worden met de optredende faalwaardes uit de testen. Bovendien kunnen ook de bezwijkmechanismen uit de praktijk vergeleken worden met de analytisch bepaalde bezwijkmechanismen. Tot slot kan er voor iedere case een ratio bepaald worden tussen de verwachte analytische faalwaarde en de praktische faalwaarde. Tabel 9 toont een overzicht van de resultaten per verbindingsmiddel. De praktische opgetreden bezwijkmechanismen zijn bepaald aan de hand van beschrijvingen in de papers. In sommige gevallen was er sprake van twijfel, deze specifieke gevallen zijn expliciet aangeduid in Tabel 9 (Case 3).

Tabel 9: Samenvatting faalwaardes analytische benadering en praktijk

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Analytisch	Bezwijkmechanisme	3	3	9	2	9
	F_{\max} [kN]	35,2	41,0	13,0	7,3	13,5
Praktisch	Bezwijkmechanisme	5	5	4/9	3	7
	F_{\max} [kN]	28,3	36,7	13,5	7,7	21,3
$F_{\max_analytisch} / F_{\max_praktisch}$		1,244	1,117	0,963	0,948	0,638

Bij case 1 valt op dat de analytische benadering een overschatting van 24% geeft van de werkelijke resultaten. Dit is een opvallend resultaat. Bovendien komen de bezwijkmechanismen niet overeen. Desondanks ligt volgens de analytische berekening de faalwaarde van bezwijkmechanisme 5 zeer dicht bij die van bezwijkmechanisme 3. Mogelijk heeft de inschatting van bepaalde parameters een invloed op het resultaat. Kleine wijzigingen kunnen leiden tot een ander bezwijkmechanisme volgens de analytische methode. Een parameter die bijvoorbeeld ingeschat is voor case 1, is de ultieme treksterkte $f_{u,k}$. Deze parameter heeft een rechtstreekse invloed op het vloeimoment dewelke wel aanwezig is in de formule van bezwijkmechanisme 5 en afwezig is in de formule van bezwijkmechanisme 3. Dit betekent concreet dat indien deze parameter lager ingeschat werd, bezwijkmechanisme 5 zou optreden. In dat geval is er wel een overeenkomst tussen de analytische methode en de praktijk. Bovendien heeft de axiale uittreksterkte F_{ax} ook een belangrijke invloed op de faalwaarde. Deze waarde is normaliter gebaseerd op het minimum van drie waardes. In de praktijk kunnen er echter meestal slechts één of twee formules berekend worden, omdat er te weinig gegevens gekend zijn. Er is daarom in dit geval slechts één formule berekend dewelke een extra randvoorwaarde heeft met betrekking tot de diameter van het verbindingsmiddel. De diameter moet namelijk een grootte hebben tussen 6 en 12 mm. Case 1 en Case 2 maken echter gebruik van een diameter van 22 mm en vallen dus niet binnen deze grenzen. Maar omdat er hierdoor geen enkele formule zou kunnen berekend worden, is deze formule toch gebruikt om de uittreksterkte te bepalen. Mogelijk speelt de ongeschiktheid van deze formule (volgens de voorwaarden) ook een rol op het eindresultaat. Indien men zowel de argumentatie voor de faalwaarde alsook voor het bezwijkmechanisme in acht neemt, ziet men dat de analytische methode een redelijk geschikte benadering maakt van de praktische resultaten. Bovendien tonen beide resultaten bezwijkmechanismen volgens hout-op-hout verbindingen.

Indien er een vergelijking gemaakt wordt tussen de resultaten van case 2, kan er vastgesteld worden dat de analytische benadering een overschatting van 11% geeft van de werkelijke resultaten. Verder komen de bezwijkmechanismen ook niet overeen, hierbij kan echter dezelfde verklaring gebruikt worden zoals in case 1 reeds besproken is. Bovendien speelt het vloeimoment M_y een belangrijke rol in het eindresultaat. Deze parameter moet echter vaak bepaald worden aan de hand van EC 5 formules. Deze formules hebben op hun beurt enkele parameters nodig die niet altijd verkrijgbaar zijn. Een voorbeeld hiervan is zoals reeds vermeld de ultieme treksterkte $f_{u,k}$. Daarbij maakt ook deze case

gebruik van diameter 22 mm dewelke in principe ongeschikt is voor bepaalde formules. Dezelfde verklaringen en argumentatie kunnen hiervoor gegeven worden zoals reeds in de analyse van case 1 besproken is. Dit heeft als gevolg dat er kan besloten worden dat de resultaten toch een acceptabele benadering maken gezien de onzekerheid van de parameters. Hoe beter de parameters gekend zijn, hoe geschikter de analytische benadering lijkt. Bovendien kan men ook hier vaststellen dat de resultaten in beide gevallen aantonen dat hout-op-hout bezwijkmechanismen optreden.

Vervolgens kan men vaststellen dat de praktische faalwaarde van case 3 bijna gelijk is aan de analytische benadering. De praktijkresultaten liggen echter net iets hoger. Dit is een gunstig resultaat, omdat er in de praktijk geen falen kan optreden voor de analytisch bepaalde faalwaarde bereikt is. Hierdoor kan de faalwaarde op voorhand met vrij grote precisie ingeschat worden. Bovendien is er wel een verschil merkbaar tussen beide bezwijkmechanismen. Het analytische bezwijkmechanisme heeft een extra plastisch scharnier in het hout. Desondanks kan er niet uitgesloten worden dat dit bezwijkmechanisme ook in de praktijk opgetreden is, omdat de schroeven in de literatuur niet uit het hout zijn geschroefd. Hierdoor blijft de mogelijkheid bestaan dat er ook een plastisch scharnier in het hout aanwezig is wat zou resulteren in bezwijkmechanisme 9. Dit betekent dat voor case 3 de faalwaardes en mogelijk ook de bezwijkmechanismen een goede match hebben tussen de analytisch en praktische resultaten. Ook kan men vaststellen dat opnieuw hout-op-hout bezwijkmechanismen optreden.

Bij case 4 liggen de resultaten van de analytische methode en de praktijk zeer dicht bij elkaar. De faalwaarde ligt in de praktijk opnieuw net iets hoger dan de analytische methode aangeeft, maar dit is opnieuw een gunstig resultaat zoals in de vorige case reeds uitgelegd is. De bezwijkmechanismen komen echter niet overeen. Volgens de analytische methode wordt het beton weggeduwd door de schroef, maar in praktijk blijkt dat de schroef roteert zowel in het hout als in het beton. Volgens de analytische methode en de praktijk treden bezwijkmechanismen op die afkomstig zijn van de hout-op-hout bezwijkmechanismen.

Tot slot tonen de resultaten van case 5 dat de praktische faalwaarde ongeveer 8 kN hoger ligt dan het analytische resultaat. Bovendien komen de bezwijkmechanismen niet perfect overeen. Er kan echter wel vastgesteld worden dat beide bezwijkmechanismen bestaan uit twee plastische scharnieren waarvan er zich één in het hout bevindt en de andere ofwel in de betonlaag ofwel op de tussenlaag. Dit kan er mogelijk op duiden dat in de realiteit het beton zich stijver gedraagt dan er voorspeld is. Hierdoor kan het plastisch scharnier zich niet vormen in het beton, maar wel op de tussenlaag zoals het in praktijk heeft plaatsgevonden. Indien hiermee rekening gehouden wordt in de analytische methode, mag bezwijkmechanisme 9 uitgesloten worden. Het eerstvolgende bezwijkmechanisme dat dan zal optreden volgens Tabel 7 is bezwijkmechanisme 7 met een faalwaarde van 15,6 kN. Deze faalwaarde komt beter overeen met de werkelijke waarde van 21,3 kN. Ook dit is een gunstig resultaat aangezien de praktische waarde opnieuw hoger ligt dan de analytische waarde. Deze case toont aan dat ook bezwijkmechanismen volgens staal-op-hout verbindingen kunnen optreden in hout-beton composieten.

5.4.2. Slipmodulussen

Vervolgens kunnen ook de slipmodulussen volgens de analytische methode vergeleken worden met de praktische resultaten. Tabel 10 vat de resultaten samen en toont daarbij ook een ratio tussen de analytische en praktische resultaten.

Tabel 10: Samenvatting slipmodulussen analytische benadering en praktijk

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Analytisch	K_{slip} [kN/mm]	16,5	16,5	6,5	6,5	10,8
Praktisch	K_{slip} [kN/mm]	2,2	3,5	0,9	1,3	1,1
$K_{\text{slip_analytisch}}/K_{\text{slip_praktisch}}$		7,5	4,714	7,222	5	9,818

Hieruit kan besloten worden dat de analytische formules overschattingen maken die tot wel tien maal groter zijn dan de praktische waardes. Bovendien zijn de formules enkel afhankelijk van de diameter en de dichtheid van het hout. Desondanks deze parameters gelijk zijn bij case 1 en 2 en bij case 3 en case 4, kan er in de praktijk toch een verschil vastgesteld worden. Mogelijk speelt er ook een andere parameter een rol bij het stijfheidsgedrag van een proefstuk. Deze parameter is echter nog niet in rekening gebracht in de huidige formules.

Hieruit ontstaat de vraag of de voorgestelde verdubbeling van de stijfheidsformule noodzakelijk is. Deze verdubbeling wordt namelijk specifiek voorgesteld voor hout-beton composieten, maar lijkt op basis van deze resultaten overbodig. Hierbij zal het niet uitvoeren van de verdubbeling echter nog steeds leiden tot overschattingen met een factor vijf voor case 5. Voor case 1 tot en met 4 zijn deze factoren kleiner maar maakt de analytische methode nog steeds een overschatting. Hierbij moet er echter opnieuw vermeld worden dat de praktische slipmodulussen van case 1 en 2 gebaseerd zijn op waardes uit grafieken waardoor er een inschattingmarge in rekening moet worden genomen. Deze marge heeft mogelijk een grote invloed op het eindresultaat van slipmodulussen die met formule (3) berekend zijn. Dit betekent dat dit geen invloed heeft op case 3, 4, en 5, omdat deze reeds exact bepaald zijn in de papers.

6. Analytische benadering experimentele proefstukken

De experimentele proefstukken uit hoofdstuk 4 kunnen ook analytisch benaderd worden. Aangezien de proefstukken nog geen push-out testen ondergaan hebben, zal deze analytische benadering fungeren als analytische voorspelling. Hierbij wordt er opnieuw gebruik gemaakt van de analytische methode uit hoofdstuk 3 om negen bezwijkmechanismen te berekenen. Hierbij moet er rekening gehouden worden dat proefstuk 4 en proefstuk 5 de uitzonderlijke berekeningsmethode van gelijkjnde wapeningsstaven volgt zoals reeds in hoofdstuk 3 beschreven is. De overige drie proefstukken volgen de standaard berekeningsmethode waarvan voorbereidende calculaties conform Eurocode 5 verlopen. Vervolgens kan ook de slipmodulus per verbindingsmiddel K_{slip} en de slipmodulus voor het hele systeem K_{slip_totaal} bepaald worden. Tabel 11 toont de uiteindelijke resultaten van de analytische benadering van de faalwaarde per verbindingsmiddel. De gemarkeerde resultaten zijn de faalwaardes per verbindingsmiddel die verwacht worden. Bovendien wordt de totale sterkte van het systeem ook vermeld. Om deze waarde te bekomen moet men de laagste faalwaarde per verbindingsmiddel vermenigvuldigen met het aantal verbindingsmiddelen in één proefstuk. Tot slot worden zowel de slipmodulus per verbindingsmiddel alsook de slipmodulus voor het hele systeem vermeld.

Tabel 11: Resultaten analytische benadering experimentele proefstukken

Bezwijkmechanisme	F_{max} [kN]				
	Proefstuk 1 S-8-110-NG-NI	Proefstuk 2 S-8-110-NG-I	Proefstuk 3 S-8-110-G-I	Proefstuk 4 R-8-110-G-NI	Proefstuk 5 R-8-110-G-I
1	19,2	19,2	19,2	33,5	33,5
2	16,5	16,5	16,5	23,1	23,1
3	8,3	8,3	8,3	15,3	15,3
4	8,3	8,3	8,3	11,8	11,8
5	6,2	6,2	6,2	10,6	10,6
6	8,9	8,9	8,9	16,9	16,9
7	5,0	5,0	5,0	6,3	6,3
8	8,1	8,1	8,1	12,9	12,9
9	4,2	4,2	4,2	7,2	7,2
F_{max_totaal} [kN]	16,8	16,8	16,8	25,2	25,2
K_{slip} [kN/mm]	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
K_{slip_totaal} [kN/mm]	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0

Hieruit blijkt dat bezwijkmechanisme 9 bij alle schroefverbindingen zal optreden. Bovendien zijn hun faalwaardes ook allemaal gelijk aan elkaar. Dit is te wijten aan het feit dat Eurocode 5 geen rekening houdt met gelijkjnde verbindingen bij schroeven. Verder wordt het gebruik van een tussenlaag ook niet in rekening gebracht. Hetzelfde kan vastgesteld worden bij proefstuk 4 en 5. Hier is er geen onderling verschil in analytische waarde, omdat de formules geen rekening houden met het gebruik van een tussenlaag. Hier kan echter wel vastgesteld worden dat bezwijkmechanisme 7 in beide gevallen zal optreden. Dit is het bezwijkmechanisme afkomstig uit de technische specificatie van gelijkjnde staafverbindingen. Bovendien kan er vastgesteld worden dat de faalwaardes van gelijkjnde staafverbindingen een hogere waarde hebben dan de schroefverbindingen. Uit de voorgaande vaststellingen volgt dat zowel de bezwijkmechanismen volgens hout-op-hout verbindingen alsook volgens staal-op-hout verbindingen mogelijk kunnen optreden tijdens de testen. De bezwijkmechanismen en faalwaardes fungeren echter louter en alleen als voorspelling. Enkel testresultaten kunnen deze vaststellingen bevestigen of ontcrachten. De testresultaten zijn echter afhankelijk van een correcte en uniforme uitvoering. Tot slot zijn alle slipmodulussen ook gelijk aan

elkaar omdat er in alle cases gebruik wordt gemaakt van hetzelfde hout en dezelfde diameter van verbindingsmiddel. Dit voorspelt een gelijke stijfheid voor alle proefstukken tijdens de testen, maar is opnieuw afhankelijk van een correcte en uniforme uitvoering van de testen.

7. Besluit

Deze thesis onderzocht hout-beton composieten op zowel een experimentele alsook een analytische wijze. Het doel van het onderzoek was tweeledig. Eerst betrachtte de thesis het gedrag van hout-beton composieten experimenteel te analyseren via push-out testen. Belangrijke parameters hierbij waren gelijmde bevestigingsmethodes, het gebruik van wapeningsstaven en het gebruik van een tussenlaag tussen hout en beton. Hierna focuste de thesis op het opstellen van een analytische methode. Deze methode omvatte negen mogelijke bezwijkmechanismen met bijhorende formules die allen afkomstig waren uit EC 5. Hierbij werd er naast de gekende bezwijkmechanismen voor staal-op-hout verbindingen ook gekeken naar de bezwijkmechanismen voor hout-op-hout verbindingen. Door de geannuleerde testen wegens de COVID-19 crisis werd er gebruik gemaakt van alternatieve proefresultaten van vijf cases uit de literatuur. Deze resultaten werden geanalyseerd op gebied van sterkte en stijfheid. Hierna werd de reeds opgestelde analytische methode gebruikt om deze nieuwe cases te benaderen. Hiermee werd er enerzijds betracht de geschiktheid van de analytische formules te bevestigen en anderzijds de optredende bezwijkmechanismen te analyseren. Dit laatste stond toe om het optreden van hout-op-hout bezwijkmechanismen te bevestigen. Tot slot werd de analytische methode ook toegepast op de oorspronkelijke experimentele proefstukken. Deze resultaten dienen als voorspelling voor de nog uit te voeren testen.

De analyse van de alternatieve proefresultaten staat toe enkele belangrijke vaststellingen te maken. Ten eerste wordt op niveau van het geheel systeem vastgesteld dat een toenemend aantal verbindingsmiddelen leidt tot een stijging van de sterkte en de stijfheid. Vervolgens staat de analyse van de resultaten per verbindingsmiddel toe enkele andere fenomenen vast te stellen. Zowel een stijgende diameter alsook een hogere penetratielengte in het hout leiden tot hogere sterktes. Bovendien leidt een hogere treksterkte van het verbindingsmiddel ook tot een hogere sterkte. De hogere treksterkte gaat echter gepaard met het toepassen van een gelijmde verbinding. De exacte invloed van beide parameters is echter niet gekend, maar er kan wel een stijging van de faalwaarde vastgesteld worden. Tot slot leiden ook de toename van de hout- en betonsterkte tot hogere faalwaardes. De stijfheden kunnen vervolgens ook geanalyseerd worden. Hieruit blijkt dat de gelijmde verbinding de hoogste stijfheid heeft wat overeenkomt met bevindingen uit de literatuur. Proefstukken met gelijkwaardige houttypes en diameters van de verbindingsmiddelen hebben wel een verschillende stijfheid. Dit strookt niet met de bestaande formules die aantonen dat de stijfheid enkel afhankelijk is van de twee reeds genoemde parameters.

De analytische methode bij de alternatieve cases staat opnieuw toe enkele vaststellingen te maken. Hieruit blijkt dat de analytische methode in de meeste gevallen in staat is een goede voorspelling te doen van de proefresultaten. Hierbij treedt er een maximale onderschatting van 36% op die te deels te wijten is aan inschattingen van parameters. Daarnaast treedt er ook een maximale overschatting van 24% op die een nauwgezette analyse nodig heeft. In de praktijk is er namelijk een zo precies mogelijke inschatting gewenst waarbij er een kleine onderschatting mag zijn van de proefresultaten. Een overschatting daarentegen leidt tot falen vooraleer de geschatte analytische resultaten bereikt zijn. Dit moet te allen tijde vermeden worden. Vervolgens toont de analyse aan dat zowel hout-op-hout alsook staal-op-hout bezwijkmechanismen optreden. Deze bezwijkmechanismen worden in de meeste cases correct voorspeld door de analytische methode. Er blijkt echter enkel een afwijking van dit fenomeen te zijn wanneer er gebruik wordt gemaakt van lage betonsterktes. Er moet echter een algemene kanttekening gemaakt worden bij zowel de faalwaardes alsook de bezwijkmechanismen. In de meeste cases is er namelijk een kleine afwijking vastgesteld die mogelijk te wijten is aan het gebruik van een formule die in principe ongeschikt is. De randvoorwaarden voor de diameter werden niet gerespecteerd. Bij gebrek aan alternatieven zijn deze formules echter toch gebruikt wat kan leiden tot zowel over- als onderschattingen van bepaalde parameters. Naast het feit dat sommige formules niet geschikt waren, zijn er ook enkele parameters geschat omdat deze niet in de papers vermeld werden. Dit kan opnieuw leiden tot kleine wijzigingen in de resultaten. Desalniettemin voorspelt de analytische methode met voldoende juistheid de mogelijke bezwijkmechanismen met bijhorende

faalwaardes. Tot slot toont de vergelijking tussen de analytische stijfheid en de praktische stijfheid aan dat de analytische methode overschattingen maakt die tot wel tien keer groter zijn. Hieruit rijst de vraag of de aanbevolen verdubbelingsfactor in de stijfheidsformule voor hout-beton composieten noodzakelijk is. De analytische formule voor de stijfheid lijkt minder geschikt om de proefresultaten te benaderen.

Tot slot voorspelt de analytische methode het optreden van bezwijkmechanismen 9 en 7 in de experimentele proefstukken. Hierbij zal de faalwaarde hoger liggen bij gelijmde wapeningsstaafverbindingen dan bij schroefverbindingen. Er bestaat echter nog geen concrete normering omtrent de invloed van het gebruik van een tussenlaag en gelijmde schroefverbindingen wat leidt tot veel gelijke waarden. De geplande testen staan echter toe een nauwgezet inzicht hierin te verkrijgen. Hetzelfde geldt voor de stijfheid die momenteel enkel afhankelijk is van de diameter van het verbindingsmiddel en de dichtheid van het hout. De testen zullen toestaan de invloed van andere parameters te onderzoeken.

Bibliografie

- [1] A. Dias, „Mechanical behaviour of timber-concrete joints,” 2005.
- [2] M. van der Linden, „Timber-concrete composite beams,” 1999.
- [3] D. Djoubissie, „Experimental study of the mechanical behavior of timber-concrete shear connections with threaded reinforcing bars,” 2018.
- [4] E. Steinberg, „Connectors for timber- Lightweight concrete composite structures,” 2003.
- [5] Z. Akasah, „Analytical Assessment for Comparisons of Triple-T Precast Concrete-Timber Composite Floor using Gamma method,” 2012.
- [6] A. Dias, „Design of timber-concrete composite structures,” 2018.
- [7] E. Lukaszewska, „Development of Prefabricated Timber-Concrete Composite Floors,” 2009.
- [8] A. Ceccotti, „Behaviour of a Timber-Concrete Composite Beam with Glued Connection at Strength Limit State,” 2006.
- [9] F. Moshiri, „The Effect of Interlayer on the Structural Behavior of Timber Concrete Composite Utilizing Self-Compacting and Conventional Concretes,” 2015.
- [10] L. Jorge, „Interlayer Influence on Timber-LWAC Composite Structures with Screw Connections,” 2010.
- [11] D. Yeoh, „Experimental Performance of LVL-Concrete,” 2010.
- [12] EN 1995-1-1, „EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules for buildings,” 2004.
- [13] EN 1995-1-1, „EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures - Structural design of timber-concrete composite structures - Common rules and rules for buildings,” 2019.
- [14] CEN/TC250/SC5, „Bonded-in-rods,” 2019.
- [15] EN 1992-1-1, „EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings,” 2004.
- [16] ETA-13/0029, „ETA-13/0029: ASSY-Plus-FT screws,” 2017.
- [17] EN 12390-3, „EN 12390-3: Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens,” 2019.
- [18] EN 26891, „EN 26891: Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics,” 2009.
- [19] EN 14358, „EN 14358: Timber structures - Calculation and verification of characteristic values,” 2016.
- [20] H. Miljenko, „Timber-Lightweight Aggregate Composite Floor Structures,” 2012.
- [21] L. Kozaric, „Slip Modulus of Screws in Timber and Lightweight Concrete Composite Structures,” 2018.
- [22] H. Du, „Load-Carrying Capacity of Self-tapping Lag Screws for Glulam-lightweight Concrete Composite Beams,” 2019.