Afstudeeronderzoek, course 15 & 16 25-05-2021

Hout U Flexibel

Hoofdrapportage



Dit bestand betreft de hoofdrapportage waarbij de constructieve uitwerking van een houten functie-flexibel elementenconcept centraal staat.

Namen	Bob van Alst	619803
	Stijn van den Broek	600216
Cursus	Afstudeeronderzoek, course 15 & 16	
Organisaties	Hogeschool van Arnhem en Nijmegen Croes Bouwtechnisch Ingenieursbureau	
Begeleiders HAN	Ellen Rutgers, Ruben Onstein & Dickjan Schaap	
Begeleiders Croes	Maarten Braem & Friso Janssen	

Hout U Flexibel
Flexibele utilitaire houtbouw

croes
Bouwtechnisch Ingenieursbureau

HAN UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Colofon

Titel: Hout U Flexibel

Course: 15 & 16

Datum: 25-05-2021

Auteurs:

Naam: Bob van Alst
Studentnr.: 619803
E-Mailadres: BGJ.vanAlst@student.han.nl
Studie: Bouwkunde Constructie
Functie: Student Bouwkunde

Naam: Stijn van den Broek
Studentnr.: 600216
E-Mailadres: S.vandenBroek4@student.han.nl
Studie: Bouwkunde Constructie
Functie: Student Bouwkunde

Onderwijsinstelling:

Instelling: Hogeschool van Arnhem en Nijmegen
Faculteit: Techniek, Built Environment
Adres: Ruitenberglaan 26
Postcode: 6826 CC Arnhem

Begeleiders Hogeschool van Arnhem en Nijmegen:

Naam: Ellen Rutgers
Afkorting: RGSE
E-mailadres: Ellen.rutgers@han.nl
Functie: Docent BK
Taak: Afstudeerbeg. 1

Naam: Ruben Onstein
Afkorting: OSNRC
E-mailadres: Ruben.onstein@han.nl
Functie: Docent BK/CT
Taak: Afstudeerbeg. 2A (feb-apr)

Naam: Dickjan Schaap
Afkorting: SCHPD
E-mailadres: DickJan.schaap@han.nl
Functie: Docent BK/CT
Taak: Afstudeerbeg. 2B (mei-juni)

Afstudeerbedrijf:

Instelling: Croes Bouwtechnisch Ingenieursbureau
Adres: Kerkenbos 1006
Postcode: 6546 BA Nijmegen

Begeleiders Croes:

Naam: Maarten Braem
E-mailadres: mbr@croes.nl
Functie: Constructeur
Taak: Bedrijfsbegeleider 1

Naam: Friso Janssen
E-mailadres: fj@croes.nl
Functie: Register Constructeur
Taak: Bedrijfsbegeleider 2

Voorwoord

Voor u ligt het onderzoek Hout U Flexibel. Het onderzoek is geschreven als afstudeeronderzoek, wat onze laatste stap is binnen de bacheloropleiding Bouwkunde met de afstudeerrichting Constructie aan de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen. De opgedane kennis en vaardigheden en de ontwikkelingen die wij hebben doorgemaakt gedurende de afgelopen vier jaar van de opleiding zijn tijdens dit onderzoek toegepast. Onze interesse op het gebied van innovatie en houtconstructies heeft geleid tot het afstudeeronderzoek Hout U Flexibel.

Hout U Flexibel betreft een onderzoek naar een houten elementenconcept waarbij functie-flexibiliteit centraal staat. Binnen het onderzoek is gekeken naar de mogelijkheden tot constructieve uitwerking. De competenties waaraan wij hebben gewerkt zijn:

<u>Opleidingsspecifieke competenties:</u>

- **C01**: Initiëren en sturen
- **C02**: Ontwerpen
- **CO3**: Specificeren
- **C06**: Monitoren, toetsen en evalueren

<u>Algemene HBO competenties:</u>

- **C07**: Onderzoeken
- **C08**: Communiceren en samenwerken
- **C09**: Managen en innoveren

Via deze weg willen wij graag de HAN begeleiders Ellen Rutgers, Ruben Onstein en Dickjan Schaap bedanken voor de ondersteuning van het proces gedurende het onderzoek.

Daarnaast willen wij Maarten Braem en Friso Janssen van Croes Bouwtechnisch Ingenieursbureau bedanken voor de ondersteuning, adviezen en de feedback tijdens de uitvoering van dit onderzoek. Ten slotte willen wij ook bedrijven, personen en familieleden bedanken die wij mochten interviewen, enquêteren en om advies mochten vragen tijdens het onderzoek.

Wij wensen u veel leesplezier toe.

Bob van Alst & Stijn van den Broek

Bemmel, 25 mei 2021



Figuur 1 – Stijn van den Broek (links) & Bob van Alst (rechts), overgenomen uit Tech Gelderland, artikel Draagconstructie in hout, fotograaf: Erik van 't Hullenaar

Samenvatting

De hedendaagse manier van ontwerpen en bouwen in Nederland ligt onder de loep. Dit komt onder andere door ontwikkelingen op het gebied van klimaatverandering. Utiliteitsbouw wordt hedendaags voornamelijk uitgevoerd in beton en staal. In de afgelopen tijd speelt de milieu-impact (stikstof en CO_2) steeds meer een rol door onder andere het klimaatakkoord in de Europese Unie. Door het gebrek aan kennis en ervaring binnen onder andere het construeren met hout, loopt Nederland achter op het gebied van houtbouw ten opzichte van landen met een grote houtproductie zoals Duitsland, Oostenrijk en Scandinavische landen. Tevens is de markt bezig met het industrialiseren en prefabriceren van de bouwsector. Tot slot houdt de sector zich steeds vaker bezig met het transformeren van gebruiksfuncties binnen bestaande gebouwen. Bovenstaande ontwikkelingen vereisen een toekomstbestendige ontwerp- en bouwmethodiek.

Het doel van het onderzoek is het ontwerpen van een houtbouw elementenconcept waarbij functievrijheid centraal staat voor bouwwerken tot een vloerhoogte van 13 meter (in verband met 90 min. brandwerendheid). Binnen dit ontwerp wordt voornamelijk gekeken naar de constructieve eigenschappen en uitwerkingen van het elementenconcept. Hieruit volgt de hoofdvraag van het afstudeeronderzoek:

> *'Welke realistische mogelijkheden met betrekking tot de hoofddraagconstructie voor bouwwerken uitgevoerd in hout zijn toepasbaar voor een utilitair functie-flexibel geïndustrialiseerd elementenconcept?'*

De eerste stap in het beantwoorden van dit vraagstuk is het uitvoeren van een veldonderzoek. Hieruit is door middel van een enquête en interviews gebleken dat het merendeel van de respondenten en geïnterviewden van mening zijn dat een functie-flexibel elementenconcept het meest toekomstbestendig is binnen de utiliteitsbouw.

Vervolgens is het begrip 'functie-flexibel ontwerpen' geconcretiseerd. Aan de hand van de enquêteresultaten is de hypothese met betrekking tot de gebruiksfuncties binnen functie-flexibel ontwerpen geverifieerd. Vanuit deze gebruiksfuncties zijn de eisen, stramienmaten en een installatieconcept bepaald.

Hierna is het concept constructief uitgewerkt. Dit heeft geresulteerd in de realistische mogelijkheden van de hoofddraagconstructie, zoals vermeld in de hoofdvraag. Dit is uitgewerkt middels onderstaand stappenplan:

- **Stap 1**: Het opstellen van de constructieve varianten als constructieoverzichten.
- **Stap 2**: Het dimensioneren van de vloerconstructie in combinatie met de liggers. Een kwalitatieve beschouwing is hieraan voorafgegaan.
- **Stap 3:** Aan de hand van de constructieve varianten in combinatie met de dimensionering is een multicriteria-analyse opgesteld met criteria en bijbehorende wegingsfactoren, wat heeft geresulteerd in de meest realistische varianten.
- **Stap 4**: De kolommen zijn per stramienmaat gedimensioneerd.
- **Stap 5**: Tot slot zijn verbindings- en sparingsmogelijkheden en de mogelijke stabiliteitsprincipes kwalitatief beschouwd.

Het afstudeeronderzoek heeft geresulteerd in constructief uitgewerkte realistische mogelijkheden. Dit betreft per verschillende stramienmaat, een kolomdimensie en de vier meest realistische vloer-ligger-combinaties uitgevoerd in hout. Deze varianten zijn terug te vinden in hoofdstuk 6.0: *Hout U Flexibel Brochure*.

Summary

The current way of engineering and building in the Netherlands is under scrutiny. This is partly due to developments in terms of climate change. Nowadays, non-residential buildings are mainly constructed in concrete and steel. However, the environmental impact (nitrogen and CO_2) is playing an increasing role due to, for example, the climate agreement in the European Union. Due to the lack of knowledge and experience in, inter alia, constructing with wood, the Netherlands lags in terms of wood construction compared to countries with a large wood production, for example: Germany, Austria, and the Scandinavian countries. The market is also industrialising and prefabricating the construction industry. Finally, the sector is increasingly focusing on the transformation of functions within existing buildings. The above-mentioned developments require a future-proof engineering and construction methodology.

The purpose of the research is to design a wooden construction element concept in which flexibility of function is central for buildings up to a floor height of 13 metres (in relation to 90 min. fire resistance). Within this design, the structural properties and elaborations of the element concept are mainly studied. This results in the main question of the thesis:

> *'What realistic possibilities regarding the main load-bearing structure for buildings constructed in wood are suitable for a non-residential function-flexible industrialised element concept?'*

The first step in answering this question is to perform a field research. By means of a survey and interviews, it appeared that the majority of the respondents and interviewees are convinced that a function-flexible element concept is the most future-proof in non-residential buildings.

Subsequently, the concept of function-flexible design was concretised. Based on the results of the survey, the hypothesis regarding the functions within function-flexible design was verified. From these functions, the requirements, grid dimensions and an installation concept were determined.

After this, the concept is structurally engineered. This resulted in the realistic possibilities of the main load-bearing structure, as mentioned in the main question. This is elaborated in accordance with the following step-by-step plan:

- **Step 1**: Designing the constructive variants as structural overviews.
- **Step 2**: Dimensioning of the floor structure in combination with the beams. This was preceded by a qualitative consideration.
- **Step 3**: Based on the constructive variants in combination with the dimensioning a multi-criteria analysis with criteria and related weighting factors, resulting in the most realistic variants.
- **Step 4**: The columns were dimensioned per grid dimension.
- **Step 5**: Lastly, connection- and opening possibilities as well as the possible stability principles were qualitatively considered.

The thesis research resulted in constructively elaborated realistic possibilities. This concerns per different grid dimension, a column dimension and the four most realistic floor-beam combinations in timber. These variants can be found in Chapter 6.0: Hout U Flexibel Brochure.

Leeswijzer

Dit rapport is een verslaglegging van de vooraf opgestelde deelvragen en bijlagen van de onderzoek ten behoeve van de beschikbare informatie en resultaten voor het concept Hout U Flexibel. Hieronder volgt de leeswijzer met de inhoud per hoofdstuk.

Beschrijving hoofdstukken
Hoofdstuk 1: Inleiding: In hoofdstuk 1 worden de aanleiding, voorstudie, probleemstelling, doelstelling, hoofdvraag en deelvragen vermeld.
Hoofdstuk 2: Veldonderzoek Toekomstbestendige ontwerp- en bouwmethodieken: In dit hoofdstuk wordt het veldonderzoek beschreven waarin onderzoek is gedaan naar toekomstbestendige ontwerp- en bouwmethodieken. De deelvragen die aan bod komen binnen dit hoofdstuk zijn: • *2.1 Welke conclusie kan getrokken worden met betrekking tot het besluit om een functie-flexibele ontwerpmethodiek en een elementenconcept bouwmethode toe te passen in relatie met de resultaten van het veldonderzoek?* • *2.2 Welke conclusie kan getrokken worden met betrekking tot de aanname van de toegepaste gebruiksfuncties in relatie met de resultaten van het veldonderzoek?* De informatie die in dit hoofdstuk staat beschreven is afkomstig uit bijlage 3: Veldonderzoek *Toekomstbestendige ontwerp- en bouwmethodieken*.
Hoofdstuk 3: Functie-flexibel ontwerpen: In hoofdstuk 3 worden de eisen, stramienmaten en installatieconcept van functie-flexibel ontwerpen onderzocht en toegelicht. De deelvragen die aan bod komen binnen dit hoofdstuk zijn: • *3.1 Aan welke eisen dient een utilitair bouwwerk te voldoen bij een functie-flexibele ontwerpmethodiek?* • *3.2 Welke stramienmaten dienen toegepast te worden om aan de functie-flexibiliteit voor utilitaire bouw te voldoen?* • *3.3 Welk installatieconcept dient toegepast te worden om aan de functie-flexibiliteit voor utilitaire bouw te voldoen?* De informatie die in dit hoofdstuk staat beschreven is afkomstig uit bijlagen: *4.Eisen functie-flexibel ontwerpen*, *5.Stramienplan* en *6.Installatieconcept*.
Hoofdstuk 4: Construeren: In hoofdstuk vier wordt het concept constructief uitgewerkt. Dit betreft: constructieve varianten, constructieve toetsingen, multicriteria-analyse en beschouwingen verbindings- en sparingsmogelijkheden. De deelvraag die aan bod komt binnen dit hoofdstuk is: • *3.4 Welke constructieve overzichtsvarianten inclusief materialisatie en dimensionering zijn realistisch voor een utilitair functie-flexibel geïndustrialiseerd elementenconcept?* De informatie die in dit hoofdstuk staat beschreven is afkomstig uit bijlage 7: *Variantenstudie*.
Hoofdstuk 5: Conclusie: Hierin worden de resultaten van het afstudeeronderzoek geconcludeerd.
Hoofdstuk 6: Hout U Flexibel Brochure: Deze brochure dient als samenvattend geheel van het onderzoek en geeft de eindconclusie visueel en praktisch weer.
Hoofdstuk 7: Terugblik en aanbeveling: In dit hoofdstuk worden informatie, resultaten en conclusies ter discussie gesteld. Binnen de aanbeveling worden mogelijke vervolgonderzoeken beschreven.
Hoofdstuk 8: Literatuurlijst: In de literatuurlijst staan alle geraadpleegde bronnen/literatuur die toegepast zijn in het hoofdrapport. Per bijlage is op dezelfde wijze een literatuurlijst opgesteld.

Tabel 1 – Leeswijzer, (1) = Auteurs: Stijn van den Broek & Bob van Alst, hierna te noemen (1).

Begrippenlijst

In de rapportage is gebruik gemaakt van bouwkundig en constructief jargon. In tabel 2 hieronder zijn de definities van de begrippen toegelicht.

Begrip	Definitie
Beschouwing	Een kwalitatieve beoordeling voorafgaande aan een gedetailleerde uitwerking *(1)*.
Biobased materialen	Materialen die afkomstig zijn van natuurlijke/organische grond-stoffen, bijvoorbeeld: hout, bamboe of hennep *(Encyclo, z.d.-a)*.
Circulaire ontwerpprincipe	Een ontwerp dat wordt uitgevoerd met als doel om bij te dragen aan het "economisch systeem waarbij de inzet en waarde van grondstofstromen worden geoptimaliseerd zonder daarbij het functioneren van de biosfeer en de integriteit van de maatschappij te belemmeren" *(Actieteam Framework, 2021, p.8)*.
CLT	De afkorting van Cross Laminated Timber, in het Nederlands Kruislaaghout. Bestaande uit kruislings verlijmde houtenlamellen in drie of meer lagen vuren *(Wikipedia-bijdragers, 2021a)*.
Distributiesysteem	Transportmiddelen om een product te verplaatsen, bijvoorbeeld het verplaatsen van lucht door middel van luchtkanalen *(Encyclo, z.d.-c)*.
Elementenconcept	Geprefabriceerde losse componenten, bestaande uit wanden, kolommen of vloeren, die worden gestapeld op een vrachtwagen en worden getransporteerd naar de bouwplaats. Ook kunnen de elementen in de fabriek worden voorzien van installaties, afwerkingen en gevelbekledingen *(1)* .
Functie-flexibel bouwen	Een manier van ontwerpen, bouwen en exploiteren van bouwwerken waarbij binnen de levensduur een functiewisseling plaats kan vinden zonder ingrijpende veranderingen aan de hoofddraagconstructie. De gevelopvulling, binnenwanden, afwerkingen en installaties kunnen (los van de hoofddraagconstructie) variëren *(1)* .
Functiewisselingen	Betreft in dit onderzoek *(1)*: • Een interne verandering waarbij het mogelijk is om de indeling van de plattegrond aan te passen binnen een gebruiksfunctie, zonder de hoofddraagconstructie hierop aan te hoeven passen. • Een interne verandering waarbij het mogelijk is om de gebruiksfunctie aan te passen, zonder de hoofddraagconstructie hierop aan te hoeven passen.
Gemodificeerd hout	Het modificeren van hout is het veranderen van eigenschappen van het product door het toevoegen van andere stoffen. Het doel van deze verandering is om de eigenschappen van product te verbeteren. Binnen het afstudeeronderzoek gaat het hier voornamelijk op de constructieve eigenschappen *(ClubGreen, z.d.)*.
Glulam	Is een samenvoeging van Glued Laminated Timber. Een houtproduct door samenstelling van verlijming. Binnen het Nederlandse technische jargon ook wel gelamineerd hout genoemd *(Eurabo, z.d.-a)*.
Holle constructieve elementen	Constructief niet-massieve elementen, die door toepassing van ribben zijn voorzien van een gewichtsbesparing ten opzichte van vol-massief hout *(1)*.
Houtskeletbouw	Een bouwwijze waarbij de constructieve delen van het gebouw gerealiseerd zijn van een houten skelet van balken, kolommen en platen *(Encyclo, z.d.-d)*.

Begrip (vervolg)	**Definitie** (vervolg)
Kerto Ripa	LVL-vloersysteem van MetsäWood. Hieronder vallen meerdere vloersystemen bestaande uit LVL-ribben, bovenplaat en eventuele (lokale) onderplaten *(1)*.
Klimaatakkoord	Een verzameling van overheidsbesluiten van het kabinet in 2019. Met als doel om de CO_2 te verminderen en hierbij de Nederlandse bijdrage te leveren tegen de wereldwijde klimaatverandering *(Wikipedia-bijdragers, 2021b)*.
Klimaatbeheersings-concept	Systeem dat het klimaat van een gebouw reguleert. Om het klimaat te reguleren zijn klimaatinstallaties nodig: luchtverversing, verwarming, koeling en verlichting *(1)*.
Koolstofdioxide (CO_2)	Door middel van o.a. verbrandingen van fossiele brandstoffen komt een kleurloos, niet giftige gas (koolstofdioxide) in de atmosfeer terecht. Deze uitstoot is mede verantwoordelijk voor het broeikaseffect. Binnen het onderzoek wordt de afkorting CO_2 gebruikt *(Kernerman Dictionaries, z.d.)*.
LVL	De afkorting van Laminated Veneer Lumber. LVL is opgebouwd uit meerdere houten fineerlagen van 3 á 6 mm dik, die onderling verlijmd zijn *(Eurabo, z.d.-b)*.
Module concept	Geprefabriceerde modules, bestaande uit wanden, kolommen en vloeren, die als één complete unit op een vrachtwagen getransporteerd worden. De modules kunnen in de fabriek worden voorzien van installaties, afwerkingen en gevelbekledingen *(1)*.
Multicriteria-analyse (MCA)	Een wetenschappelijke beoordelingsmethode om tussen diverse mogelijkheden een keuze te kunnen maken op basis van meer dan één criterium. Binnen het onderzoek wordt de afkorting MCA gebruikt *(Encyclo, z.d.-b)*.
Poisson factor	Een materiaalconstante die beschrijft hoe een materiaal reageert op trek- of drukbelasting. Dit betreft dwarscontractie *(Wikipedia-bijdragers, 2019)*.
Remontabel bouwen	Een manier van bouwen waarbij verschillende componenten makkelijk te demonteren en vervolgens te verplaatsen, repareren, vervangen of (binnen nieuw project) her te gebruiken zijn *(1)*.
Schijfwerking	is een stabiliteitsprincipe dat zorgt voor horizontale stabiliteit in een constructie. De horizontale krachten worden door schijfwerking overgedragen naar verticale stabiliteitssystemen *(FEBE, z.d.)*.
Unity Checks (U.C.)	De optredende eenheid mag de gestelde eis eenheid niet overtreffen. Hiervoor wordt de U.C.-waarde berekend door middel van de optredende eenheid te delen door de gestelde eis eenheid. De U.C.-waarde mag niet groter zijn dan 100% of 1,00. Binnen het onderzoek wordt de afkorting U.C. gebruikt *(InfoNu, 2021)*.
Utiliteitsbouw (Utilitair)	Gebouwen met een maatschappelijke functie. Hierbij kunt u denken aan: kantoren, winkels, fabrieken, bedrijfshallen, bioscopen en opslagruimtes *(Encyclo, z.d.-e)*.

Tabel 2 – Begrippenlijst

Inhoudsopgave

Colofon 2
Voorwoord 3
Samenvatting 4
Summary 5
Leeswijzer 6
Begrippenlijst 7
1.0 Inleiding 10
1.1 Aanleiding 10
1.2 Voorstudie 11
1.3 Probleemstelling 13
1.4 Doelstelling 13
1.5 Hoofdvraag en deelvragen 13
1.6 Onderzoek grenzen 14
2.0 Veldonderzoek Toekomstbestendige ontwerp- en bouwmethodieken 15
2.1 Enquête 15
2.2 Interviews 15
2.3 Resultaten veldonderzoek 16
3.0 Functie-flexibel ontwerpen 17
3.1 Eisen aan functie-flexibel ontwerpen 17
3.2 Stramienplan 18
3.3 Installatieconcept 19
4.0 Construeren 20
4.1 Opgestelde constructieve varianten 21
4.2 Constructieve toetsing 22
4.3 Multicriteria-analyse 26
4.4 Realistische varianten 28
4.5 Stabiliteit 33
5.0 Eindconclusie 34
6.0 Hout U Flexibel Brochure 35
7.0 Terugblik en aanbevelingen 43
7.1 Discussie 43
7.2 Vervolgstudie 44
8.0 Literatuurlijst 45

1.0 Inleiding

1.1 Aanleiding

De aanleiding van dit onderzoek betreft meerdere factoren. Deze zijn hieronder toegelicht.

Klimaatontwikkeling:

Door onder andere menselijke handelingen op aarde komen broeikasgassen vrij in de atmosfeer. Door het vrijkomen van deze gassen ontstaat een klimaatverandering (impact op het milieu), waardoor de zeespiegel en de temperatuur stijgt op aarde. Koolstofdioxide (CO_2) is hiervan een belangrijke oorzaak. Om de klimaatveranderingen te beheersen heeft Nederland naast vele andere landen het VN-klimaatakkoord ondertekend in Parijs. Nederland heeft dit akkoord getekend met als doel in 2050 95% minder CO_2 uit te stoten ten opzichte van 1990. Om dit doel te behalen zal de huidige werkwijze in de bouw- en infrasector moeten veranderen. De winning van beton en staal veroorzaakt namelijk een aanzienlijk aandeel, 14% van de totale CO_2 uitstoot door de mens *(van der Lugt & Harsta, 2020, p.15)*.

Ook zullen in de loop der tijd metalen grondstoffen opraken. Door de klimaatdoelstellingen is vanaf begin dit jaar 2021 een CO_2-heffing geïntroduceerd op productieprocessen in Nederland. Hierdoor kan de kostprijs van gewapend beton stijgen tot 34% en staal tot 14% in 2030 *(Bronsvoort, Veldboer, te Slaa & Kaptein, 2020, p. 33)*. Ook heeft de woningcrisis invloed op de CO_2 uitstoot. Door deze crisis zullen in de komende jaren meer huizen gebouwd moeten worden, met minder uitstoot.

Toekomstbestendig ontwerpen

Om de klimaatdoelstellingen te behalen zal er een transitie verwezenlijkt moeten worden naar een circulaire economie. Dit gaat gepaard met circulaire ontwerpprincipes voor het ontwerpproces van projecten. Een van de circulaire ontwerpprincipes is 'ontwerp voor meerdere levenscycli' *(Dijcker & Schepers, 2018, p.10)*.

Sinds de laatste jaren komt de leegstand van panden in Nederland steeds meer voor. Dit geldt voornamelijk voor kantoorpanden waarbij 3,3 miljoen vierkante meter oftewel 6% administratief leeg staat. Ook 6% van de bouwwerken met een winkelfunctie staat leeg *(Centraal Bureau voor de Statistiek, 2019)*. Het ombouwen van de leegstaande panden naar woningen blijkt in de praktijk vaak lastig. De panden blijken niet geschikt voor de woonfunctie of de projecten zijn financieel niet haalbaar.

Industrialisatie van de bouwsector

Door ontwikkelingen in de samenleving is de bouwsector aan het industrialiseren. De bouwproductie is zeer afhankelijk van de conjunctuur en de vraag, waardoor de werkgelegenheid in de sector fluctueert. Dit kan leiden tot een personeelstekort bij een groeiende economie. Ook heeft de sector met een woningnood te maken waardoor er per jaar honderdduizend woningen gebouwd moeten worden. Echter blijkt dit in de praktijk lastig te verwezenlijken, waardoor het ontwikkelen van geïndustrialiseerde elementen- en/of moduleconcepten voor initiatiefnemers interessant wordt.

Utiliteitsbouw

Tot op heden wordt de hoofddraagconstructie van utilitaire gebouwen uitgevoerd in beton en staal. Door de klimaatdoelstellingen en de vraag vanuit ontwikkelaars en opdrachtgevers zal het materiaalgebruik aangepast moeten worden om de CO_2 uitstoot te reduceren. Het bouwen met biobased materialen biedt toekomst voor de vraag van ontwikkelaars/opdrachtgevers en voor deze doelstellingen. Hout is een biobased materiaal. Echter, binnen de Nederlandse bouwsector blijkt een kennisachterstand aanwezig met betrekking tot houtbouw. *(Bronsvoort et al., 2020, p. 36)*.

1.2 Voorstudie

Het concretiseren van de hoofdvraag is ervaren als een lastige opdracht. De geringe kennis met betrekking tot houtbouw was hier de voornaamste oorzaak van. Met deze reden is besloten om, voorafgaande aan het afstudeeronderzoek, een relatief uitgebreide voorstudie op te zetten.

Het doel van deze voorstudie is het opdoen van beschikbare kennis welke toepasbaar en bruikbaar is voor het afstudeeronderzoek. Met deze opgedane kennis werd verwacht dat het opstellen van een concrete onderzoeksvraag voorspoediger zou verlopen.

Voorafgaand aan de voorstudie zijn deelvragen opgesteld waarover de afstudeerders meer kennis wilden vergaren. Hieronder staan de deelvragen vermeld met de bijbehorende conclusies welke relevant zijn voor het algehele onderzoek.

Deelvragen voorstudie/literatuuronderzoek:

- *Wat is de relatie tussen houtbouw en het milieu?*
- *Welke houtbouw materialen/producten zijn beschikbaar op de markt en welke eigenschappen zijn hieraan verbonden?*
- *Welke referentieprojecten op gebied van houtbouw zijn beschikbaar en welke ontwikkeling/ kennis is relevant voor het onderzoek?*
- *Hoe wordt geconstrueerd met houtconstructies?*
- *Hoe wordt gerekend aan houtconstructies?*

Aan de hand van de voorstudie is veel algemene kennis over houtbouw opgedaan en is meer inzicht verkregen in de onderzoeksmogelijkheden van het afstudeeronderzoek. Daarnaast is tijdens het maken van de voorstudie een deelvraag ontstaan welke cruciaal is voor het afbakenen van de onderzoeksvraag:

Welke geïndustrialiseerde (module- of elementen concept) bouwmethode in combinatie met gemodificeerd of gezaagd hout is het best geschikt voor de utilitaire houtbouw met betrekking tot de bouw- en exploitatiefase en de levensduur?

Deze vraag diende voorafgaand aan het afstudeeronderzoek beantwoord te worden. Dit is gedaan met de kennis welke is opgedaan gedurende de voorstudie.

Het antwoord van de afstudeerders op de vraag is verwoord als een visie gebaseerd op feitelijke informatie (dit is verwerkt in tabel 3, zie volgende pagina):

Gezaagd hout is toepasbaar en financieel aantrekkelijk bij kleine overspanningen en kleine bouwwerken. Het kan bijvoorbeeld goed worden toegepast bij woningbouw. Dit kan unieke architectuur beslaan of als modules worden toegepast voor kleine woonbouwwerken.

Voor de utiliteitsbouw is ontwerpen met behulp van modules minder praktisch. De grootte van de modules is namelijk afhankelijk van het transport. Hierdoor kunnen geen grote overspanningen worden toegepast, wat ten koste van de vrij-indeelbaarheid kan gaan. Daarnaast is een utiliteitsgebouw lastig te beperkten tot een moduleconcept door de projectspecificatie. Bij utiliteitsbouw zijn losse elementen met grotere overspanningen uitgevoerd in gemodificeerd hout beter toepasbaar, ook ten behoeve van hogere bouwwerken. Het toepassen van elementen zal ook een gunstige invloed hebben op het aantal transportbewegingen.

Verder is het financieel en met het oog op de milieu-impact aantrekkelijk om voornamelijk, waar mogelijk, te ontwerpen in holle houtbouw elementen. Deze holle constructieve elementen kunnen bestaan uit gezaagd en gemodificeerd hout.

De genomen besluiten voor de afbakening van het onderzoek aan de hand van de, gedurende het vooronderzoek, opgedane kennis zijn:

Het afstudeeronderzoek zal zich richten op een geïndustrialiseerd houten elementenconcept, met een maximale vloerhoogte van 13 meter t.o.v. maaiveld, voor de utiliteitsbouw waarbij functie-flexibiliteit centraal staat.

Dit besluit is gebaseerd op onderstaande tabel 3.

Gemodificeerde houtbouw	**Aspecten**	**Houtskeletbouw**
Meer houtgebruik - Meer CO_2 opslag; - Zwaarder materieel, > stikstof; - Hogere materiaalkosten; - Positieve invloed op MPG (afhankelijk van TNO).	Houtvolume	Minder houtgebruik - Minder CO_2; - Lichter materieel, < stikstof.
Hoogbouw. Middelhoge bouwwerken. Grootschalig seriematig bouwen. Grote overspanningen mogelijk. Woning- en utiliteitsbouw.	Toepassing	Laagbouw. Kleinschalige bouwwerken. Complexe ontwerpen. Optoppingen/aanbouwen.
Lichte constructie, 40% t.o.v. steenachtige bouwwerken. Lichte fundering. Gemiddeld hijsmaterieel.	Gewicht	Zeer lichte constructie, 25-30% t.o.v. steenachtige bouwwerken. Lichte fundering. Licht hijsmaterieel.
Relatief nieuw/onbekend in Nederland. Geen fabrieken in Nederland. Duitsland en Scandinavië voorlopers.	Ervaring	Relatief bekende bouwmethode. Vertrouwd bij aannemers.
Goed te prefabriceren. Gemaakt uit gelamineerde latten tot massieve platen en vervolgens verwerkt d.m.v. CNC.	Fabricage	Goed te prefabriceren. Gemaakt uit losse balken.
Snelste methode. Toe te passen als elementen en modules.	Bouwtijd	Snelle methode. Toe te passen als elementen en modules.
Aanpassingen tijdens de bouw zijn lastig. Meubelbevestiging eenvoudig door homogene achter constructie. Geen binnen afwerking noodzakelijk	Bouwplaats	Flexibele verwerking, aanpassing tijdens de bouw mogelijk Wandbevestigingen ter plaatse van stijlen Binnen afwerking is noodzakelijk
Minder gevoelig voor temperatuurwisselingen door warmteaccumulatie > thermisch comfort. Constructieve en thermische laag gescheiden. Minder isolatie nodig, alle isolatie is mogelijk.	Thermisch	Gevoelig voor temperatuurwisselingen < thermisch comfort. Constructieve en thermische laag gecombineerd. Minerale isolatie heeft de voorkeur.
Goede ruimteakoestiek, maatregelen t.b.v. contactgeluid nodig.	Akoestiek	Goede ruimteakoestiek, maatregelen t.b.v. contactgeluid nodig.
Niet dampopen bouw. Redelijke vochtregeling.	Vocht	Dampopen bouw. Goede vochtregeling.
Veilig en voorspelbaar brandgedrag. Overdimensioneren of beschermen.	Brand	Dient beschermt te worden.
Demontabel. Niet composteerbaar door lijm. Downcycling mogelijk, spaanderplaten.	Circulariteit	Demontabel. Composteerbaar. Downcycling mogelijk, spaanderplaten.
Materiaal duurder dan arbeid. In de meeste aspecten concurrerend met traditionele bouw.	Kosten	Arbeid duurder dan materiaal. In de meeste aspecten concurrerend met traditionele bouw.

Tabel 3 – Aspecten gemodificeerd hout en houtskeletbouw, informatie is overgenomen van verschillende bronnen (Gillis, 2019; Redactie Het Houtblad, 2020; Bruggink, 2020; Bouwmeester, z.d.; TNO, 2021).

1.3 Probleemstelling

Utiliteitsbouw wordt hedendaags voornamelijk uitgevoerd in beton en staal. In de afgelopen tijd speelt de milieu-impact (stikstof en CO_2) een steeds belangrijkere rol door het klimaatakkoord in de Europese Unie. Door het gebrek aan kennis en ervaring binnen onder andere het construeren met hout, loopt Nederland achter op het gebied van houtbouw ten opzichte van landen met een grote houtproductie bijvoorbeeld: Duitsland, Oostenrijk en Scandinavische landen. Daarnaast ligt de traditionele manier van ontwerpen en bouwen in Nederland onder de loep. Dit komt door het klimaatakkoord, de woningnood en door leegstaande panden. Tevens is de markt bezig met het industrialiseren en prefabriceren van de bouwsector door het gebrek aan uitvoerend personeel en ten behoeve van snel en betaalbaar bouwen. Door deze ontwikkelingen in de bouwsector wordt een ontwerp- en bouwmethode gezocht waarbij de uitvoering, het gebruik en de fase na einde levensduur in relatie met toekomstbestendigheid en duurzaamheid centraal staat.

1.4 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is het ontwerpen van een houtbouw elementenconcept waarbij functievrijheid centraal staat voor bouwwerken tot een vloerhoogte van 13 meter. Dit doel wordt bereikt door een constructief en installatietechnisch concept op te stellen binnen een tijdsbestek van circa 16 weken. Binnen dit ontwerp wordt voornamelijk gekeken naar de constructieve eigenschappen van het elementenconcept. Het doel wordt meetbaar door zowel constructieve en bouwbesluit-technische eisen. Het doel is opgesteld door de hierboven in hoofdstuk 1.1: *Aanleiding* genoemde probleemstelling en aandachtspunten voor de bouw in Nederland. Daarnaast is het doel realistisch omdat er voldoende kennis is over houtbouw om dit concept te realiseren.

1.5 Hoofdvraag en deelvragen

Aan de hand van bovenstaande hoofdstukken is de hoofdvraag geformuleerd:

> *Welke realistische mogelijkheden met betrekking tot de hoofddraagconstructie voor bouwwerken uitgevoerd in hout zijn toepasbaar voor een utilitair functie-flexibel geïndustrialiseerd elementenconcept?*

Vanuit het formuleren van de hoofdvraag zijn, naast Fase 1: Voorstudie, twee fases van het onderzoek opgesteld: Fase 2: Veldonderzoek en Fase 3: Ontwerpen concept met deelvragen:

2.1 Welke conclusie kan getrokken worden met betrekking tot het besluit om een functie-flexibele ontwerpmethodiek en een elementenconcept bouwmethode toe te passen in relatie met de resultaten van het veldonderzoek?

2.2 Welke conclusie kan getrokken worden met betrekking tot de aanname van de toegepaste gebruiksfuncties in relatie met de resultaten van het veldonderzoek?

3.1 Aan welke eisen dient een utilitair bouwwerk te voldoen bij een functie-flexibele ontwerpmethodiek?

3.2 Welke stramienmaten dienen toegepast te worden om aan de functie-flexibiliteit voor utilitaire bouw te voldoen?

3.3 Welk installatieconcept dient toegepast te worden om aan de functie-flexibiliteit voor utilitaire bouw te voldoen?

3.4 Welke constructieve overzichtsvarianten inclusief materialisatie en dimensionering zijn realistisch voor een utilitair functie-flexibel geïndustrialiseerd elementenconcept?

1.6 Onderzoek grenzen

Tijdsbestek

Het onderzoek is gedurende de periode 1 februari 2021 tot en met 25 mei 2021 uitgevoerd. Hierbij is fulltime (40 uur per week) aan het onderzoek gewerkt.

Afbakening

Dit onderzoek kan als breed worden omschreven. Hierbij is een duidelijk afbakening noodzakelijk. Dit onderzoek beperkt zich tot de constructieve en deels bouwtechnische uitwerking van het elementenconcept. Hieronder wordt verder toegelicht wat de grenzen van het onderzoek zijn:

- Elementenconcept:
  - Het elementen concept beperkt zich tot een maximale vloerhoogte van 13 meter t.o.v. maaiveld. In verband met brandeisen, zie hieronder. Daarnaast wordt niet verwacht dat een functie-flexibel (met bijeenkomstbelasting) concept gewenst is voor hogere bouwwerken.
  - Het concept wordt niet getoetst op brand. De aanname is dat de constructie 90 min. brandwerend wordt bekleed.
  - Binnen het onderzoek vallen onderstaande onderdelen:
    - Bouwbesluit: Hoofdstuk 2: 2.1 algemene sterkte bouwconstructie
      - Niet hierboven benoemde onderdelen van het bouwbesluit worden niet meegenomen in het onderzoek.
  - De brochure voor het elementenconcept beperkt zich tot:
    - Welke functies toepasbaar zijn, dimensies concept, ontwerpmogelijkheden en de randvoorwaardes van het concept.
- Functie-flexibel ontwerpen:
  - Binnen de functieflexibiliteit worden onderstaande gebruiksfuncties toegepast: woonfunctie, bijeenkomstfunctie, gezondheidszorgfunctie, kantoorfunctie, logiesfunctie, onderwijsfunctie, sportfunctie en winkelfunctie.
  - De gebruiksfuncties die geen deel uitmaken van dit onderzoek zijn: celfunctie, industriefunctie, overige gebruiksfunctie en bouwwerk geen gebouw zijnde.
  - In het deelonderzoek: *Toekomstbestendig ontwerp- en bouwmethodieken* worden de gebruiksfuncties ter discussie gesteld.
- Constructieve aspecten:
  - De varianten worden getoetst op sterkte en stijfheid.
  - Bij 'realistische' varianten worden de verbindingen tussen ligger-vloer, kolom-kolom en ligger-kolom constructief beschouwd.
  - Bij de 'realistische' varianten worden horizontale sparingsmogelijkheden beschouwd.
  - De stabiliteitsmogelijkheden worden beschreven in de rapportage in hoofdstuk 4.5 *Stabiliteit* en vervolgens in de brochure. Dit wordt verder niet constructief getoetst.
  - De fundering wordt niet beschouwd in dit onderzoek. In de brochure wordt enkel vermeld hoeveel belasting op de onderbouw wordt afgedragen per bouwlaageenheid. Het uitgangspunt is dat het concept op een stabiele ondergrond gefundeerd kan worden. Hiermee wordt ook de begane grondvloer bedoeld.
  - De aannames die worden gedaan voor de constructieve toetsing dienen tijdens de toetsing toegelicht te worden. Bijvoorbeeld: belastingen en beperkingen van de constructie.
- Installatietechnische aspecten:
  - Het onderzoek beperkt zich tot een conceptgedachte waarbij de hoogte en positie beschikbaar voor installaties worden bepaald.

2.0 Veldonderzoek Toekomstbestendige ontwerp- en bouwmethodieken

Door de transformatie die de bouwsector moet ondergaan als gevolg van het klimaatakkoord zal gekeken moeten worden naar de ontwerp- en bouwmethodieken. De methodieken die naar voren komen binnen de vakbladen in de sector en door pioniers in circulair bouwen zijn functie-flexibel bouwen, remontabel bouwen, moduleconcepten en elementenconcepten. Echter, de betekenissen worden door diverse partijen binnen de sector op verschillende manieren opgevat en zijn er onduidelijkheden over de toepasbaarheid van deze methodieken.

Het doel van dit hoofdstuk is om inzicht te krijgen in welke manier van ontwerpen en bouwen het meest toekomstbestendig is om de bouwsector te verduurzamen. Ook heeft het als doel om genomen besluiten met betrekking tot het afstudeeronderzoek: een elementenconcept uitgevoerd in hout uitwerken waarbij functie-flexibiliteit centraal staat, te evalueren en ter discussie te stellen. Er is een hypothese opgesteld met betrekking tot de voor functie-flexibele bouwwerken, toepasbare gebruiksfuncties opgesteld: Woon-, bijeenkomst-, gezondheidszorg-, kantoor-, logies-, onderwijs-, sport- en winkel- (exclusief opslag) functie.

Binnen dit hoofdstuk staan meerdere deelvragen centraal namelijk:

2.1 Welke conclusie kan getrokken worden met betrekking tot het besluit om een functie-flexibele ontwerpmethodiek en een elementenconcept bouwmethode toe te passen in relatie met de resultaten van het veldonderzoek?

2.2 Welke conclusie kan getrokken worden met betrekking tot de aanname van de toegepaste gebruiksfuncties in relatie met de resultaten van het veldonderzoek?

Aan de hand van de aanleiding, het doel en de deelvragen is een veldonderzoek uitgevoerd door middel van een onpersoonlijke enquête in combinatie met interviews. Hierdoor kunnen de deelvragen middels de opgedane informatie beantwoord worden.

2.1 Enquête

De eerste stap binnen het veldonderzoek is het uitvoeren van een ‘onpersoonlijke’ enquête bestaande uit gesloten vragen. Deze manier van enquêteren kan leiden tot een grote steekproefgrootte wat het resultaat van het veldonderzoek positief kan beïnvloeden.

In totaal hebben 74 respondenten de enquête ingevuld. De steekproefgrootte van 377 respondenten is niet behaald. Echter, de onderzoeksresultaten zijn wel als bruikbaar beschouwd voor het beantwoorden van de deelvragen die horen bij het veldonderzoek.

De enquête is terug te lezen in bijlage 3: *Veldonderzoek* hoofdstuk 3.0: *Enquête*.

2.2 Interviews

Naar aanleiding van de resultaten zijn twee vervolginterviews opgesteld om dieper op de vraagstukken in te kunnen gaan. Deze interviews zijn uitgevoerd met:

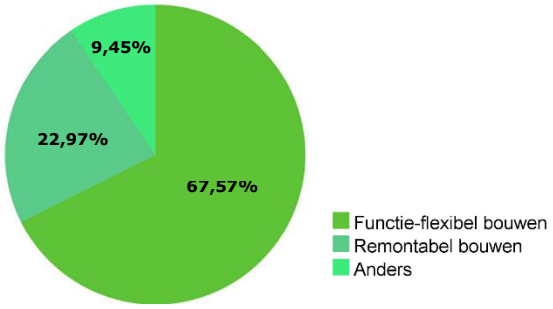
- Oprichter/ontwikkelaar FLETTS (ontwikkelaar moduleconcept)
- Directeur/architect NarrativA (architectenbureau houtbouw)

De resultaten van deze interviews zijn meegenomen in de beantwoording van de deelvragen. De interviews zijn terug te lezen in bijlage 3: *Veldonderzoek,* hoofdstuk 4.0: *Interviews*.

2.3 Resultaten veldonderzoek

2.3.1 Functie-flexibel of demontabel ontwerpen

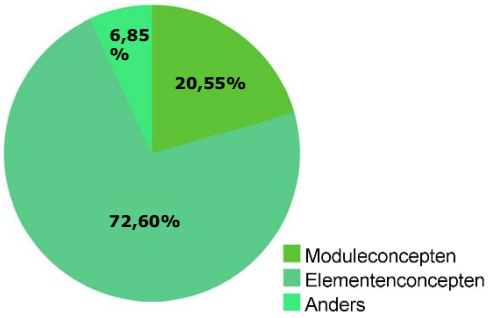
Uit de resultaten is gebleken dat mensen actief in de bouw over het algemeen meer ervaring opgedaan hebben met projecten waarbij functie-flexibel bouwen is toegepast dan met projecten waarbij remontabel bouwen is toegepast. De ervaring met functie-flexibel bouwen is gemiddeld gezien beter ondervonden dan de ervaring met remontabel bouwen. De respondenten verwachten dat functiewisselingen vaker op gaan treden dan remontages, wat instemt met de hypothese. Het grootste aantal respondenten verwacht per 25 jaar een functiewisseling. Voorgaande resultaten leiden tot het bevestigen van de hypothese. Dit is extra benadrukt bij het resultaat van vraag 10.0 waarbij 67,57% van de respondenten functie-flexibel bouwen het meest toekomstbestendig vindt binnen de utiliteitsbouw, zie grafiek 1.



Grafiek 1 – Functie-flexibel ontwerpen of remontabel ontwerpen, (1)

2.3.2 Elementen of modulaire bouwmethodiek

Uit de enquête is gebleken dat de respondenten meer ervaring hebben opgedaan met elementenconcepten dan met moduleconcepten. Daarbij is ook gebleken dat de ervaring met elementenconcepten meer positief wordt beschouwd dan bij moduleconcepten. Uit de resultaten over de vraag naar de architectonische beperkingen bij de twee bouwmethodieken is opgevallen dat men bij elementenconcepten minder architectonische beperkingen verwacht dan bij moduleconcepten. Uit het interview met FLETTS is gebleken dat architecten zelf verschillende meningen hebben over gestandaardiseerde bouwmethodieken. Voorgaande resultaten leiden tot het bevestigen van de hypothese. Dit is extra benadrukt bij het resultaat van vraag 18.0 waarbij 72,6% van de respondenten het bouwen met een elementenconcept het meest toekomstbestendig vindt binnen de utiliteitsbouw, zie grafiek 2.



Grafiek 2 – Moduleconcepten of elementenconcepten, (1)

2.3.3 Gebruiksfuncties voor functie-flexibel elementenconcept

Uit de tabel 4 valt te concluderen dat de vooraf opgestelde hypothese grotendeel overeenkomt met de visie van de respondenten. Echter, er is gebleken dat men geen voorstander is van de sportfunctie binnen het functie-flexibele concept. Ook wordt verwacht dat fysieke activiteiten negatieve effecten hebben op trillingen wat een actueel aandachtspunt is binnen de houtbouw. Met deze redenen is ervoor gekozen om de sportfunctie niet toe te passen binnen het functie-flexibele elementenconcept. De gebruiksfuncties die 'wel toepasbaar' zijn binnen tabel 4, worden toegepast voor het concept.

Overzicht toepasbaarheid functie-flexibel elementenconcept				
Gebruiksfunctie	Functie-flexibel (zie grafiek 9, H3.6 vraag 9.0)	Elementenconcept (zie grafiek 16, H3.6 vraag 16.0)	Hypo-these	Toepasbaar Wel/niet
Woon	**69,9%**	**62,2%**	**Wel**	**Wel**
Bijeenkomst	**83,6%**	**70,3%**	**Wel**	**Wel**
Cel	23,3%	59,5%	Niet	Niet
Gezondheidszorg	**57,5%**	**70,3%**	**Wel**	**Wel**
Industrie	47,9%	**71,6%**	Niet	Niet
Kantoor	**97,3%**	**74,3%**	**Wel**	**Wel**
Logies	**64,4%**	**64,9%**	**Wel**	**Wel**
Onderwijs	**67,1%**	**71,6%**	**Wel**	**Wel**
Sport	31,5%	**67,6%**	**Wel**	Niet
Winkel	**62,2%**	**73,0%**	**Wel**	**Wel**
	Toepasbaar → >50%	Toepasbaar → >62%		

Tabel 4 –Overzicht toepasbaarheid functie-flexibel elementenconcept, (1)

3.0 Functie-flexibel ontwerpen

Functie-flexibel klinkt als een innovatieve manier van ontwerpen. Maar de concrete en technische betekenis hiervan is vrij en breed te interpreteren.

Het doel van dit hoofdstuk is het concreet maken van het begrip 'functie-flexibel' aan de hand van eisen en voorwaarden welke van toepassing zijn voor deze manier van ontwerpen en bouwen. Hierdoor vormt dit hoofdstuk de eerste stap binnen fase 3, het ontwerpproces van het functie-flexibele elementenconcept.

Binnen dit hoofdstuk staan meerdere deelvragen centraal. Iedere deelvraag wordt bij het betreffende deelhoofdstuk vermeld en beantwoord. Aan de hand van de opgedane informatie zal de vraag beantwoord worden.

3.1 Eisen aan functie-flexibel ontwerpen

Voor het functie-flexibele elementenconcept worden eerst eisen en voorwaarden opgesteld wat als aanzet voor het ontwerp fungeert. Dit doel is in onderstaande deelvraag geformuleerd:

Deelvraag 3.1*: Aan welke eisen dient een utilitair bouwwerk te voldoen bij een functie-flexibele ontwerpmethodiek?*

Het antwoord van deze deelvraag kan niet in één alinea omvat worden. Deze vraag wordt beantwoord middels een eisentabel, algemene bepalingen en de aangenomen belastingen.

Eisentabel functie-flexibel ontwerpen

Aan de hand van het veldonderzoek (zie hoofdstuk 2.0: *Veldonderzoek Toekomstbestendige ontwerp- en bouwmethodieken*), bouwbesluiteisen en normen is onderstaande tabel met uiteenlopende eisen opgesteld. Dit betreft de minimale eisen horend bij een referentieperiode van 100 jaar. De verdere toelichting over de toepassing van onderstaande eisen staat vermeld in bijlage 4: *Eisen functie-flexibel ontwerpen*.

Gebruiksfunctie	Toepasbaar voor concept	Vrije hoogte		Luchtverversing		Belastingen				ψ-factoren			Brandwerend in hoogte vloer bij bezwijken constructie		
						Vloer	m² last	puntlast		ψ_0	ψ_1	ψ_2	60 min.	90 min.	120 min.
Woon	Ja	2,6	m	-	dm³/s p.p.	1,83	kN/m²	3,14	kN	0,4	0,5	0,3	0-7m	7-13m	> 13m
Bijeenkomst	Ja	2,6	m	4-6,5	dm³/s p.p.	5,23	kN/m²	7,32	kN	0,4	0,7	0,6	0-5m	5-13m	> 13m
Gezondheidszorg	Ja	2,6	m	6,5-12	dm³/s p.p.	5,23	kN/m²	7,32	kN	0,4	0,7	0,6	0-5m	5-13m	> 13m
Kantoor	Ja	2,6	m	6,5	dm³/s p.p.	2,60	kN/m²	3,12	kN	0,5	0,5	0,3	0-5m	5-13m	> 13m
Logies	Ja	2,6	m	12	dm³/s p.p.	1,83	kN/m²	3,14	kN	0,4	0,7	0,6	0-5m	5-13m	> 13m
Onderwijs	Ja	2,6	m	8,5	dm³/s p.p.	4,18-5,23	kN/m²	7,32	kN	0,4	0,7	0,6	0-5m	5-13m	> 13m
Sport	Nee	2,6	m	6,5	dm³/s p.p.	5,23	kN/m²	7,32	kN	0,4	0,7	0,6	0-5m	5-13m	> 13m
Winkel	Ja	2,6	m	4	dm³/s p.p.	4,18	kN/m²	7,32	kN	0,4	0,7	0,6	0-5m	5-13m	> 13m
Cel	Nee	2,5	m	12	dm³/s p.p.	1,83	kN/m²	3,14	kN	0,4	0,7	0,6	0-5m	5-13m	> 13m
Industrie	Nee	2,6	m	6,5	dm³/s p.p.	> 5,00	kN/m²	>7,00	kN	1,0	0,9	0,8	0-5m	5-13m	> 13m
Overig	Nee	-	m	-	dm³/s p.p.	-	kN/m²	-	kN	-	-	-	-	-	-
Bouwwerk geen gebouw zijnde	Nee	-	m	-	dm³/s p.p.	-	kN/m²	-	kN	-	-	-	-	-	-

Tabel 5 – Eisentabel functie-flexibel bouwen, informatie is overgenomen uit verschillende bronnen (Blok, 2018, p. 61; Bouwbesluit, z.d.-a; Bouwbesluit, z.d.-b; Bouwbesluit, z.d.-c; Bouwbesluit, z.d.-d; Bouwbesluit, z.d.-e)

Algemene bepalingen

De algemene bepalingen staat vermeld in bijlage 4: *Eisen functie-flexibel ontwerpen*.
De onderzochte houten materialen welke zijn toegepast in de variantenstudie zijn:

Gezaagd: C24 Glulam: GL28c LVL: 48P

Aangenomen belastingen

De aangenomen belastingen staat vermeld in bijlage 4: *Eisen functie-flexibel ontwerpen*.
De belangrijkste aangenomen belasting is die van de verdiepingsvloer welke voor een bijeenkomstfunctie in combinatie met lichte scheidingswanden en een referentieperiode van 100 jaar resulteert in een vloerbelasting van 6,03 kN/m². Daarnaast wordt een gevelbelasting van 1,00 kN/m² aangehouden ter plaatse van elke stramienrand.

3.2 Stramienplan

Nu de uitgangspunten met betrekking tot het concept bepaald en onderbouwd zijn, kan worden begonnen met het ontwerpproces van het functie-flexibele elementenconcept. De vervolgstap richting dit concept is het bepalen van stramienmaten.

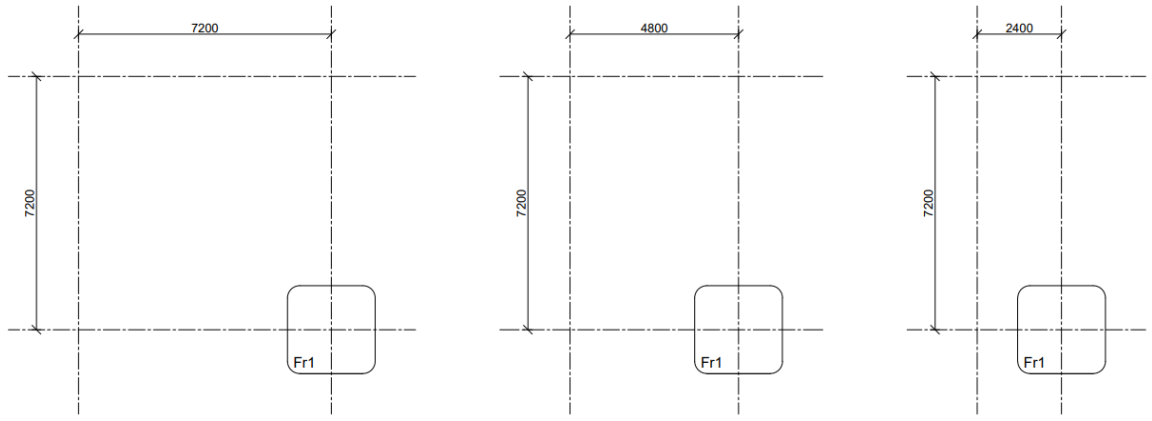
Deze activiteit is ontstaan aan de hand van deelvraag 3.2: *Welke stramienmaten dienen toegepast te worden om aan de functie-flexibiliteit voor utilitaire bouw te voldoen?*

Het antwoord op deze vraag en het beoogde resultaat van dit deelonderzoek is een stramienplan. Dit plan is een balans tussen constructieve haalbaarheid, materiaalgebruik en functie-flexibiliteit, zoals beschreven in hoofdstuk 2.0 *Toekomstbestendig ontwerp- en bouwmethodieken*.

Ten eerste is aan de hand van de literatuur, informatie verkregen over gebruikelijke stramienmaten voor specifieke functies.

In veel gevallen is de stramienmaat, ongeacht de gebruiksfunctie, een meervoud van 0,30, 0,60, 1,20, 1,80 of 2,40 m. Dit heeft met standaard afmetingen te maken van platen, vloeren en gevelelementen. Volgens Jellema deel 9 *(Kamerling & Kamerling, 2004, p. 39 & 190)* wordt voor kantoren veelal een stramienplan van 5,40 x 5,40 m (+ 1,8 m gangzone) aangehouden waarbij in de breedte 2 à 3 werkplekken gerealiseerd kunnen worden. Bij logiesfuncties wordt voornamelijk een stramienbreedte van 3,6 of 7,2 m toegepast waarbij de stramiendiepte variabel is.

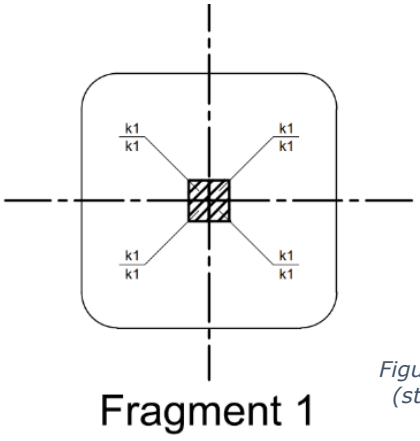
Naar aanleiding van de opgedane informatie uit functie-flexibele onderzoeken, overige literatuur en referentieprojecten zijn onderstaande stramienmaten ontstaan:



7200 x 7200 mm | 4800 x 7200 mm | 2400 x 7200 mm

Figuur 2 – Stramienplan (visueel), (1).

Het voornaamste stramienmaat binnen het concept dient 7,2 x 7,2 m te zijn. De stramienmaat van 4,8 m breed is een pasmaat en de maat van 2,4 m breed zal voornamelijk als gangmodule worden toegepast. De verwachting is dat de hoogte van de constructieve elementen van de gangmodule kleiner zal zijn, waardoor deze voornamelijk toegepast kan worden voor het horizontaal transport van installaties.



Figuur 3 – Fragment 1 (stramienplan), (1).

3.3 Installatieconcept

Het constructief uitwerken van het elementenconcept staat in dit afstudeeronderzoek centraal. Echter, in dit hoofdstuk wordt een uitstap gemaakt naar de installatietechniek. Dit onderdeel dient als beschouwing om het elementenconcept integraal te onderzoeken. Een vervolgonderzoek zal uitwijzen of de aangenomen installatietechnische aspecten correct zijn.

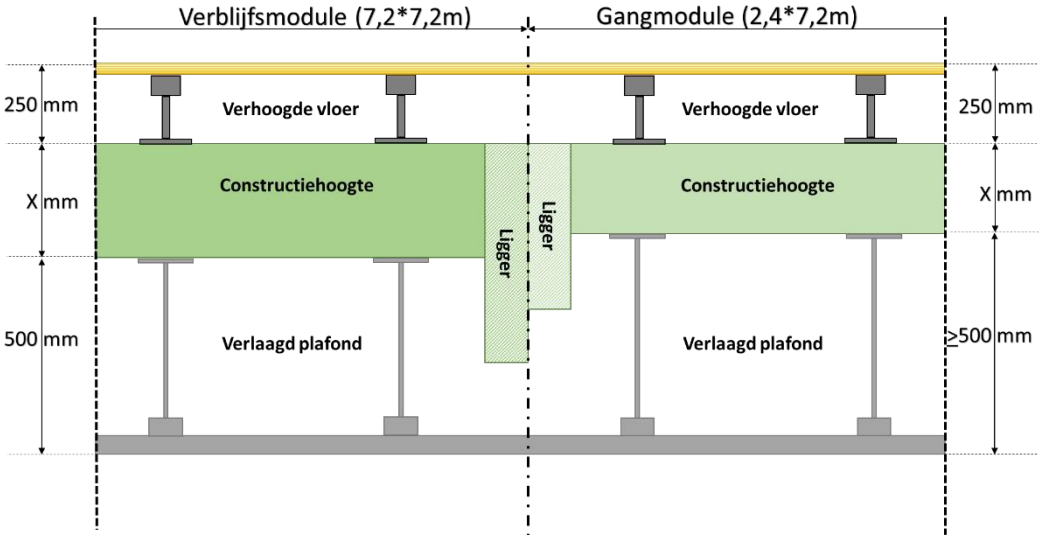
De integrale uitwerking van het elementenconcept heeft geresulteerd in de laatste deelvraag binnen hoofdstuk 3 *Functie-flexibel* ontwerpen, deelvraag 3.3: *Welk installatieconcept dient toegepast te worden om aan de functie-flexibiliteit voor Utilitaire bouw te voldoen?* Deze vraag wordt beantwoord aan de hand van installatietechnische uitgangspunten.

Met het oog op flexibel ontwerpen/gebruiken en de relatief korte levensduur van installaties door schade, veroudering en eventuele nieuwe eisen is het van belang dat de installatie los van de hoofddraagconstructie bereikbaar, vervangbaar en verplaatsbaar zijn.

Binnen de vergelijking van de installatieconcepten valt te concluderen dat het toepassen van één installatieconcept niet mogelijk is voor een functie-flexibel utilitair elementenconcept. Dit komt door de verschillende klimaatbeheersingsconcepten die niet voldoen aan elke soort functie van een ruimte. En omdat de omvang van het gebouw niet vaststaat.

Uit de opgedane kennis is gebleken dat een combinatie tussen een plafond- en vloerdistributiesystemen gewenst is. Dit betekent dat zowel boven als onder de constructieve vloer ruimte beschikbaar is voor installaties. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de vrije hoogte en de minimaal beschikbare installatieruimte.

In onderstaande figuur 4 staat visueel toegelicht welke installatiehoogte onder en boven de constructieve vloer is aangehouden. De minimale vrije hoogte voor een verblijfsruimte is 2,6 meter en van verkeersruimte 2,3 meter. Dit resulteert in de mogelijkheid om het horizontale hoofdtransport ten behoeve van voornamelijk luchtverversing in de gangmodule te positioneren. De lagere constructiehoogte en het extra verlaagde plafond biedt de ruimte voor deze transportvoorzieningen.



Figuur 4 - Installatieprincipe verblijfsmodule en gangmodule, (1).

In bijlage 6: *Installatieconcept* staat toegelicht hoe de installatiehoogtes boven en onder de vloer tot stand zijn gekomen.

4.0 Construeren

Om een functie-flexibel bouwwerk te realiseren in hout dient de hoofddraagconstructie berekend te worden. Om de hoofddraagconstructie te berekenen moet eerst een constructief ontwerp ontwikkeld worden. Dit gaat gepaard met constructieve varianten om een realistisch constructief ontwerp te realiseren. Het doel is om inzicht te krijgen in en het bepalen van constructieve houten materialisatie en dimensionering voor het functie-flexibele elementenconcept. Hierbij staat de volgende deelvraag centraal:

Deelvraag 3.4: *Welke constructieve overzichtsvarianten inclusief materialisatie en dimensionering zijn realistisch voor een utilitair functie-flexibel geïndustrialiseerd elementenconcept?*

Om antwoord op deze vraag te kunnen geven is het deelonderzoek: *Variantenstudie* opgesteld, zie bijlage 7*: Variantenstudie*. Binnen deze varianten studie is een stappenplan aangehouden om de deelvraag te kunnen beantwoorden, namelijk:

Stap 1 Opstellen constructieve varianten:

De eerste stap binnen de variantenstudie is het opstellen van constructieve varianten. Dit is gedaan om door middel van verschillende overspanningen en verschillende constructieve concepten te onderzoeken welke varianten het meest 'realistisch' zijn voor het functie-flexibele elementenconcept. Het begrip 'realistisch' wordt in het hoofdstuk 4.3: *Multicriteria-analyse* toegelicht. De constructieve varianten zijn opgesteld door middel van de stramienmaten uit bijlage 5: *Stramienplan*. Zie figuur 2 in hoofdstuk 3.2: *Stramienplan*. De opgestelde varianten zijn weergegeven in hoofdstuk 4.1: *Opgestelde constructieve varianten*, figuur 5.

Stap 2 Dimensioneren van de vloerconstructie in combinatie met de liggers:

1. Eerst worden de varianten constructief beschouwd. Dit wordt gedaan om mogelijke onrealistische varianten vroegtijdig uit te sluiten om de beschikbare tijd zo efficiënt mogelijk te benutten. Hierbij spelen het transport en de productie een centrale rol.
2. Ten tweede wordt gebruikte rekenprogrammatuur geverifieerd met handberekeningen. Dit is gedaan om grip te krijgen op de constructieve dimensionering en toetsing. Wanneer hier geen grote verschillen ontstaan kan het rekenprogramma toegepast worden voor de desbetreffende berekeningen.
3. Ten derde wordt eerst per verschillende manier van afdracht een stappenplan uitgeschreven om weer te geven hoe te werk is gegaan tot het realiseren van de constructieve dimensionering van de varianten.
4. Tot slot worden de varianten constructief getoetst. Deze constructieve toetsingen zijn terug te lezen in de bijlage 7: *Variantenstudie*.

Stap 3 Multicriteria-analyse:

Vervolgens worden de gedimensioneerde varianten door middel van een multicriteria-analyse op waarde geschat. De waarde wordt bepaald door criteria en objectieve scores. Hieruit volgt een selectie van de meest realistische varianten in relatie met de criteria.

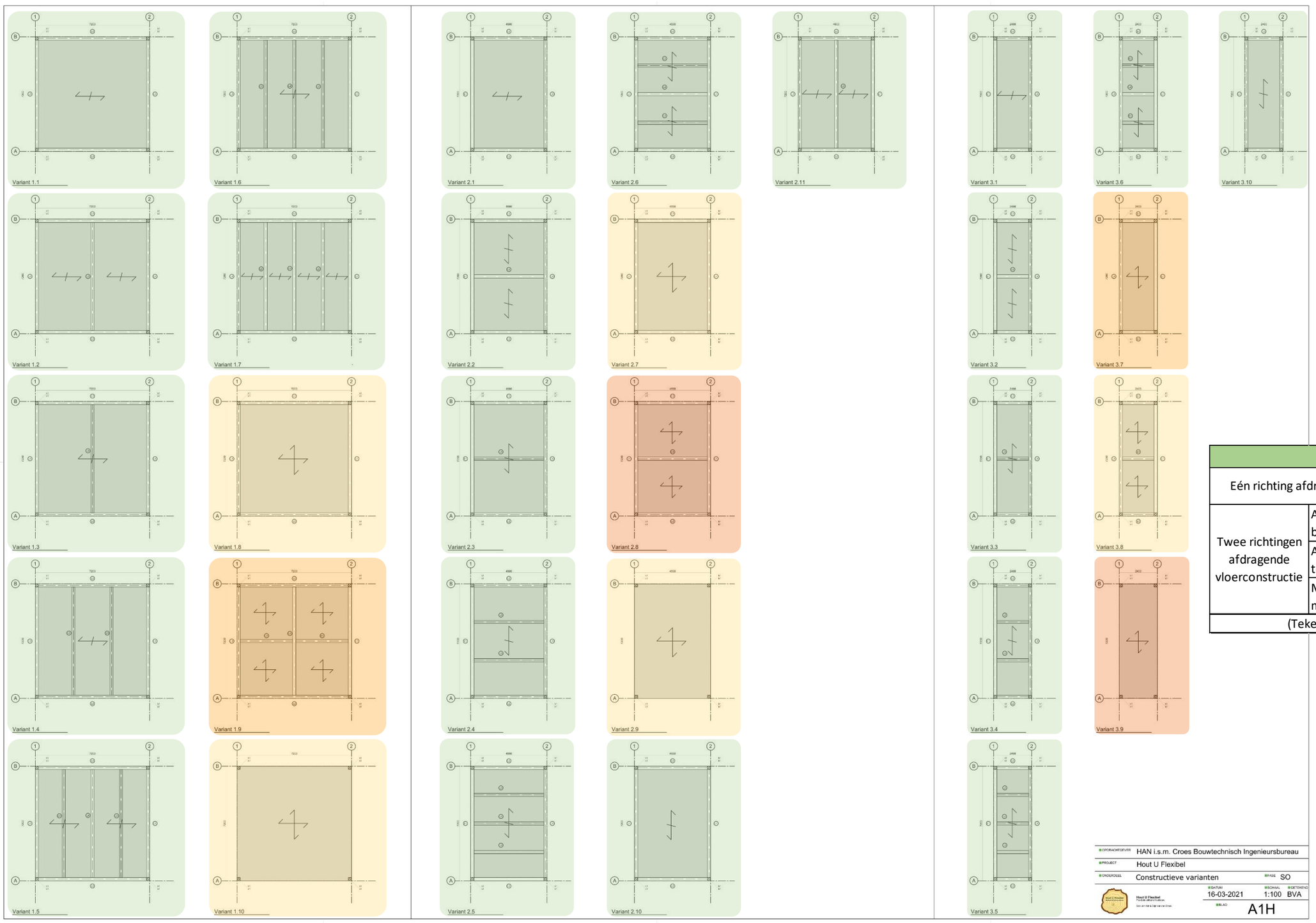
Stap 4 Dimensionering kolommen:

In stap 4 worden de kolommen beschouwd en constructief getoetst. De stramienmaten staan vast voor het functie-flexibele elementenconcept waardoor wordt verwacht dat de kolomafmetingen binnen één stramienmaat niet tot weinig in maat zullen verschillen.

Stap 5 Verbindings-, sparings- en stabiliteitsmogelijkheden:

Tot slot worden de verbindingen van de realistische varianten beschouwd. Dit wordt gedaan door middel van verbindingsmogelijkheden van leveranciers. Vervolgens wordt er gekeken naar horizontale sparingsmogelijkheden en mogelijke stabiliteitsprincipes.

4.1 Opgestelde constructieve varianten



Figuur 5 – Overzicht constructieve varianten, (1).

4.2 Constructieve toetsing

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe en met welke diepgang de constructieve varianten constructief zijn uitgewerkt. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de werkwijze en de resultaten van de varianten waarbij de vloeren in één richting en in twee richtingen afdragen.

Vloeren in 1 richting afdragend

Onderstaande tekst slaat op de constructieve varianten waarbij de vloeren in één richting afdragen, zie groen gearceerde varianten in figuur 5, op pagina 21.

Ten eerste zijn de betreffende varianten kwalitatief beschouwd. Hieruit is niet gebleken dat enkele varianten met het oog op de praktische haalbaarheid niet uitvoerbaar zijn. Het gevolg hiervan is dat elke groen gearceerde constructieve variant constructief uitgewerkt is. Deze constructieve uitwerking is volgens onderstaand stappenplan uitgevoerd:

- **Stap 1 Uitsplitsen variant**: per variant zijn de constructieve componenten bepaald en voorzien van mogelijke materiaaltoepassingen.
- **Stap 2 Toetsing vloerconstructies UGT en BGT**: de vloerconstructiemogelijkheden zijn constructief getoetst aan de hand van de belastingaannames. Dit betreft CLT-, Kerto Ripa, en houten balklaagvloeren. Voor de constructieve dimensionering zijn rekenprogramma's toegepast. De maatgevende reactiekrachten van de vloersteunpunten zijn toegepast als belasting op de betreffende liggers.
- **Stap 3 Toetsing liggerconstructies UGT en BGT**: de liggerconstructie-mogelijkheden zijn getoetst middels de belasting zoals hierboven vermeld. Dit betreft Glulam en LVL-liggers. De reactiekrachten van de liggers dienen als belasting op de kolommen en in sommige gevallen als puntlast op andere liggers in dezelfde variant.

Zoals in bovenstaand stappenplan is beschreven, zijn de constructieve componenten getoetst middels rekenprogrammatuur. Deze rekenprogrammatuur is voorafgaand aan de toetsing geverifieerd door middel van handberekeningen. Dit betreft de berekeningen van CLT-vloeren, Kerto Ripa vloeren en LVL-liggers. In bijlage 7: *Variantenstudie* staan de handberekeningen en de rest van de constructieve uitwerking weergegeven. In onderstaande opsomming wordt vermeld welke aspecten binnen de constructieve uitwerking inclusief handberekeningen zijn opgevallen:

- CLT-vloeren: hierbij is opgevallen dat kruislaagse lagen geen bijdrage leveren aan de sterkte en stijfheid van de platen. Verder is gebleken dat twee soorten traagheidsmomenten toegepast worden bij CLT-platen:
  - $I_{x,net}$: bepaald met behulp van de formule van Steiner en wordt gebruikt om het weerstandsmoment te bepalen voor de UGT-toetsing.
  - $I_{x,ef}$: bepaald middels Steiner maar gereduceerd met een Gamma (γ)-factor (als gevolg van afstuifvervorming) en wordt gebruikt bij de BGT-toetsing.
- Kerto Ripa vloeren: deze bestaan uit LVL-ribben en platen. Echter, deze componenten kunnen diverse stijfheden hebben waardoor een gecombineerde EI wordt berekend i.p.v. een gecombineerd traagheidsmoment. Hierbij wordt ook de (uitgebreide) formule van Steiner toegepast. Deze vloeren hebben een minimaal hoogte van 200 mm waardoor deze vloer bij kleine overspanningen lage U.C.'s hebben.
- LVL-liggers: doordat de vezels in de LVL-liggers parallel in één richting liggen, kan dit materiaal beschouwd worden als homogeen ten behoeve van het weerstands- en traagheidsmoment. Het dubbel uitvoeren van LVL-liggers dient als vervolgonderzoek.
- Houten balklagen: dit vloertype is enkel toepasbaar bij de varianten waarbij een bij kleine overspanning (tot 3600 mm) is toegepast als gevolg van standaard houtafmetingen en de grote belastingen.

Vloeren in 2 richtingen afdragend

Onderstaande tekst slaat op de constructieve variant waarbij de vloeren in twee richtingen afdragen, zie geel gearceerde varianten in figuur 5, op pagina 21.

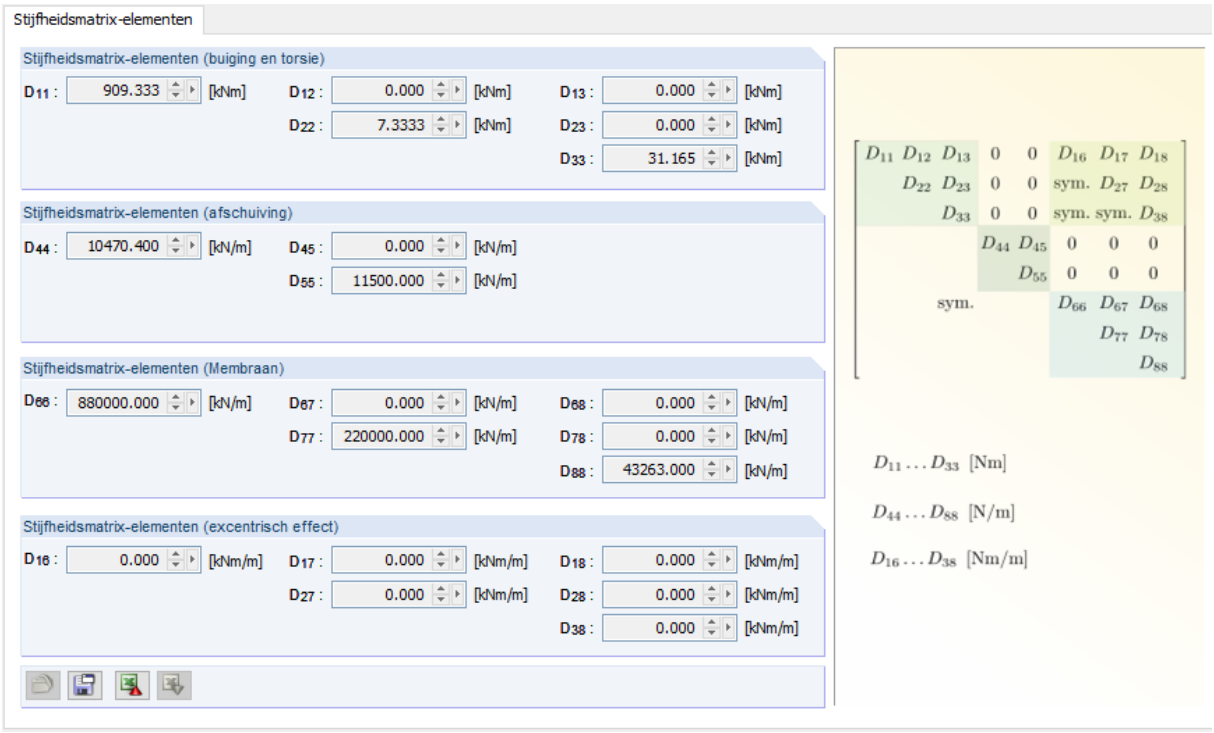
Ook deze constructieve varianten zijn eerst kwalitatief beschouwd. Hieruit is gebleken dat enkele varianten bij voorbaat af zijn gevallen doordat deze niet uitvoerbaar of rendabel zijn. Dit heeft te maken met maximale productie- en transportafmetingen, het gebrek aan momentvaste vloerkoppelingen, en de tekortkoming van afdraagcapaciteit in de kruislaagse richting. Dit heeft geleid tot het afvallen van V1.8, V1.10, V2.7, V2.9 en V3.8. De overige varianten met in twee richtingen afdragende vloeren (V1.9, V2.8, V3.7 en V3.9) zijn met behulp van RFEM verder constructief uitgewerkt volgens onderstaande stappenplan:

- **Stap 1 variant opstellen**: tijdens het modelleren van de constructieve modellen in RFEM is rekeningen gehouden met diverse aspecten uiteenlopend van krachtswerkingen in verbindingen tot het invullen van factoren en overige materiaaleigenschappen.
- **Stap 2 proefbelasting**: om de werking van het model te controleren, zijn de uitkomsten ten gevolge van een proefbelasting gecontroleerd op de volgende punten: opmerkelijkheden bij de vervormingen en de momentenlijnen, extreme normaalkrachten en het verloop van de dwarskrachtenlijn.
- **Stap 3 belastingen opstellen**: nadat het model is gecontroleerd aan de hand van de proefbelastingen, zijn de daadwerkelijke belastingen in het model toegepast. Deze belastingen zijn, zoals in hoofdstuk 3.1 *Eisen aan functie-flexibel ontwerpen* vermeld, verdeeld in het eigengewicht (situatie afhankelijk), de opgelegde (1,00 kN/m², vloer en 4,30 kN/m[1], gevel) en de variabele (6,03 kN/m²) belasting. Deze waarden zijn in bijlage 4: *Eisen aan functie-flexibel ontwerpen* toegelicht.
- **Stap 4 belastingcombinaties aanmaken**: voordat de resultaten geanalyseerd konden worden, diende de belastingcombinaties aangemaakt te worden. De belastingcombinaties zijn: UGT (alle belasting gevallen inclusief veiligheidsfactoren), BGT eind (alle belastinggevallen zonder veiligheidsfactoren) en BGT bijkomend (enkel variabele belasting zonder veiligheidsfactoren). Met vol- en half belasten velden is geen rekening gehouden.
- **Stap 5 resultaten uitvoeren en analyseren UGT en BGT**: nu het model klaar is voor gebruik, kunnen de resultaten uitgevoerd worden. Aan de hand van de resultaten kunnen de constructieve componenten getoetst worden. Zowel de liggers als de vloeren zijn getoetst in de UGT (dwarskracht en moment) en in de BGT (eind- en bijkomende vervorming).

De toetsing van de CLT-vloeren is met behulp van RFEM berekend, dit betreft de dwarskrachten, momenten en zakkingen in de vloeren en liggers. Deze rekenprogrammatuur diende met de hand gecontroleerd te worden. Dit is gedaan door de stijfheidsmatrix van de orthotrope CLT-vloeren. Een stijfheidsmatrix is een tabel waarin met diverse D-waardes aangegeven wordt welke stijfheden aan het materiaal en profiel toegekend zijn. In figuur 6 op pagina 24 staat een stijfheidsmatrix van een 3-laags (40-20-40) CLT-vloer dik: 100 mm. In onderstaande tabel 6 staat weergegeven welke stijfheden de D-waardes representeren.

Kleur	Stijfheid
D_{11}, enz.	Buig- en torsiestijfheid
D_{16}, enz.	Schuifstijfheid
D_{44}, enz.	Excentriciteitsstijfheid
D_{66}, enz.	Membraamstijfheid

Tabel 6 – stijfheidstypen, , overgenomen uit pdf-document figuur 2.20 (p.15) van Dlubal Software GmbH, 2013.



Figuur 6 – Rekenvoorbeeld RFEM CLT-vloer V3.7, overgenomen uit software RFEM, Dlubal Software GmbH, 2020.

Aan de hand van de verkregen stijfheidsmatrix van CLTdesigner en RFEM konden de D-waardes gecontroleerd worden met de hand berekende waardes. De formules van deze waardes zijn verkregen vanuit The CLT handbook *(Gustafsson, 2019, p.64-67)*. De waardes welke belangrijk en gecontroleerd zijn, zijn D_{11} (buigstijfheid sterke as), D_{22} (buigstijfheid zwakke as), D_{33}, D_{88}, D_{66} en D_{77}.

Bij de vergelijking tussen de stijfheidsmatrix van CLTdesigner en RFEM ontstond een verschil tussen de D_{11} en D_{22}. De reden hiervan is het verschil in elasticiteitsmodulus en de Poisson-factor. Het programma CLTdesigner hield hiervoor een waarde van nul aan waarbij RFEM standaard 0,2 was ingevuld. In overige literatuur staat ook vermeld dat een Poisson-factor van nul aangehouden dient te worden.

Een ander verschil ontstond bij de D_{33} en D_{88}. Hierbij is gebleken dat de CLTdesigner een k_{33} en k_{88} invulde in de formule (afhankelijk van de CLT opbouw en lamel eigenschappen). Deze waardes stonden in RFEM standaard op 1. De waardes zijn met behulp van een spreadsheet bepaald en ingevuld in RFEM.

De verschillen hebben ertoe geleid dat de RFEM invoer nauwkeurig ingevoerd en gecontroleerd diende te worden zoals de elasticiteitsmodulus, Poisson-factor, de k_{33} en k_{88}. Naar aanleiding van deze correcte invoeren zijn de extreme verschillen van de D-waardes tussen CLTdesigner, RFEM en de handberekeningen verholpen en kon het RFEM model in gebruik genomen worden.

Nadat de varianten constructief uitgewerkt zijn, zijn deze nogmaals kwalitatief beschouwd. Hierbij diende de resultaten als richtlijn om de varianten te beoordelen of deze realistisch en rendabel zijn. Uit deze resultaten valt te concluderen dat V1.9 en V3.7 niet geschikt zijn voor in twee richtingen afdragende CLT-vloeren. De argumentatie is terug te vinden in bijlage 7: *Variantenstudie*, hoofdstuk 5.0: *Varianten in twee richtingen afdragend*.

Naar aanleiding van de resultaten van dit deelonderzoek kunnen onderstaande conclusies getrokken worden met betrekking tot in twee richtingen afdragende vloeren in relatie met de opgestelde constructieve varianten.

- **Lengte/breedte verhouding**: CLT-platen reageren het meest stijf wanneer de hoofd-afdraagrichting van de plaat in de korte overspanningsrichting ligt. Bij een grotere verhouding tussen de lengte en de breedte van de vloerplaat zal de vloer zich steeds meer als een vloer op twee steunpunten gedragen, waarbij de kruislaagse richting weinig tot geen belasting opneemt en afdraagt. De optimale lengte/ breedte verhouding van CLT-vloeren in twee richtingen afdragend zal middels een vervolgonderzoek uitgewezen dienen te worden.
- **Stijfheidsverhouding vezelrichting**: een klein stijfheidsverschil tussen D_{11} en D_{22} is gewenst wanneer geacht wordt dat de CLT-vloer in twee richtingen dient af te dragen. Stijfheidsverschillen tussen D_{11} en D_{22} worden veroorzaakt door de plaatdikte en de laagopbouw. In tabel 7 hieronder staat een voorbeeld van twee 100 mm dikke CLT-platen weergegeven waaruit blijkt dat de laagopbouw van grote invloed is. Over het algemeen geldt, hoe meer lagen (van dezelfde laaghoogte, zie L-100/5s), hoe kleiner de stijfheidsverhoudingen. Echter, dit kan leiden tot een grotere benodigde vloerhoogte doordat de hoofdafdracht-richting (D11) hierdoor gereduceerd wordt.

Profiel	L-100/3s	L-100/5s
Opbouw	40-20-40	20-20-20-20-20
Verhouding richtingen	80/20	60/40
D11	909333	726000
D22	7333	190667
Verhouding stijfheden	124,0	3,8

Tabel 7 – stijfheidsverschillen, (1).

- **Stijfheid overige constructieve componenten**: bij de varianten welke statisch onbepaald zijn, zullen de stijfheden van de liggers en vloeren met elkaar samenwerken en zo de krachtafdracht onderling verdelen. Over het algemeen nemen stijve componenten meer belasting naar zich toe waardoor minder stijve componenten ontlast kunnen worden. Wanneer een verandering in de dimensionering van één of meerdere componenten verandert, kan het gehele krachtenspel veranderen. In deze gevallen biedt parametrisch ontwerpen de oplossing. Dit kan middels een vervolgonderzoek onderzocht worden.

Bovenstaande conclusies hebben betrekking op de onderzochte varianten. Deze informatie biedt geen garantie voor het afdragen van CLT-vloeren in twee richting in het algemeen.

Deze nabeschouwing heeft geleid tot het vervallen van de hierboven genoemde varianten waardoor V2.8 en V3.9 (zie figuur 5) als enige varianten waarbij vloeren in twee richtingen afdragen overblijven. Deze twee varianten zullen worden meegenomen in de multicriteria-analyse in onderstaande hoofdstuk. De beredenering en de constructieve onderbouwing gaat gepaard met bovenstaande concluderende opsomming. De uitgebreide analyse staat vermeld in bijlage 7: *Variantenstudie*, hoofdstuk 5.0 *Varianten in twee richtingen afdragend*.

4.3 Multicriteria-analyse

Om tot 'realistische' varianten te komen binnen het concept is een multicriteria-analyse opgesteld. De constructieve varianten inclusief materialisatie door constructieve toetsing worden beoordeeld op de onderstaande criteria (hierna te benoemen: C.). De scores worden door middel van een schaalverdeling van 10 stappen toegekend. De stappen worden verdeeld door het verschil tussen de grootste waarde en de laagste waarde per criterium te bepalen en deze vervolgens te verdelen in 10 stappen. De wegingsfactoren (hierna te benoemen: W.) worden door middel van een schaalverdeling van 5 stappen toegekend. De waardes van de wegingsfactoren zijn naar rato van significantie en relevantie opgesteld. De argumentatie van de wegingsfactoren staat vermeld in bijlage 7: Voorstudie, hoofdstuk 6.0: Multicriteria-analyse. De varianten met de hoogste totaalscore blijken het meest realistisch te zijn voor het functie-flexibele elementenconcept. Hieronder zijn de criteria beschreven van de multicriteria-analyse:

C.1 Kubieke meter hout per vierkante meter vloeroppervlakte (m³/m²), W.= 4:

Het aantal kubieke meters hout per vierkante meter bestaat uit de vloerconstructiemogelijkheid + liggerconstructiemogelijkheid.

C.2: Kostprijs materialisatie per vierkante meter vloeroppervlakte (€/m²), W.= 5:

Bij verschillende leveranciers zijn kostprijzen per kubieke meter materiaal opgevraagd. In verband met anonimiteit en het fluctueren van de prijzen zijn deze bronnen niet vermeld. De volgende prijzen (excl. transport en montage) zijn aangehouden:

Liggerconstructie:

- Gezaagd € 320,00 per m³
- Glulam € 950,00 per m³
- LVL € 725,00 per m³

Vloerconstructie:

- CLT € 1200,00 per m³
- Kerto Ripa € 900,00 per m³
- Multiplex € 665,00 per m³

De kostprijs per vierkante meter vloeroppervlak bedraagt de vloerconstructie-mogelijkheid + liggerconstructiemogelijkheid. De houten balklaag bestaat uit multiplex (zie vloerconstructie) en gezaagd hout (zie liggerconstructie).

C.3: Hoogte vloerconstructie, W.= 3:

Per variant is bekeken wat de constructiehoogte bedraagt in millimeters. De constructie-hoogte bedraagt de vloerconstructiemogelijkheid + liggerconstructiemogelijkheid. Als het mogelijk is om binnen een variant de vloerconstructiemogelijkheid tussen de liggerconstructiemogelijkheid te plaatsen is de hoogte van de liggerconstructie-mogelijkheid aangehouden als constructiehoogte.

C.4: Hoeveelheid lijm in constructie (kilogram) per vierkante meter vloeroppervlakte (kg/m²), W.= 2:

De volgende lijmmassa-percentages zijn aangehouden:

- CLT 0,90% *(Storaenso & Holz & Funktion AG, p.2, z.d.)*
- LVL en multiplex 6,00% *(Finnish Woodworking Industries, p.20, 2019)*
- Glulam 2,00% *(De Groot Vroomshoop B.V., 2020)*

De volgende massa's zijn aangehouden *(bronnen staan vermeld in de voorstudie, zie bijlage: 1. Voorstudie, hoofdstuk 2: Houtbouwmaterialen)*:

- CLT 500 kg/m³
- LVL en multiplex 510 kg/m³
- Glulam 415 kg/m³

De lijm hoeveelheid (massa in kilogram) per vierkante meter vloeroppervlak bedraagt de vloerconstructiemogelijkheid + liggerconstructiemogelijkheid.

4.3.1 Stappen multicriteria-analyse

Gedurende de multicriteria-analyse is gebruik gemaakt van twee stappen. Deze hebben geresulteerd in onderstaande tabeltypes:

Stap 1 Totaaltabel:

In de totaaltabellen materialisatie V1, 2 en 3 zijn per vloerconstructiemogelijkheid de vier criteria berekend, hierin is het gemiddelde van de liggerconstructies (gezaagd, Glulam en LVL) per variant meegenomen. Vervolgens is een schaalverdeling toegekend per criteria. Hieruit volgt de eerste berekening van de multicriteria-analyse. Vanuit deze eerste berekening zijn de vier beste 'realistische' varianten toegepast bij stap 2. De tabellen zijn terug te lezen in bijlage 7: *Voorstudie*, hoofdstuk 6.0: *Multicriteria-analyse*

Stap 2 Verdiepende tabel:

In de hiernaast vermelde verdiepende tabellen 8, 9 en 10 materialisatie V1, 2 en 3 zijn de vier meest realistische varianten uit stap 1 verder beschouwd. De verdiepende tabel is per vloerconstructiemogelijkheid en per liggerconstructiemogelijkheid over vier criteria berekend. Vervolgens zijn de scores per variant op dezelfde wijze als bij stap 1 bepaald. Vanuit deze tweede berekening zijn de vier beste 'realistische' varianten toegekend die dienen als mogelijkheid voor het elementenconcept.

Multicriteria analyse varianten 1.

Variant		1.1								1.2				1.7			
Criteria	Weging [1-5]	Kerto Ripa T 5rib				Kerto Ripa O.B.				Houten balk-laag				Houten balk-laag			
		Glulam		LVL		Glulam		LVL		Glulam		LVL		Glulam		LVL	
kubieke meter hout per vierkante meter in m³/m²	4	9	36	10	40	9	36	10	40	7	28	9	36	1	4	7	28
kostprijs per vierkante meter in €/m²	5	1	5	3	15	1	5	4	20	5	25	10	50	3	15	10	50
Vloer-constructie hoogte in mm	3	1	3	9	27	1	3	9	27	1	3	10	30	6	18	8	24
Lijm hoeveelheid per variant in kg/m²	2	1	2	3	6	1	2	3	6	10	20	2	4	10	20	2	4
Totaal:		46		88		46		93		76		120		57		106	

Tabel 8 –Multicriteria-analyse stap 2 van verdiepende tabel varianten 1., (1).

Multicriteria analyse varianten 2.

Variant		2.1								2.2				2.11			
Criteria	Weging [1-5]	Kerto Ripa T 5rib				Kerto Ripa O.B.				Houten balk-laag				Houten balk-laag			
		Glulam		LVL		Glulam		LVL		Glulam		LVL		Glulam		LVL	
kubieke meter hout per vierkante meter in m³/m²	4	5	20	10	40	4	16	9	36	1	4	7	28	4	16	10	40
kostprijs per vierkante meter in €/m²	5	2	10	6	30	1	5	5	25	5	25	10	50	5	25	10	50
Vloer-constructie hoogte in mm	3	1	3	5	15	1	3	5	15	1	3	10	30	1	3	10	30
Lijm hoeveelheid per variant in kg/m²	2	3	6	7	14	2	4	6	12	10	20	1	2	10	20	1	2
Totaal:		39		99		28		88		52		110		64		122	

Tabel 9 –Multicriteria-analyse stap 2 van verdiepende tabel varianten 2., (1).

Multicriteria analyse varianten 3.

Variant		3.1												3.2			
Criteria	Weging [1-5]	Kerto Ripa T 5rib				Kerto Ripa O.B.				Houten balk-laag				Houten balk-laag			
		Glulam		LVL		Glulam		LVL		Glulam		LVL		Glulam		LVL	
kubieke meter hout per vierkante meter in m³/m²	4	6	24	10	40	1	4	2	8	10	40	10	40	1	4	4	16
kostprijs per vierkante meter in €/m²	5	3	15	6	30	1	5	3	15	8	40	10	50	7	35	10	50
Vloer-constructie hoogte in mm	3	1	3	9	27	1	3	9	27	1	3	9	27	1	3	10	30
Lijm hoeveelheid per variant in kg/m²	2	8	16	4	8	6	12	1	2	10	20	5	10	10	20	5	10
Totaal:		58		105		24		52		103		127		62		106	

Tabel 10 –Multicriteria-analyse stap 2 van verdiepende tabel varianten 3., (1).

4.3.2 Resultaten multicriteria-analyse

Uit de multicriteria-analyse, welke is opgesteld aan de hand van criteria met wegingsfactoren en objectieve variant-criteriascores, is gebleken dat voornamelijk varianten positief zijn beoordeeld waarbij onderstaande constructieve onderdelen van kracht zijn:

Vloeren:

- Wanneer houten balklagen toegepast konden worden, worden deze varianten als het meest realistisch beoordeeld.
- Wanneer houten balklagen niet toegepast konden worden, ontstond een tweestrijd tussen de Kerto Ripa vloeren van MetsäWood types: T 5-rib en Open Box.
- Tot slot is gebleken dat de varianten waarbij de vloeren tussen de liggers gepositioneerd konden worden, hoger scoorden in de MCA dan varianten waarbij de vloer over de liggers gepositioneerd worden.

Liggers:

- Over het algemeen zijn LVL-liggers als het meest realistisch beoordeeld in de multicriteria-analyse. Dit wordt veroorzaakt door het prijsverschil en de slankere dimensionering ten opzichte van Glulam liggers.

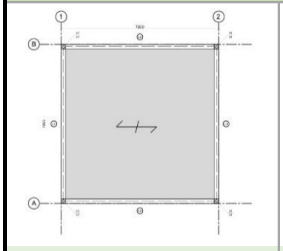
4.4 Realistische varianten

4.4.1 Constructieve overzichten

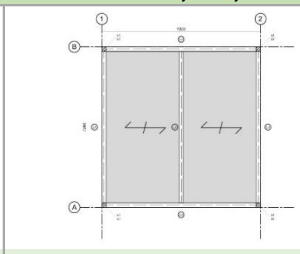
Vanuit de multicriteria-analyse zijn de constructieve varianten beoordeeld op een realistische toepassing. In tabel 11 hieronder zijn de mogelijkheden tot meest 'realistische' constructieve varianten weergegeven, in hoofdstuk 4.1: *Opgestelde constructieve varianten* staan deze varianten uitvergroot weergegeven. In tabel 12 staan de meest 'realistische' varianten inclusief materialisatie en de waarden van de criteria.

Realistische mechanische varianten

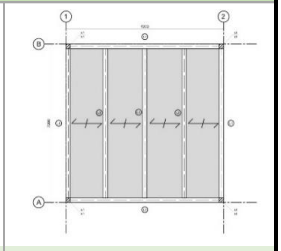
Stramien 7,2 x 7,2 m



Variant 1.1

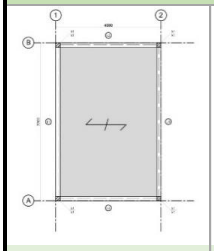


Variant 1.2

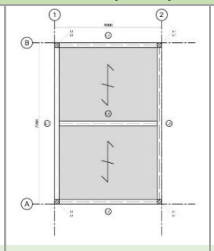


Variant 1.7

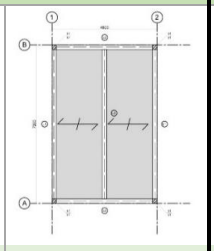
Stramien 4,8 x 7,2 m



Variant 2.1

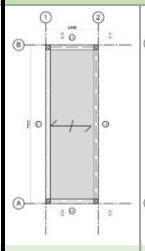


Variant 2.2

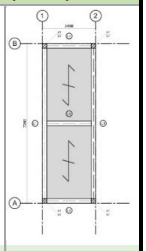


Variant 2.11

Stramien 2,4 x 7,2 m



Variant 3.1



Variant 3.2

Tabel 11 – Overzicht realistische constructieve e varianten, (1).

Realistische' varianten														
	Liggers							Vloeren		kubieke meter hout per vierkante meter in m³/m²	kostprijs per vierkante meter in €/m²	Vloer-constructie hoogte in mm	Lijm hoeveelheid per variant in kg/m²
					afmetingen								
v	t.	Ant.	L	x	b	x	h	soort	type				
Varianten 1. 7,2 x 7,2 m													
1.1 LVL	L1	2	7200	x	150	x	730	Kerto Ripa T 5rib	KRT-2400x 37 - 5 x 51 x 400 (m)	**0,160**	**€ 100,85**	**730**	**2,433**
	L2	2	7200	x	75	x	480	Kerto Ripa O.B.	KRO-2400x 31 - 5 x 45 x 300 - 5 x 150 / 300 x 38 (m)	**0,159**	**€ 99,61**	**730**	**2,391**
1.2 LVL	L1	2	7200	x	150	x	600	Houten balklaag	plaat 18 + 71 x 271 h.o.h. 610	**0,172**	**€ 62,01**	**700**	**2,655**
	L2	2	7200	x	150	x	700						
	L3	1	7200	x	150	x	700						
1.7 LVL	L1	2	7200	x	75	x	630	Houten balklaag	plaat 18 + 71 x 171 h.o.h. 610	**0,192**	**€ 60,12**	**750**	**2,578**
	L2	2	7200	x	150	x	750						
	L3	3	7200	x	75	x	700						
Varianten 2. 4,8 x 7,2 m													
2.1 LVL	L1	2	7200	x	150	x	660	Kerto Ripa T 5rib	KRT-2400x 25 - 5 x 45 x 300 (m)	**0,149**	**€ 82,55**	**660**	**1,626**
	L2	2	4800	x	75	x	320	Kerto Ripa O.B.	KRO-2400x 25 - 5 x 45 x 180 - 5 x 150 / 300 x 38 (m)	**0,157**	**€ 89,53**	**660**	**1,863**
2.2 LVL	L1	2	7200	x	150	x	600	Houten balklaag	plaat 18 + 71 x 271 h.o.h. 610	**0,161**	**€ 56,12**	**600**	**2,402**
	L2	2	4800	x	108	x	440						
	L3	1	4800	x	150	x	470						
2.11 LVL	L1	2	7200	x	108	x	600	Houten balklaag	plaat 18 + 71 x 196 h.o.h. 610	**0,150**	**€ 58,63**	**600**	**2,511**
	L2	2	4800	x	108	x	600						
	L3	1	7200	x	150	x	610						
Varianten 3. 2,4 x 7,2 m													
3.1 Glulam	L1	2	7200	x	135	x	600	Houten balklaag	plaat 18 + 71 x 196 h.o.h. 610	**0,176**	**€ 80,32**	**600**	**1,144**
	L2	2	2400	x	72	x	200						
3.1 LVL	L1	2	7200	x	150	x	530	Kerto Ripa T 5rib	KRT-2400x 25 - 5 x 45 x 200 (m)	**0,176**	**€ 89,82**	**530**	**2,894**
	L2	2	2400	x	75	x	160	Houten balklaag	plaat 18 + 71 x 196 h.o.h. 610	**0,173**	**€ 62,84**	**530**	**2,680**
3.2 LVL	L1	2	7200	x	150	x	520	Houten balklaag	plaat 18 + 71 x 271 h.o.h. 610	**0,194**	**€ 66,02**	**520**	**2,808**
	L2	2	2400	x	75	x	250						
	L3	1	2400	x	75	x	340						

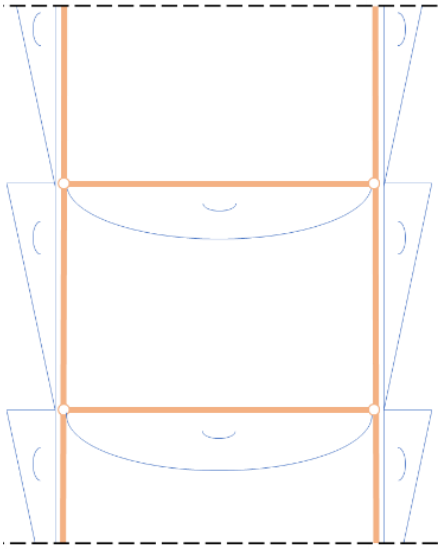
Tabel 12 – Overzicht realistische varianten materialisatie en waarden criteria, (1).

4.4.2 Kolommen

Nu de meest 'realistische' varianten bekend zijn, kunnen de kolomdimensies bepaald worden. Deze dimensies zijn afhankelijk van diverse factoren zoals: de schematisering, de excentriciteit, de rekenwijze en de materiaaltoepassing. De wijze waarop is omgegaan met deze factoren wordt in dit hoofdstuk behandeld.

Schematisering

Het schematiseren van constructieve aansluitingen is van grote invloed op het krachten- en momentenverloop en de dimensionering. In hoofdstuk 4.0: *Construeren* is te zien dat de constructieve componenten scharnieren met elkaar verbonden zijn. Dit is afkomstig van het hiernaast gelegen momentenverloop over meerdere verdiepingen. Om grote momenten in kolommen te voorkomen is ervoor gekozen om de verbindingen scharnierend uit te voeren.



Figuur 7 –Weergave momentenlijn, (1).

Excentriciteit

Bij de kolomberekening dient een excentriciteit aangehouden te worden veroorzaakt door verbindingen, imperfecties en scheefstanden. De belasting op de kolommen kan verdeeld worden in de bovenstaande (uit bovenstaande kolom) en de aansluitende (uit de aansluitende ligger) belasting. De excentriciteit is als volgt aangehouden: voor de bovenstaande belasting wordt geen excentriciteit aangehouden, voor de aansluitende belasting is een excentriciteit van $e = \frac{1}{2} b + 50$ mm. Deze excentriciteit is afkomstig van de manier van verbinden en de asymmetrische aansluiting van ligger en kolom.

Rekenwijze

De kolommen zijn net als de liggers en vloeren berekend door middel van rekenprogrammatuur welke is geverifieerd middels een handberekening.

Het elementenconcept bestaat uit drie stramienvarianten. Doordat de belasting op de kolommen van elke stramienvariant sterk fluctueert, wordt elke stramienvariant voorzien van een eigen kolomdimensie. Hierbij is het verschil tussen varianten binnen een stramienmaat verwaarloosbaar.

De totale belasting op de maatgevende onderste kolommen is bepaald waarbij de variabele belasting van twee bouwlagen volledig is meegenomen. De rest van de variabele belasting is gereduceerd met behulp van de ψ_0-factor. Hierbij is uitgegaan van 4 bouwlagen (3 verdiepingsvloeren + 1 dakvloer).

Materiaaltoepassing

Voor de dimensionering van de kolommen is beoogd om zowel Glulam als LVL kolommen uit te werken. Echter, na contact met een LVL-leverancier is gebleken dat zij tot een maximale profieldikte van 144 mm produceren. De dimensionering, zoals hierboven vermeld, resulteerde in profielen groter dan de maximaal te produceren profielen. Standaard profielen onderling verlijmen is mogelijk, maar hierdoor vervalt de productgarantie en dit kan tot kwaliteitsverlies leiden. Met deze reden is binnen dit afstudeeronderzoek besloten om enkel Glulam kolommen constructief uit te werken.

Resultaten

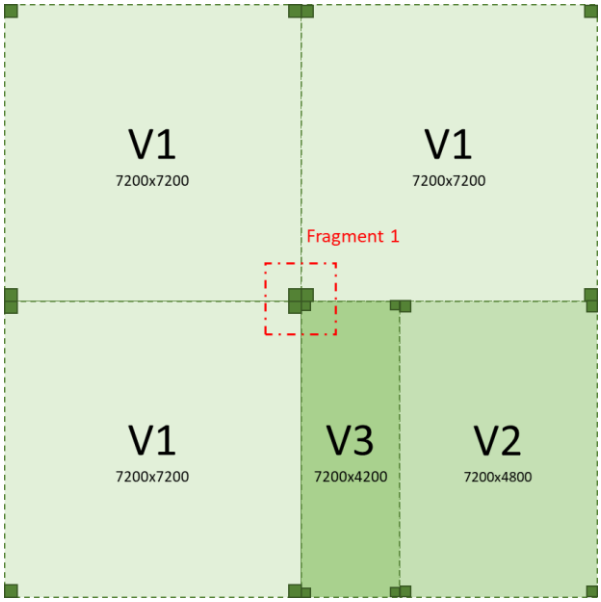
Alle hierboven genoemde factoren hebben geleid tot de kolomdimensies zoals vermeld de tabel 13 hiernaast.

Door het toepassen van diverse kolomafmetingen, ontstaat een aandachtspunt bij de aansluiting van deze verschillende dimensies.

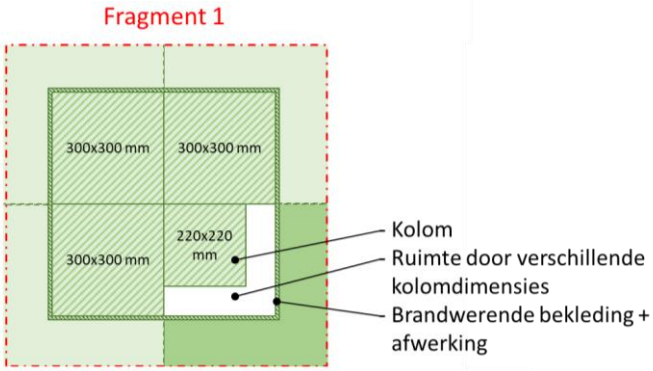
Variant	Stramien [mm]	Kolommaat Glulam bxh [mm]
V1	7200x7200	300x300
V2	7200x4800	260x260
V3	7200x2400	220x220

Tabel 13 – Kolomafmetingen, (1).

In onderstaande figuren 8 en 9 staat een mogelijke situatie geschetst waarbij bovenstaand voorval plaatsvindt. In figuur 8 staat de positie van het fragment weergegeven. Figuur 9 (het fragment) geeft weer welk gevolg kan ontstaat door het toepassen van diverse kolomafmetingen. Dit verschijnsel wordt opgelost door de ontstane ruimte te gebruiken voor het verticale transport W- en E-distributiesystemen. Vervolgens dient de kolomaansluiting 90 minuten brandwerend bekleed te worden.



Figuur 8 – Kolomsamenkomst verschillende stramienmaten, (1).



Figuur 9 – Fragment 1 kolomsamenkomst verschillende stramienmaten, (1).

De kolomdimensies zijn berekend aan de hand van een maximale verdiepingshoogte van 4,3 m. Deze hoogte ($\frac{13\ m}{3\ bouwlagen} = 4{,}33\ m$, zie hoofdstuk 1.6: *afbakening*) is afkomstig van de 4 bouwlagen in combinatie met de brandeis van maximaal 90 min. De vrije hoogte van verblijfsgebieden dient minimaal 2,6 m hoog te zijn. Bij een verkeersruimte dient de minimale vrije hoogte 2,3 m te zijn. In onderstaande tabel 14 wordt weergeven hoe de verdiepingshoogte zich in relatie met constructiehoogtes verhoudt. (I) staat voor de installatiehoogte van 250 mm (verhoogde vloer) + 500 mm (verlaagde plafond).

Stramien	Functie	Verdiepings-hoogte	Max. vloer -hoogte	Optr. Vrije hoogte	Min. vrije hoogte	Voldoet
7,2 x 7,2	Gebruiksfunctie	4300	437 + 750 (I)	3113	2600	Ja
4,8 x 7,2	Gebruiksfunctie	4300	325 + 750 (I)	3225	2600	Ja
2,4 x 7,2	Verkeersfunctie	4300	225 + 750 (I)	3325	2300	Ja

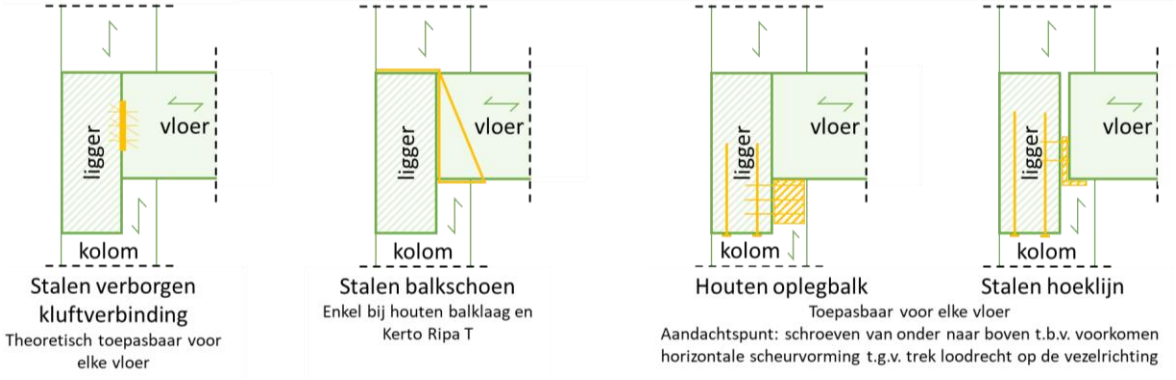
Tabel 14 – Verhouding verdiepings- en vrije hoogte, (1).

In bovenstaande tabel is te zien dat de vrije hoogte voor elk stramienplan ruim voldoet aan de bouwbesluiteisen. In praktijk zal in het Programma van Eisen vastgesteld dienen te worden welke vrije hoogte vereist is.

4.4.3 Verbindingen

In hoofdstuk 4.4.2 *Kolommen* wordt een excentriciteit aangehouden welke afkomstig is van de manier van het verbinden van de ligger en de kolom. In dit hoofdstuk wordt deze verbinding evenals de verbinding tussen vloer en ligger en tussen kolomkop en kolomvoet constructief beschouwd en geschetst. Een vervolgonderzoek zal uit moeten wijzen welke verbindingen het meest realistisch zijn. Hierbij dient tevens aandacht besteed te worden aan geluids- en brandeisen. Het uitgangspunt van deze verbindingen is dat deze scharnierend werken. Hierbij wordt verwacht dat de verbindingen niet maatgevend zullen zijn voor de dimensionering van de constructieve componenten.

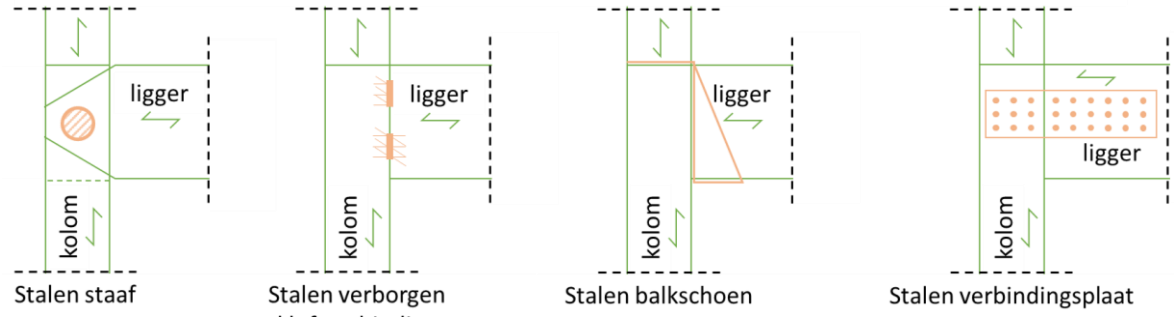
Vloer-ligger-verbinding



Figuur 10 –Weergave vloer-ligger-verbindingen, (1).

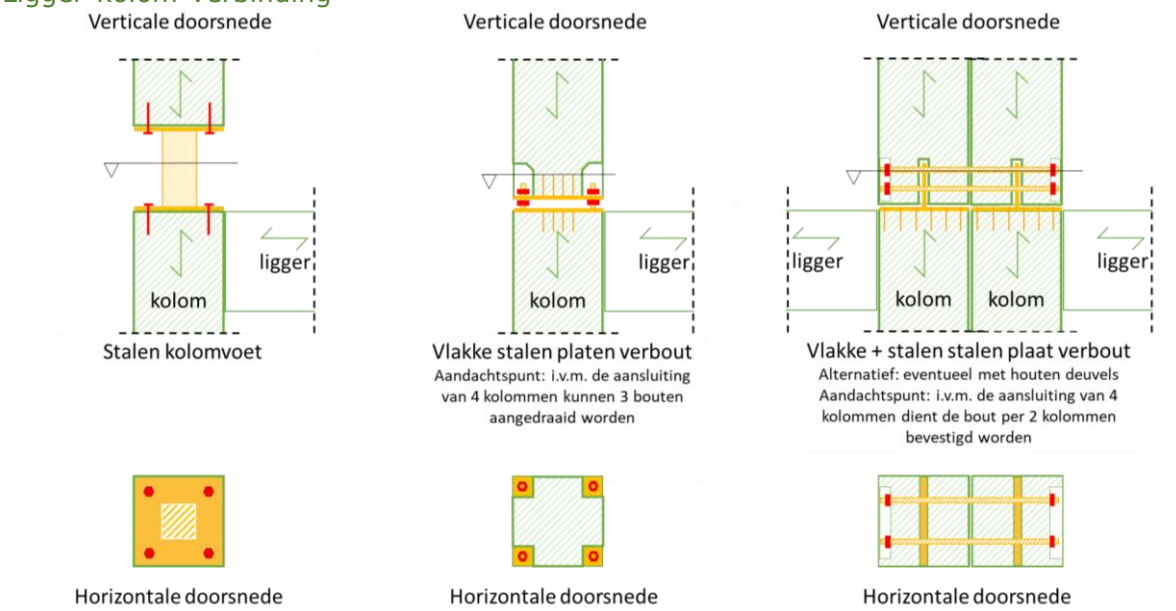
Ligger-kolom-verbinding

Uitgangspunt: de ligger wordt niet op druk loodrecht op de vezels belasting.



Figuur 11 –Weergave ligger-kolom-verbindingen, (1).

Ligger-kolom-verbinding



Figuur 12 –Weergave kolom-kolom-verbindingen, (1).

4.4.4 Sparingen ten behoeve van installaties

De constructiehoogte is van invloed op de detaillering, vrije hoogte en kosten. Bij dit elementenconcept wordt de constructieve hoogte beïnvloed door de installatiehoogte van het verlaagd plafond. Deze hoogte kan gereduceerd worden door sparingen en/of verjongingen in de liggers aan de brengen. De sparingsmogelijkheden zijn sterk afhankelijk van de maatgevende U.C. van het betreffende constructieve onderdeel.

In dit afstudeeronderzoek worden de sparingen en verjongingen ten behoeve van installaties constructief beschouwd. Een verdere constructieve uitwerking kan middels een vervolgonderzoek uitgevoerd worden of projectspecifiek getoetst worden. Met betrekking tot de liggers kan onderscheid gemaakt worden tussen een maatgevende U.C. op buiging en vervorming of op dwarskracht.

Wanneer de liggers op buiging of vervorming maatgevend is, dient de sparing richting de oplegging gepositioneerd te worden. Het maximale moment en de maximale vervorming zullen namelijk in het midden van de overspanning plaatsvinden.

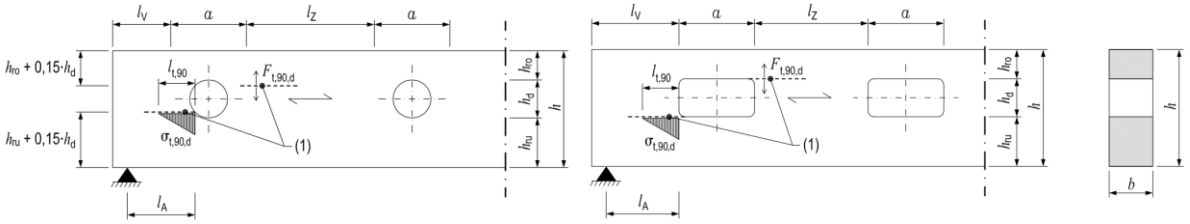
Wanneer de ligger op dwarskracht maatgevend is, dient de sparing meer richting het midden van de overspanning gepositioneerd te worden. De dwarskracht is namelijk maximaal ter plaatse van de steunpunten.

Indien de positie van sparingen aan de onderzijde van de ligger en ter plaatse van het steunpunt gewenst is, spreekt men over verjongingen. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de capaciteit van de verbinding ter plaatse van de verjonging.

In de praktijk zal de positie afhankelijk van de U.C.'s bepaald en constructief getoetst dienen te worden. Dit zal gepaard gaan met een installatietechnisch adviseur voor de benodigde sparingen en met een bouwfysisch adviseur ten behoeve van geluidsvoorzieningen. Door de overdimensionering veroorzaakt door een lijnlast van 4,30 kN/m[1] als gevolg van een mogelijke gevel in combinatie met de niet volledig uitgenutte U.C.'s, kan de reserve capaciteit van de liggers voldoende zijn voor het horizontale transport van leidingen en kanalen. Een constructieve controle is hierbij een vereiste.

Overige uitgangspunten ten behoeve van sparingen en verjongingen:

- Onderstaande uitgangspunten hebben betrekking op LVL-liggers:



Materiaal	l_v	l_A	l_z	$hro\ en\ hru$	a	h_d
LVL-P	$\geq h$	≥0,5 h	$\max(1{,}5\ h; 300\ mm)$	≥0,35 h	$\leq 2{,}5\ h_d$	$\leq 0{,}15\ h$

Figuur 13 – Richtlijnen sparingen in LVL-liggers, overgenomen uit European LVL Handbook (p.134-135), Finnish Woodworking Industries, 2019.

- De verjonging dient met een minimale steilheid van 1:10 worden aangebracht, *(NEN, 2014, 6.5.1 (2))*.
- Advies: positioneer indien mogelijk de sparingen in het midden van de hoogte van de ligger.

Bovenstaande informatie dient als richtlijn. Een constructieve controle is hierbij vereist. Doordat de sparingsmogelijk zeer project- en variant-specifiek zijn, worden deze niet constructief uitgewerkt. Middels een vervolgonderzoek kan dit onderzocht worden.

4.5 Stabiliteit

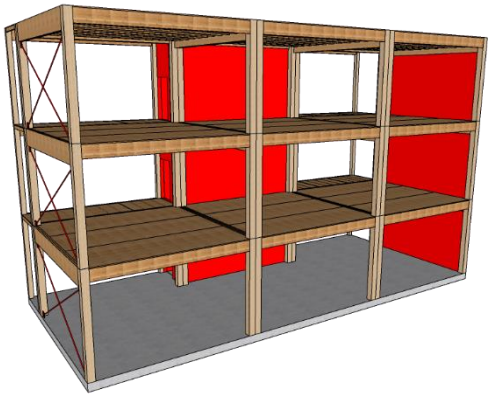
Het elementenconcept is geconstrueerd middels scharnierende verbindingen, zoals bij hoofdstuk 4.4.2: *Kolommen* is vermeld. Om de stabiliteit van het bouwwerk te realiseren dienen voorzieningen getroffen te worden. Gedurende dit afstudeeronderzoek is de stabiliteit van het concept kwalitatief beschouwd. Dit houdt in dat de stabiliteitsvoorzieningen beschreven en gevisualiseerd worden. Een verdere constructieve uitwerking zal niet plaatsvinden in dit afstudeeronderzoek. Dit kan uitgevoerd worden in een vervolgonderzoek.

Gedurende de voorstudie is kennis opgedaan met diverse stabiliteitsprincipes welke toepasbaar zijn binnen de hybride- en houtbouw. Voor het elementenconcept zijn drie stabiliteits-voorzieningen beschouwd. Deze staan weergeven in figuur 14, 15 en 16, in combinatie met een mogelijke stapelindeling van de elementen. De stabiliteitsvoorzieningen zijn rood weergegeven.

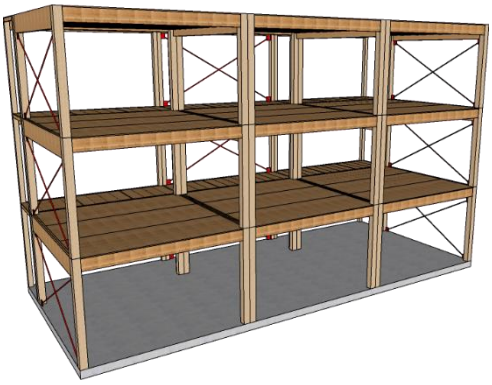


Figuur 14 – Stabiliteitswanden, (1).

De windbelasting van de gevel wordt doorgegeven naar de liggers en middels de schijfwerking van de vloeren naar de stabiliteitsvoorzieningen afgedragen. Tot slot zal de kracht naar de fundering worden afgedragen.



Figuur 15 – Stabiliteitskern, mogelijk i.c.m. windverband en/of wand, (1).



Figuur 16 – Windverbanden, (1).

Voor het bepalen van de toe te passen stabiliteitsprincipes dient rekening gehouden te worden met onderstaande uitgangspunten:

- De stabiliteitsvoorzieningen dienen over de volledige gebouwhoogte uitgevoerd te worden. Wanneer dit niet mogelijk is, dienen de betreffende constructieve componenten getoetst worden.
- Wanneer gebruik wordt gemaakt van wanden en windverbanden dient een minimum aantal van drie toegepast te worden en dienen de werklijnen van deze voorziening niet in éénzelfde snijpunt te vallen.
- De stabiliteitswanden – en kern(en) zijn materiaalonafhankelijk. Hierbij kan CLT of overige houten wanden of beton (hybride) toegepast worden.

De stabiliteitsvoorzieningen zijn afhankelijk van de gebouwdimensies, de opdrachtgever en de locatie. De voorzieningen dienen per project en situatie getoetst te worden aan de hand van een rekenkundige controle. Hierbij dient ook rekening gehouden te worden met eventuele extra optredende krachten in de constructieve componenten en dient gecontroleerd te worden of trek in de fundering op kan treden.

5.0 Eindconclusie

Gedurende dit afstudeeronderzoek stond onderstaande hoofdvraag centraal:

> *Welke realistische mogelijkheden met betrekking tot de hoofddraagconstructie voor bouwwerken uitgevoerd in hout zijn toepasbaar voor een utilitair functie-flexibel geïndustrialiseerd elementenconcept?*

Deze wordt in dit hoofdstuk aan de hand van de opgedane kennis beantwoord:

Ten eerste is de manier van toekomstbestendig ontwerpen en bouwen middels het veldonderzoek vastgesteld. Hieruit is gebleken dat functie-flexibel ontwerpen en het toepassen van een elementenconcept meer toekomstbestendig is dan remontabel ontwerpen en moduleconcepten. De aspecten (gebruiksfuncties, stramienmaten, eisen, belastingen en installatieprincipes) horende bij een functie-flexibel elementenconcept staan vermeld in hoofdstuk: *2.0 Veldonderzoek* en *3.0 Functie-flexibel ontwerpen.*

De opgestelde constructieve varianten zijn opgedeeld in twee toepassingen van vloerafdracht, dit betreft: 1. In één richting afdragend (toepasbaar voor elke beschouwde houten vloer) en 2. In twee richtingen afdragend (enkel CLT beschouwd).

Uit de constructieve uitwerking van de varianten die in één richting afdragen, is gebleken dat houten balklagen zeer gunstig beoordeeld worden in de multicriteria-analyse. Echter, deze zijn enkel van toepassing bij relatief kleine overspanningen (≤ 3,6m). Bij kleinere overspanningen (≤ 2,4m) is gebleken dat de vloersystemen (T en Open Box) van Kerto Ripa met vijf ribben gepaard gaan met lage Unity Checks (zie bijlage 7: *Variantenstudie*) door de standaard minimale vloerhoogte.

Uit de constructieve uitwerking van de varianten die in twee richtingen afdragen, is gebleken dat bij de beschouwing vijf van de negen varianten niet realistisch worden beoogd door transportbeperkingen of het gebrek aan momentvaste plaatkoppelingen. Tijdens het uitwerken van de overige 4 varianten is gebleken dat de efficiëntie van CLT-vloeren in twee richtingen afdragend sterk afhankelijk is van de volgende aspecten: lengte/breedte verhouding plaat, stijfheidsverhouding tussen vezelrichtingen en de stijfheid van overige constructieve componenten. De constructieve uitwerking heeft geresulteerd in het meewegen van de varianten V2.8 en V3.9 binnen de multicriteria-analyse.

De multicriteria-analyse heeft het begrip 'realistisch' tastbaar gemaakt en afgewogen tegen de opgestelde constructieve varianten. Aan de hand van de criteria (m^3 hout/m^2, kostprijs/m^2, constructiehoogte en lijmhoeveelheid kg/m^2) in combinatie met de bijbehorende wegingsfactoren is gebleken dat de varianten die in hoofdstuk 4.4: *Realistische varianten*, tabel 12 staan vermeld als meest realistische mogelijkheden zijn beoordeeld.

Resumé

Rekening houdend met materiaalgebruik, functie-flexibel ontwerpen en bouwen, bouwkosten en mogelijke varianten in ontwerp en uitvoering wordt geadviseerd om stapelbouw met het Hout U Flexibel concept tot 4 bouwlagen te realiseren met: gelamineerde kolommen, (voornamelijk) stramienmaten van 7,2 x 7,2 m, vloersystemen van traditionele houten balklagen en/of Kerto Ripa en projectspecifieke verbindingen, sparingen en stabiliteits- en funderingsprincipes. Dit bouwprincipe leidt tot een goedkoop, slank en toekomstbestendig ontwerp op het gebied van bouwen en exploiteren.

De eindconclusie is middels de brochure, hoofdstuk 6.0: Hout U Flexibel Brochure, visueel weergegeven. Deze brochure dient als samenvattend geheel van het onderzoek.

Hout U Flexibel





Een houten functie-flexibel utilitair elementenconcept

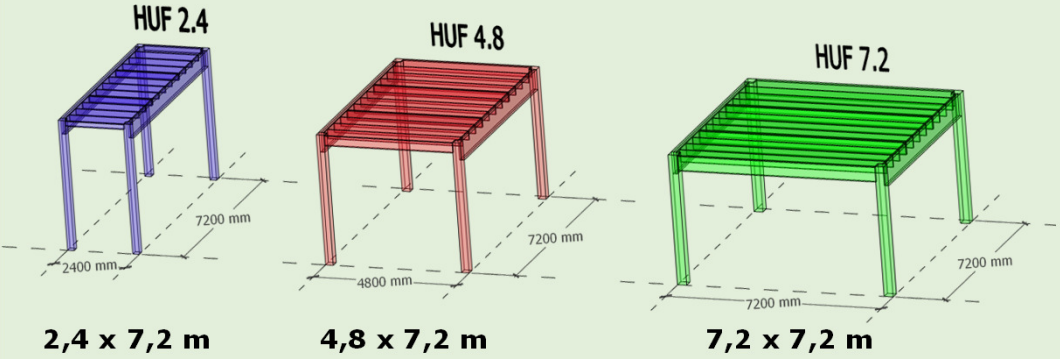
6.0 Hout U Flexibel Brochure

Toekomstbestendig ontwerpen & bouwen

Hout U Flexibel

Door technische, duurzame, economische, ecologische en politiek-juridische ontwikkelingen in de bouwsector is een toekomstbestendige ontwerp- en bouwmethodiek gewenst waarbij de uitvoering, het gebruik en de fase na einde levensduur centraal staan.

Deze visie heeft geleid tot een utilitair functie-flexibel elementenconcept uitgevoerd in hout. Dit concept bestaat uit drie stapelbare HUF-modules bestaande uit geprefabriceerde elementen met de stramienmaten:



2,4 x 7,2 m **4,8 x 7,2 m** **7,2 x 7,2 m**

Wanneer gebruik wordt gemaakt van het HUF-concept kunnen bouwwerken gerealiseerd worden met een minimale levensverwachting van 100 jaar waarbij functiewisselingen zonder dat ingrijpende aanpassingen aan de hoofddraagconstructie uitgevoerd hoeven te worden.

Het HUF-concept is opgebouwd uit diverse gemodificeerde houten materialen, namelijk:

- Gezaagd hout;
- Multiplex;
- Glulam (gelamineerd hout);
- LVL (Laminated Veneer Lumber).

Hout U Flexibel anticipeert op en houdt rekening met onderstaande ontwikkelingen en aspecten:

- Klimaatontwikkelingen
- CO_2 uitstoot/heffing
- Leegstand van gebouwen
- Sloop bestaande bouwwerken
- Circulair bouwen
- Woningnood
- Industrialiseren bouwsector
- Milieu wet- en regelgeving
- Houtbouw ontwikkelingen
- Stijgende vraag naar uitvoerend personeel

HUF-concept in de praktijk

Functie-flexibel

Functie-flexibiliteit is de speerpunt van het HUF-concept. Deze functie-flexibiliteit wordt gerealiseerd door een manier van ontwerpen waarbij rekeningen is gehouden met eisen en voorwaarden welke van toepassing zijn voor onderstaande gebruiksfuncties:

- Woonfunctie
- Bijeenkomstfunctie
- Gezondheidszorgfunctie
- Kantoorfunctie
- Logiesfunctie
- Onderwijsfunctie
- Winkelfunctie

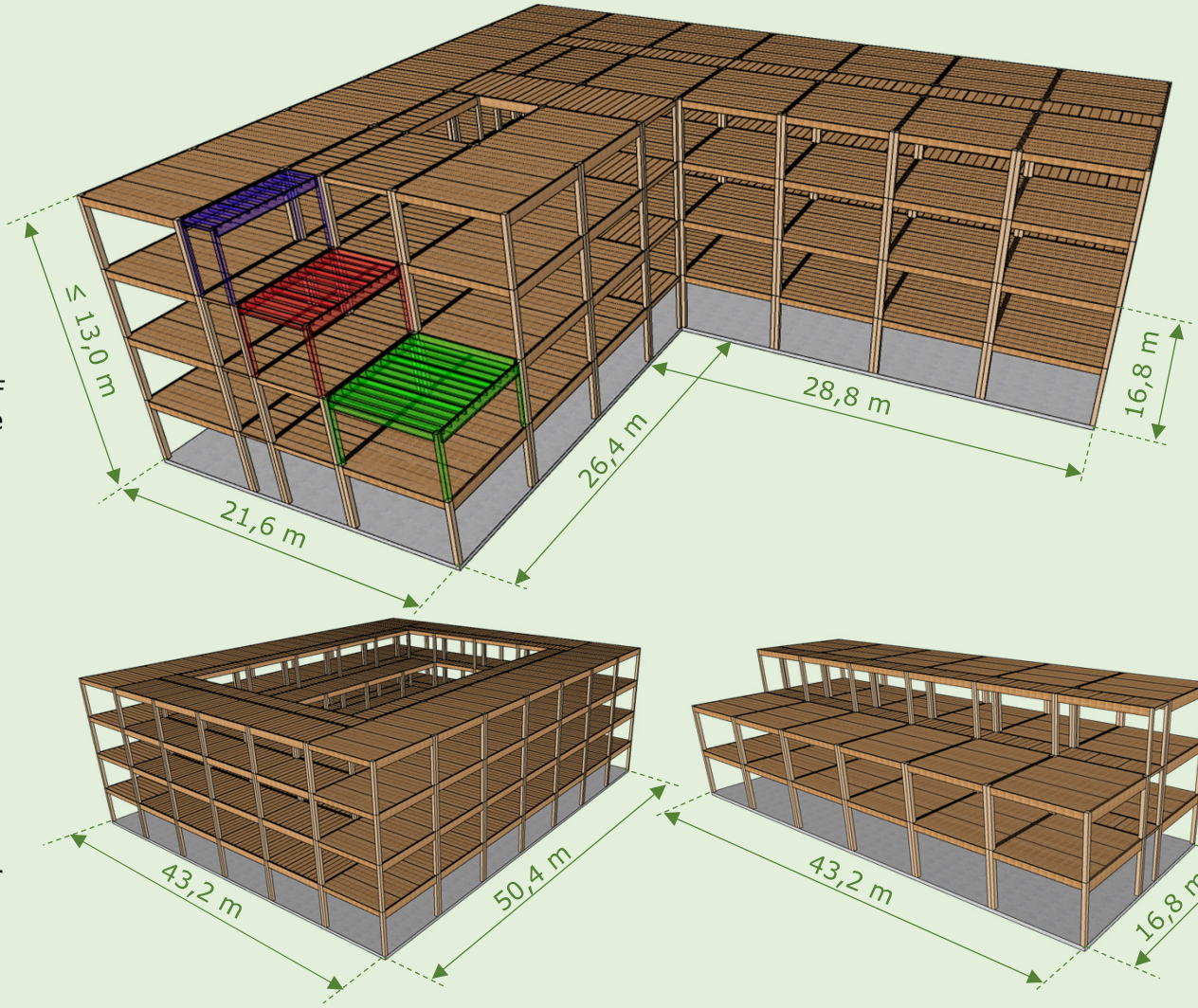
Deze gebruiksfuncties zullen voornamelijk van toepassing zijn op de HUF 7.2. De HUF 2.4 leent zich als gangmodule en de HUF 4.8 als pasmodule om de hoofdstramienmaat van 7,2 x 7,2 m te handhaven.

Alle bovenstaande gebruiksfuncties zijn toe te passen binnen het HUF-concept doordat de volgende belastingen zijn aangehouden:

Belastingtype	Verdiepingsvloer	Dakvloer
G_k Eigen gewicht	variabel per HUF	variabel per HUF
G_k Opgelegd	1,00 kN/m²	1,86 kN/m²
Q_k Variabel	6,03 kN/m²	2,50 kN/m²
G_k Gevel	4,30 kN/m[1]	-

Het HUF-concept laat een maximale vloerhoogte met een gebruiksfunctie toe van 13 meter hoog t.o.v. maaiveld waardoor het bouwwerk 90 min. brandwerend bekleed dient de worden. Dit resulteert in een maximale stapelhoogte van 4 HUF-modules met een maximale verdiepingshoogte van 4,3 meter hoog.

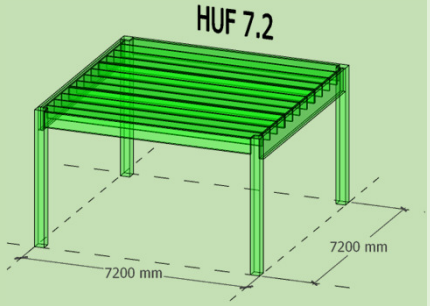
Stapelmogelijkheden



Elementenspecificaties

HUF 7.2

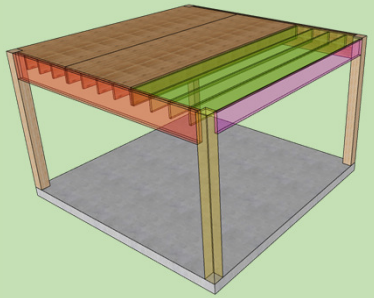
De HUF 7.2 betreft een elementenconcept van 7,2 x 7,2 m. Deze HUF dient als verblijfsruimte. Enkele voorbeelden van toepassingen zijn: appartement, logiesruimtes (2*3,6x7,2 m), kantoor ruimte 5,4 m + 1,8 m gangzone, bijeenkomst, enz. Hieronder staan de specificaties van de vier verschillende HUF's 7.2 weergegeven.



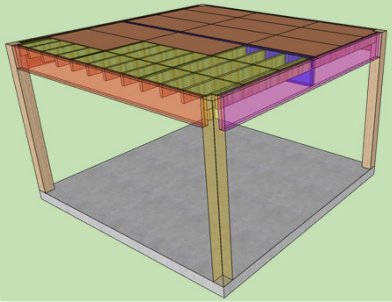
In onderstaande tabel staan specificaties van de HUF's 7.2 per aspect vermeld:

HUF module	Kubieke meter hout per vierkante meter [m³/m²]	Kostprijs per vierkante meter [€/m²]	Vloer-constructie hoogte [mm]	Lijm hoeveelheid per variant [kg/m²]
7.2A	0,160	€ 100,85	730	2,433
7.2B	0,159	€ 99,61	730	2,391
7.2C	0,172	€ 62,01	700	2,655
7.2D	0,192	€ 60,12	750	2,578

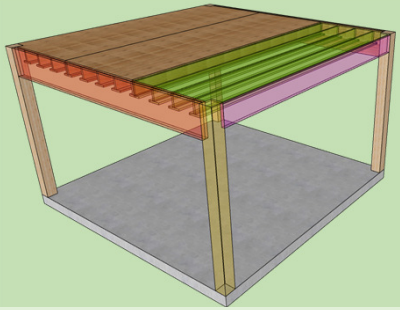
De kostprijs bestaat uit het materiaal en de productie (excl. transport en montage). De kostprijs kan fluctueren, onder andere afhankelijk van de vraag en aanbod.



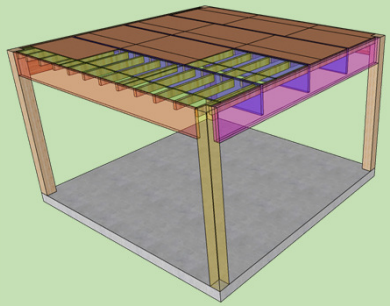
HUF 7.2A					
Component	Dimensie/Product [mm]				
Vloer	Kerto Ripa T 5 rib KRT-2400x37-5x51x400 (m)				
Ligger 1	150	x	730		LVL
Ligger 2	75	x	480		LVL
Kolom	300	x	300		Glulam
Hoofdrapportage V1.1 LVL					



HUF 7.2C					
Component	Dimensie/Product [mm]				
Vloer	Houten balklaag 71x271 h.o.h. 610 + plaat 18				
Ligger 1	150	x	600		LVL
Ligger 2	150	x	700		LVL
Ligger 3	150	x	700		LVL
Kolom	300	x	300		Glulam
Hoofdrapportage V1.2 LVL					



HUF 7.2B					
Component	Dimensie/Product [mm]				
Vloer	Kerto Ripa O.B. KRT-2400x31-5x45x300-5x150/300x38 (m)				
Ligger 1	150	x	730		LVL
Ligger 2	75	x	480		LVL
Kolom	300	x	300		Glulam
Hoofdrapportage V1.1 LVL					

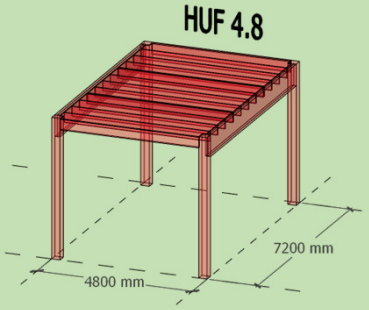


HUF 7.2D					
Component	Dimensie/Product [mm]				
Vloer	Houten balklaag 71x171 h.o.h. 610 + plaat 18				
Ligger 1	75	x	630		LVL
Ligger 2	150	x	750		LVL
Ligger 3	75	x	700		LVL
Kolom	300	x	300		Glulam
Hoofdrapportage V1.7 LVL					

Elementenspecificaties

HUF 4.8

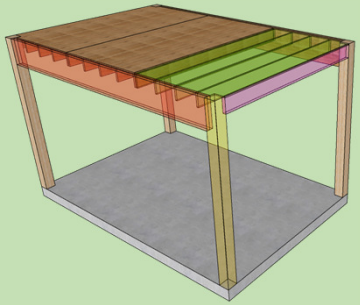
De HUF 4.8 betreft een elementenconcept van 4,8 x 7,2 m. Deze HUF dient als passtramien ten behoeve van de HUF 2.4 (gangmodule). De HUF 4.8 kan dienen als verblijfsruimte of verkeersruimte. Hieronder staan de specificaties van de vier verschillende HUF's 4.8 weergegeven.



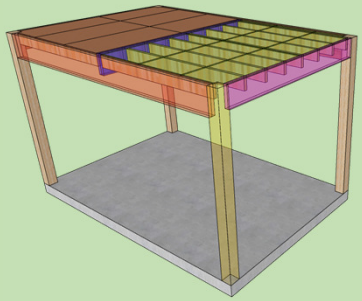
In onderstaande tabel staan specificaties van de HUF's 4.8 per aspect vermeld:

HUF module	Kubieke meter hout per vierkante meter [m³/m²]	Kostprijs per vierkante meter [€/m²]	Vloer-constructie hoogte [mm]	Lijm hoeveelheid per variant [kg/m²]
4.8A	0,149	€ 82,55	660	1,626
4.8B	0,157	€ 89,53	660	1,863
4.8C	0,161	€ 56,12	600	2,402
4.8D	0,150	€ 58,63	600	2,511

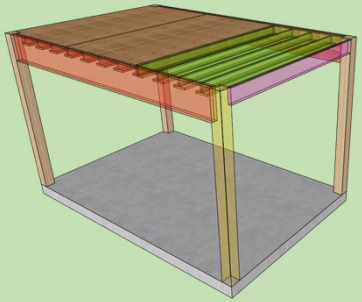
De kostprijs bestaat uit het materiaal en de productie (excl. transport en montage). De kostprijs kan fluctueren, onder andere afhankelijk van de vraag en aanbod.



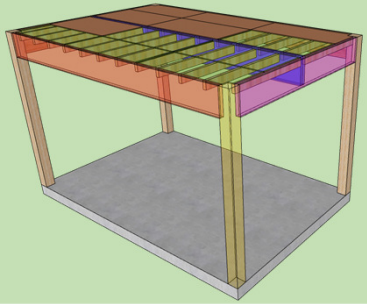
HUF 4.8A				
Component	Dimensie/Product [mm]			
Vloer	Kerto Ripa T 5 rib KRT-2400x25-5x45x300 (m)			
Ligger 1	150	x	660	LVL
Ligger 2	75	x	320	LVL
Kolom	260	x	260	Glulam
Hoofdrapportage V1.1 LVL				



HUF 4.8C				
Component	Dimensie/Product [mm]			
Vloer	Houten balklaag 71x271 h.o.h. 610 + plaat 18			
Ligger 1	150	x	600	LVL
Ligger 2	108	x	440	LVL
Ligger 3	150	x	470	LVL
Kolom	260	x	260	Glulam
Hoofdrapportage V1.2 LVL				



HUF 4.8B				
Component	Dimensie/Product [mm]			
Vloer	Kerto Ripa O.B. KRT-2400x25-5x45x180-5x150/300x38 (m)			
Ligger 1	150	x	660	LVL
Ligger 2	75	x	320	LVL
Kolom	260	x	260	Glulam
Hoofdrapportage V1.1 LVL				

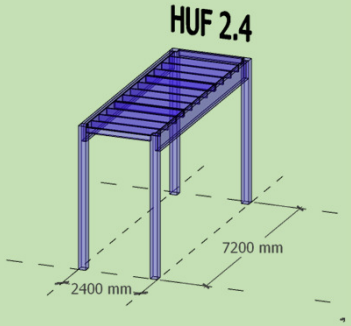


HUF 4.8D				
Component	Dimensie/Product [mm]			
Vloer	Houten balklaag 71x196 h.o.h. 610 + plaat 18			
Ligger 1	108	x	600	LVL
Ligger 2	1083	x	600	LVL
Ligger 3	150	x	610	LVL
Kolom	260	x	260	Glulam
Hoofdrapportage V1.7 LVL				

Elementenspecificaties

HUF 2.4

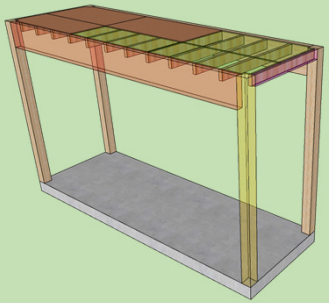
De HUF 2.4 betreft een elementenconcept van 2,4 x 7,2 m. Deze HUF dient als gangmodule (verkeersruimte). Deze module kan toegepast worden als hoofddistributie van horizontaal transport van installaties. Hieronder staan de specificaties van de vier verschillende HUF's 2.4 weergegeven.



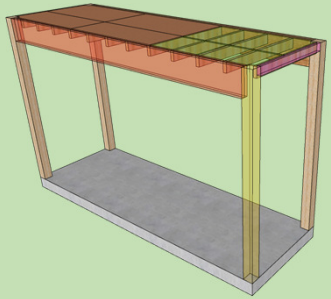
In onderstaande tabel staan specificaties van de HUF's 2.4 per aspect vermeld:

HUF module	Kubieke meter hout per vierkante meter [m³/m²]	Kostprijs per vierkante meter [€/m²]	Vloer-constructie hoogte [mm]	Lijm hoeveelheid per variant [kg/m²]
2.4A	0,176	€ 80,32	600	1,144
2.4B	0,176	€ 89,82	530	2,894
2.4C	0,173	€ 62,84	530	2,680
2.4D	0,194	€ 66,02	520	2,808

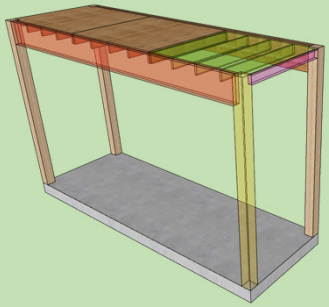
De kostprijs bestaat uit het materiaal en de productie (excl. transport en montage).
De kostprijs kan fluctueren, onder andere afhankelijk van de vraag en aanbod.



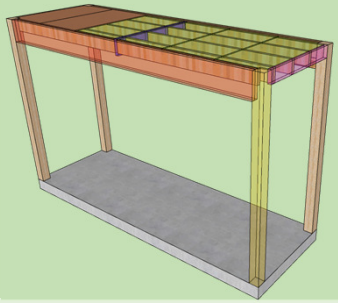
HUF 2.4A				
Component	Dimensie/Product [mm]			
Vloer	Houten balklaag 71x196 h.o.h. 610 + plaat 18			
Ligger 1	135	x	600	Glulam
Ligger 2	72	x	200	Glulam
Kolom	220	x	220	Glulam
Hoofdrapportage V3.1 Glulam				



HUF 2.4C				
Component	Dimensie/Product [mm]			
Vloer	Houten balklaag 71x196 h.o.h. 610 + plaat 18			
Ligger 1	150	x	530	LVL
Ligger 2	75	x	160	LVL
Kolom	220	x	220	Glulam
Hoofdrapportage V3.1 LVL				



HUF 2.4B				
Component	Dimensie/Product [mm]			
Vloer	Kerto Ripa T 5 rib KRT-2400x25-5x45x200 (m)			
Ligger 1	150	x	530	LVL
Ligger 2	75	x	160	LVL
Kolom	220	x	220	Glulam
Hoofdrapportage V3.1 LVL				

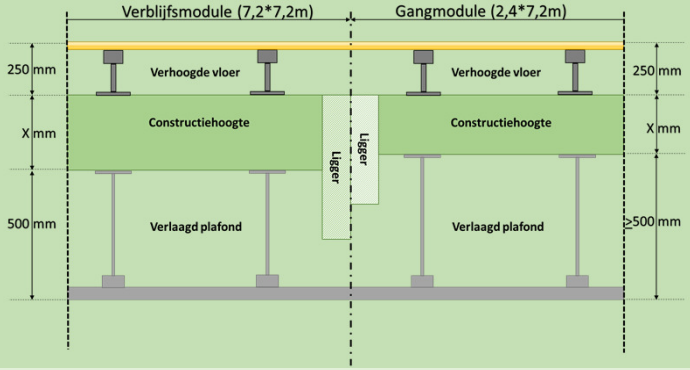


HUF 2.4D				
Component	Dimensie/Product [mm]			
Vloer	Houten balklaag 71x271 h.o.h. 610 + plaat 18			
Ligger 1	150	x	520	LVL
Ligger 2	75	x	250	LVL
Ligger 3	75	x	340	LVL
Kolom	220	x	220	Glulam
Hoofdrapportage V3.2 LVL				

Ontwerp uitgangspunten

Installatieconcept

Binnen het HUF-concept is een installatieprincipe beschouwd. De installaties zijn los van de hoofddraagconstructie bereikbaar, vervangbaar en verplaatsbaar. De E- & W-installaties en de bijbehorende distributiesystemen kunnen gepositioneerd worden in de verhoogde vloer (250 mm) en in het verlaagd plafond (500 mm).



In de gangmodule (verkeersruimte) mag een lagere minimale vrije hoogte (2,3 i.p.v. 2,6 m) aangehouden worden. Hierdoor kan, indien noodzakelijk, het verlaagd plafond binnen de HUF 2.4 groter dan 500 mm uitgevoerd worden. Zie onderstaande tabel voor de relatie tussen de verdiepingshoogte en de vrije hoogte. De verdiepingshoogte is projectspecifiek en maximaal 4,3 m

HUF-module	Maximale verdiepings-hoogte	Vloer + installatie-hoogte	Optr. Vrije hoogte	Min. vrije hoogte	Verschil
7,2 x 7,2	4300	437 + 750 (I)	3113	2600	513
4,8 x 7,2	4300	325 + 750 (I)	3225	2600	625
2,4 x 7,2	4300	225 + 750 (I)	3325	2300	1025

Fundering

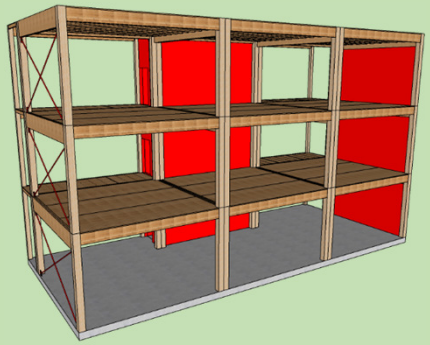
Houtbouw staat bekend als lichte bouwmethode. Dit voordeel heeft een positieve invloed op de dimensionering, uitvoering en fundering. In de tabel hiernaast staan de reactiekrachten per enkele kolom en situatie vermeld. Deze belastingen worden samen met de belasting op de begane grondvloer afgedragen op de fundering. De fundering dient project- en locatie-specifiek getoetst te worden.

Puntlast* op fundering vanuit enkele kolom in kN								
HUF module	Aantal bouwlagen							
	1		2		3		4	
	F_k	F_d	F_k	F_d	F_k	F_d	F_k	F_d
HUF 7.2	62	85	206	280	278	371	421	566
HUF 4.8	42	56	139	188	188	250	285	382
HUF 2.4	21	28	76	102	120	159	161	213

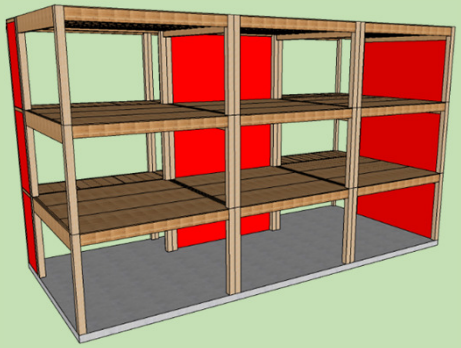
* De puntlasten zijn gebaseerd op een situatie met twee aansluitende gevels (hoekkolom) en dienen voor enkele kolommen. Bij kolomsamenkomsten dient deze belasting vermenigvuldigd te worden met het aantal kolommen.

Stabiliteit

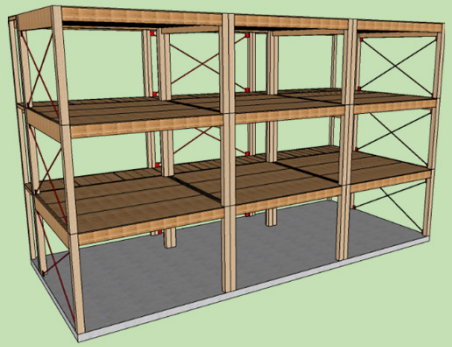
De HUF-modules zijn op zich zelf niet stabiel. Er dienen stabiliteitsvoorzieningen getroffen te worden binnen de ontwikkeling van een project. In onderstaande afbeeldingen staan de stabiliteitsmogelijkheden van het HUF-concept weergegeven:



Stabiliteitsprincipe: Stabiliteitskern, mogelijk i.c.m. windverband en/of wand



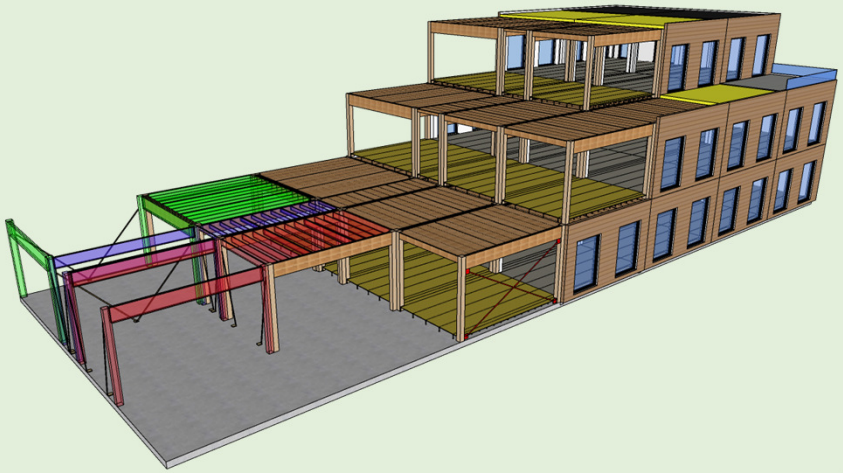
Stabiliteitsprincipe: Stabiliteitswanden



Stabiliteitsprincipe: Windverbanden

Hout + Flexibel = de Toekomst!

Hout U Flexibel biedt middels dit HUF-concept een verfrissende blik op de traditionele ontwerp en bouwwijze waardoor ingespeeld wordt op technische, duurzame, economische, ecologische en politiek-juridische ontwikkelingen in de bouwsector. Dit leidt tot een toekomstbestendige manier van ontwerpen en bouwen.



Het HUF-concept is door Stijn van den Broek en Bob van Alst ontwikkeld als onderdeel van de afstudeerscriptie *Hout U Flexibel*



Stijn van den Broek (links) & Bob van Alst (rechts), overgenomen uit Tech Gelderland, artikel Draagconstructie in hout, fotograaf: Erik van 't Hullenaar

Een houten functie-flexibel utilitair elementenconcept

7.0 Terugblik en aanbevelingen

7.1 Discussie

In de discussie wordt gereflecteerd op de opgedane kennis, de hierbij horende conclusies en gemaakte keuzes. Elke bijlage beschikt over een los hoofdstuk welke is toegewijd aan de discussie. In deze hoofddiscussie staan de meest relevante discussiepunten.

De kwaliteit van het resultaat van de opgestelde enquête binnen het veldonderzoek wordt ter discussie gesteld door het lage aantal respondenten (74) ten opzichte van de beoogde populatiegrootte (377) vanuit voorschriften en door de relatief beperkte beroepsdiversiteit binnen de populatie.

Binnen de hedendaagse utiliteitsbouw wordt de gebruiksfunctie wonen niet genoemd. Echter, binnen het concept wordt deze gebruiksfunctie wel toegepast. Woningbouw betreft een andere manier van ontwerpen door eisen zoals lichte variabele belasting, buitenruimte, brand, geluid, installatie en de gewenste vrije hoogte. Het is dan ook de vraag of de gebruiksfunctie wonen rendabel is binnen het utilitaire functie-flexibele elementenconcept. Bij geïndustrialiseerde woningbouw zijn moduleconcepten mogelijk beter toepasbaar.

Wanneer functie-flexibel ontwerpen wordt toegepast, dient de levensduur van de bouwwerken verhoogd te worden tot 100 jaar om het concept kostentechnisch rendabel te maken. Uit het veldonderzoek is namelijk gebleken dat men eens per 25 jaar een functiewisseling verwacht. Bij een levensduur van 50 jaar betekent dit dat één functiewisseling plaatsvindt. Deze grotere investeringskosten zullen naar verwachting niet opwegen tegen het geringe aantal functiewisselingen binnen 50 jaar. Maar is het wel haalbaar en wenselijk om een gebouw ontworpen op eisen, belastingen en regelgeving van nu voor 100 jaar te gebruiken in verband met ontwikkelingen in eisen, regelgeving en technologie? In de praktijk kan het voorkomen dat dit concept, welke is gebaseerd op minimale bouwbesluiteisen en de vastgestelde gebruiksfuncties, niet voldoet aan het Programma van Eisen van de opdrachtgever. Daarnaast valt te betwijfelen of de extra begininvestering door het overdimensioneren rendabel zijn tegenover de reductie van functie-transitiekosten.

De stramienmaten zijn gebaseerd op betonnen, stalen en houten referentieconstructies. Of het realistisch is om een constructie gebaseerd op bouwwerken met diverse materialisatie uit te voeren in hout of dat houtbouw een eigen manier van construeren dient te krijgen, blijft een vraagstuk.

Tijdens het afstudeeronderzoek is een installatieconcept bepaald aan de hand van een literatuuronderzoek. Het ontbreken van een controle van dit concept door een installatietechnisch adviseur, heeft ertoe geleid dat dit concept als een aanname wordt beschouwd en ter discussie gesteld dient te worden in samenwerking met een betreffende adviseur. Hierbij dienen tevens overige bouwkundige aspecten aan bod te komen.

De multicriteria-analyse is opgebouwd uit criteria met wegingsfactoren. Het anders interpreteren of het vervangen en toevoegen van criteria kan invloed hebben op de resultaten. In het onderzoek zijn voornamelijk constructieve criteria meegewogen. Er is beschouwd dat overige criteria (geluid, vocht, brand, etc.) worden gerealiseerd binnen het verlaagd plafond en de verhoogde vloer. Ook de wegingsfactoren spelen een grote rol binnen de analyse. In de toekomst kunnen bepaalde criteria belangrijker of minder belangrijk worden hetgeen invloed kan hebben op de wegingsfactoren. In verband met de referentieperiode van 100 jaar is dit een complex vraagstuk waarbij meerdere belangen een rol spelen.

7.2 Vervolgstudie

De vervolgstudies zijn gebaseerd op de discussiepunten in hoofdstuk 7.1: *Discussie* en de overige discussies in de bijlagen.

De aangehouden stramienmaten zijn gebaseerd op onderzoeken en referentieprojecten. Een vervolgonderzoek waarbij diverse adviseurs betrokken zijn, zal moeten uitwijzen of deze stramienmaten overeenkomen met de functie-flexibele visie.

Installatietechniek is specialistisch werk, waarbij normaliter installatieadviseurs betrokken zijn bij het ontwerpproces van een gebouw. Dit onderzoek heeft zich kort gericht op het hoogtegebruik van horizontale installatie/distributiesystemen en klimaatbeheersingsconcepten. Een vervolgonderzoek naar functie-flexibele installaties is gewenst voor een beter beeld voor het totaalconcept. Dit is ook van toepassing op brand- en geluidseisen. In dit onderzoek is bepaald dat de constructie brandwerend bekleed wordt. Wanneer constructieve materialen als zichtwerk worden gewenst, dient een vervolgonderzoek uit te wijzen op welke wijze overgedimensioneerd kan worden om aan de eisen te voldoen. Dit kan invloed hebben op de multicriteria-analyse.

In de conclusie is vermeld dat de CLT-vloeren die in twee richtingen afdragen niet tot nauwelijks rendabel zijn binnen de onderzochte varianten. In overige situaties kan het zijn dat een CLT-vloer in twee richtingen afdragend wel rendabel is. In een vervolgonderzoek kan onderzocht worden wanneer een CLT-vloer in twee richtingen een meerwaarde heeft ten opzichte van een vloer die in één richting (op twee steunpunten) afdraagt.

Gedurende de constructieve uitwerking van de variantenstudie is gebleken dat in veel gevallen samengestelde profielen toegepast dienden te worden. Dit betrof dubbele of zelfs driedubbele LVL liggers. De samenwerking tussen de liggers dient gecontroleerd te worden in een vervolgonderzoek.

Uit de materialisering en dimensionering van de kolommen is gebleken dat LVL-kolommen niet standaard geproduceerd worden in grote dimensies. Het koppelen van standaard profielafmetingen wordt door de producent niet geproduceerd en geeft geen garantie op deze uitvoering. In een vervolgonderzoek zal net als in de hierboven staande alinea de koppeling tussen standaard LVL-profielen onderzocht dienen te worden.

Het concept is constructief uitgewerkt middels de belastingen van verdiepingsvloeren. Ook de dakvloeren en liggers zijn gedimensioneerd aan de hand van deze belastingen. Echter, de dakbelasting is kleiner dan de belastingen op de verdiepingsvloer. Een vervolgonderzoek kan uitwijzen of de bovenste bouwlaag geoptimaliseerd kan worden. Dit betreft ook de optimalisatie van de kolomafmetingen per bouwlaag. Of dit opweegt tegen het beperken van de standaardisatie binnen het concept, dient aan de hand van de materialisatiewinst in een vervolgonderzoek onderzocht te worden. Verder dient de dimensionering van de constructieve componenten herzien/geoptimaliseerd te worden waarbij rekening gehouden dient te worden met de verbindingen, sparingen, ψ-factoren, systeemlengtes en stabiliteitsvoorzieningen. Ook kan deze optimalisatie invloed hebben op de multicriteria-analyse en de meest realistische varianten.

Tot slot dient een vervolgonderzoek gewijd te worden aan de verbinding tussen de HUF-modules ten behoeve van de stabiliteit.

8.0 Literatuurlijst

Actieteam Framework. (2021). *Lexicon Circulaire Bouw* (2.0). Platform CB'23. Geraadpleegd van https://platformcb23.nl/aan-de-slag/2020

Blok, R. (2018). *Tabellen voor bouw- en waterbouwkundigen* (10de ed.). Amersfoort , Nederland: ThiemeMeulenhoff bv.

Bouwbesluit. (z.d.-a). *Afdeling 3.6. Luchtverversing*. Geraadpleegd op 30 april 2021, van https://www.bouwbesluitonline.nl/docs/wet/bb2012/hfd3/afd3-6

Bouwbesluit. (z.d.-b). *Afdeling 4.1. Verblijfsgebied en verblijfsruimte*. Geraadpleegd op 30 april 2021, van https://www.bouwbesluitonline.nl/docs/wet/bb2012/hfd4/afd4-1

Bouwbesluit. (z.d.-c). *Afdeling 4.6. Buitenruimte, nieuwbouw*. Geraadpleegd op 30 april 2021, van https://www.bouwbesluitonline.nl/docs/wet/bb2012/hfd4/afd4-6

Bouwbesluit. (z.d.-d). *Artikel 2.10. Tijdsduur bezwijken*. Geraadpleegd op 30 april 2021, van https://www.bouwbesluitonline.nl/docs/wet/bb2012/hfd2/afd2-2/par2-2-1/art2-10

Bouwbesluit. (z.d.-e). *Hoofdstuk 3. Technische bouwvoorschriften uit het oogpunt van gezondheid*. Geraadpleegd op 30 april 2021, van https://www.bouwbesluitonline.nl/docs/wet/bb2012/hfd3

Bouwmeester. (z.d.). *MASSIEVE HOUTBOUW*. Geraadpleegd op 25 februari 2021, van https://www.bouwmeester.be/massieve-houtbouw/

Bronsvoort, E., Veldboer, T., te Slaa, A., & Kaptein, T. (2020). *Bouwen aan een houten toekomst*. Circle Economy. Geraadpleegd van https://assets.website-files.com/5d26d80e8836af2d12ed1269/5fdb7e3e69a4b8a7cc2c7203_20201217%20-%20COP%20Houtbouw%20-%20report%20-%20210x297mm.pdf

Bruggink, G. (2020, 9 oktober). *CLT of HSB: welke houtbouwmethode is beter?* Geraadpleegd op 25 februari 2021, van https://www.orga-architect.nl/nieuws/clt-of-hsb/

Centraal Bureau voor de Statistiek. (2019, 28 november). *Meeste oppervlakteleegstand bij kantoren en winkels*. Geraadpleegd op 5 februari 2021, van https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2019/48/meeste-oppervlakteleegstand-bij-kantoren-en-winkels#:%7E:text=In%202019%20was%20de%20leegstand,neer%20op%20ongeveer%20vijfhonderd%20voetbalvelden.

ClubGreen. (z.d.). *Modificeren, gemodificeerd*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://www.joostdevree.nl/shtmls/modificeren.shtml#:%7E:text=%22Modificeren%20is%20het%20veranderen%20van,het%20weer%20en%20de%20omgeving.

De Groot Vroomshoop B.V. (2020, 1 februari). *Gelamineerd hout - draagconstructies*. Geraadpleegd op 15 april 2021, van https://www.biobasedbouwen.nl/producten/gelamineerde-houtconstructies-de-groot-vroomshoop/

Dijcker, R., & Schepers, O. (2018). *Circulair Ontwerpen in het MIRT-proces*. Rijkswaterstaat. Geraadpleegd van https://puc.overheid.nl/PUC/Handlers/DownloadDocument.ashx?identifier=PUC_158441_31&versienummer=1

Dlubal Software GmbH. (2013). *RF-LAMINATE Calculation and Design of Laminate Surfaces Program Description* (September 2013). Auteur. Geraadpleegd van http://download.dlubal.com/default.aspx?file=manual/en/RF-LAMINATE_E.pdf&mime=application/pdf&force=1

Encyclo. (z.d.-a). *Definitie Biobased*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://www.encyclo.nl/begrip/biobased

Encyclo. (z.d.-b). *Definitie multicriteria-analyse*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://www.encyclo.nl/begrip/multicriteria_analyse#:%7E:text=Definities%20die%20%6multicriteria%60%20bevatten%3A,van%20meer%20dan%20%C3%A9%C3%A9n%20onderscheidingscriterium.

Encyclo. (z.d.-c). *Definities Distributienet*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://www.encyclo.nl/begrip/Distributienet

Encyclo. (z.d.-d). *Definities Houtskeletbouw*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://www.encyclo.nl/begrip/houtskeletbouw

Encyclo. (z.d.-e). *Definities Utiliteitsbouw*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://www.encyclo.nl/begrip/utiliteitsbouw

Eurabo. (z.d.-a). *Glulam*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://www.eurabo.be/nl/lexicon/glulam#:%7E:text=Glulam%20is%20de%20samentrekking%20van,dat%20door%20verlijming%20wordt%20samengesteld.

Eurabo. (z.d.-b). *LVL*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://www.eurabo.be/nl/lexicon/lvl#:%7E:text=LVL%20is%20de%20afkorting%20van,verlijmd%20met%20organische%20watervaste%20bindmiddelen.&text=Deze%20opbouw%20verleent%20LVL%2Dbalken,en%20een%20hoge%20dimensionele%20stabiliteit.

FEBE. (z.d.). *Schijfwerking*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://www.joostdevree.nl/shtmls/schijfwerking.shtml

Finnish Woodworking Industries. (2019, 4 september). *European LVL Handbook*. Geraadpleegd op 13 april 2021, van https://www.metsawood.com/global/Tools/European-LVL-Handbook/Pages/European-LVL-Handbook.aspx

Gillis, J. (2018, 9 oktober). *Wat is het verschil tussen houtskeletbouw en massieve houtbouw?* Geraadpleegd op 25 februari 2021, van https://www.ibc.be/verschil-houtskeletbouw-massieve-houtbouw/#:%7E:text=Bij%20houtskeletbouw%20zit%20er%20meestal,om%20een%20afwerking%20te%20kiezen.

Gustafsson, A. (2019 mei). *The CLT handbook*. Geraadpleegd op 12 april 2021, van https://www.swedishwood.com/publications/list_of_swedish_woods_publications/the-clt-handbook/

Holz.bau. (2009). CLT designer (Versie 7.3) [rekensoftware] (Versie 7.3). Graz, Oostenrijk: Holz.bau. Geraadpleegd van https://www.cltdesigner.at

InfoNu. (2020, 7 januari). *Wat houdt de UC-waarde in bij constructieberekeningen?* Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://wetenschap.infonu.nl/techniek/112369-wat-houdt-de-uc-waarde-in-bij-constructieberekeningen.html#:%7E:text=De%20Unity%20Check%20(UC%2Dwaarde)%20voor%20constructies,-Zowel%20voor%20sterkte&text=De%20mate%20van%20doorbuiging%20of%20vervorming%20mag%20de%20gestelde%20eis,nooit%20de%20100%25%20worden%20behaald.

Kernerman Dictionaries. (z.d.). *CO_2 Nederlands woordenboek - Woorden.org*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://www.woorden.org/woord/CO2

NEN. (2014, 1 juni). *NEN-EN 1995–1-1:2005+A2:2014+NB:2013*. Geraadpleegd op 16 april 2021, van https://www-1briswarenhuis-1nl-1mfpw2abm1017.stcproxy.han.nl/docs/norm/nen-en1995-1-1-2005[3]

Redactie Het Houtblad. (2020, 14 april). *Antwoorden op veelgestelde vragen over houtbouw (longread)*. Geraadpleegd op 25 februari 2021, van https://www.houtwereld.nl/architectuur/antwoorden-op-veelgestelde-vragen-over-houtbouw-longread/#:%7E:text=Wandopeningen%20worden%20in%20HSB%20voorbereid,het%20massieve%20plaatmateriaal%20worden%20uitgefreesd.&text=Een%20belangrijk%20verschil%20tussen%20beiden,gebouwen%20tot%2018%20verdiepingen%20hoog.

RFEM (Versie 5.23) [Structural Analysis & Engineering Software]. (2020). Am Zellweg, Duitsland: Dlubal Software GmbH. Geraadpleegd van https://www.dlubal.com

Storaenso & Holz & Funktion AG. (z.d.). *Hinweise zu Klebstoffen in CLT – Cross Laminated Timber*. Geraadpleegd op 15 april 2021, van https://holzfunktion.ch/wp-content/uploads/2015/03/Holz-Funktion-AG-CLT-Hinweise-zu-Klebstoffen.pdf

TNO. (2021, 19 januari). *Verkennend onderzoek tijdelijke CO_2-opslag houtbouw*. Geraadpleegd op 25 februari 2021, van https://www.tno.nl/nl/over-tno/nieuws/2021/1/verkennend-onderzoek-naar-potentieel-van-tijdelijke-co2-opslag-bij-houtbouw/

van der Lugt, P., & Harsta, A. (2020). *Tommorrow's Timber*. Naarden, Nederland: MaterialDistrict.

Wikipedia-bijdragers. (2019, 9 september). *Poisson-factor*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://nl.wikipedia.org/wiki/Poisson-factor#:%7E:text=Poisson%2Dfactoren%20in%20beide%20loodrechte,zijn%20gelijk%20bij%20isotroop%20materiaal.&text=Wanneer%20men%20in%20x%2Drichting,in%20dit%20geval%20smaller%20wordt.

Wikipedia-bijdragers. (2021a, 24 januari). *Kruislaaghout*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://nl.wikipedia.org/wiki/Kruislaaghout#:%7E:text=Kruislaaghout%20(Engels%3A%20Cross%20Laminated%20Timber,wordt%20gebruikt%20in%20de%20bouw.

Wikipedia-bijdragers. (2021b, 12 maart). *Klimaatakkoord*. Geraadpleegd op 10 mei 2021, van https://nl.wikipedia.org/wiki/Klimaatakkoord