



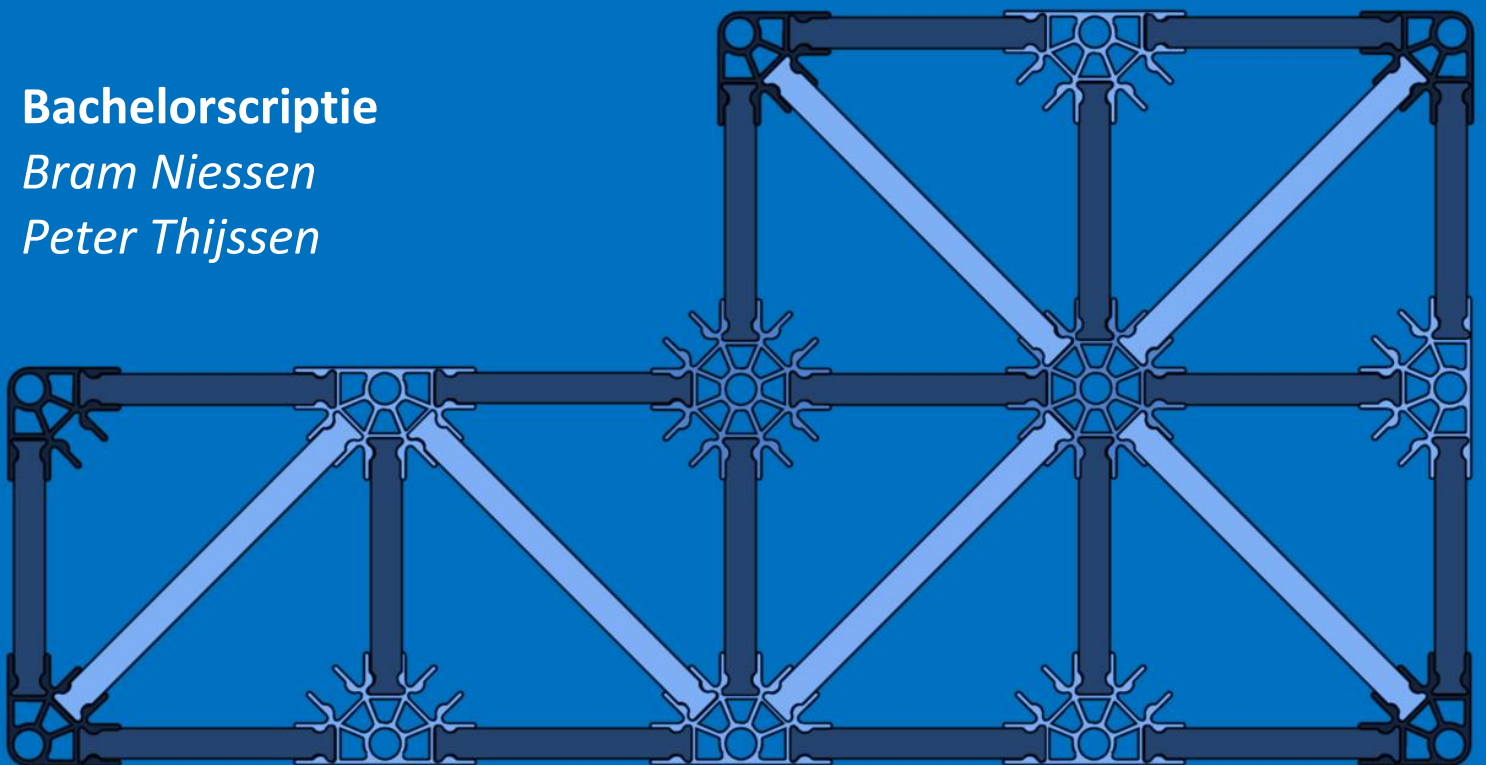
Knexeren van hoofdraagconstructies

HOOFDRAPPORTAGE

Bachelorscriptie

Bram Niessen

Peter Thijssen



Auteurs:

Bram Niessen
Peter Thijssen

Studentnummer:

566773
549703

Afstudeerbedrijf:

JVZ ingenieurs

Bedrijfsbegeleiders:

Ivo van den Bosch
Pieter Willemsen

Opleiding:

Bouwkunde

Eerste begeleider:

Jaap Rikken

Afstudeerrichting:

Constructie

Tweede begeleidster:

Ellen Rutgers

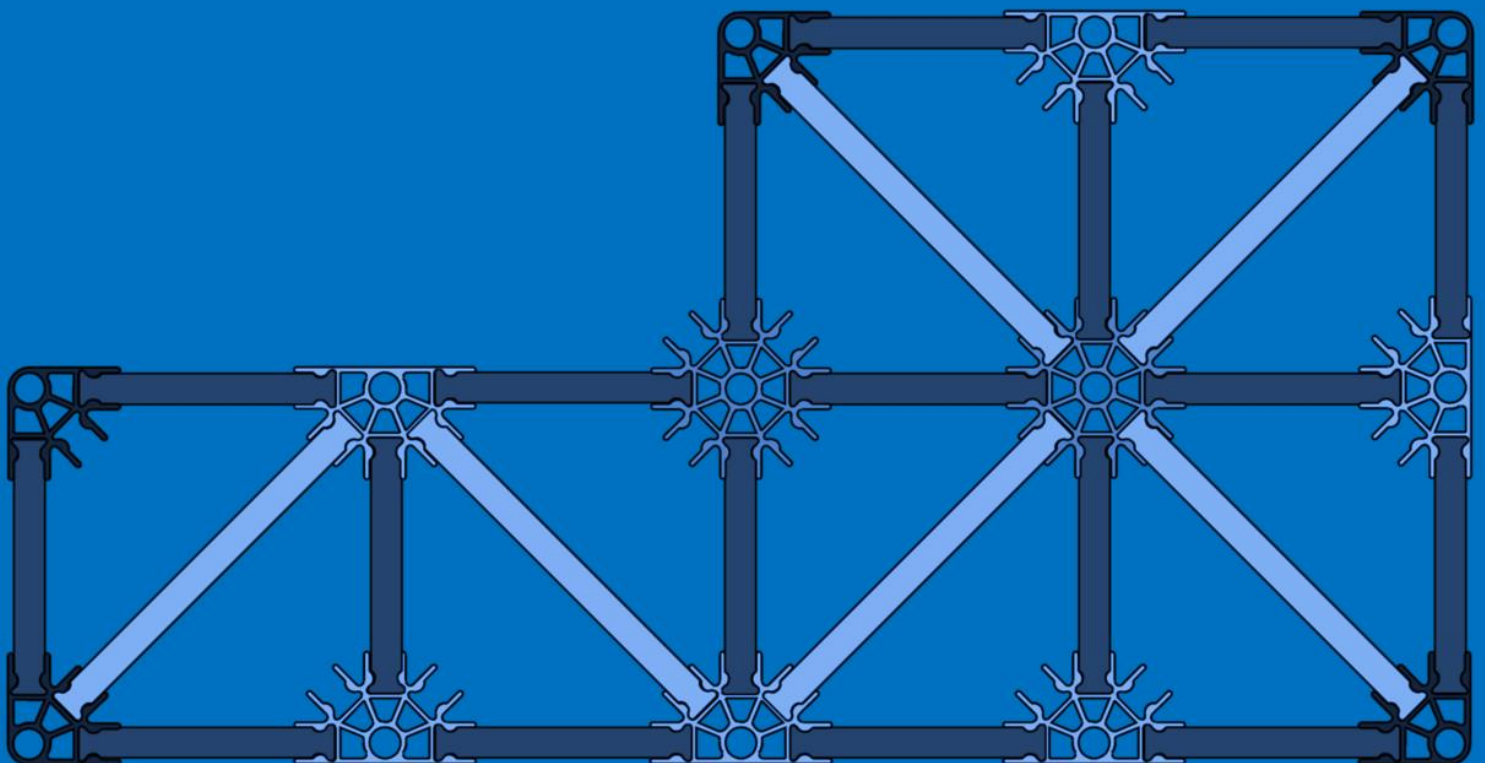
Onderwijsinstelling:

Hogeschool van Arnhem
en Nijmegen

**Datum:**

25 Mei 2018

Omslagfoto, Root B.V., www.root-bv.nl



Voorwoord

Voor u ligt de bachelorscriptie ‘Knexering van hoofddraagconstructies’. Dit onderzoek is de afsluitende proeve van bekwaam van de opleiding “Bouwkunde”, afstudeerrichting ‘Constructie’ aan de Hogeschool Arnhem Nijmegen te Arnhem. Medio 2017 zijn we begonnen aan de voorbereiding van het afstuderen. Vanaf februari 2018 tot en met mei 2018 zijn we bezig geweest met het uitvoeren van het afstudeeronderzoek bij JVZ raadgevend ingenieurs te Nijmegen.

Mede door het onderzoek “Constructieve “plug and play”-verbindingen in tuinbouwkassen” van ing. Rob J.G. Groenendijk zijn wij geïnspireerd geraakt om onderzoek te doen naar “Plug & Play”-verbindingen. Na inlezen over de onderwerpen rondom “Plug & Play”-verbindingen, blijkt de milieubelasting van de bouwsector een groot maatschappelijk probleem te zijn. Door het slim inzetten van “Plug & Play”-verbindingen, met als aanleiding de problematiek rondom de milieubelasting, is het bouwprincipe “knexeren” ontstaan. “Knexeren” is het combineren van “Plug & Play”-verbindingen in een modulair bouwsysteem. Met dit onderzoek dragen wij, op onze manier, bij aan de reductie van de milieubelasting in de bouwsector.

In dit onderzoek is de meest geschikte stalen “Plug & Play”-verbinding om hoofddraagconstructies te knexeren gevonden. Met dit doel voor ogen is een literatuurstudie uitgevoerd welke als fundament dient voor de variantenstudie. De variantenstudie is uitgevoerd middels een multicriteriumanalyse. Met de verkregen resultaten zijn conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

Bij het onderzoek is door verschillende experts een belangrijke bijdrage geleverd. Hiervoor willen wij graag onze dank betuigen. Allereerst willen wij, voor het faciliteren van werkplekken en interne kennis, JVZ raadgevend Ingenieurs bedanken. Met in het bijzonder onze begeleiders Ivo van den Bosch en Pieter Willemssen. Vervolgens willen wij onze begeleiders vanuit de Hogeschool Arnhem Nijmegen, Jaap Rikken en Ellen Rutgers bedanken. Ook danken wij Rob Groenendijk voor de inspiratie welke aanleiding gaf tot dit onderzoek. Tevens zijn wij dankbaar voor de bijdrage en medewerking van de bedrijven: Inalfa-Roofsystems en Item. Zo ook Marco Pauw, hoofdredacteur van het vakblad Bouwen met Staal. Verder willen wij Susan Hendriks bedanken voor haar bijdrage op taalkundig gebied. Tot slot gaat onze dank uit, naar de overige mensen die een bijdrage aan ons onderzoek geleverd hebben.

Indien bij een figuur, grafiek of tabel geen bronvermelding benoemd is, is er sprake van eigen werk van Bram Niessen en Peter Thijssen.

Wij wensen u veel leesplezier.

Bram Niessen en Peter Thijssen

Nijmegen, 25 mei 2018



Samenvatting

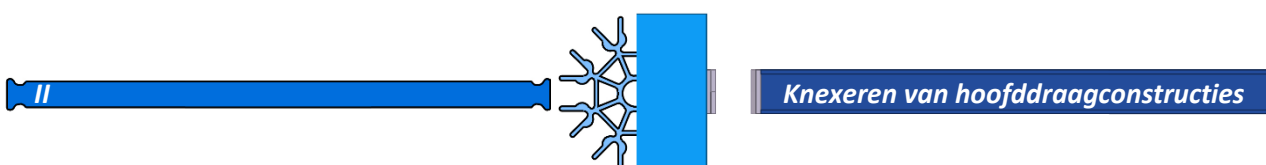
De huidige bouwsector kent een hoge milieubelasting. Dit komt door de winning van, de voor productie van bouwmaterialen, benodigde grondstoffen. Bij de winning van deze grondstoffen wordt veel fossiele brandstof verbruikt. De productie van halffabricaten (bijvoorbeeld gewalste profielen) veroorzaakt 75% van de Co₂ uitstoot in het productieproces van stalen hoofddraagconstructies. In het door Bouwend Nederland en 180 andere partijen ondertekende grondstoffenakkoord, is vastgelegd dat de milieubelasting van de bouwsector in 2030 met 50% gereduceerd dient te worden ten opzichte van 2014. Tevens legt dit akkoord vast, dat Nederland in 2050 geheel circulair dient te zijn op gebied van grondstofgebruik. Het feit dat ca. 80% van de stalen constructiedelen worden geproduceerd uit omgesmolten schroot, bewijst dat er nog genoeg ruimte is voor verbetering. (Durmisevic en Noort, Z.D.)

“Knexeren van hoofddraagconstructies” is een mogelijke oplossing. Met het zelfverzonnen begrip “knexeren” wordt een IFD (Industrieel, Flexibel en Demontabel) bouwprincipe bedoeld, dat bestaat uit het combineren van “Plug & Play”-verbindingen in een modulair bouwsysteem. Knexeren is afgeleid van het constructieve speelgoed “K’NEX”. Aangezien het onbekend is welke “Plug & Play”-verbinding het meest geschikt is om stalen hoofddraagconstructies te knexeren, wordt het in de praktijk brengen hiervan belemmerd. De doelstelling van het onderzoek is dan ook, het vinden van ‘De meest geschikte constructieve “Plug & Play”-verbinding om stalen hoofddraagconstructies te knexeren’.

Het onderzoek bestaat uit een variantenstudie, waaruit blijkt welke “Plug & Play”-verbinding het meest geschikt is om hoofddraagconstructies te knexeren. De variantenstudie beschouwt vijf “Plug & Play”-verbindingen, die het meest in aanmerking komen om hoofddraagconstructies te knexeren. Deze variantenstudie is vormgegeven met een multicriteriumanalyse. In deze multicriteriumanalyse is de montabelbaarheid, demontabelbaarheid, fabricage, capaciteit, technische flexibiliteit, materiaalgebruik en de esthetica van de verbindingen beschouwd.

Dit onderzoek toont aan dat de Snap-fitverbinding de meeste geschikte “Plug & Play”-verbinding is om te knexeren. De verbinding scoort voornamelijk hoog op het gebied van capaciteit en montabelbaarheid. Op de overige criteria scoort de Snap-fitverbinding boven gemiddeld. Echter is de score op het gebied van fabricage minder goed. Dit onderzoek geeft mogelijke optimalisaties in de vorm van schetsontwerpen.

De Snap-fitverbinding is de aanbevolen “Plug & Play”-verbinding om stalen hoofddraagconstructies te knexeren. Bij het in praktijk brengen van “knexeren”, wordt verdere optimalisatie van deze verbinding aanbevolen. Dit onderzoek toont de technische haalbaarheid van “knexeren” aan. Om de haalbaarheid van “knexeren” volledig aan te tonen dient de economische- en maatschappelijke haalbaarheid onderzocht te worden.



Summary

The current build environment has a high environmental impact. This is due to the extraction of the raw materials required for the production of building materials. In the extraction of these raw materials, large quantities of fossil fuel is used. The production of intermediate semi-finished products (for example: steel sections) causes 75% of the Co2 emission in the production process of steel loadbearing constructions. In the raw materials agreement (grondstoffenaccord), signed by "Bouwend Nederland" and other parties, it has been agreed on the case that the environmental impact of the build environment has to be reduced by 50% in 2030 compared to 2014. This agreement also stipulates that the Netherlands will be completely circular in 2050. The fact that about 80% of the steel components are produced from re-melted scrap, proves that there is still enough space for improvement. (*Durmisevic and Noort, W.D.*)

"Knexing of loadbearing structures" is a possible solution. With the self-invented term "knexing" is meant an IFD (Industrial, Flexible and De-mountable) construction principle, where "Plug & Play"-connections are used in combination with a modular building system. 'Knexing' is derived from the constructive toy "K'NEX". Putting it into practice is hampered, since it is unclear which "Plug & Play" connection is the most suitable connection for 'knexing' of steel loadbearing structures. Therefore, the aim of this research is to find 'The most suitable constructive "Plug & Play" connection for 'knexing' steel loadbearing structures.

This research consists of a comparative study that shows the most suitable "Plug & Play" connection for 'knexing' steel loadbearing structures. The comparative study considers five "Plug & Play" connections, which are most suitable for 'knexing' loadbearing constructions. This comparative study has been given form with a multi-criterion analysis. This multi-criterion analysis considers the ability to mount, ability to dismount, manufacturing, capacity, technical flexibility, material use and the aesthetics of the connections.

This study shows that the Snap-fit-connection is the most suitable "Plug & Play" connection for 'knexing' loadbearing structures. The Snap-fit connection scores high on capacity and the ability to mount. The Snap-fit connection scores above average, on the other criteria. However, the score in the field of manufacturing is worse. This research provides possibilities to optimize. These possibilities are given in the form of sketch designs.

The Snap-fit connection is the recommended "Plug & Play" connection for 'knexing' loadbearing structures. Further optimization of this connection is recommended, in case of bringing "knexing" to practice. To fully approve the feasibility of "knexing", the economic and social feasibility must be investigated. This research approves the technical feasibility of "knexing".



Zusammenfassung

Den heutige Bausektor kennt eine hohe Umweltbelastung. Dies ist auf die Gewinnung von Rohstoffen zur Herstellung von Baustoffen zurückzuführen. Bei der Gewinnung der Rohstoffen wird viel fossiler Brennstoff verbraucht. Die Produktion von Halbfabrikaten (Zum Beispiel Gewalzte Profilen) verursacht 75% von den Co2 Ausstoß im den Produktionsprozess von Stahlen Hauptstützkonstruktionen. In den durch "Bouwens Nederland" und 180 andere Parteien unterzeichnetet Grundstoffen vertrag, ist festgelegt das die Umweltbelastung von der Bausektor in 2030 mit 50% reduziert dient zu werden gegenüber 2014. Diese vertrag legt auch fest das dies in die Niederlande in 2050 ein vollständig kreisförmig Prozess sein muss auf den gebiet von Rohstoffverbrauch .

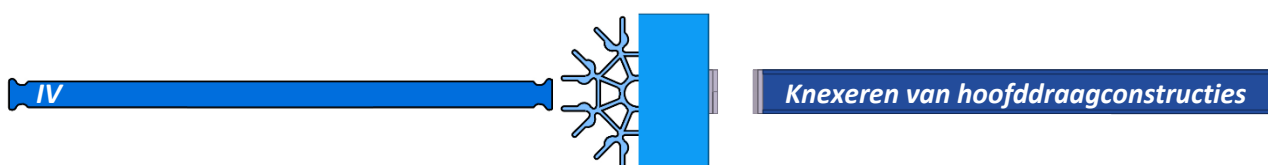
Die Tatsache, dass etwa 80% von die stahlen Konstruktion teilen produziert werden aus umgeschmolzene Schrott, beweist dass noch genügend Raum für Verbesserung besteht. (Durmisevic und Noort, o.D.)

"Knexierung von Hauptstützkonstruktionen" ist eine mögliche Lösung. Im das Selbst erfundene Begriff "Knexierung" wird ein IFD-Bauprinzip gemeint dass besteht aus es Kombinieren von "Plug & Play"-Verbindungen in einen modularen Bausystem. Knexieren ist abgeleitet von den Spielzeug "K'NEX". Da nicht bekannt ist welche "Plug & Play"-Verbindung am meist geeignet ist um Stahlen Hauptstützkonstruktionen zu Knexieren, wird die Umsetzung in der Praxis behindert. Ziel der Forschung ist daher das Finden von die am beste geeignete Konstruktiven "Plug & Play"-Verbindung um Stahlen Hauptstützkonstruktionen zu Knexieren.

Die Studie besteht aus eine Variantenstudie, was zeigt welche „Plug & Play“ Verbindung am meisten geeignet ist um Hauptstützkonstruktionen zu Knexieren. Die Variantenstudie Betrachtet fünf "Plug & Play"-Verbindungen, die am besten geeignet sind, Hauptstützkonstruktionen zu Knexieren. Die Variantenstudie wurde mit einer Multi-Kriterien-Analyse Entwickelt. In diesen Multi-Kriterien-Analyse ist die Mon- und Demontierbarkeit, Herstellung, Kapazität, Technische Flexibilität, Material Verwendung und die Ästhetik der Verbindungen berücksichtigt.

Diese Studie seicht das die Snap-Fit-verbindungen die meist geeignete "Plug & Play"-Verbindung ist für das Knexieren. Diese Verbindung Punktet vor allen hinsichtlich auf Kapazität und Montierbarkeit. Auf der Übrige Kriterien punkt die Snap-Fit-verbindung überdurchschnittlich. Das Ergebnis der Herstellung ist jedoch weniger gut. Diese Studie bietet mögliche Optimierungen in Form von Skizzen.

Die Snap-Fit-verbindung ist die empfohlene "Plug & Play"-Verbindung um Stahlen Hauptstützkonstruktionen zu Knexieren. In der Praxis von Knexieren wird weiter Optimierung von diese Verbindung empfohlen. Diese Studie seicht die Technische Machbarkeit von Knexierung an. Um die Machbarkeit von Knexierung vollständig zu beweisen dient den Wirtschaftliche- und Soziale Machbarkeit untersucht zu werden.

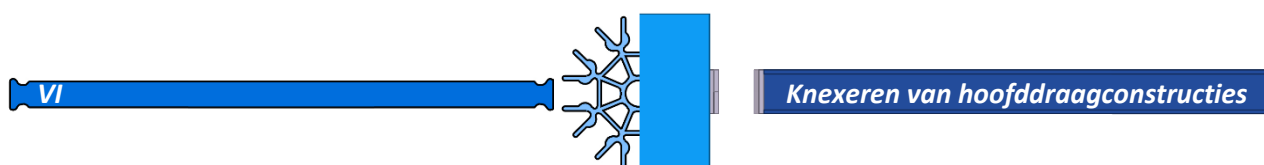


Inhoudsopgave:

Voorwoord	I
Samenvatting	II
Summary	III
Zusammenfassung	IV
Hoofdstuk 1: Inleiding	1
1.1 Opzet van het onderzoek	1
1.2 Afbakening van het onderwerp	2
1.2.1 Aanleiding	2
1.2.2 Probleem beschrijving	2
1.2.3 Probleemstelling	2
1.2.4 Doelstelling	3
1.2.5 Vraagstelling	3
1.2.6 Onderdelen van het onderzoek	4
1.2.7 Naslagwerk	4
1.3 Knexeren toegelicht	5
Hoofdstuk 2: Uitgangspunten	6
2.1 De verbindingen	6
2.1.1 Bajonetverbinding	7
2.1.2 Kluftverbinding	8
2.1.3 Con-X-verbinding	9
2.1.4 Quiconverbinding	10
2.1.5 Snap-fitverbinding	11
2.2 Vergelijkingscriteria	12
2.3 Gelijktelling van de profilering	12
2.4 Casus	14
2.5 Normen en richtlijnen	15
2.6 Materiaalgebruik	15
2.7 Toegepaste computersoftware	15
Hoofdstuk 3: Achtergronden	16
3.1 Modulair bouwen	16
3.2 Knexeren is IFD	17
3.2.1 IFD of niet?	17
3.3 Reductie milieubelasting	18
3.4 Bijdrage van kennis uit andere sectoren	18
3.4.1 Automotive	19
3.4.2 Werktuigbouwkunde	19



Hoofdstuk 4: Variantenstudie	20
4.1 Algemeen	20
4.1.1 Multicriterium-keuzematrix	21
4.1.2 Wegingsfactoren	22
4.1.3 Waardering van de criteria	23
4.2 Montabelbaarheid	24
4.2.1 Intensiteit montagehandelingen	24
4.2.2 Hoeveelheid montagehandelingen	25
4.3 Demontabelbaarheid	26
4.4 Fabricage	27
4.5 Capaciteit	28
4.5.1 Wegingsfactoren	29
4.5.2 Resultaten	29
4.5.3 Methode	29
4.6 Technische flexibiliteit	32
4.6.1 Variatie in capaciteit	32
4.6.2 Toepassingsgebieden	33
4.6.3 Beoordelingsmethode	33
4.7 Materiaalgebruik	34
4.7.1 Gewicht per verbinding	34
4.7.2 Efficiëntie	35
4.8 Esthetica	36
Hoofdstuk 5: Optimalisatie	37
5.1 Optimalisatie 2 (Snap-fit): Dubbele versimpelde zwaluwstaart + zelfborging	37
5.2 Optimalisatie (knexeren): ITP-verbinding	38
Hoofdstuk 6: Conclusie	40
Hoofdstuk 7: Discussie	41
Hoofdstuk 8: Aanbevelingen	42
Hoofdstuk 9: Literatuurlijst	43
Hoofdstuk 10: Bijlagen	46



Hoofdstuk 1: Inleiding

Dit hoofdstuk bevat de opbouw van deze onderzoeksrapportage. Per onderdeel wordt kort toegelicht wat deze inhoud.

1.1 Opzet van het onderzoek

Dit onderzoek bestaat uit de volgende onderdelen:

- Afbakening onderwerp;
- Uitgangspunten van de variantenstudie;
- Achtergronden;
- Variantenstudie;
- Optimalisatie.

Afbakening onderwerp (Paragraaf 1.2)

Bij de afbakening van het onderwerp, is de doelstelling met bijbehorende probleemanalyse toegelicht. Ook is de hoofdvraag van het onderzoek belicht, met de daarbij horende deelvragen.

Uitgangspunten van de variantenstudie (Hoofdstuk 2)

In het onderdeel “Uitgangspunten van de variantenstudie” is aandacht besteed aan de toelichting van de uitgangspunten voor de variantenstudie.

Achtergronden (Hoofdstuk 3)

Het onderdeel “Achtergronden” is gebaseerd op literatuuronderzoek (“*Deelrapportage 1: Literatuurstudie*”). De literatuurstudie van dit onderzoek heeft voornamelijk een voorbereidende functie voor de variantenstudie en de optimalisatie. Ook is de combinatie van de termen “IFD”, “Plug & Play” en “Knexeren” toegelicht. Tevens is met dit literatuuronderzoek antwoord gegeven op enkele deelvragen.

Variantenstudie (Hoofdstuk 4)

De variantenstudie beslaat het grootste gedeelte van het onderzoek. Bij de variantenstudie zijn vijf relevante “Plug & Play”-verbindingen met elkaar vergeleken. Er is uiteindelijk een keuze gemaakt voor “de beste” verbinding omtrent het knexeren van hoofddraagconstructies. Deze keuze is gemaakt met behulp van een multicriteriumanalyse. De criteria, met de bijbehorende wegingsfactoren in deze multicriteriumanalyse, zijn bepaald voor het vergelijken van de verschillende “Plug & Play”-verbindingen in een geknexeerde hoofddraagconstructie. In de variantenstudie zijn de wegingsfactoren bepaald voor de criteria, zijn de prestaties van de verbindingen per criterium bepaald en is de waardering aan de hand van deze prestaties per verbinding weergegeven.

Optimalisatie (Hoofdstuk 5)

Het onderdeel “optimalisatie” is een handvat voor eventuele optimalisaties van de winnende verbinding uit de variantenstudie.

Tot slot zijn er conclusies getrokken (Hoofdstuk 6), vindt er discussie plaats (Hoofdstuk 7) en is er ruimte voor aanbevelingen (Hoofdstuk 8).



1.2 Afbakening van het onderwerp

Deze paragraaf is opgebouwd, door eerst de aanleiding van het onderzoek te benoemen en vervolgens de probleembeschrijving met de bijbehorende probleemstelling, waarop volgend, de doelstelling van het onderzoek is omschreven. Na de doelstelling, wordt de vraagstelling van het onderzoek behandeld. Vervolgens vindt een stuk afbakening van dit onderzoek plaats. Tot slot is het naslagwerk verantwoord.

1.2.1 Aanleiding

De aanleiding van dit onderzoek is de hoge milieubelasting van de bouwsector. De bouwsector is een grootgebruiker van grondstoffen. Deze grondstoffen worden grotendeels gebruikt voor de productie van bouwmaterialen van gebouwen. Bij de productie van deze bouwmaterialen en de winning van hun grondstoffen worden veel fossiele energiebronnen gebruikt. Dit is zeer belastend voor het milieu. Volgens het grondstofenakkoord, dat in 2017 ondertekend is door 180 grote partijen in de bouwsector, moeten de direct uit de aarde gewonnen grondstoffen in 2030 met 50% gereduceerd zijn ten opzichte van 2014. Het is zelfs zo dat Nederland in 2050 geheel circulair dient te zijn. Dit betekent een 100% reductie van het grondstofgebruik. (van Veen, Peschier en Stichting Stimular, 2017)

Bij de productie van (nieuw) constructiestaal wordt 80% geproduceerd uit schroot en 50% van de constructiedelen wordt hergebruikt na een aantal kleine aanpassingen. (Bouwen met Staal, 2018) Echter dient er voor overige constructiedelen steeds nieuw halffabricaat (bijvoorbeeld onbewerkte gewalste profielen) geproduceerd te worden. Aangezien het produceren van halffabricaten circa 75% van de Co₂ uitstoot veroorzaakt in het productieproces van stalen hoofddraagconstructies, is hier nog genoeg ruimte voor verbetering. (Durmisevic en Noort, z.d.)

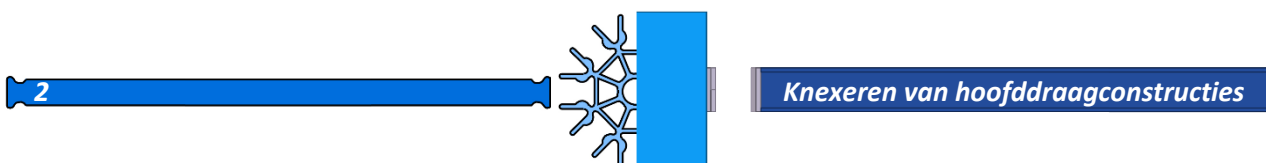
1.2.2 Probleem beschrijving

Om bij te dragen aan een reductie van de milieubelasting van de bouwsector is het “knexeren” in het leven geroepen. Knexeren is een IFD (Industrieel, Flexibel en Demontabel) bouwprincipe, waarbij het doel hoofdzakelijk, het reduceren van de milieubelasting van de bouwsector is. Omdat er meerdere “Plug & Play”-verbindingen bestaan, die het mogelijk maken om te knexeren, is het moeilijk de meest geschikte verbinding te vinden. Het is namelijk zo dat knexeren mogelijk niet aantrekkelijk is om in de praktijk te brengen, wanneer enkel de reductie van de milieubelasting als voordeel wordt gezien. De technische haalbaarheid dient aangetoond te worden en er dient een goede basis voor het knexeerprincipe te zijn voordat het in de praktijk kan worden gebracht.

1.2.3 Probleemstelling

De probleemstelling is als volgt geformuleerd:

Onbekend is welke constructieve “Plug & Play”-verbinding het meest geschikt is om een stalen hoofddraagconstructie te knexeren. Daardoor wordt het in de praktijk brengen van knexeren belemmerd.



1.2.4 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is als volgt geformuleerd:

De meest geschikte constructieve “Plug & Play”-verbinding vinden om stalen hoofddraagconstructies te knexeren.

1.2.5 Vraagstelling

Op basis van de doelstelling is de onderzoeksvraag afgeleid. Tevens zijn deelvragen opgesteld die leiden tot het beantwoorden van de onderzoeksvraag.

De hoofdvraag is:

Welke bestaande stalen constructieve “Plug & Play”-verbinding is de meest geschikte verbinding om hoofddraagconstructies te knexeren?

De deelvragen hierbij zijn:

- *Welke criteria zijn belangrijk om de prestaties van de verschillende “Plug & Play”-verbindingen aan te toetsen?*
- *Hoe zwaar weegt elk criteria mee voor de prestaties van de verschillende “Plug & Play”-verbindingen?*
- *Hoe presteren de verschillende bestaande “Plug & Play”-verbindingen ten opzichte van elkaar?*

Extra vraagstukken om de technische haalbaarheid van knexeren te versterken zijn:

- *Hoe valt deze “meest geschikte” verbinding nog verder te optimaliseren?*
- *Wordt de milieubelasting door de bouwsector gereduceerd door stalen hoofddraagconstructies van gebouwen te knexeren?*

Opmerking: De definitieve hoofdvraag en deelvragen wijken licht af van de in de definitieve plan van aanpak gestelde hoofd- en deelvragen. Dit komt door gewijzigde prioriteitstelling tijdens het onderzoek ten opzichte van het plan van aanpak.



1.2.6 Onderdelen van het onderzoek

Om af te bakenen wat er wel en niet wordt onderzocht, zijn in deze paragraaf de onderdelen van het onderzoek vastgesteld.

Dit onderzoek betreft een variantenstudie, waarbij uitsluitend de vijf geselecteerde bestaande “Plug & Play”-verbindingen worden beschouwd.

De haalbaarheid van het knexeren wordt enkel vanuit het technische aspect belicht. Andere haalbaarheidseisen, zoals economische- en maatschappelijke haalbaarheid, betreffende het knexeren zijn buiten beschouwing gelaten.

Bij het bepalen van de capaciteit van de verschillende verbindingen is uitgegaan van de toepassing in een geschoord systeem. Dit omdat het vergelijk op verbindingsniveau gedaan is en niet op constructiedeelniveau.

De verbindingen worden enkel in één casus geplaatst om met enkele toepassingsgebieden de technische flexibiliteit van de verbindingen te kunnen waarderen. Buiten de casus voor technische flexibiliteit, wordt er niet ingegaan op casussen.

De prestaties van de verbindingen op de verschillende criteria, worden bepaald aan de hand van beschikbare literatuur of zelf gegenereerde resultaten.

1.2.7 Naslagwerk

Dit onderzoek is gedocumenteerd in verschillende naslagwerken. Buiten deze hoofdrapportage, bestaan deze naslagwerken uit een aantal deelrapportages. Waar nodig is verwezen naar het naslagwerk.

De deelrapportages zijn:

- *Deelrapportage 1: Literatuurstudie*
- *Deelrapportage 2: Variantenstudie & Optimalisatie*
- *Deelrapportage 3: Programma van Eisen*
- *Deelrapportage 4: Plan van Aanpak*
- *Deelrapportage 5: Procesmap*

**Opmerking: Enkele deelrapporten zijn uitsluitend op aanvraag beschikbaar.*

1.3 Knexeren toegelicht

‘Knexeren’ is een term met veel betekenis voor dit onderzoek. Knexeren is een zelfverzonnen begrip. Dit begrip is als volgt te beschrijven:

Knexeren is een IFD (Industrieel, Flexibel en Demontabel) bouwprincipe dat bestaat uit het combineren van “Plug & Play”-verbindingen in een modulair bouwsysteem. Deze methode van bouwen is te relateren aan de wijze waarop het constructieve speelgoed “K’NEX” werkt. Het begrip knexeren is daarom een afgeleide van de naam “K’NEX”.

K’NEX is een constructief speelgoed uitgevonden door Joel Glickman, in 1989. (K’NEX, 2018)



Figuur 1: Illustrenderende vergelijking van K’NEX met een dragende constructie (Root B.V., Z.D.)

“Knexeren” deelt zijn filosofie met dat van het constructieve speelgoed. Bij knexeren wordt namelijk middels “Plug & Play”-verbindingen, in combinatie met modulaire bouwsystemen, simpliciteit van het bouwproces gewaarborgd. Door de simpliciteit is de kans op falen in de uitvoering te verminderen. De simpliciteit van het bouwproces vereist geen hoge mate van vakkundigheid.

Dit is voordelig voor de grote vraag naar vakkundig personeel in de bouwsector. (Doodeman, 2018)

Net zoals bij K’NEX, kan iedereen bouwen met/aan een geknexeerde hoofddraagconstructie. Ook stimuleert het knexeren van hoofddraagconstructies een tweede leven van een constructiedeel. Door de simpliciteit en modulariteit, maar boven alles ook de demontabelbaarheid van geknexeerde hoofddraagconstructies, is het één op één hergebruik van constructiedelen mogelijk.

De term “Plug & Play”-verbinding is afgeleid uit de computerindustrie. Daarbij is het principe gebaseerd op ‘klik en klaar’. Doormiddel van een aantal simpele handelingen, kan een verbinding gemaakt worden. (Bijlaard en Brekelmans, 2008).

“Plug & Play”-verbindingen vallen onder de vormverbindingen. Vormverbindingen worden met elkaar verbonden zonder “hulpmiddel”. Door de vorm van de elementen passen deze in elkaar zonder gebruik te maken van schroeven, bouten of lassen (zie Figuur 2). De gedachtegang van “Plug & Play”-verbindingen is het reduceren van de montagetijd.

(Durmisevic E. & Brouwer J, 2016)



Figuur 2: Vormverbinding (Contimeta, 2018)

Hoofdstuk 2: Uitgangspunten

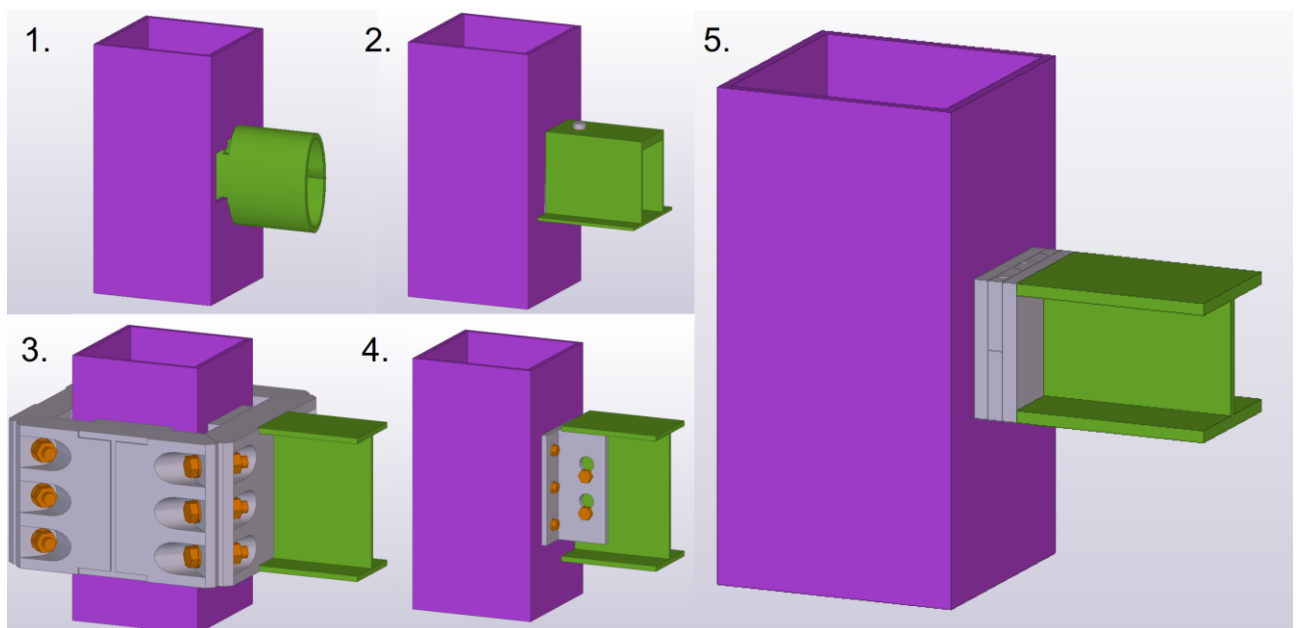
In dit hoofdstuk wordt er kennis gemaakt met ‘de verbindingen’ die in dit onderzoek met elkaar vergeleken zijn. Daarnaast is de werkwijze van de variantenstudie toegelicht en zijn de overige randvoorwaarden en eisen in beeld gebracht.

2.1 De verbindingen

De “Plug & Play”-verbindingen, waar dit onderzoek het vergelijk tussen maakt, zijn geselecteerd door hun relevantie met knexeren. De eisen van knexeren worden verder toegelicht in: *“Deelrapportage 3: Programma van Eisen + Casusbeschrijving”*.

De “Plug & Play”-verbindingen zijn:

- Bajonetverbinding (1);
- Kluftverbinding (2);
- Con-X-verbinding (3);
- Quiconverbinding (4);
- Snap-fitverbinding (5).



Figuur 3: Geselecteerde plug & play verbindingen (Tekla structures (Versie TS 2017i))

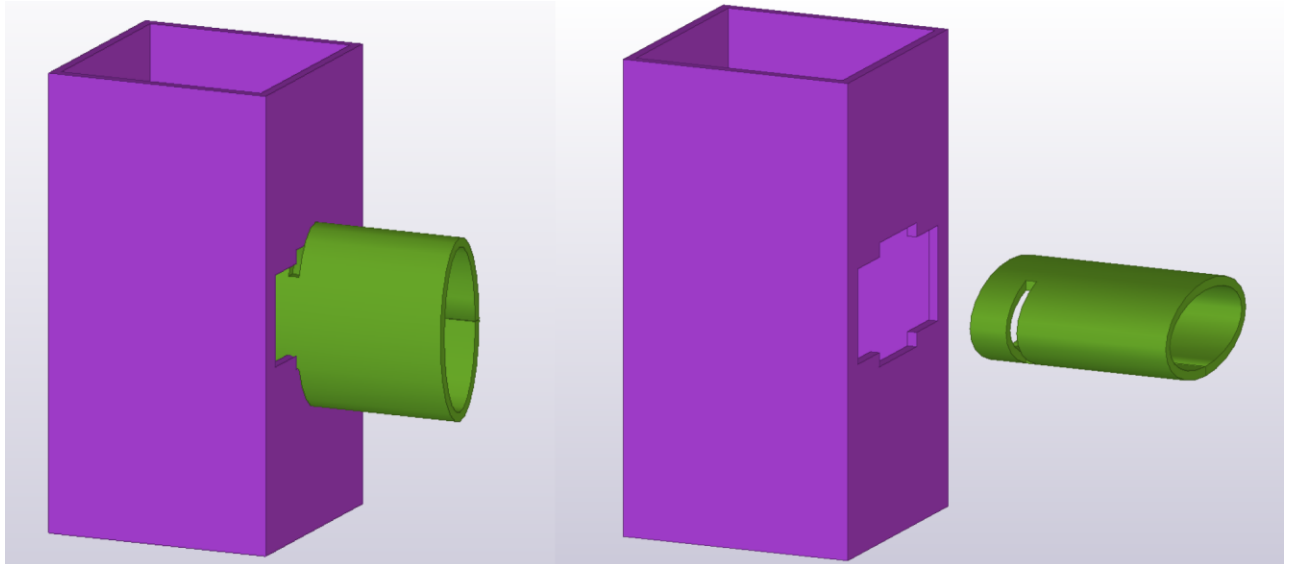
De volgende paragrafen lichten de verbindingen individueel, in het kort toe, door aan te geven waar de verbindingen hun oorsprong vinden en hoe dat de verbindingen zijn opgebouwd.

Uitgebreide toelichting op de krachtsafdracht en andere specificaties van de verbindingen zijn te vinden in: *“Deelrapportage 2: Variantenstudie + Optimalisatie”*.



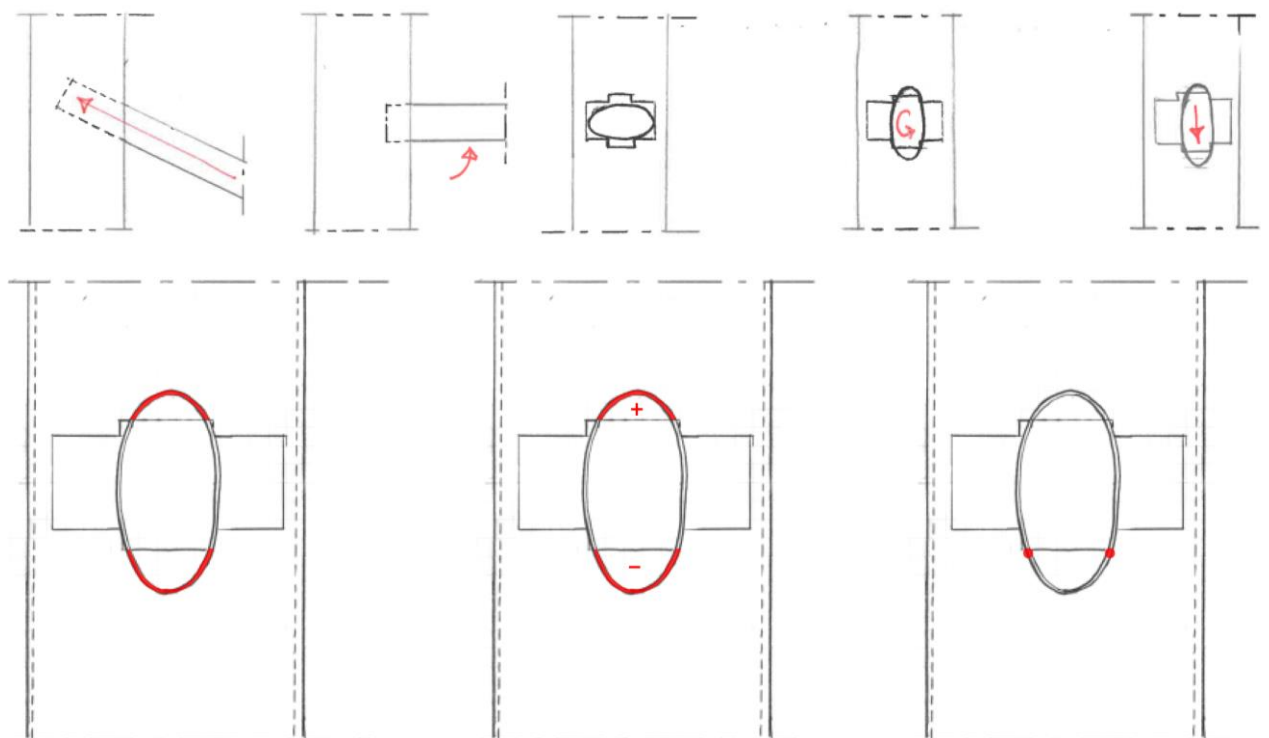
2.1.1 Bajonetverbinding

De bajonetverbinding, zoals deze te zien is in *Figuur 4*, vindt zijn oorsprong in de masterdissertatie “Constructieve “Plug and Play” verbindingen in tuinbouwkassen” (Groenendijk, 2017). Groenendijk heeft de verbinding ontworpen, om in de kassenbouw, de verbinding tussen kolommen en koppelkokers in een stabiliteitsverband, “Plug & Play” te maken. (Groenendijk, 2017)



Figuur 4: Bajonetverbinding (gemonteerde toestand links, niet gemonteerde toestand rechts) (Tekla structures (Versie TS 2017i))

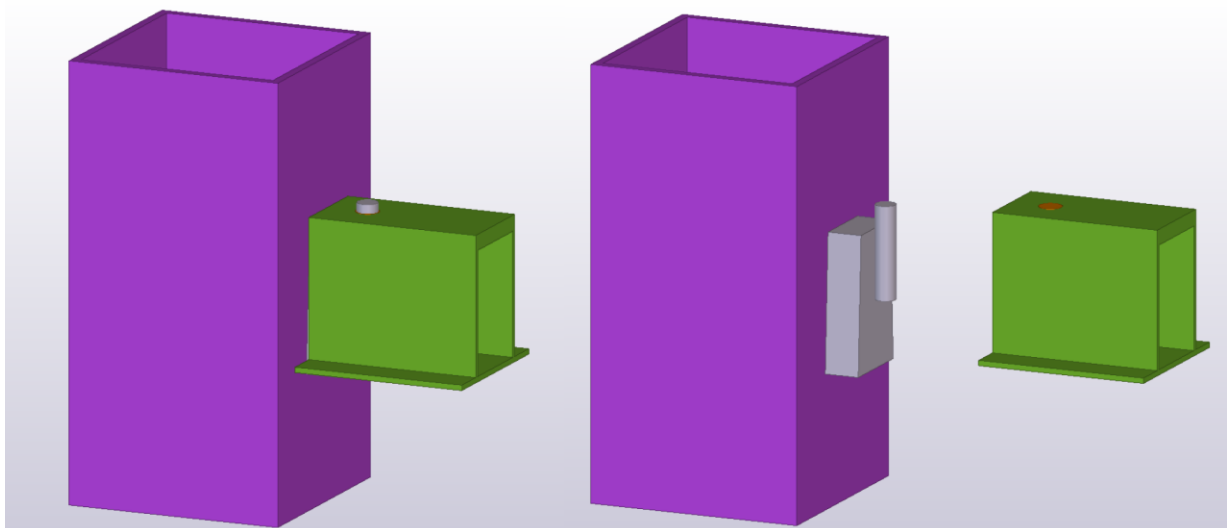
In dit onderzoek, is de bajonetverbinding, de verbinding tussen een kokerkolom en een ellipsvormige buisprofiel-ligger. De verbinding wordt gerealiseerd, middels de geometrie van de sparingen in de kolom en ligger. De sparing in de kolom is van een bepaalde vorm, zodat de ligger, door de sparing gestoken kan worden. De sparingen in de ligger zorgen ervoor dat de ligger geroteerd kan worden. Na een rotatie van 90 graden, kan de belasting middels contactvlakken overgedragen worden (zie *Figuur 5*). (Groenendijk, 2017)



Figuur 5: Wijze van montage (boven) en aanduiding contactvlakken (onder, van links naar rechts, Normalkracht, Moment, Dwarskracht)

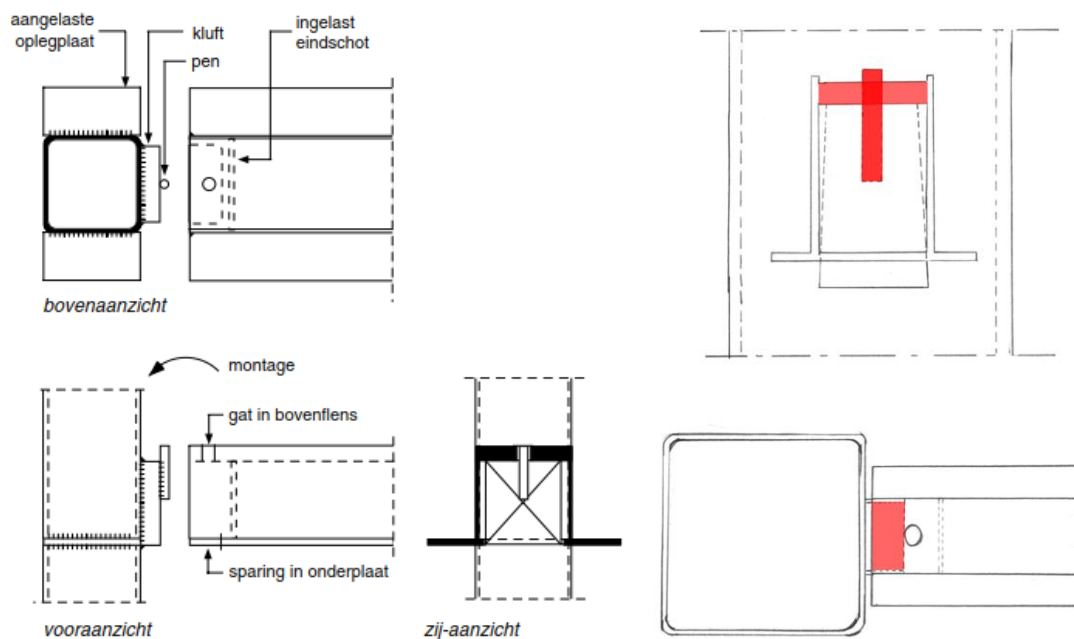
2.1.2 Kluftverbinding

De kluftverbinding, zoals deze te zien is in *Figuur 6*, vindt zijn oorsprong in hoofddraagconstructies van gebouwen. Bij deze hoofddraagconstructies kunnen betonnen vloeren (vaak kanaalplaatvloeren), opgelegd worden, op de onderflenzen van stalen liggers. Deze stalen liggers, die uitgevoerd worden als THQ-liggers, worden middels de kluftverbinding met kolommen verbonden. Bij dergelijke constructies zijn de kolommen doorgaand en de liggers enkelvelds uitgevoerd. (*Bouwen met Staal, 1998*)



Figuur 6: Kluftverbinding (gemonteerde toestand links, niet gemonteerde toestand rechts) (Tekla structures (Versie TS 2017i))

In dit onderzoek, is de kluftverbinding, de verbinding tussen een kokerkolom en een THQ-ligger. De kolom is voorzien van een kluft met een pen. De ligger is voorzien van een gat ter grootte van ongeveer de kluftpenn, een sparring aan de onderzijde van de ligger en een verstijvingsplaat net achter de sparring in de onderzijde. De THQ-ligger wordt boven de kluft met pen, die aan de kolom bevestigd is, gehesen. Vervolgens kan de ligger zakken tot de pen in het daarvoor bestemde gat valt. De belasting wordt overgedragen doormiddel van de contactvlakken. Deze contactvlakken zijn het contactvlak tussen de pen en de bovenflens van de ligger en het contactvlak tussen de bovenkant van de kluft en de bovenflens van de ligger (zie *Figuur 7*). (*Bouwen met Staal, 1998*)

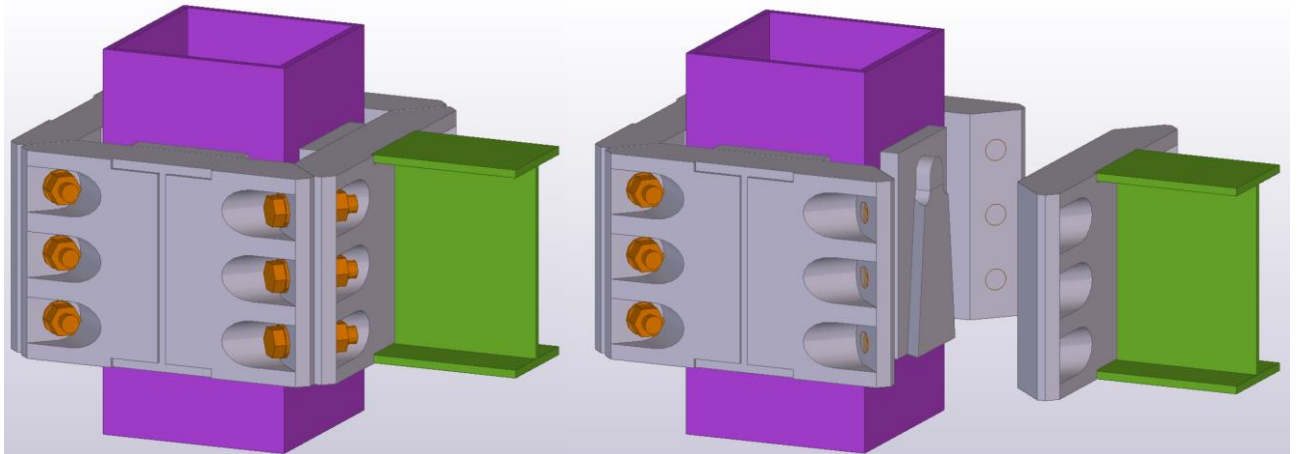


Figuur 7: Montage kluftverbinding (links) (Bouwen met Staal, 1998), aanduiding contactvlakken (rechts)

2.1.3 Con-X-verbinding

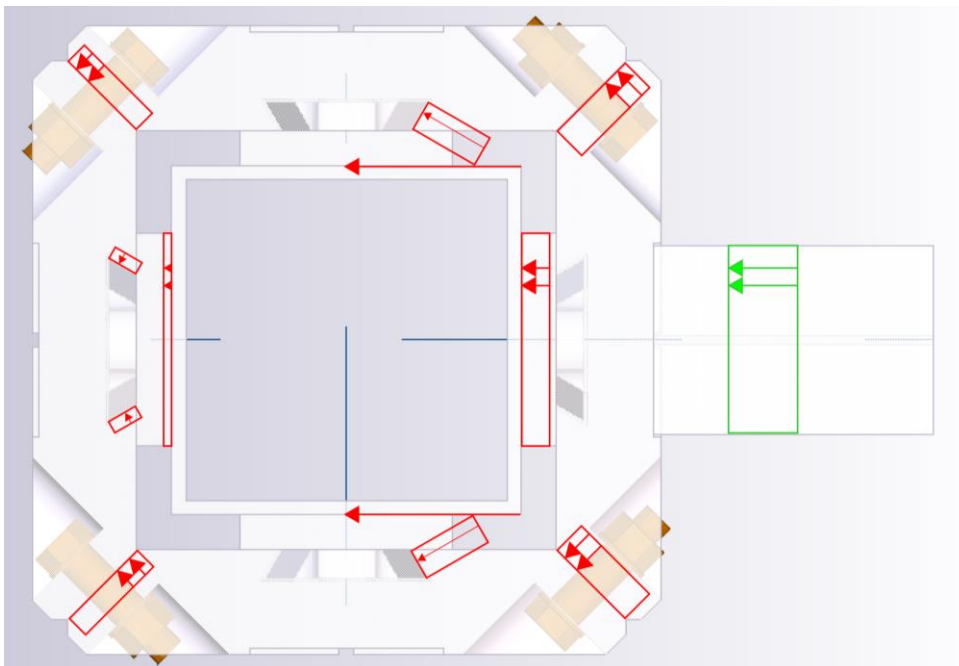
De Con-X-verbinding, zoals die is te zien in *Figuur 8*, vindt zijn oorsprong bij het Amerikaanse bedrijf Con X Tech. De Con-X-verbinding is voor verschillende toepassingsmogelijkheden te gebruiken: van hoofdconstructies van gebouwen tot constructieve frames voor olieleidingen.

De verbinding is ontwikkeld, ten behoeve van een modulair bouwsysteem, dat het gebruik van stalen constructieframes, efficiënter moet maken. (Con X Tech, 2018)



Figuur 8: Con-X-verbinding (gemonteerde toestand links, niet gemonteerde toestand rechts) (Tekla structures (Versie TS 2017i))

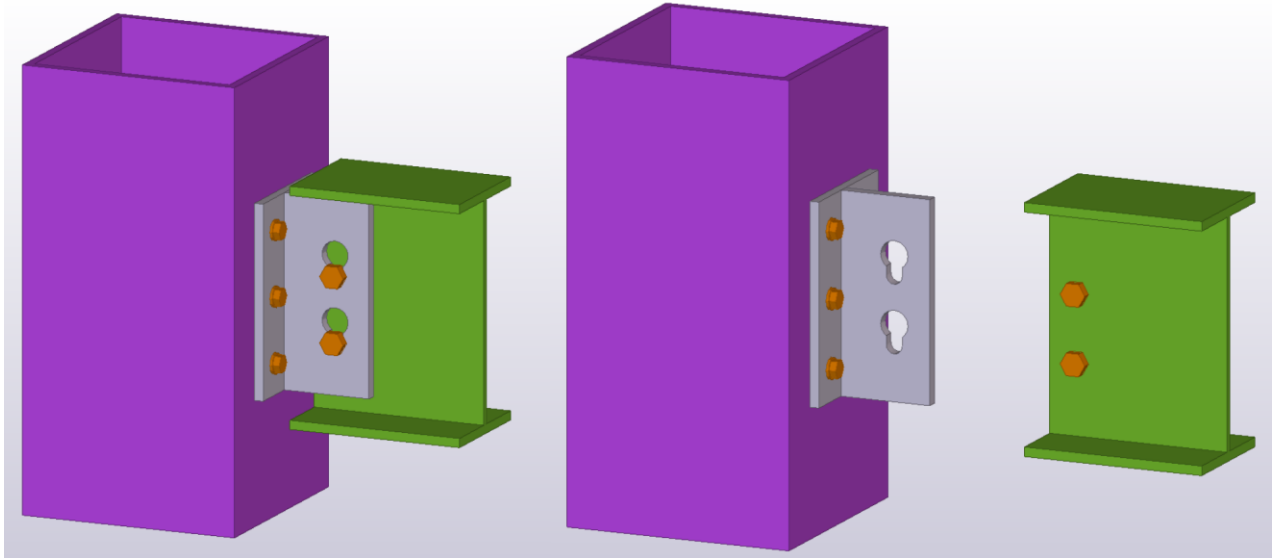
In dit onderzoek, is de Con-X-verbinding, de verbinding tussen een kokerkolom en een I-profielligger. Hoewel de kokerkolom initieel gevuld is met beton, is de betonvulling in dit onderzoek, buiten beschouwing gelaten. De kokerkolom is voorzien van een plaat, waarop de kopplaat van de ligger kan aansluiten. De plaat op de kolom is voorzien van een zwaluwstaartvormige lip. De kopplaat van de ligger bevat een tegen-gestelde vorm, zodat deze bij montage in elkaar vallen. Na plaatsing van de ligger, dient de kopplaat van de ligger, middels bouten aan de aansluitende kopplaten, verbonden te worden. Deze platen dienen aan alle vier de zijden van de kolom bevestigd te worden. Na het bevestigen kan de belasting via het contactvlak van de platen overgedragen worden (zie: *Figuur 9*).



Figuur 9: Krachtsafdracht Con-X-verbinding bij negatieve normaalkracht (druk), analytisch weergegeven (Tekla structures (Versie TS 2017i))

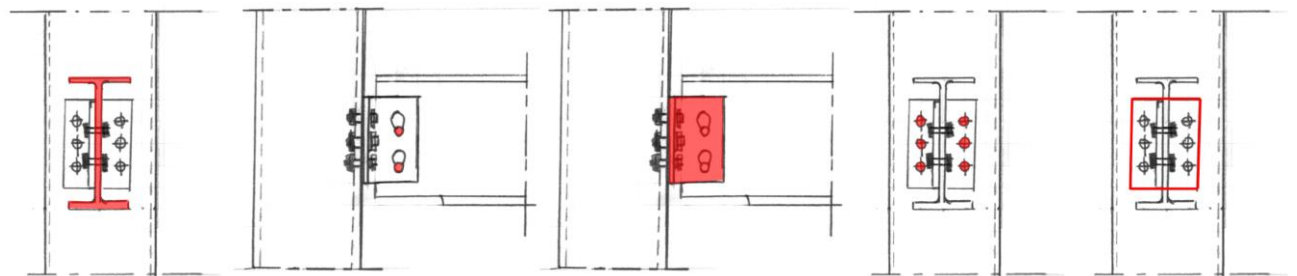
2.1.4 Quiconverbinding

De Quiconverbinding, zoals deze te zien is in *Figuur 10*, vindt zijn oorsprong bij het Britse 'Steel Construction Institute'. De Quiconverbinding is ontwikkeld, als tijdbesparend systeem, voor de realisatie van stalen hoofddraagconstructies van gebouwen. (Heywood, 2004)



Figuur 10: Quiconverbinding (gemonteerde toestand links, niet gemonteerde toestand rechts) (Tekla structures (Versie TS 2017i))

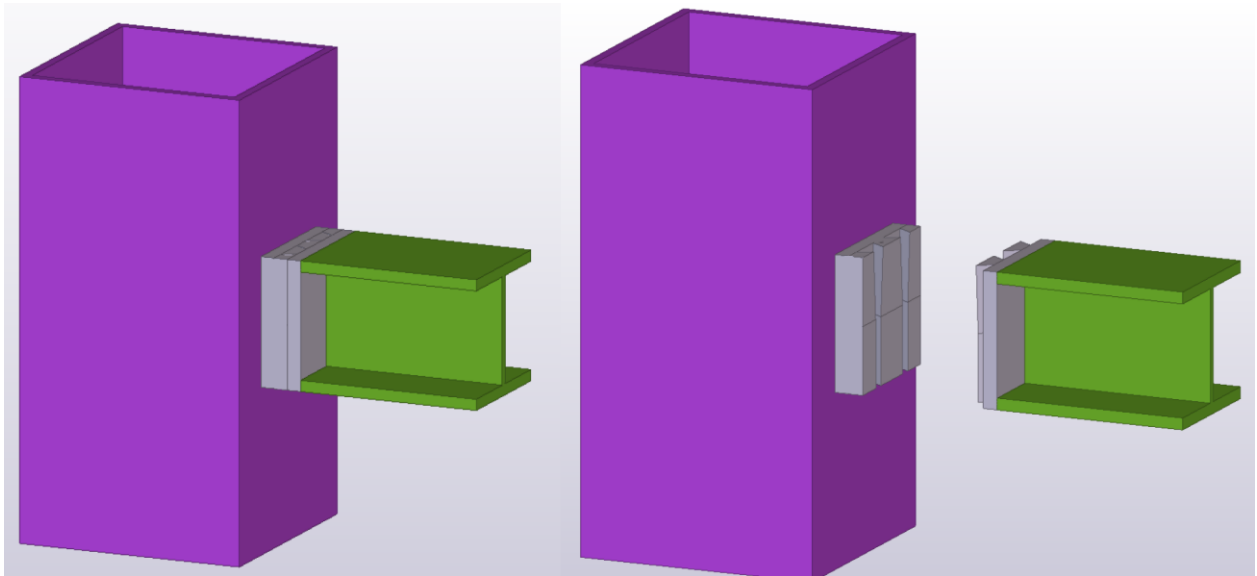
In dit onderzoek, is de Quiconverbinding, de verbinding tussen een kokerkolom en een I-profielligger. Het uiteinde van de ligger, wordt met de zijde van de ontbrekende onderflens en de shoulder-bolts, langs het aangeboute T-stuk gezet. Vervolgens worden de 'shoulder-bolts' door de bovenzijde van de sleutelgatvormige sparring in het T-stuk geplaatst. De ligger wordt omlaag gebracht totdat de shoulder-bolts in het T-stuk hangen. Vervolgens worden de shoulder-bolts aangedraaid, om de verbinding van verticale borging te voorzien. De belasting uit de ligger wordt via de shoulder-bolts overgedragen aan het T-stuk dat vervolgens de belasting via de bouten en het contactvlak tussen de kolom en het T-stuk aan de kolom overdraagt (zie: *Figuur 11*). (Heywood, 2004)



Figuur 11: Krachtsafdracht Quiconverbinding

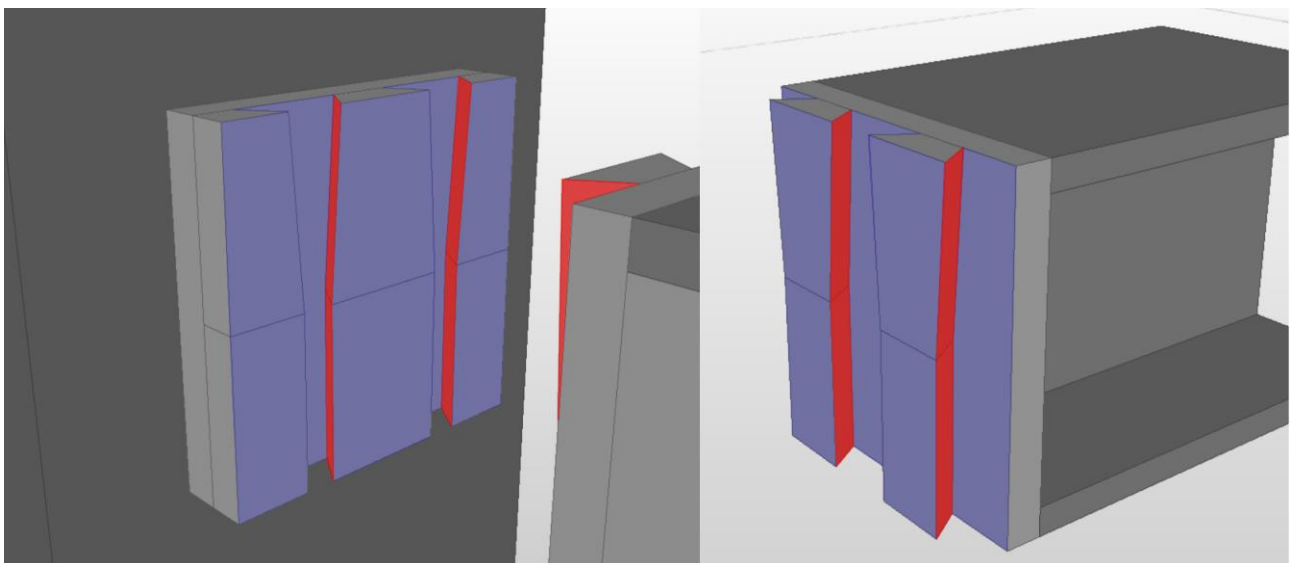
2.1.5 Snap-fitverbinding

De Snap-fitverbinding, zoals deze te zien is in *Figuur 12*, vindt zijn oorsprong op de Technische Universiteit van Eindhoven. A. Verbossen introduceerde het ontwerp voor de Snap-fitverbinding om het bouwproces van stalen hoofddraagconstructies van gebouwen te versnellen. (Quesada, 2016)

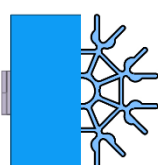


Figuur 12: Snap-fitverbinding (gemonteerde toestand links, niet gemonteerde toestand rechts) (Tekla structures (Versie TS 2017i))

In dit onderzoek, is de Snap-fitverbinding, de verbinding tussen een kokerkolom en een H-profiel ligger. De Snap-fitverbinding is een verbinding door twee platen. Deze platen kunnen als kopplaten voor liggers dienen maar ook kunnen ze aan een kolom bevestigd worden. De ene plaat is voorzien van een zwaluwstaart, de ander van een contrazwaluwstaart die bij montage in elkaar worden geschoven. De kolomplaat is voorzien van verende borgpennen die tijdens montage in de daarvoor bedoelde sparingen in de kopplaat van de ligger klikken (deze zijn niet weergegeven in *Figuur 12*). Deze borgpennen verzorgen borging in verticale richting. Na montage wordt de belasting afgedragen via het contactvlak tussen de zwaluwstaart en de contrazwaluwstaart (zie *Figuur 13*). (Quesada, 2016)



Figuur 13: Aanduiding contactvlakken Snap-fitverbinding (rood betekent trek en blauw betekent druk) (Tekla structures (Versie TS 2017i))



2.2 Vergelijkingscriteria

Dit onderzoek vergelijkt de in *paragraaf 2.1* benoemde verbindingen aan een zevental criteria. In deze paragraaf zijn de criteria benoemd en kort toegelicht wat ze inhouden.

De vergelijkingscriteria zijn:

- Montabelbaarheid;
- Demontabelbaarheid;
- Fabricage;
- Capaciteit;
- Technische flexibiliteit;
- Materiaalgebruik;
- Esthetica.

Deze criteria zijn gebaseerd op literatuuronderzoek en de gestelde eisen voor het knexeren van hoofd-draagconstructies. Deze eisen zijn te vinden in "*Deelrapportage 3: Programma van Eisen*".

Met *montabelbaarheid* wordt bedoeld: 'hoe gemakkelijk een verbinding te monteren is'.

Met *demontabelbaarheid* wordt het gemak van demontage bedoeld.

Met *fabricage* wordt bedoeld wat de intensiteit bij het fabriceren van een verbinding is.

Met *capaciteit* wordt de sterkte en stijfheid van een verbinding bedoeld. Dit is uit te drukken in normaal-krachten-capaciteit, dwarskrachten-capaciteit, momentcapaciteit en rotatiestijfheid.

Met *technische flexibiliteit* wordt bedoeld hoe flexibel een verbinding is op z'n toepassingsgebied. Ook wordt bedoeld hoe gemakkelijk een verbinding is aan te passen om daarmee de capaciteit te beïnvloeden.

Met *materiaalgebruik* wordt enerzijds de hoeveelheid materiaal bedoeld en anderzijds de capaciteit bij dat materiaalgebruik (efficiëntie van de verbinding).

Met *esthetica* wordt bedoeld hoe "mooi" een verbinding gevonden wordt.

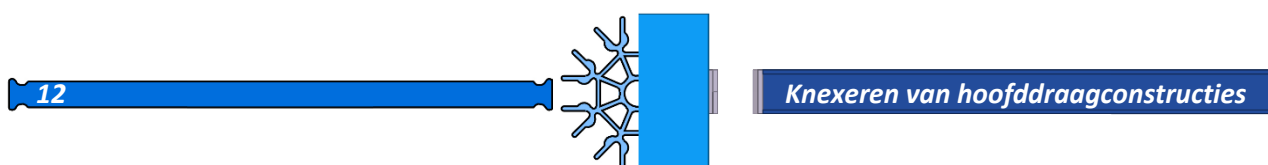
Aan ieder criterium is een weging gegeven. Deze wegingsfactoren zijn verder toegelicht in *Hoofdstuk 4*.

2.3 Gelijkstelling van de profilering

Bij verbindingen kunnen verschillen in aansluitende profileringen veel invloed hebben op de resultaten per criterium. In dit onderzoek is, waar mogelijk, dezelfde profilering toegepast. Dit om de verbindingen écht op verbindingniveau te beschouwen en daarmee het effect van de eigenschappen van de aansluitende delen zo min mogelijk in de beschouwing mee te nemen.

De verbindingen in dit onderzoek, zijn allemaal verbindingen tussen een kolom en een ligger. Ondanks dat de kolommen aan elkaar gelijk te stellen zijn als vierkant kokerprofiel, is het gelijkstellen van de liggerprofielen complexer.

Enkele verbindingen zijn alleen in de profilering uit te voeren zoals deze initieel ontworpen zijn. Neem bijvoorbeeld de bajonetverbinding. Wanneer deze verbinding uitgevoerd zou worden met een I-profiel-ligger in plaats van de ellipsvormige buis, is deze niet meer vergelijkbaar met de initiële verbinding. Een ander voorbeeld is de Quiconverbinding waarbij de uitvoering met een H-profiel in plaats van een I-profiel onmogelijk is door een tekort aan hoogte van het liggerlijf.



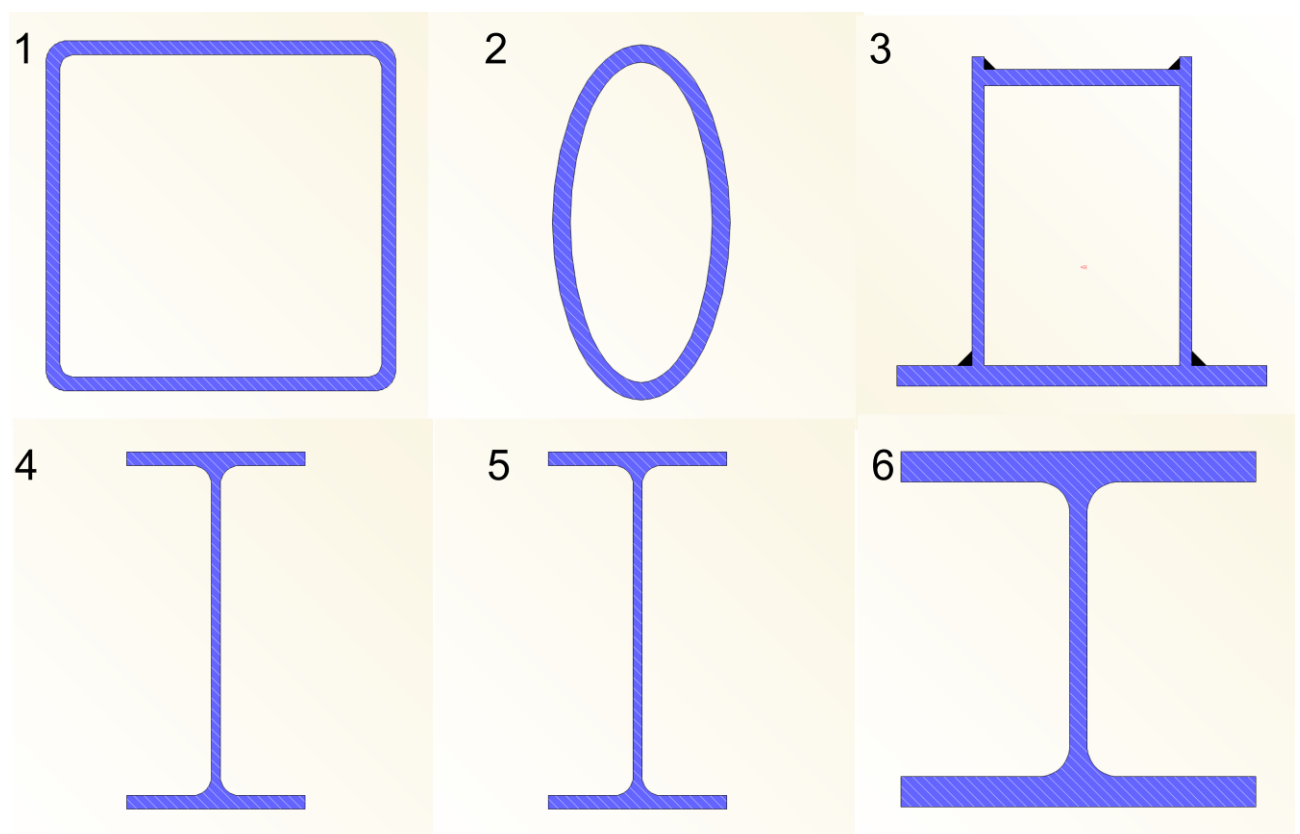
Met het toepassen van zo veel mogelijk dezelfde profilering, wordt bedoeld dat de meest invloedrijke eigenschappen van een profieldoorsnede gelijkgesteld zijn. Voor de volgende eigenschappen is gelijkwaardigheid van de liggerprofielen benaderd:

- Oppervlakte;
- Traagheidsmoment.

Oppervlakte is een belangrijke eigenschap, aangezien het materiaalgebruik en de normaalkrachts capaciteit, sterk afhankelijk zijn van de oppervlakte. Omdat het traagheidsmoment van het liggerprofiel, in grote mate de krachtsverdeling bepaalt, is ook deze gelijkgesteld.

De Snap-fitverbinding is als uitgangspunt genomen, omdat van deze verbinding het meest bekend is op het gebied van capaciteit, maar ook omdat de capaciteit van de verbinding, lastig te bepalen is door de complexe vormen. De HEB140 van de Snap-fit als uitgangspunt, resulteert in de andere verbinding in de volgende profilering:

Kolom →	K250/10	(1)
Bajonetverbinding →	Ellips Koker 200/100/10	(2)
Kluft verbinding →	THQ160*5-18*95-6*180	(3)
Con-X-verbinding →	IPE270	(4)
Quiconverbinding →	IPE270	(5)
(Snap-fitverbinding →	HEB140)	(6)



Figuur 14: Profilering per verbindingstype (1) Kolommen, (2) Bajonetverbinding, (3) Kluftverbinding, (4) Con-X-verbinding, (5) Quiconverbinding, (6) Snap-fitverbinding (niet in verhouding ten opzichte van elkaar)

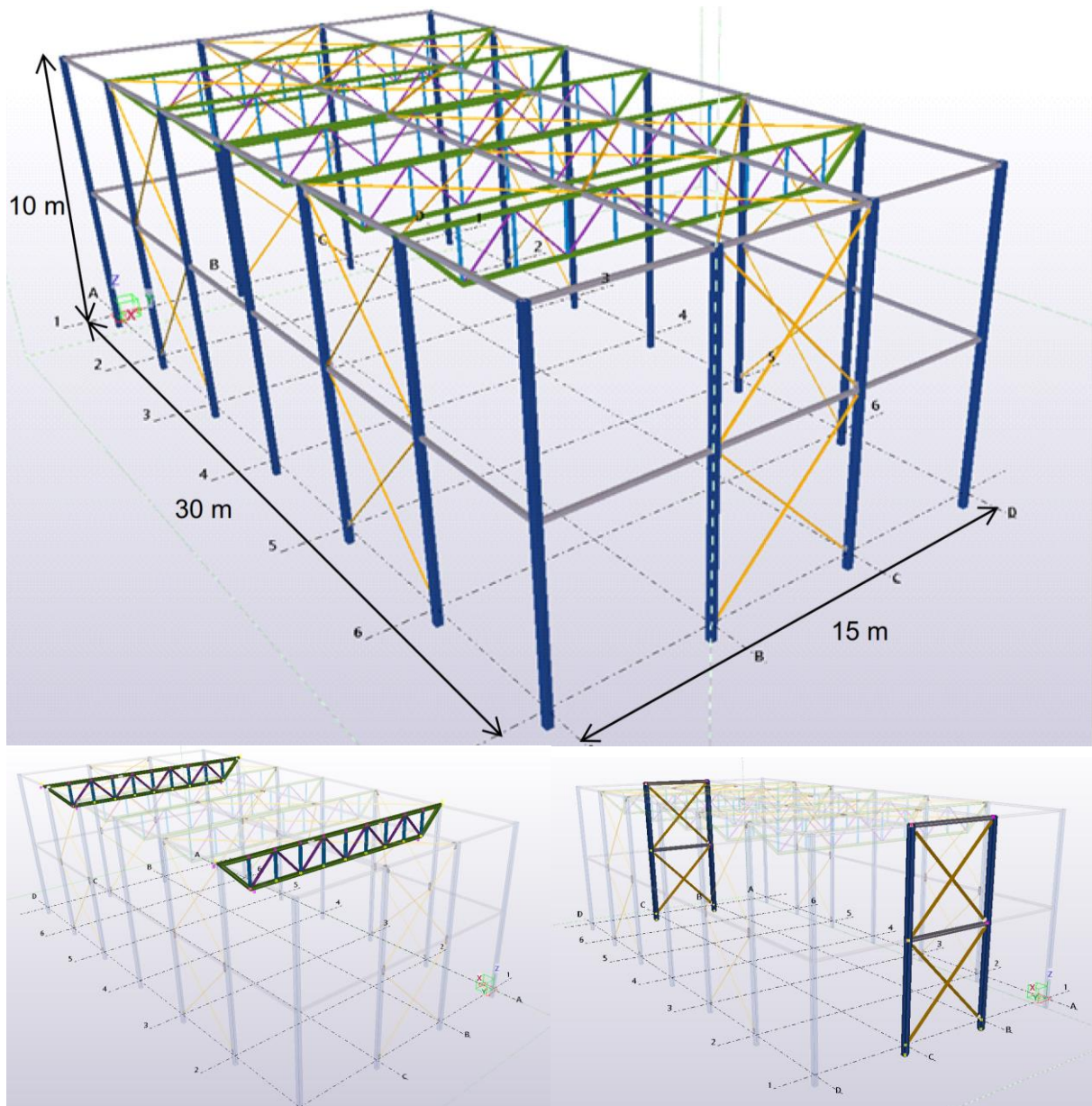


2.4 Casus

In casus plaatsing is benodigd, bij het criterium technische flexibiliteit. De beoordeling voor de flexibiliteit, op toepassingsgebied van de verbindingen, wordt gedaan aan de hand van een casus.

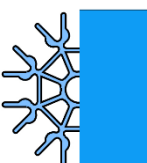
Het onderzoek, naar de technische haalbaarheid van 'knexeren', behoeft een casus.

In deze casus zijn de toepassingsmogelijkheden van de verbindingen in de windbokken en de vakwerkliggers beschouwd, zie *Figuur 15*.



Figuur 15: Casus stalen hal (Tekla structures (Versie TS 2017i))

De volledige specificaties van de casus zijn te vinden in “Deelrapportage 2: Variantenstudie + Optimalisatie” en “Deelrapportage 3: Programma van eisen”.



2.5 Normen en richtlijnen

De gebruikte normen en richtlijnen bij het bepalen van de prestaties van de verbindingen zijn afkomstig uit de direct aangestuurde normbladen (1^e lijns): “Constructieve veiligheid”.

2.6 Materiaalgebruik

De materiaaleigenschappen worden in dit onderzoek niet benoemd. Uitgegaan is, van constructiestaal met staalkwaliteit S235.

2.7 Toegepaste computersoftware

Buiten de handberekeningen en met de hand gemaakte illustraties, is er gebruik gemaakt van de volgende reken- en tekensoftware:

- Dlubal RFEM, versie 5.13;
- Technosoft Raamwerken, versie 6;
- Tekla Structures, versie TS2017i.

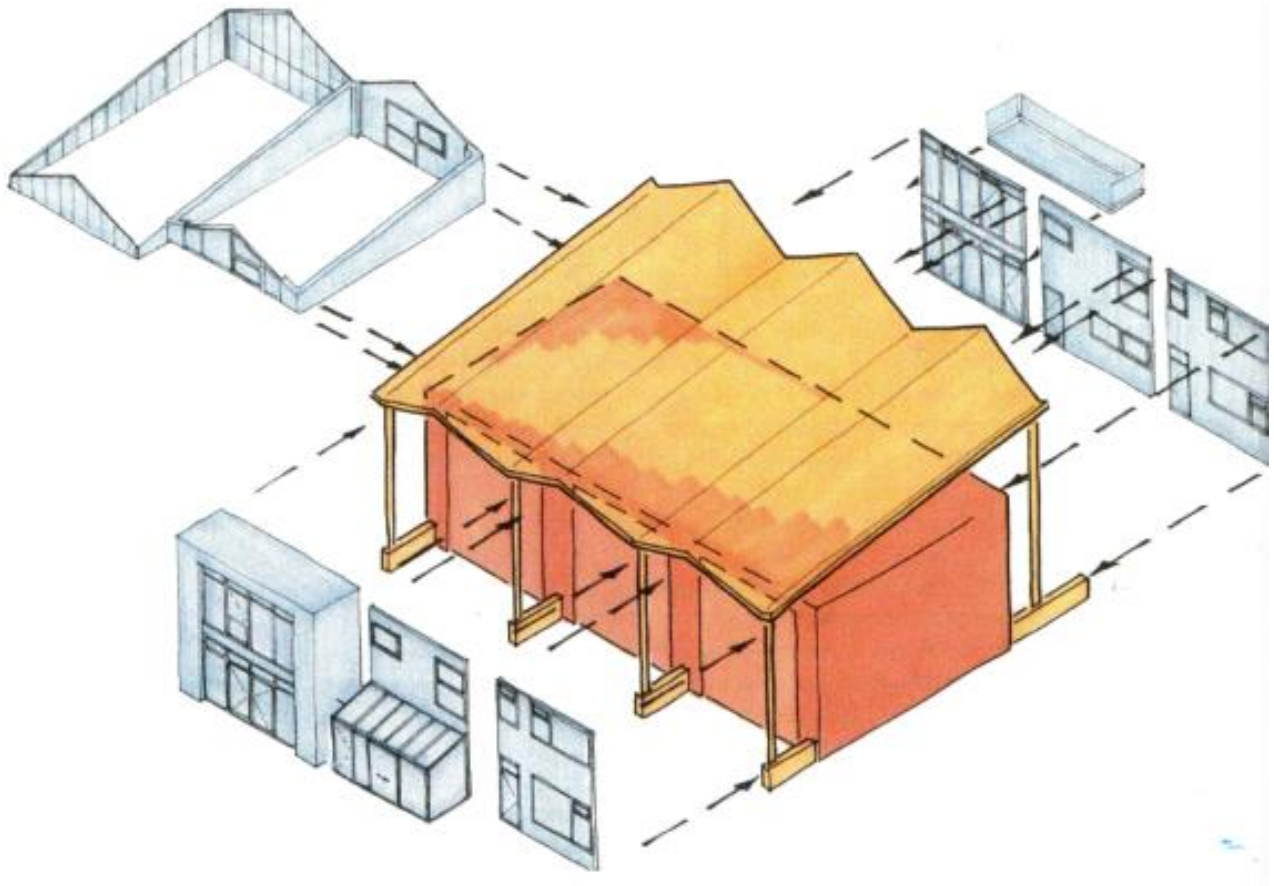
Hoofdstuk 3: Achtergronden

Dit hoofdstuk geeft achtergrondinformatie over het onderzoek. De achtergrond informatie is opgedeeld in de volgende onderwerpen:

- Modulair bouwen;
- Knexeren is IFD;
- Reductie van de milieubelasting;
- Verbindingsmethodieken uit andere sectoren.

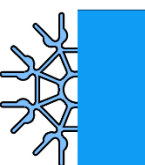
3.1 Modulair bouwen

Modulair bouwen is onderdeel van knexeren. Maar wat wordt er verstaan onder modulair bouwen? Bij modulaire gebouwen, bestaat het gebouw uit modules. Dit kan in verschillende vormen zijn. Gebouwdelen zoals gevels en deelconstructies kunnen modulair zijn. Een voorbeeld hiervan is te zien in *Figuur 16*. Ook kan een gebouw gerealiseerd worden, doormiddel van, het stapelen van modulaire doosjes (containers). (Slawik, Bergman, Buchmeier, Tinney, 2010)



Figuur 16: Schetsmatige planweergave Projectpaviljoen te Drachten van VDM Plan ontwikkeling (Galama, 2000)

Voor de complete toelichting van 'Modulair bouwen' zie: "Deelrapportage 1: Literatuuronderzoek".



3.2 Knexeren is IFD

In deze paragraaf wordt uitgelegd wat IFD inhoudt en waarom knexeren IFD genoemd mag worden.

IFD bouwen (Industrieel, Flexibel en Demontabel) is een programma, op initiatief van Stuurgroep Experimenten Volkshuisvesting (SEV), in samenwerking met de Stichting Bouwresearch (SBR), in opdracht van de ministeries van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM) en Economische Zaken (EZ). Het is de bedoeling om met dit programma, te stimuleren, gebruik te maken, van IFD- concepten en IFD- technieken. IFD-bouwen is in de loop der jaren enigszins verdwenen doordat bij de wisseling van het kabinet in 2004, weinig prioriteit lag bij het investeren in IFD. Tegenwoordig is IFD te zien in andere verschijningen. Een voorbeeld daarvan is het circulaire bouwen. (*Bouwmeester, 2000*)

Industrieel bouwen

Industrieel bouwen, ookwel prefabricage, streeft naar het prefabriceren van onderdelen in de fabriek. Dit heeft als effect, dat er steeds meer standaardafmetingen worden gebruikt in de bouw. Ook brengt prefabricage risicovermindering en kwaliteitsverbetering met zich mee door de gecontroleerde omgevingsfactoren van een fabriek. (*Senternovem, 2007*)

Flexibel bouwen

Flexibel bouwen kan op bouwdeelniveau en op bouwniveau. Op bouwdeelniveau zijn de gebouwdelen flexibel inzetbaar. Bij flexibiliteit op bouwniveau betreft het een gebouw dat flexibel inzetbaar is. Een goed voorbeeld van flexibiliteit op bouwniveau, is het voormalig kantoorgebouw van Rijkswaterstaat in Presikhaaf te Arnhem (te zien in *Figuur 17*) dat recentelijk is omgebouwd tot studentenhuisvesting. (*Senternovem, 2007*)

Demontabel bouwen

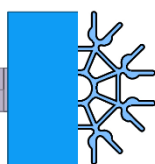
Flexibel bouwen op bouwdeelniveau, gaat vaak hand in hand met demontabelbaarheid. Bij flexibel op bouwdeelniveau, is het belangrijk dat dit bouwdeel, zo te demonteren is, dat deze hergebruikt kan worden. Daarom dienen deze zo ontworpen te zijn, dat deze met zo min mogelijk schade gedemonteerd kunnen worden. (*Senternovem, 2007*)



Figuur 17: Studentenhuysvesting "Helix" te Arnhem (Ssh&, 2018)

3.2.1 IFD of niet?

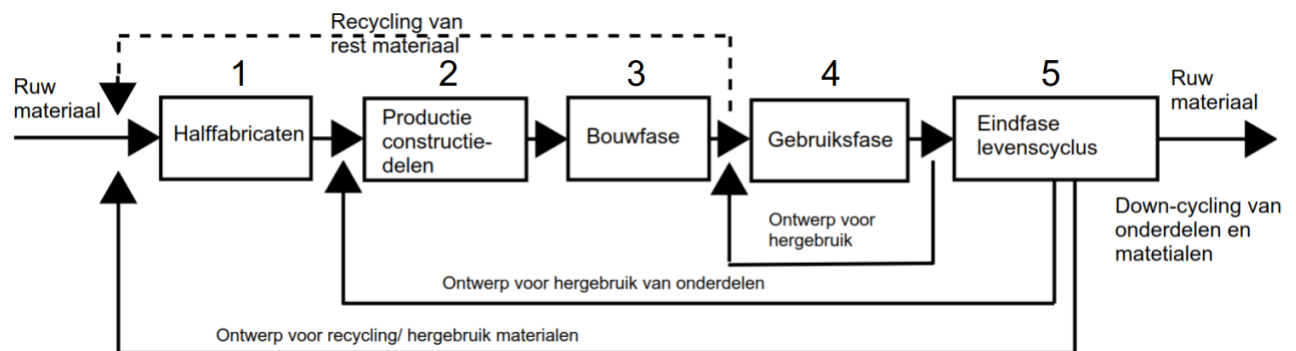
Op de vraag of knexeren IFD is, kan op een eenvoudige wijze uitsluitel worden gegeven. De SEV heeft een checklist samengesteld om te bepalen of een systeem en/of bouwwijze is aan te merken als IFD. Er is sprake van IFD wanneer slechts een of twee van de volgende vragen met 'Nee' worden beantwoord. Door deze vragenlijst in te vullen met bij minder dan drie vragen 'nee', wordt bekrachtigd dat het bij knexeren over IFD gaat. Deze lijst is te vinden in: "*Deelrapportage 1: Literatuurstudie*" (*Senternovem, 2007*)



3.3 Reductie milieubelasting

Bij de uitleg van het begrip “knexeren” wordt geïnsinueerd, dat knexeren bijdraagt aan de reductie van milieubelasting betreffende de bouwsector, door het één op één hergebruik van constructiedelen te stimuleren. Uit literatuuronderzoek blijkt dit ook echt zo is.

De levenscyclus van een stalen hoofddraagconstructie, bestaat volgens E. Durmisevic (Technische Universiteit Delft, Afdeling: Buiding Technologie) en N. Noort (Corus Colors), uit vijf fases. In deze vijf fases, doorloopt de stalen hoofddraagconstructie, het creëren van het materiaal tot aan de vernietiging van dit materiaal. De vijf fases zijn als volgt:



Figuur 18: Levenscyclus stalen hoofddraagconstructie schematisch weergegeven (Durmisevic en Noort, Z.D.)

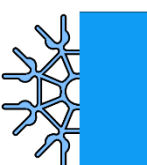
Uit onderzoek van ECSC (2002), blijkt, dat de Co₂-uitstoot in de levensduurcyclus van een staalconstructie, voor 75% veroorzaakt wordt door de eerste fase. De grootste winst valt dus hier te halen. Wanneer de half-fabricaten gereduceerd kunnen worden, kan hiermee een gigantisch verschil worden gemaakt. Ontwerpen, om de eerste fase over te kunnen slaan, zou een oplossing kunnen zijn. Ook het ontwerpen, om de tweede fase over te kunnen slaan, bij hergebruik, zou een oplossing kunnen zijn voor het terugdringen van de milieubelasting in de bouwsector. Dit bewijst dat het één op één hergebruik van constructiedelen, een reductie van de milieubelasting met zich mee brengt. (Durmisevic en Noort, Z.D.)

3.4 Bijdrage van kennis uit andere sectoren

In dit onderzoek, is kennis vergaard uit sectoren, die vergelijkbaar zijn met bouwkunde. Het betreft de automotive- en werktuigbouwkundige-sector. Deze zijstap, is genomen, om de visie op het gebied van verbindingsmethodieken te verbreden. Niet alleen verbreding is opgezocht, maar ook is gekeken of in deze ‘andere sectoren’ verbindingen worden toegepast die gelijkenissen kent met een van de onderzochte “Plug & Play”-verbindingen.

Uit literatuuronderzoek blijkt, dat zowel in de automotive, als in de werktuigbouwkundige sector, duidelijke afkadering gemaakt wordt wat betreft de type verbindingen. Bij het categoriseren van de verbindingsmethodieken, wordt onderscheidt gemaakt tussen de indeling op grond van de losneembaarheid en de indeling op grond van het verbindingstype van de verbinding. (Kals, Buiting-Csikós, van Luttervelt, Moulijn, Ponzen, Streppel, 2007)

Buiten kennis uit literatuur is er ook kennis vergaard uit de beroepspraktijk. Uit bezoeken aan één bedrijf in de werktuigbouwkundige sector (Item) en één bedrijf in de automotive sector (Inalfa).



3.4.1 Automotive

In de automotive sector wordt een divers scala aan verbindingen toegepast, die gelijkenissen kennen met “Plug & Play”-verbindingen. Echter betreft het in deze sector vaak het verbinden van plaatdelen of zijn de “Plug & Play”-verbindingen zo uitgevoerd dat deze na elastische vervorming, vormvaste verbindingen zullen zijn. Deze verbindingen worden veelal uitgevoerd in kunststof, waarvan de elasticiteit vele male hoger is dan van staal. Elastische vervorming in stalen verbindingen brengt problemen met zich mee zoals vermoeiing en blijvende deformatie in de verbinding.

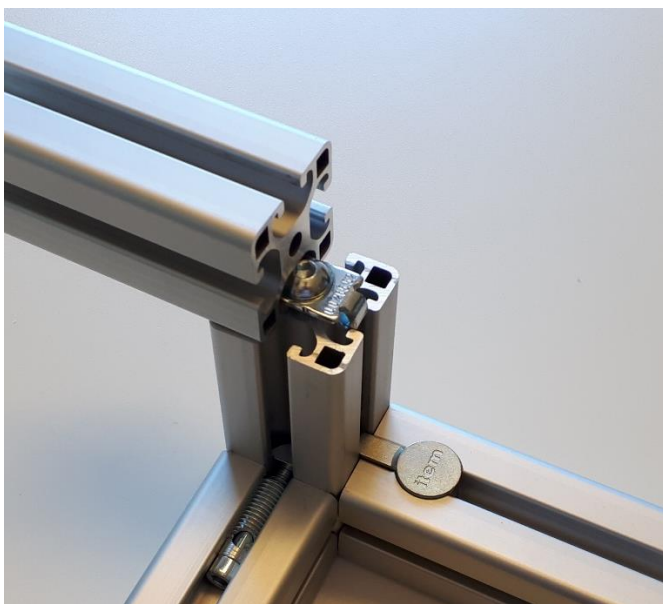
Een voorbeeld van een “Plug & Play”-verbinding die gebruikt wordt in de automotivesector, is de klikverbinding zoals deze te zien is in *Figuur 19*. (Inalfa, 2018)



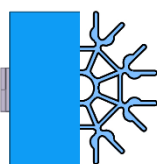
Figuur 19: Klikverbinding (Inalfa, 2018)

3.4.2 Werktuigbouwkunde

In de werktuigbouwkundige sector bestaat een systeem, dat veel gelijkenissen kent met een geknexeerde hoofddragconstructie. Het betreft een bouwsysteem met aluminium extrusieprofielen. Het door in Delft gevestigde Item, bedachte bouwsysteem, bestaat uit aluminium extrusieprofielen, die middels losneembare of beperkte losneembare vorm en krachtgesloten verbindingen, met elkaar worden verbonden. Dit systeem is te zien in *Figuur 20*. Dit bouwsysteem is zeer modulair. Echter, lijkt toepassing van dit systeem in de bouwsector niet direct mogelijk door de hoge kosten van het maken van de geëxtrudeerde profielen. (Item, 2018)



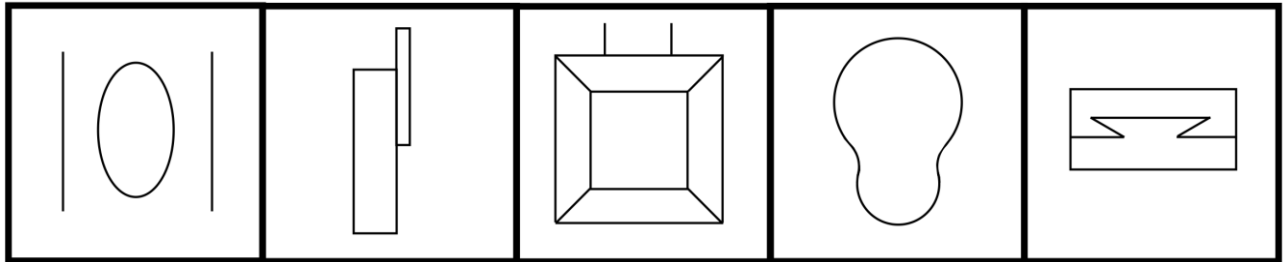
Figuur 20: Standaardverbindingen (Item, 2016)



Hoofdstuk 4: Variantenstudie

Dit hoofdstuk is de toelichting op de variantenstudie. Allereerst wordt het eindresultaat, met de daarbij horende methodiek beschouwd. Vervolgens is voor ieder criterium kort toegelicht wat de resultaten zijn en hoe deze zijn verzameld.

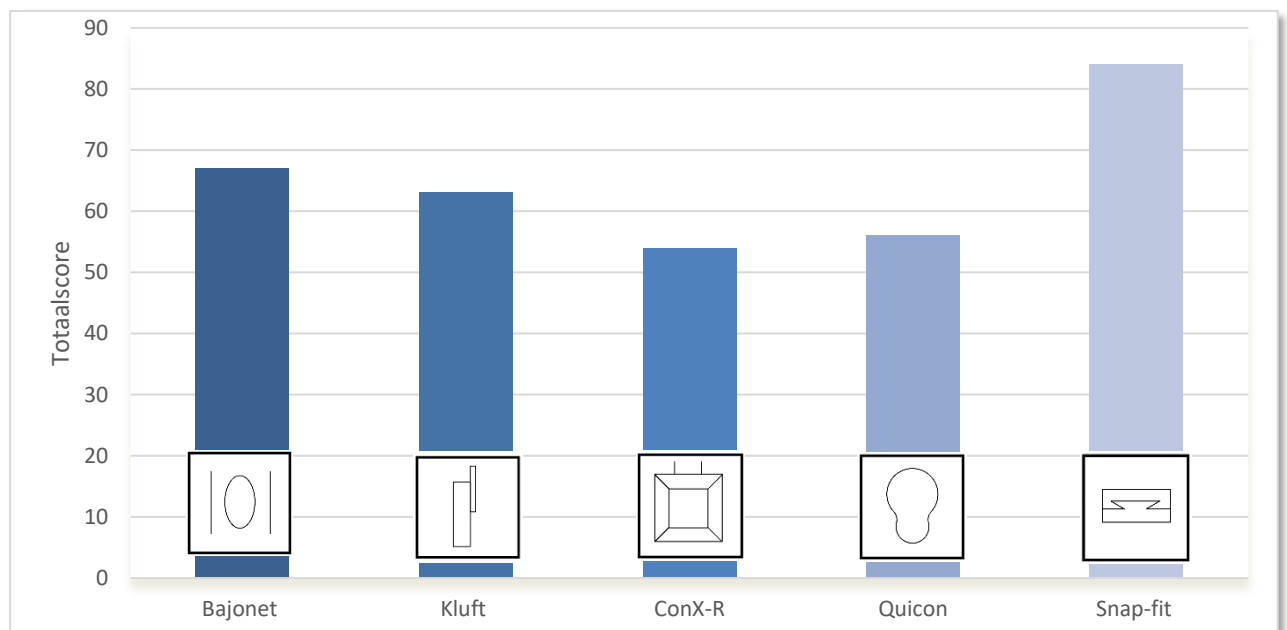
De verbindingen worden in dit hoofdstuk bij tabellen en grafieken aangegeven met de symbolen zoals te zien is in *Figuur 21*.



Figuur 21: Symbool per verbinding (van links naar rechts: Bajonet-, Kluft-, Con-X-, Quicon- en Snap-fitverbinding)

4.1 Algemeen

De variantenstudie is vormgegeven met een multicriteriumanalyse. De keuzematrix van deze analyse bestaat uit een aantal onderdelen. Deze onderdelen komen in dit hoofdstuk na elkaar aan bod.



Grafiek 1: Resultaten MCA per verbinding

De resultaten zoals deze zijn weergegeven in *Grafiek 1* zijn afkomstig uit de multicriterium-matrix.

De multicriterium-keuzematrix bestaat uit:

- De verbindingen (zoals toegelicht in *paragraaf 2.1*);
- De criteria (zoals toegelicht in *paragraaf 2.1*);
- Wegingsfactoren voor beoordelingscriteria;
- Waarderingen voor elke verbinding per criterium;
- Totaalscores per verbinding (relatief).

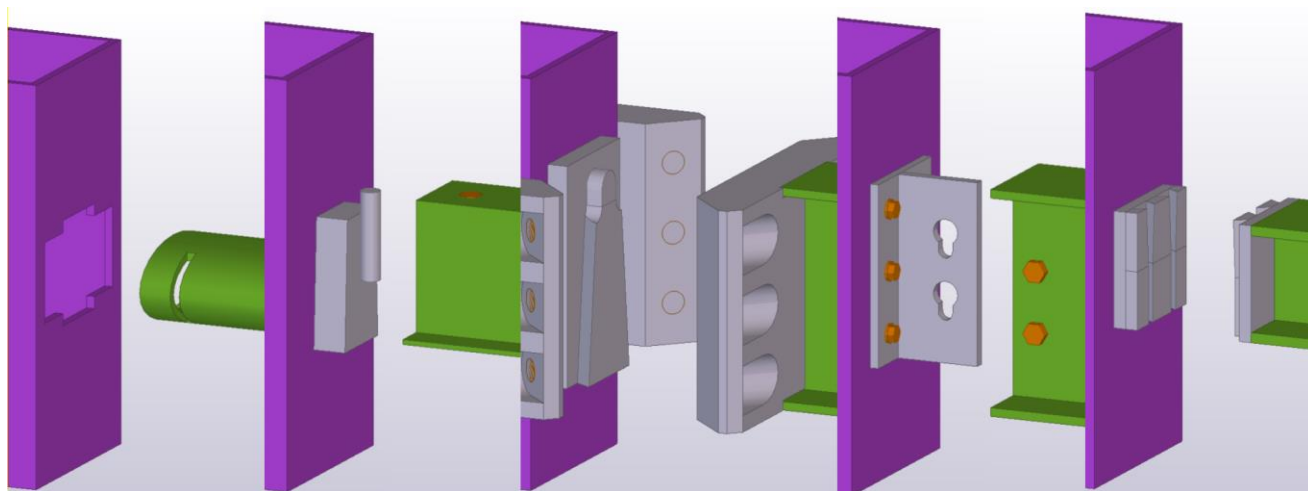
4.1.1 Multicriterium-keuzematrix

Criterium	We- ging	Bajonet		Kluft		Con X		Quicon		Snap-fit		MAX	
Montabelbaarheid	4,2	2	8,4	3	12,6	1	4,2	3	12,6	4	16,8	4	16,8
Demontabelbaarheid	3,4	1	3,4	4	13,6	1	3,4	3	10,2	3	10,2	4	13,6
Fabricage	3,1	4	12,4	3	9,3	1	3,1	3	9,3	2	6,2	4	12,4
Capaciteit	4,8	2	9,6	1	4,8	4	19,2	2	9,6	4	19,2	4	19,2
Technische flexibiliteit	3,5	3	10,5	3	10,5	4	14	2	7,0	3	10,5	4	14
Materiaalgebruik	2,7	4	10,8	2	5,4	2	5,4	1	2,7	3	8,1	4	10,8
Esthetica	2,5	4	10	2	5	1	2,5	1	2,5	4	10	4	10
Totaalscore		20	65,1	18	61,2	14	51,8	15	53,9	23	81	28	96,8
Relatieve score			67		63		54		56		84		100

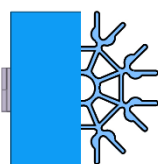
Tabel 1: Multicriterium matrix "Plug & Play"-verbindingen

Uit de keuzematrix in *Tabel 1* blijkt dat de Snap-fit als beste scoort met 84 van de 100 te behalen punten. Als tweede volgt de Bajonetverbinding met 67 punten en vervolgens de Kluftverbinding met 63 punten.

In deze multicriterium-keuzematrix zijn de criteria onder elkaar gezet. Er is een weging gegeven per criterium. Hoe deze weging bepaald is, is verder uitgelegd in *Paragraaf 4.1.2*. Vervolgens is de waardering van 1 tot 4 van elke verbinding per criterium ingevuld. Door de waardering te vermenigvuldigen met de wegingsfactor is de wegingsfactor, meegenomen in de eindscore. In de laatste kolom zijn de maximaal behaalde waarden weergegeven. Met de maximale totaalscore en de totaalscores per verbinding zijn de relatieve scores bepaald.



Figuur 22: De vergeleken verbindingen (Van links naar rechts: Bajonet, Kluft, Con X, Quicon, Snap-fit) (Tekla structures (Versie TS 2017i))



4.1.2 Wegingsfactoren

Omdat de criteria van dit onderzoek niet allemaal even zwaar wegen, zijn er wegingsfactoren bepaald. Deze wegingsfactoren zijn door meerdere partijen bepaald (externe hypothese). Om de afhankelijkheid van een partij zo min mogelijk mee te nemen in de beoordeling.

Vijftig procent van de wegingsfactor is bepaald met de externe hypothese. De ander vijftig procent van de wegingsfactor is intern bepaald.

De externe hypothese van de wegingsfactoren is bepaald met verzamelde gegevens uit een enquête. De hypothese is opgebouwd uit beoordelingen van constructeurs, architecten, projectleiders, werkvoorbereiders, bouwkundestudenten, een uitvoerder en een BIM-regisseur. In *Tabel 2 en Tabel 3* zijn de resultaten tot bruikbare wegingsfactoren verwerkt.

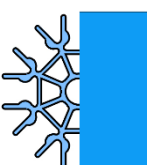
<i>Criterion</i>	Externe hypothese	Interne hypothese	Gemiddeld
<i>Montabelbaarheid</i>	4,3	4	4,2
<i>Demontabelbaarheid</i>	3,7	3	3,4
<i>Fabricage</i>	3,7	2,5	3,1
<i>Capaciteit</i>	4,5	5	4,8
<i>Technische flexibiliteit</i>	3,5	3,5	3,5
<i>Materiaalgebruik</i>	2,9	2,5	2,7
<i>Esthetica</i>	3,0	2	2,5
<i>Duurzaamheid</i>	2,9	3	3,6

Tabel 2: Samengestelde wegingsfactoren

De wegingsfactoren zijn beoordeeld met een waardering van één tot en met vijf punten. Uit proefenquêtes blijkt dit de meest optimale verscaling hiervoor te zijn. Optimaal is wanneer er genoeg keuze is om daadwerkelijk een verschil in wegenen te laten ontstaan maar dat er ook niet te véél keuze is. Door te veel keuze wordt het invullen van de enquête arbeidsintensief, ook leidt dit mogelijk tot complexe resultaatcombinaties. In *Tabel 3* zijn de gemiddelde scores, uit de door andere partijen ingevulde enquêtes te zien. Het criterium “duurzaamheid” is uiteindelijk niet meegenomen in de variantenstudie door gebrek aan tijd.

<i>Criterion</i>	CO	AR	PJ	ST	BR	UV	GEMIDDELDE
<i>Montabelbaarheid</i>	4,4	4,0	4,3	4,0	5,0	4,0	4,3
<i>Demontabelbaarheid</i>	3,6	4,0	3,3	4,0	4,0	3,0	3,7
<i>Fabricage</i>	3,4	4,3	3,3	4,0	4,0	3,3	3,7
<i>Capaciteit</i>	4,6	4,0	4,6	4,0	5,0	4,7	4,5
<i>Technische flexibiliteit</i>	2,9	4,3	3,3	2,5	4,0	3,7	3,5
<i>Materiaalgebruik</i>	2,9	3,0	3,0	4,0	2,0	2,3	2,9
<i>Esthetica</i>	2,1	5,0	2,6	3,0	3,0	2,0	3,0
<i>Duurzaamheid</i>	3,8	4,7	4,3	4,5	4,0	3,3	4,1

Tabel 3: Samenstelt gemiddelde beoordeling wegingsfactoren constructeurs (CO), architecten (AR), projectleiders (PJ), studenten (ST), BIM-regisseur (BR) en uitvoerders (UV)



4.1.3 Waardering van de criteria

Om de verbindingen met elkaar te vergelijken, is iedere verbinding beoordeeld met een waardering per criterium. Deze waardering heeft bij ieder criterium dezelfde waarderingsschaal (1 t/m 4) en is op basis van verzamelde resultaten.

Een schaal van waarderingen van één tot en met vier is toegepast omdat een kleinere schaal wellicht een eenduidige eindscore veroorzaakt (meerdere winnaars). Een te grote schaal veroorzaakt mogelijk te kleine verschillen in de eindscores.

De waarderingsschaal per criterium, aan de hand van de verzamelde resultaten is met de volgende stappen bepaald:

Stap 1: Verzamel de resultaten.

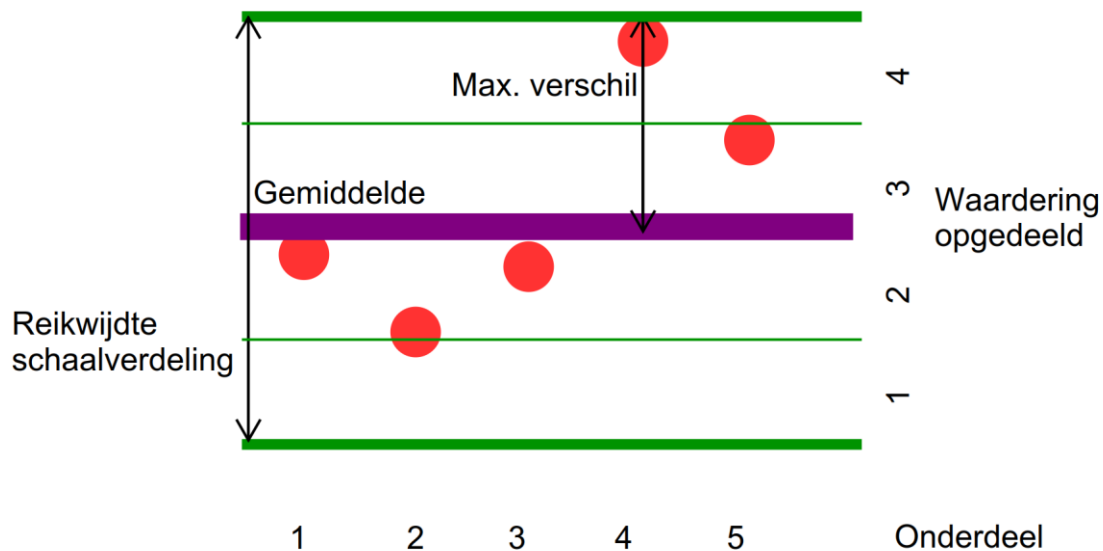
Stap 2: Bepaal het gemiddelde van alle resultaten.

Stap 3: Bepaal het maximale verschil ten opzichte van het gemiddelde.

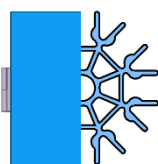
Stap 4: Deel het maximale verschil met het aantal stappen tot het gemiddelde.

Stap 5: Verdeel de waardering met een stapgrootte op basis van stap 4.

Stap 6: Bekijk de resultaten per onderdeel ten opzichte van de 4 waarderingsschalen om de waardering te bepalen.

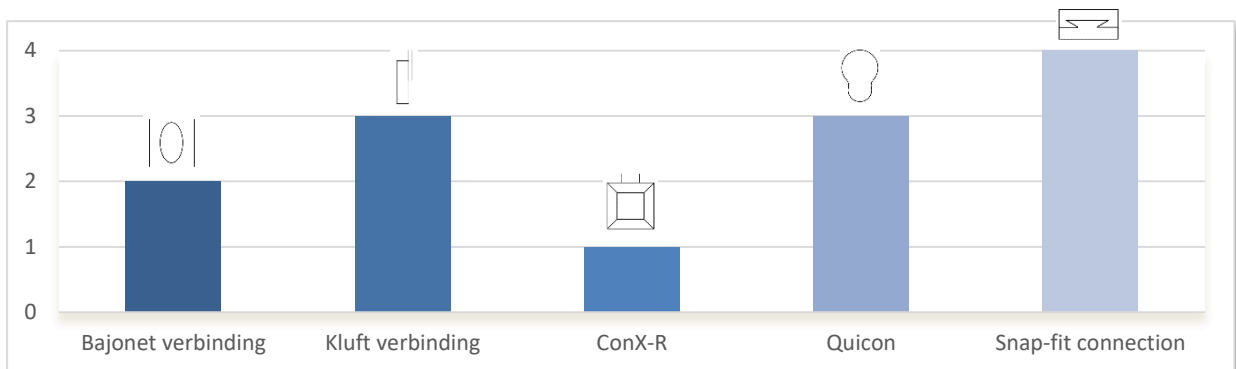


Figuur 23: Grafische weergave invulling waardering



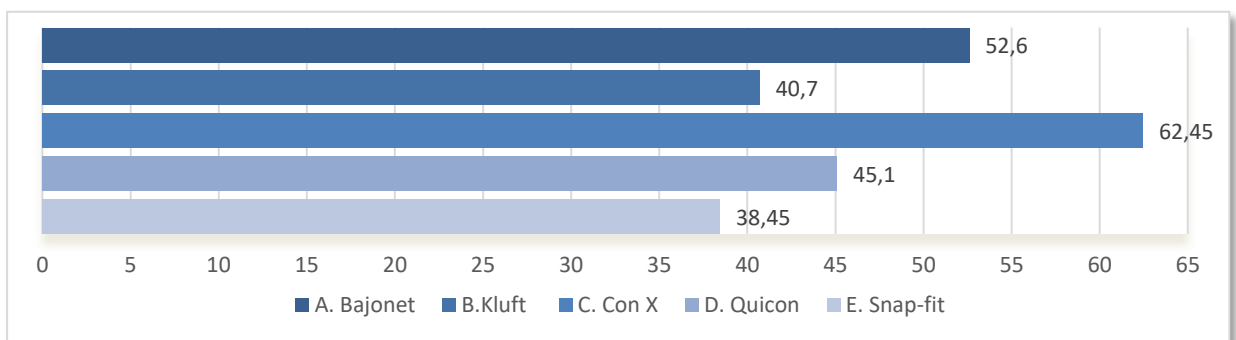
4.2 Montabelbaarheid

In deze paragraaf is het criterium “montabelbaarheid” behandeld. De resultaten van de verbindingen voor het criterium montabelbaarheid, zijn bepaald met de montagehandelingen en de intensiteit van de handelingen. De resultaten voor ‘montabelbaarheid’ zijn weergegeven in *Grafiek 2*.



Grafiek 2: Prestaties montabelbaarheid

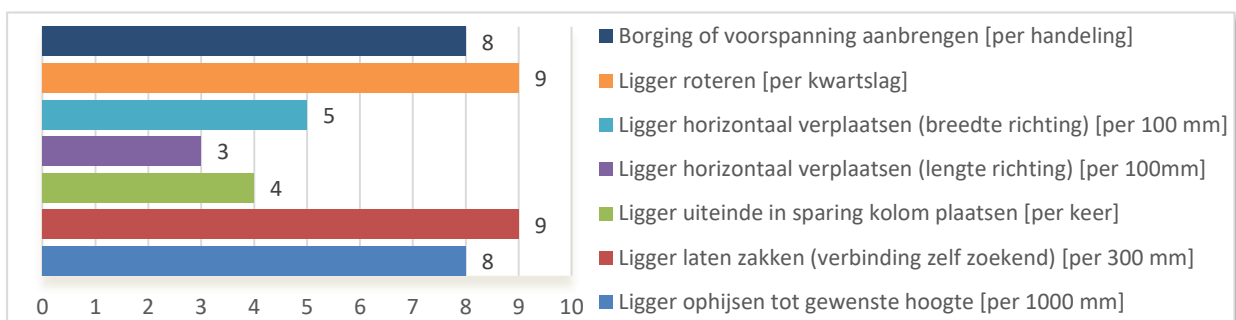
Wanneer het aantal handelingen, met de intensiteit van deze handelingen vermenigvuldigd worden, resulteert dit, in een tijdlijn voor de montage per verbinding. De intensiteit van de montage is per verbinding bepaald. Deze zijn onder elkaar gezet in *Grafiek 3*.



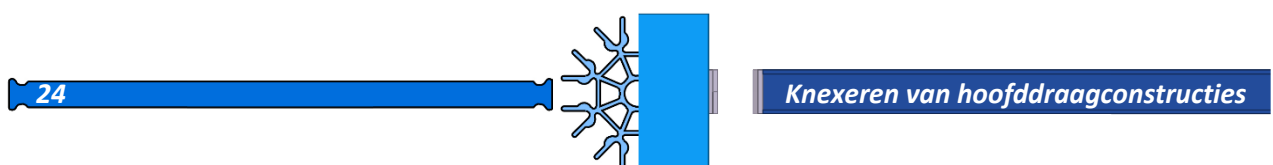
Grafiek 3: Intensiteit montagehandelingen per verbinding

4.2.1 Intensiteit montagehandelingen

In *Grafiek 4* is de intensiteit per handeling van de onderzochte “Plug & Play”-verbindingen weergegeven. De intensiteit en de verhouding tussen intensiteiten is gebaseerd op literatuur.

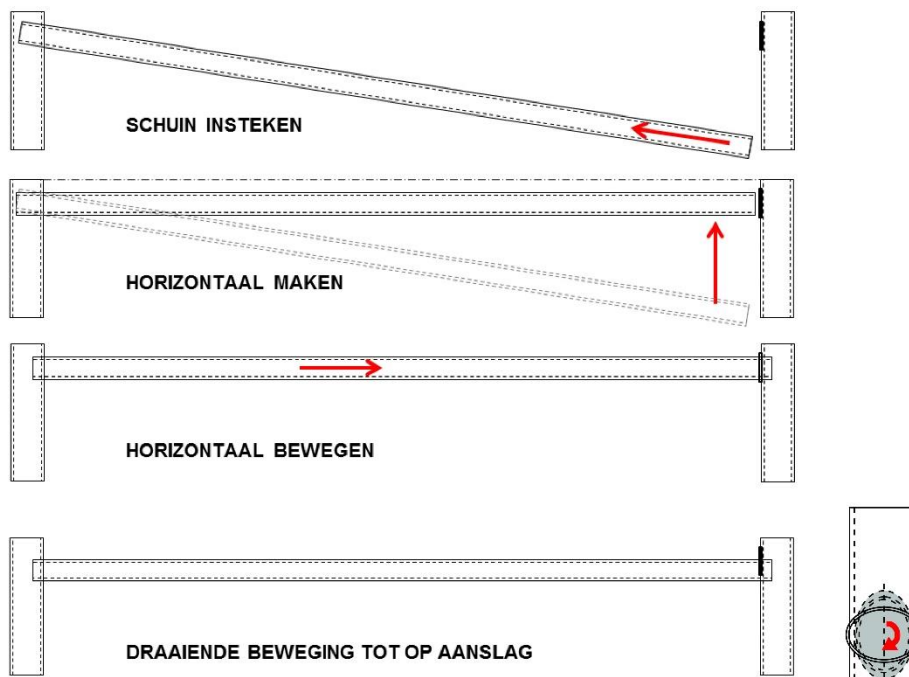


Grafiek 4: Verhouding intensiteit per montagehandeling



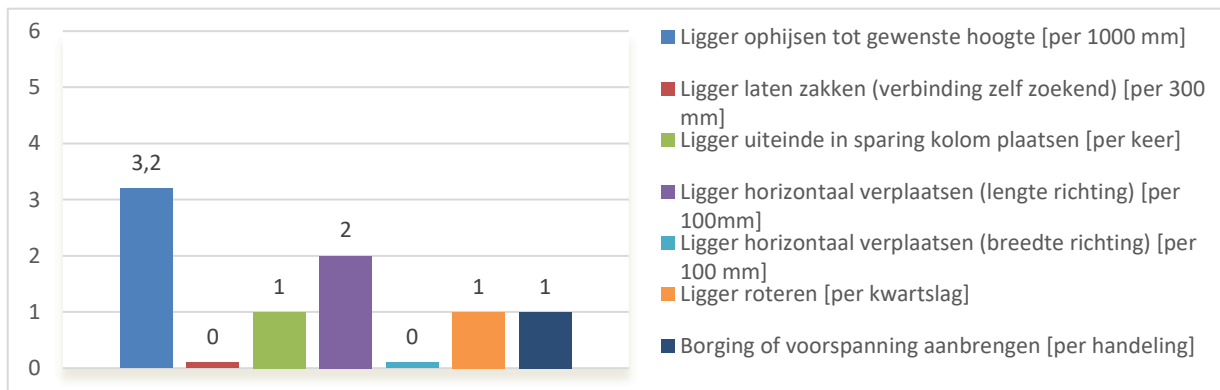
4.2.2 Hoeveelheid montagehandelingen

Voor iedere verbinding is de intensiteit van de montage uitgewerkt. Voor toelichting van de werkwijze, is de intensiteit voor de montage van de bajonetverbinding uitgewerkt, zie: *Figuur 24*.

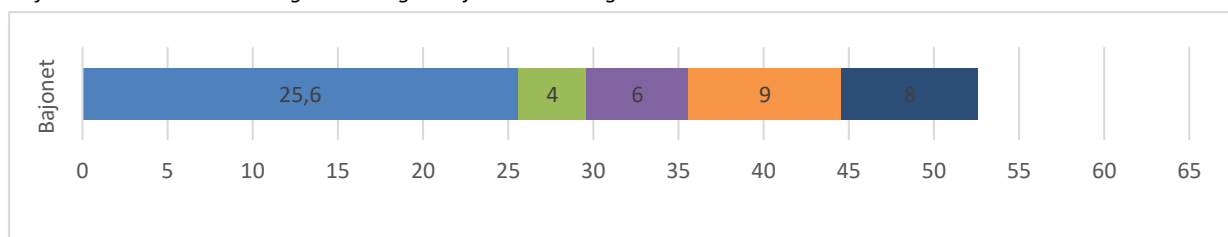


Figuur 24: Montagehandelingen bajonetverbinding (Groenendijk, 2017)

De hoeveelheid handelingen, die benodigd zijn, om de bajonetverbinding te realiseren, zijn per handeling uitgezet in *Grafiek 5*. De tijdlijn van de bajonetverbinding (te zien in *Grafiek 6*), is opgebouwd uit de hoeveelheid van de handelingen (uit *Grafiek 5*), die vermenigvuldigd zijn met de daarbij horende intensiteit. Dit is voor iedere verbinding op deze wijze uitgevoerd. De tijdlijn van de bajonet- en overige verbindingen zijn in versimpelde vorm te zien in *Grafiek 3*. De volledige uitwerking van het criterium “montabelbaarheid”, is te vinden in “*Deelrapport 2: Variantenstudie + Optimalisatie*”.



Grafiek 5: Hoeveelheid montagehandelingen bajonetverbinding

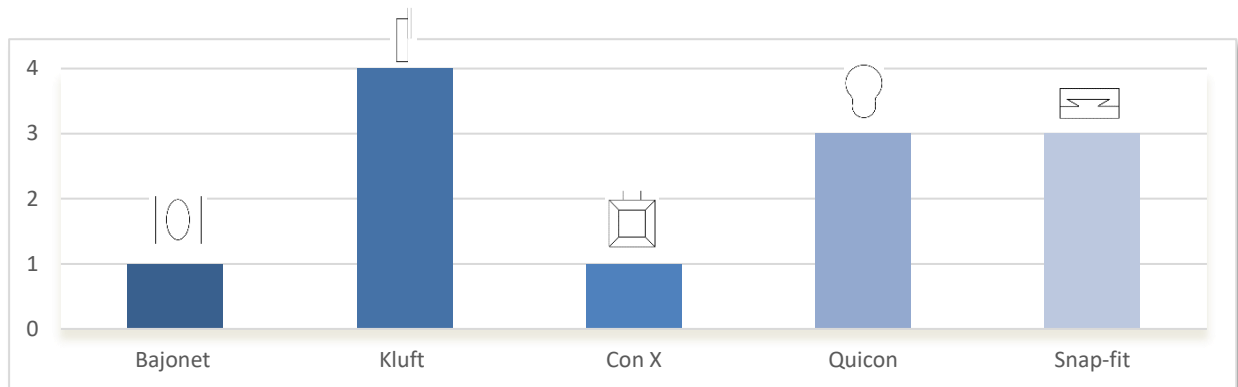


Grafiek 6: Tijdlijn montagehandelingen bajonetverbinding



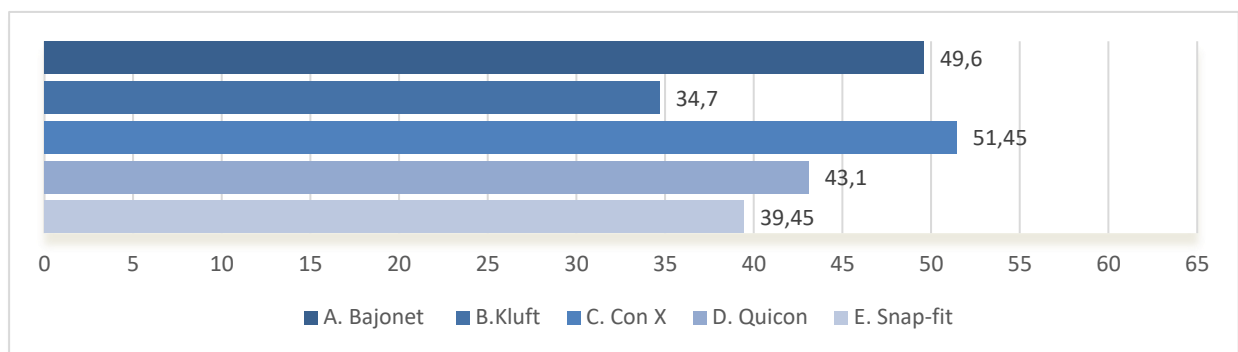
4.3 Demontelbaarheid

Deze paragraaf geeft de resultaten voor het criterium “demontelbaarheid” weer. Bij dit criterium is de aanpak hetzelfde als bij het criterium “montelbaarheid”. De resultaten van het criterium ‘demontelbaarheid’ zijn weergegeven in *Grafiek 7*.



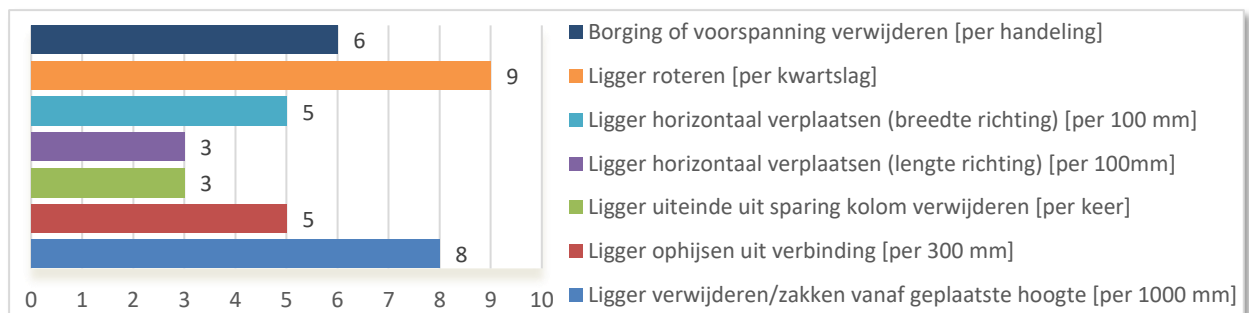
Grafiek 7: Prestaties demontelbaarheid

In *Grafiek 8* zijn de demontage-intensiteiten van de verschillende verbindingen onder elkaar gezet. De waardering per verbinding van *Grafiek 7* is gebaseerd op de resultaten in *Grafiek 8*.



Grafiek 8: Intensiteit demontagehandelingen

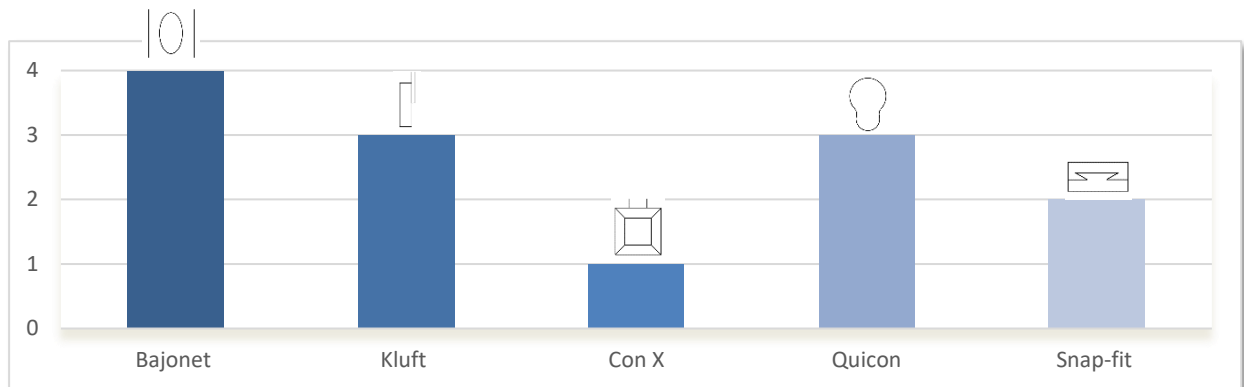
De soorten en hoeveelheden van demontagehandelingen zijn vrijwel gelijk aan die van de montage. Het verschil in eindresultaat van demontage, ten opzichte van montage, is te verklaren door verschillen in de intensiteit van enkele demontagehandelingen. De verschillen van intensiteit komen voort uit het feit, dat sommige handelingen voor de montage van een verbinding, precisie behoeft, waar dit, bij de demontage niet het geval is. De volledige uitwerking van het criterium “demontelbaarheid” is te vinden in “*Deelrapport 2: Variantenstudie + Optimalisatie*”.



Grafiek 9: Verhouding impact demontagehandelingen

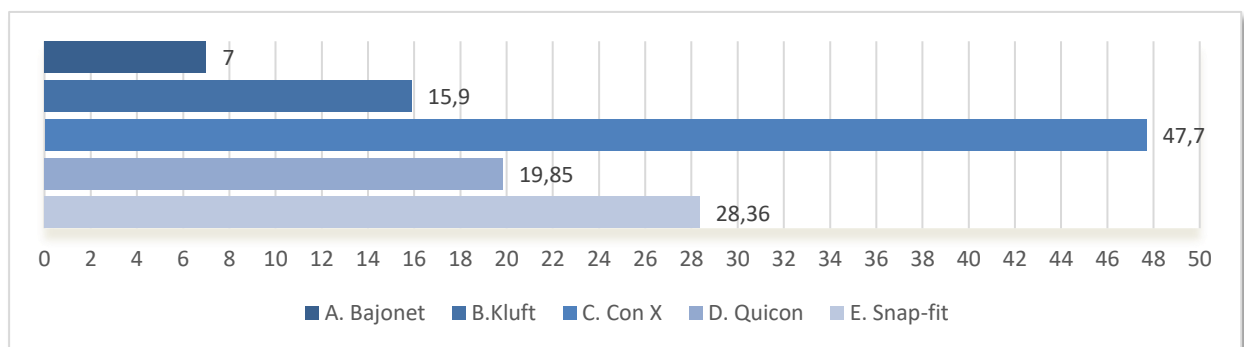
4.4 Fabricage

Deze paragraaf geeft de resultaten voor het criterium “fabricage” weer. Bij dit criterium is de aanpak hetzelfde als bij het criterium “montabelbaarheid” en “demontabelbaarheid”. De resultaten van het criterium ‘fabricage’ zijn weergegeven in *Grafiek 10*.



Grafiek 10: Prestatie fabricage

In *Grafiek 11* zijn de fabricage-intensiteiten van de verschillende verbindingen onder elkaar gezet. De waardering per verbinding van *Grafiek 10* is gebaseerd op de resultaten in *Grafiek 11*.

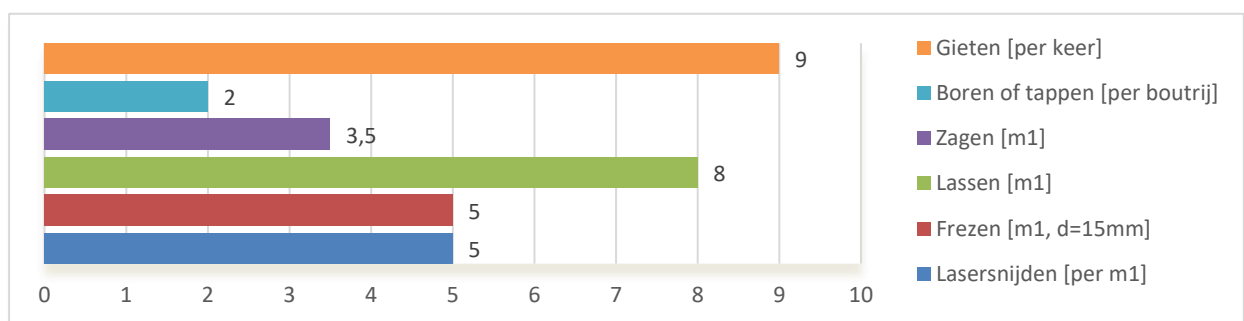


Grafiek 11: Intensiteit fabricagehandelingen

Op basis van de beschikbare literatuur zijn de fabricagehandelingen bepaald. De intensiteit van deze handelingen is bepaald, aan de hand van kostprijzen, van de handeling, voor een metaalbewerkingsbedrijf. Deze intensiteit is in samenspraak met een expert op het gebied van fabricage bepaald.

De hoeveelheid van de handeling is vermenigvuldigd met de daarbij horende intensiteit, om zo tot een totale intensiteitsscore per verbinding te komen.

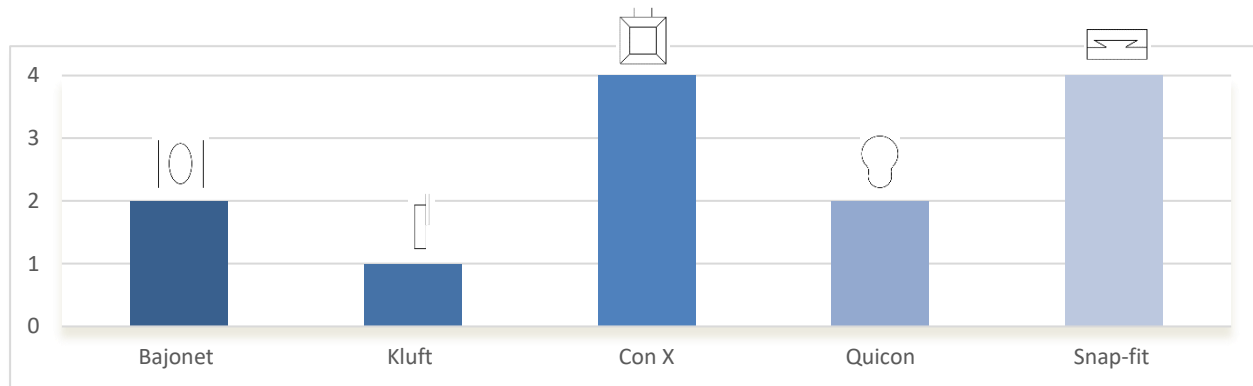
De volledige uitwerking van het criterium “fabricage” is te vinden in “*Deelrapport 2: Variantenstudie + Optimalisatie*”.



Grafiek 12: Verhouding impact fabricagehandelingen

4.5 Capaciteit

Deze paragraaf geeft de resultaten en de aanpak van het criterium “capaciteit” weer. Per verbinding is de capaciteit op het gebied van normaalkracht, dwarskracht en moment bepaald. Tevens is bepaald hoe stijf de verbinding is, door de rotatiestijfheid bij het maximaal opneembare moment te nemen.



Grafiek 13: Resultaten capaciteit per verbinding

De waardering per verbinding voor het criterium ‘capaciteit’ is te zien in *Grafiek 13*. Deze score is gebaseerd op resultaten van een multicriteriumanalyse voor verschillende soorten capaciteiten (zie *Tabel 4*). Deze multicriteriumanalyse is gemaakt omdat bijvoorbeeld een resultaat voor rotatiestijfheid moeilijk is te vergelijken met een resultaat voor normaalkracht. Uit deze multicriteriumanalyse komt een totaalscore per verbinding die vertaald is naar een score van 1 tot en met 4. Schaal en spreiding van deze score is volgens *paragraaf 4.1.3*.

Criterium	Weging	Bajonet		Kluft		Con X		Quicon		Snap-fit		MAX	
Normaalkracht (trek)	2	2	4	1	2	4	8	2	4	4	8	4	8
Normaalkracht (druk)	2	2	4	1	2	4	8	3	6	4	8	4	8
Dwarskracht	2	4	8	1	2	4	8	2	4	3	6	4	8
Moment	0,5	3	1,5	1	0,5	4	2	3	1,5	4	2	4	2
Rotatiestijfheid	0,5	3	1,5	1	0,5	4	2	2	1	4	2	4	2
Totaalscore		14	19	5	7	20	28	12	16,5	19	26	20	28
Relatieve score			68		25		100		59		93		100

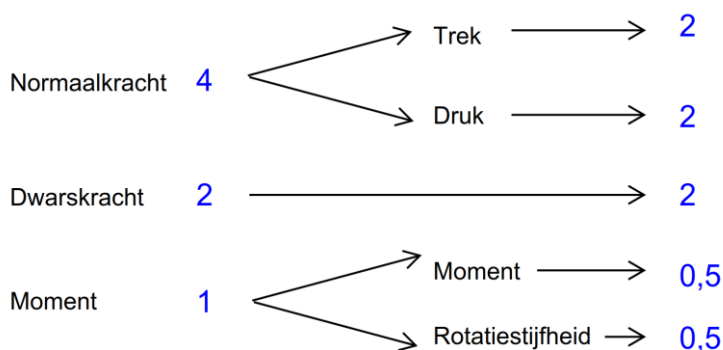
Tabel 4: Multicriteriummatrix capaciteit

Bij de waardering van de verbindingen is rekening gehouden met de eentonige waardering door extreme resultaten van de Con-X-verbinding. Omdat de Con-X-verbinding dermate hoger scoort op alle onderdelen, wordt het verschil tussen de andere verbindingen uitgevlakt. Omdat dit niet reëel is ten opzichte van de andere verbindingenvarianten, is ervoor gekozen om de schaal te bepalen aan de hand van de resultaten tussen alle verbindingen behalve de Con-X-verbinding. De waardering is gebaseerd op de resultaten zoals deze te zien zijn in *Tabel 5*.



4.5.1 Wegingsfactoren

De wegingsfactoren in *Tabel 4* zijn gebaseerd op de krachtswerking van de knopen in een geschoord raamwerk. De verdeling van deze wegingsfactoren is als volgt:



Figuur 25: Stroomschema wegingsfactoren

4.5.2 Resultaten

Onderdeel	Eenh.	Bajonet	Kluft	Con X	Quicon	Snap-fit
Normaalkracht (trek)	kN	19,90	4,20	186,18	19,10	47,70
Normaalkracht (druk)	kN	19,60	4,20	185,63	32,47	47,53
Dwarskracht	kN	141,00	37,72	224,54	56,27	78,55
Moment	kNm	2,238	0,000	15,562	2,224	3,587
Rotatiestijfheid	kNm/rad	607,0	0,0	21001,3	385,2	731,0

Tabel 5: Totaal resultaten capaciteit

4.5.3 Methode

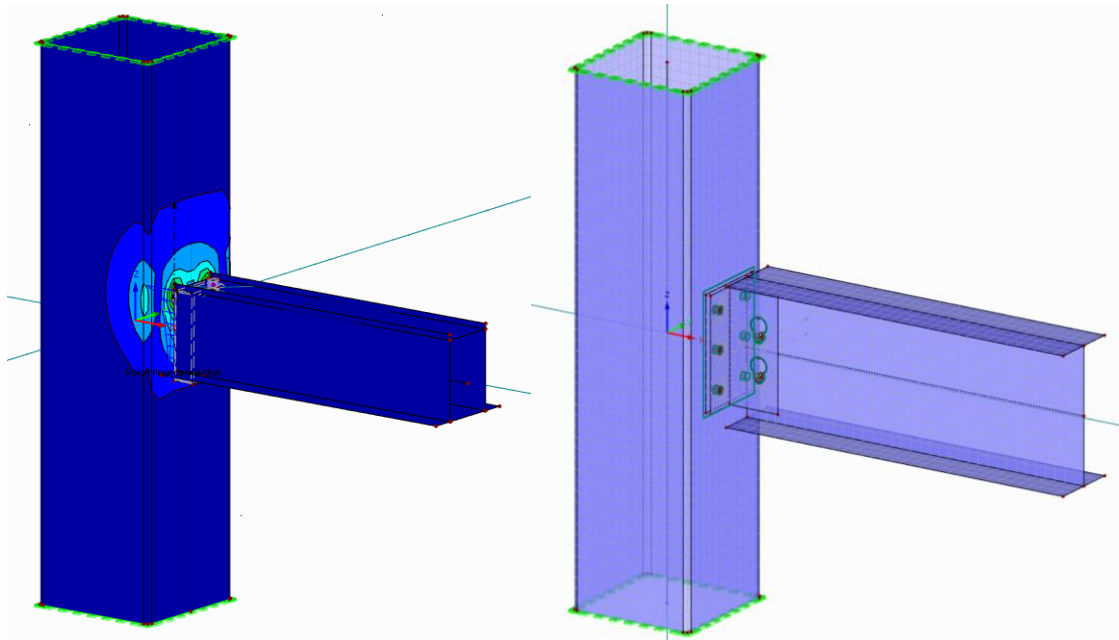
De capaciteit van de verbindingen is, waar mogelijk, bepaald met de beschikbare literatuur. Echter is een goede vergelijking pas mogelijk na het uitwerken van de capaciteit voor alle vijf de verbindingen. Bij de bepaling van de verschillende capaciteiten, is met het volgende rekening gehouden:

Bezwijkmechanismen

Voor iedere verbinding zijn de verschillende bezwijkmechanismen omschreven. Deze zijn bepaald op basis van de direct aansturende normbladen in het bouwbesluit. Lassen in de verbindingen zijn buiten beschouwing gelaten.

Bepaling capaciteit

Omdat resultaten uit proeven niet mogelijk zijn binnen dit onderzoek, is er gebruik gemaakt van het eindige-elementen rekenpakket RFEM. Met RFEM kan een rekenmodel worden opgesteld waarmee de spanningen en het spanningsverloop nauwkeurig is te bepalen. Om het bezwijkgedrag en de daarbij horende invoer te bekrachtigen, zijn exercities gedaan betreffende spanningen en vervormingsgedrag van bepaalde componenten in de verbinding. Deze exercities zijn te vinden in “Deelrapportage 2: Variantenstudie + Optimalisatie”.



Figuur 26: Rekenmodellen van de kluftverbinding (links) en Quiconverbinding (rechts) in RFEM (Dlubal RFEM (Versie 5.13.01))

Modellering

Alle verbindingen zijn gemodelleerd als ligger, die aansluit op een aan beide uiteinden ingeklemde kolom. De liggers zijn op hun uiteinde niet gesteund. Dit is gedaan omdat de ligger dan vrij kan roteren. Met deze rotatie is de rotatiestijfheid van de verbindingen bepaald.

Alle belastingen grijpen zo gelijkwaardig mogelijk aan. Zo grijpt bij bijna elke verbinding de normaalkracht over de gehele liggerdoorsnede aan, dwarskracht grijpt ter plaatse van de krachtsafdracht in de verbinding aan en een moment wordt ook over de gehele liggerdoorsnede gespreid.

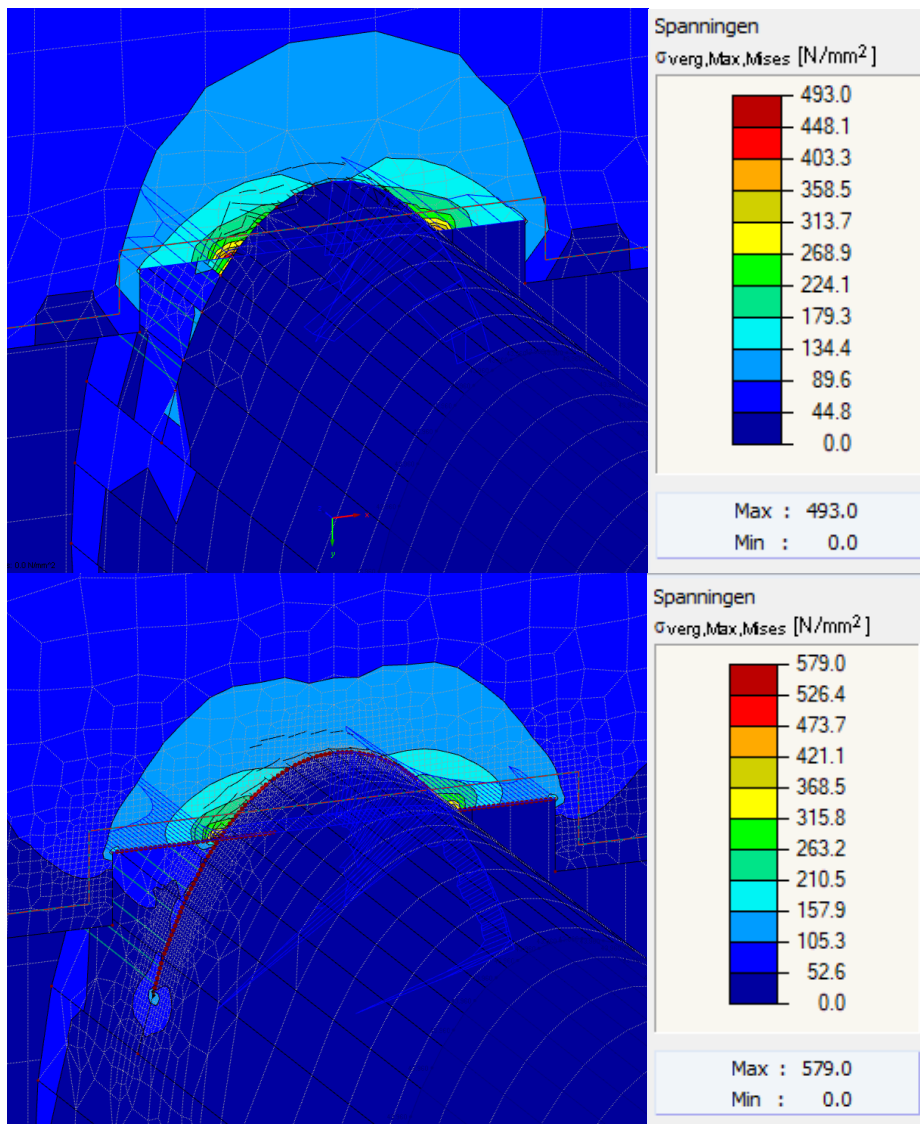
Piekspanningen

Een belangrijk onderdeel van het bekrachtigen van een model, is de beschouwing van de optredende piekspanningen. Onredelijk is om belastingen te reduceren totdat de piekspanningen zo gering zijn dat deze de vloeispanning niet overschrijden. Het is namelijk zo dat wanneer de piekspanningen geen overschrijding van de rekgrens (ϵ), die op 5% ligt, veroorzaakt, gespreid mag worden. Bij de spreiding van deze piekspanning dient de plausibiliteit verantwoord te worden.

Volgens de publicatie “Piekspanningen in eindige-elementenberekeningen” door dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom (2007) mag de piekspanning over drie maal de plaatdikte van het constructiedeel gespreid worden. Hierbij spreekt men over een 1:3 verhouding van de spreiding.

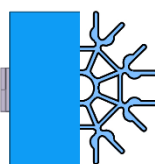
Uit “Bouwen met staal: Knopen (Stark, Wardenier, 2014)” blijkt, dat het bij een spreiding in de verhouding 1:3 of 1:2,5, gaat om een plaatdeel dat gesteund wordt door een verstijvingselement. Wanneer er geen verstijvingselement aanwezig is, kan een spreidingsverhouding van 1:1 gehanteerd worden.





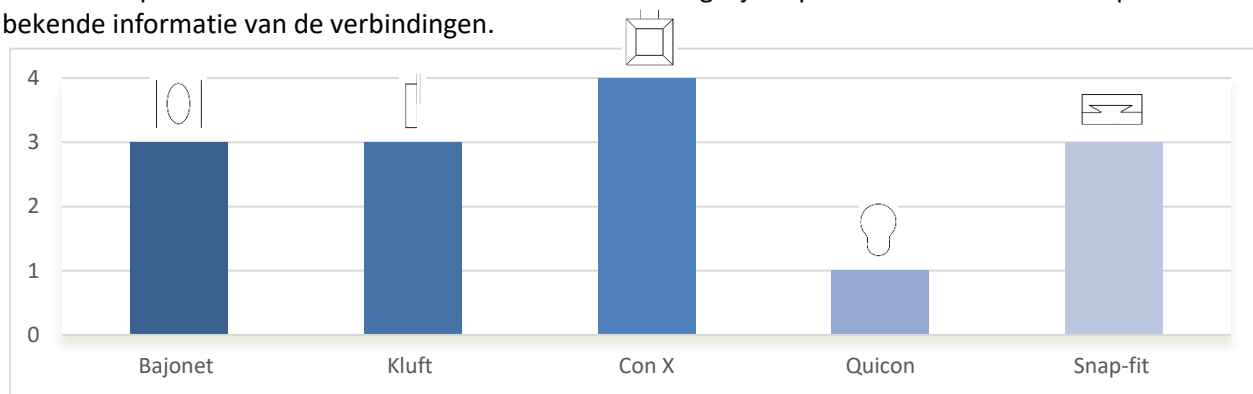
Figuur 27: Spanningsresultaten op trek belaste verbinding (boven voor netverfijning, onder na netverfijning) (Dlubal RFEM (Versie 5.13.01))

Om te achterhalen of men over een piekspanning spreekt, kan een plaatselijke EE-netverfijning in het rekenmodel geplaatst worden. Door het EE-net plaatselijk te verfijnen kan de spanning namelijk plaatselijk in hogere mate optreden. In dit geval spreekt men van een piekspanning. In *Figuur 27* is een voorbeeld van een piekspanning gegeven waar na EE-netverfijning blijkt dat het om een zeer lokale spanning gaat. Elementgrootte dient dus met inzicht gekozen te worden en zo nodig dienen de elementen vergroot of verkleind te worden.



4.6 Technische flexibiliteit

Deze paragraaf geeft de resultaten en de aanpak voor het criterium “technische flexibiliteit” weer. Per verbinding zijn aspecten binnen technische flexibiliteit beschouwd en beoordeeld. Bij technische flexibiliteit is onderscheid gemaakt tussen mogelijke toepassingsgebieden en variatiemogelijkheden in capaciteit. De mogelijke toepassingsgebieden per verbinding zijn beoordeeld aan de hand van de in *paragraaf 2.4* beschreven casus. Aan de hand van deze casus is de kans van slagen binnen deze casus ingeschat. Variatiemogelijkheden in capaciteit wordt beschouwd aan de hand van mogelijke optimalisaties en variaties op basis van de bekende informatie van de verbindingen.



Grafiek 14: Resultaten technische flexibiliteit per verbinding

De waardering van de verschillende verbindingen voor het criterium “technische flexibiliteit” is te zien in *Grafiek 14*. De Multicriteria keuzematrix vereist een waardering van 1 tot en met 4. Deze waardering is bepaald aan de hand van *Tabel 6*.

Verbinding	Score variatie	Score toepasbaarheid	Gemiddeld	Afgerond
Bajonet	2	3	2,5	3
Kluft	4	1	2,5	3
Con X	4	4	4	4
Quicon	2	1	1,5	2
Snap-fit	2	3	2,5	3

Tabel 6: Scoreverdeling voor technische flexibiliteit

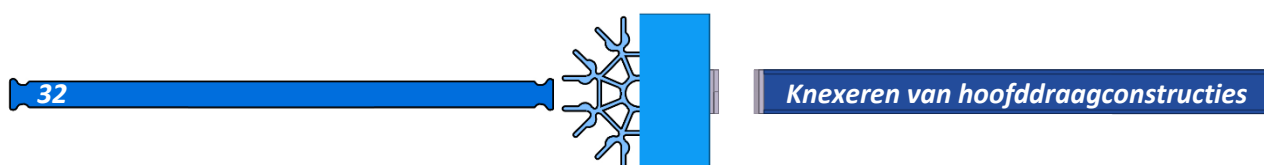
4.6.1 Variatie in capaciteit

Variatie in capaciteit, is beoordeeld, door een aantal vragen te beantwoorden met ja of nee. Voor een “ja” is de verbinding beoordeeld met 1 punt per vraag en voor een “nee” is de beoordeling 0 punten per vraag. Het betreft een drietal vragen. Namelijk:

1. Kan de capaciteit van deze verbinding verhoogd worden met dezelfde buitenwerksmaten?
2. Is de verbinding toe te passen met een geheel andere profilering voor de kolom en/of ligger?
3. Zijn aanpassingen om de capaciteit te verhogen mogelijk na fabricage, zonder dat daarmee het knexeerprincipe vervalt?

Vraag	Bajonet	Kluft	Con X	Quicon	Snap-fit
1.	1	1	1	0	0
2.	0	0	1	1	1
3.	0	1	1	0	0
Totaal	1	2	3	1	1

Tabel 7: Puntenvariatie in capaciteit per verbinding



4.6.2 Toepassingsgebieden

De verbindingen worden door hun toepasbaarheid, bij knopen in een vakwerkligger en een windbok binnen de in *paragraaf 2.4* benoemde casus, beoordeeld op hun toepassingsgebied. Bij dit toepassingsgebied is een beoordeling gegeven van niet toepasbaar (0 punten), matig toepasbaar (1 punt), voldoende toepasbaar (2 punten), goed toepasbaar (3 punten) of perfect toepasbaar (4 punten). Met deze punten verdeling kan een totaalscore van 16 punten en een minimale score van 0 punten behaald worden. In *Tabel 8* is de beoordeling van de toepassingsgebieden per verbinding weergegeven.

Onderdeel	Eenh.	Bajonet	Kluft	Con X	Quicon	Snap-fit
Vakwerkligger: Ligger/ Stijl	St.	4	0	1	0	2
Vakwerkligger: Stijl/ Ligger	St.	1	0	3	0	2
Wind bok: Ligger/ Kolom	St.	2	1	3	2	3
Wind bok: Kolom/ Ligger	St.	1	0	4	1	2
Totaal	St.	8	1	11	3	9

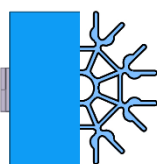
Tabel 8: Score toepassingsmogelijkheden per verbinding

4.6.3 Beoordelingsmethode

Omdat er ‘bij benadering’ een lineair verband zit tussen het versterken (vergroten van onderdelen) van de verbinding en de vergroting van de capaciteit van de verbinding, zijn de verbindingen aan elkaar vergeleken met incrementie- of decrementie-factoren ten opzichte van de casus. Het increment is de vergrotingsfactor van capaciteit die toegepast dient te worden om te voldoen in de betreffende situatie. Het decrement is het tegenovergestelde van het increment. Tevens is de technische haalbaarheid beproefd. Wanneer een verbinding bijvoorbeeld niet geborgd kan worden in een bepaalde situatie, zorgt dit voor een score van 0. In *Tabel 9* is een increment positief aangegeven en een decrement negatief.

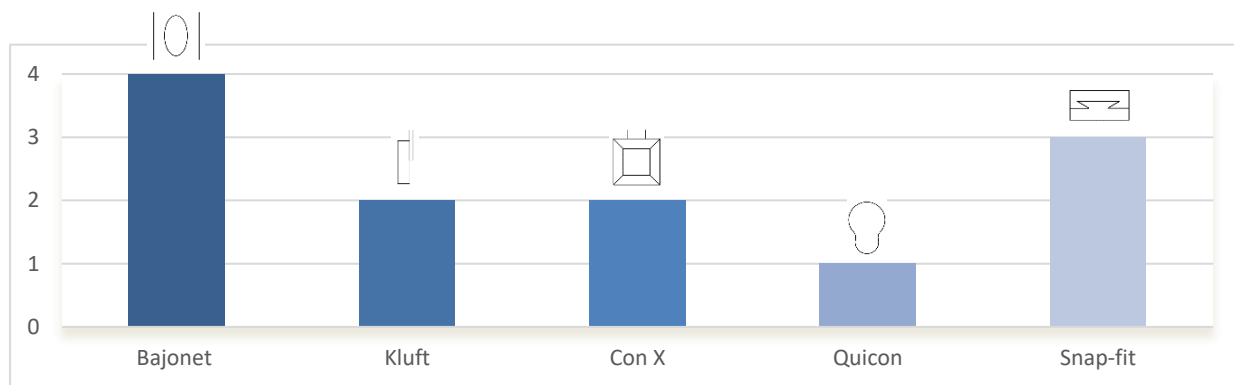
Increment/ decrement per onderdeel	Bajonet	Kluft	Con X	Quicon	Snap-fit
Vakwerkligger: Ligger/ Stijl	- 0,33	n.v.t.	- 30,00	n.v.t.	- 7,00
Vakwerkligger: Stijl/ Ligger	+ 6,20	n.v.t.	- 0,66	n.v.t.	+ 2,00
Wind bok: Ligger/ Kolom	+ 4,60	+ 20,00	- 2,00	+ 4,80	+ 1,90
Wind bok: Kolom/ Ligger	+ 10,00	n.v.t.	+ 1,10	+ 10,50	+ 4,20

Tabel 9: In- en decrementies in casusknopen per verbinding



4.7 Materiaalgebruik

Deze paragraaf geeft de resultaten en de aanpak voor het criterium “materiaalgebruik” weer. Per verbinding is het materiaalgebruik berekend. Omdat niet alleen harde cijfers, wat betreft (kilo’s) materiaal, belangrijk zijn om de prestaties voor het criterium materiaalgebruik te bepalen, is een vergelijk gemaakt in materiaalgebruik en hoe dit in verhouding is met de behaalde capaciteit (efficiëntie). Door de efficiëntie van de verbindingen mee te nemen in de waardering voor dit criterium is deze zo breed mogelijk beschouwd.



Grafiek 15: Resultaten materiaal per verbinding

Voor het criterium “materiaalgebruik” scoren de verschillende verbindingen zoals is te zien in *Grafiek 15*. Deze scores zijn bepaald aan de hand van *Tabel 10*.

Verbinding	Score gewicht	Score efficiëntie	Gemiddeld	Afgerond
Bajonet	4	3	3,5	4
Kluft	2	1,5	1,75	2
Con X	1	2,5	1,75	2
Quicon	1	1,5	1,25	1
Snap-fit	2	3	2,5	3

Tabel 10: Scoreverdeling voor materiaal

4.7.1 Gewicht per verbinding

De gewichten van de verbindingen zijn bepaald aan de hand van de verbindingen zoals deze zijn beschreven in *paragraaf 2.1*. Hierbij is uitgegaan van een verbinding waar een ligger aan één zijde van de kolom aansluit.

Omdat de Con-X-verbinding in grote mate verschilt van de andere verbindingen, zijn deze resultaten niet meegenomen bij de schaalverdeling van de waardering voor het gewicht.

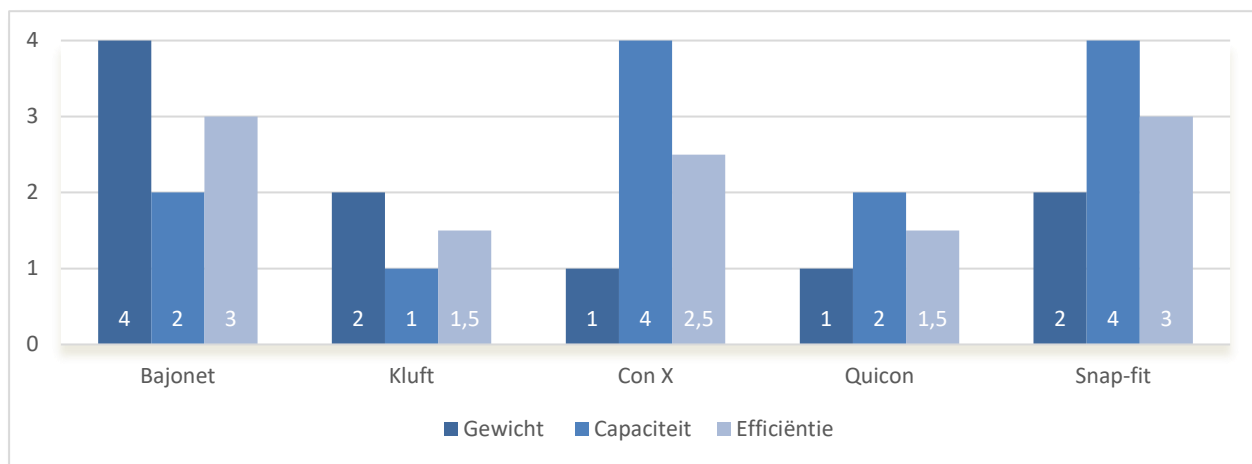
Verbinding	Gewicht	Score
Bajonet	94,39 kg	4
Kluft	99,39 kg	2
Con X	144,98 kg	1
Quicon	102,75 kg	1
Snap-fit	99,75 kg	2

Tabel 11: Gewichten verbindingen en de daarbij horende waardering



4.7.2 Efficiëntie

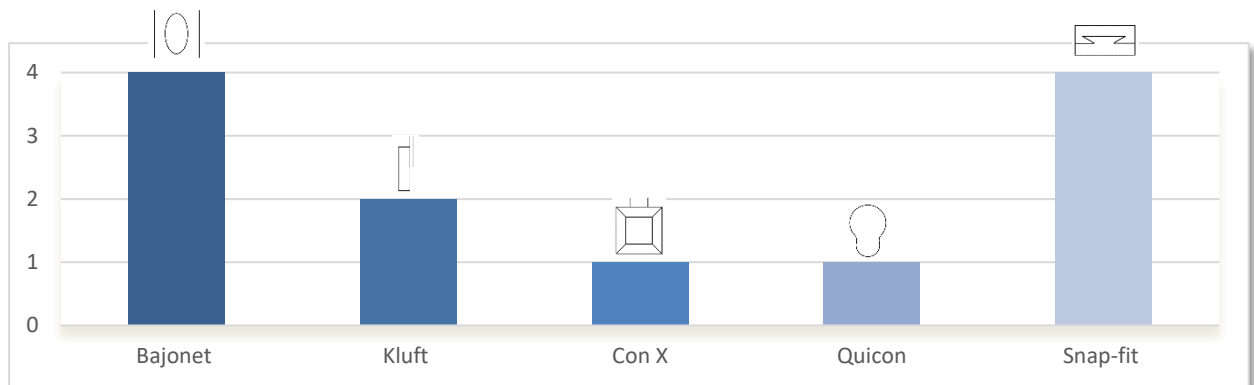
De beoordeling voor efficiëntie is gedaan door het gemiddelde van de beoordeling op het gebied van capaciteit en gewicht te nemen. Dit is te zien in *Grafiek 16*. De waardering voor capaciteit is afkomstig uit *paragraaf 4.5*.



Grafiek 16: Resultaten efficiëntie per verbinding

4.8 Esthetica

Deze paragraaf geeft de resultaten en de aanpak voor het criterium “esthetica” weer. In *Grafiek 17* is te zien hoe de verschillende “Plug & Play”-verbindingen ten op zichte van elkaar scoren op gebied van esthetica.

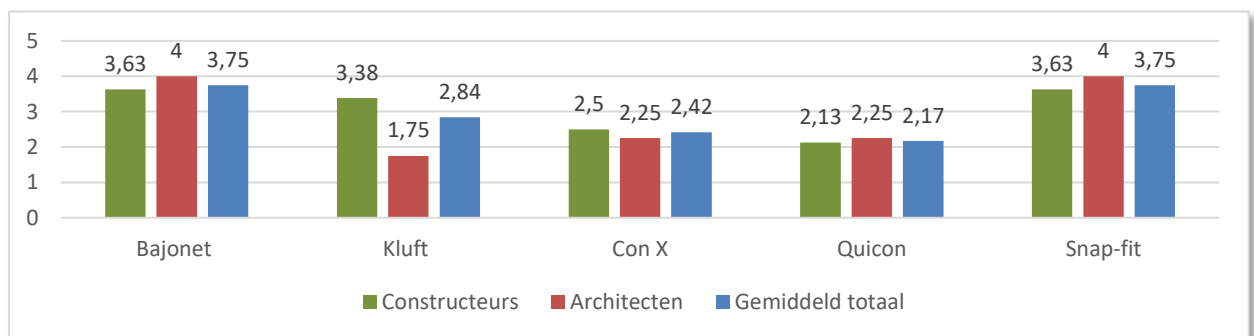


Grafiek 17: Prestaties esthetica

Esthetica is een niet-technisch criterium. Er zijn geen eisen of eigenschappen vastgelegd, om te bepalen of een verbinding esthetisch hoog of laag scoort. Dit komt doordat esthetica een subjectief onderwerp is. De beoordeling van het uiterlijk van een verbinding kan voor ieder anders zijn.

Om de prestaties voor het criterium esthetica te bepalen is er een enquête afgenomen. Met deze enquête zijn meningen verzameld van constructeurs en architecten.

In de enquête is gevraagd om de verbindingen op esthetische waarde te beoordelen met een cijfer van één tot en met vijf, waarin een vijf de beste waardering is. De resultaten van de enquête zijn weergegeven in *Grafiek 18*.



Grafiek 18: Resultaten enquête esthetica

Omdat uit de resultaten van de enquête blijkt dat de meningen binnen een partij verdeeld zijn, is er bij de totaalbeoordeling, geen onderscheid gemaakt tussen beoordelingen van constructeurs en beoordelingen van architecten.

Hoofdstuk 5: Optimalisatie

In dit hoofdstuk is de optimalisatie van de Snap-fitverbinding behandeld. Enkel de Snap-fit is geoptimaliseerd, omdat deze de meest geschikte verbinding is om mee te knexeren. Buiten het feit dat de Snap-fit de meest geschikte verbinding is om mee te knexeren, kan deze nog geoptimaliseerd worden, om deze zo, nog geschikter te maken. Ook is er een verbinding bedacht met de Snap-fit als vertrekpunt. Deze bedachte verbinding past perfect binnen het knexeren.

De optimalisatie is gedaan in de vorm van aanbevelingen en suggesties.

De optimalisaties en het idee voor de zelfbedachte verbinding (in “*Deelrapport 2: Variantenstudie + Optimalisatie*” uitgebreid toegelicht) zijn voortgevloeid uit brainstormsessies. Na de brainstormsessies zijn de ideeën geïllustreerd en specifiek gemaakt. De brainstormsessies die plaats hebben gevonden zijn:

- 18-04-2018 Inalfa Roofsysteem;
- 20-04-2018 JVZ ingenieurs.

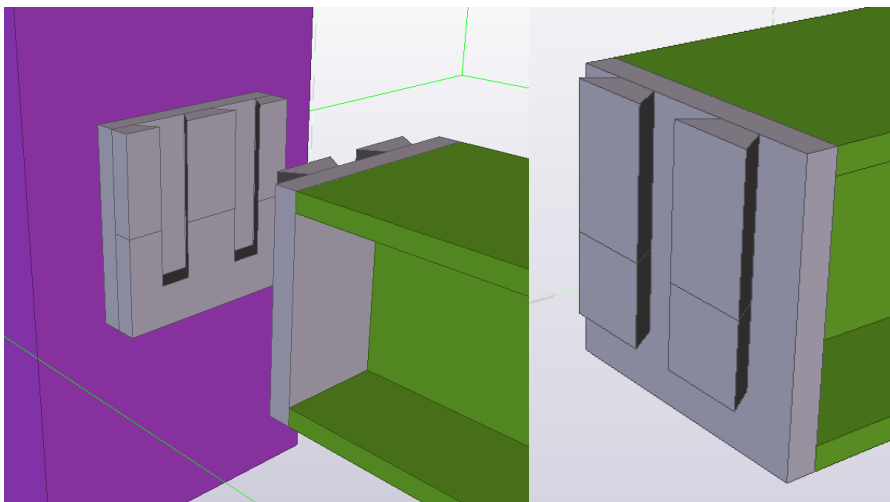
De belangrijkste optimalisaties zijn in de volgende paragrafen benoemd.

5.1 Optimalisatie 2 (Snap-fit): Dubbele versimpelde zwaluwstaart + zelfborging

Uit de in *paragraaf 4.1.1* benoemde keuzematrix blijkt dat de Snap-fitverbinding minder goed scoort op fabricage. Dit komt doordat de verbinding complexe vormen bevat welke gefreesd dienen te worden.

Door de verbinding van minder complexe onderdelen te voorzien kan er worden bespaard in handelingen bij het freeswerk.

De minder complexe onderdelen in de verbinding zijn de twee identieke zwaluwstaarten. In het originele ontwerp zijn de zwaluwstaarten verschillend in doornede boven en onder. Door de doorsnede over de hele lengte hetzelfde te houden, versimpelt dit het onderdeel waardoor de complexiteit van het freeswerk afneemt.

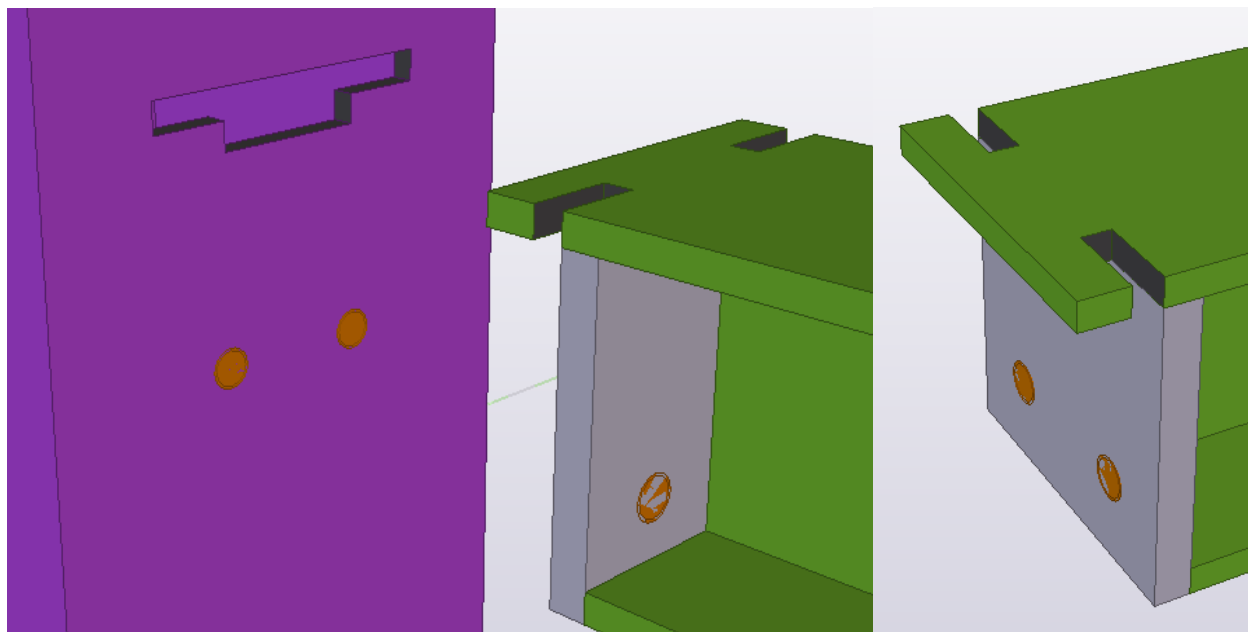


Figuur 28: Dubbele versimpelde zwaluwstaart + zelfborging (Tekla structures (Versie TS 2017i))

Ook lopen de zwaluwstaarten in deze optimalisatie niet over de gehele hoogte van de plaat. Daardoor ontstaat een aanslag waardoor verticale borging en daarmee ook dwarskrachtoverdracht voorzien is. Een ander bijkomend voordeel van deze optimalisatie is dat toleranties een minder dominante rol spelen in de capaciteit van de verbinding. Door het contactvlak tussen de zwaluwstaart en de contra-zwaluwstaart enkel op trek te belasten en daarmee dus niet meer op dwarskracht, kunnen toleranties worden toegelaten zonder dat de verbinding de belasting anders afdraagt dan de intentie is. Dit idee is ontstaan naar aanleiding van de brainstormsessie bij JVZ ingenieurs.

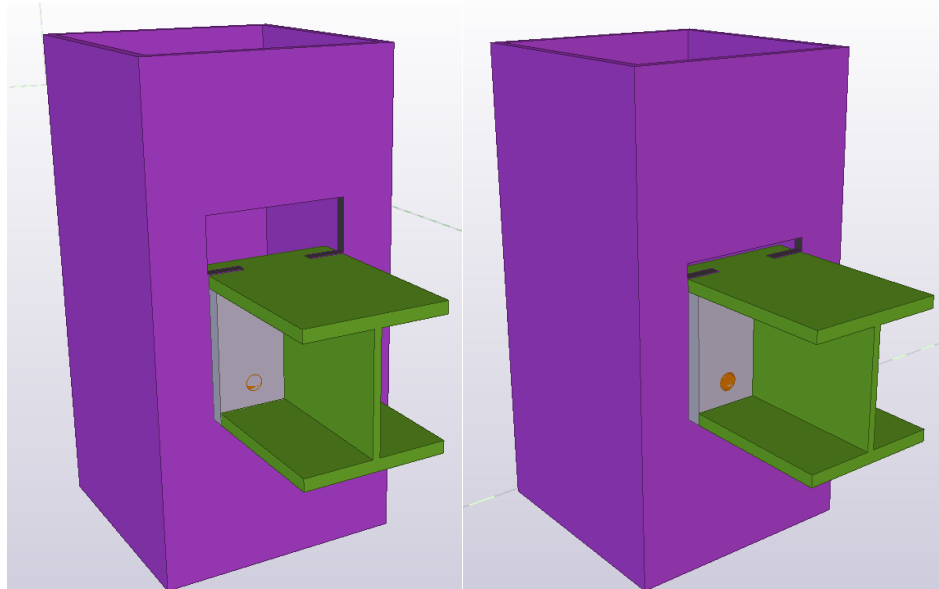
5.2 Optimalisatie (knexeren): ITP-verbinding

De ITP-verbinding (Integrated T-Part verbinding) is een optimalisatie die volgt uit de brainstormsessie bij Inalfa Roofsystems. Bij het knexeren dient het om een modulair bouwsysteem te gaan. Wanneer een dergelijk bouwsysteem modulair dient te zijn, moeten de verbindingen ook op verschillende hoogtes aan kunnen sluiten. Het verbindingselement op de ligger hoeft enkel aan de te verbinden zijde te zijn voorzien. Echter dient het verbindingselement op de kolom op meerdere posities geplaatst te worden. Dit om hiermee het bouwsysteem modulair te laten zijn.

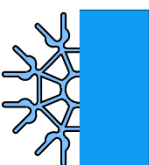


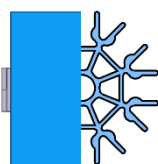
Figuur 29: ITP-verbinding (Tekla structures (Versie TS 2017i))

De complexiteit van de verbinding is bij deze verbinding afgenomen ten opzichte van de andere verbindingen. In het uitstekende gedeelte van de bovenflens van de ligger worden sleuven gezaagd die het T-stuk vormen. Dit T-stuk wordt in de sparring geplaatst en naar beneden geschoven tot de aanslag. De verticale borging is gerealiseerd door twee bouten. De verbinding in deze vorm heeft enkel een aantal zaag- en ponshandelingen voor sparringen. Ook hoeft er nog maar één plaat aan de ligger gelast te worden. Uiteindelijk zal de sparring in de kolom iets groter uitvallen ten behoeve van montage/demontage (zie Figuur 30).



Figuur 30: Vergrootte sparring versus kleine sparring (Tekla structures (Versie TS 2017i))





Hoofdstuk 6: Conclusie

Dit onderzoek geeft antwoord op de vraag:

Welke bestaande stalen constructieve “Plug & Play”-verbinding is de meest geschikte verbinding om hoofddraagconstructies te knexeren?

Er wordt antwoord gegeven op deze vraag met behulp van een multicriteriumanalyse.

In de multicriteriumanalyse zijn de juiste afwegingen gemaakt door twee deelvragen te beantwoorden:

- *Welke criteria zijn belangrijk om de prestaties van de verschillende “Plug & Play”-verbindingen aan te toetsten?*
- *Hoe zwaar weegt elk criteria mee voor de prestaties van de verschillende “Plug & Play”-verbindingen?*

Deze vragen zijn belangrijk, aangezien hiermee, de eisen van het “Knexeren” worden meegenomen in het onderzoek. Dit onderzoek, vergelijkt de verbindingen, op de criteria capaciteit, montabelbaarheid, technische flexibiliteit, demontabelbaarheid, fabricage, materiaalgebruik en esthetica. Deze criteria staan op afloop van wegingsfactor.

Door de volgende vraag te beantwoorden zijn de verbindingen aan elkaar vergeleken:

- *Hoe presteren de verschillende bestaande “Plug & Play”-verbindingen tegenover elkaar?*

De beoordeling per criterium, voltrekt zich, met behulp van de prestaties per verbinding. Met deze beoordelingen en wegingsfactoren per criteria heeft iedere verbinding een totaalscore.

De multicriteriumanalyse toont aan, dat de Snap-fitverbinding de meest geschikte “Plug & Play”-verbinding is om te knexeren.

Deze verbinding scoort samen met de Con-X-verbinding het beste op capaciteit en als beste op montabelbaarheid. Verder scoort deze verbinding op de overige criteria bovengemiddeld. Eén duidelijk nadeel aan de verbinding is dat deze slecht scoort op het criterium fabricage. Dit is te verklaren door de complexe vormen in de verbinding, die moeilijk te fabriceren zijn.

Dit onderzoek geeft voorstellen om deze verbinding te optimaliseren. Zo zijn de complexe vormen in de verbinding teruggebracht naar minder complexe vormen en is voorgesteld om het aantal componenten en het daarbij horende aantal handelingen terug te brengen. Door deze optimalisaties worden wellicht er concessies gedaan op de prestaties van overige criteria. Tevens geven die suggesties voor optimalisatie antwoord op de volgende deelvraag:

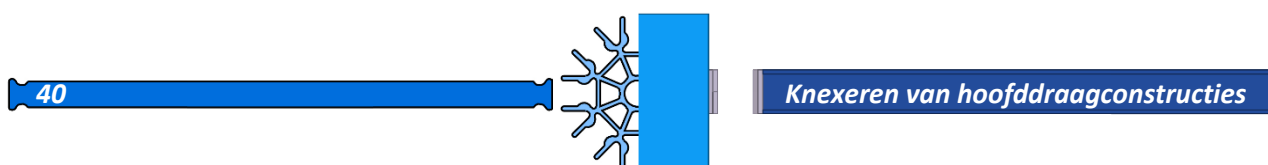
- *Hoe valt deze “meest geschikte” verbinding nog verder te optimaliseren?*

Ook toont dit onderzoek de technische haalbaarheid van knexeren met de Snap-fit verbinding aan. Het onderzoek waardeert namelijk het criterium technische flexibiliteit aan de hand van mogelijke toepassingen binnen een casus. Uit het feit dat de Snap-fitverbinding toepasbaar is in deze casus blijkt dat knexeren met de Snap-fit technisch haalbaar is.

Tevens geeft dit onderzoek antwoord op de deelvraag:

- *Wordt de milieubelasting door de bouwsector gereduceerd door stalen hoofddraagconstructies van gebouwen te knexeren?*

Het literatuuronderzoek geeft hier antwoord op. Knexeren stimuleert namelijk het tweede leven van een constructiedeel. Bij een tweede leven van een constructiedeel wordt in dit tweede leven ca. 75% van de Co₂-uitstoot bespaard door de halffabricaten-fase over te slaan. Waar een geknexeerde hoofddraagconstructie in twee levens 125% Co₂ uitstoot, stoot een traditionele hoofddraagconstructie 200% uit.



Hoofdstuk 7: Discussie

De gehele haalbaarheid van “knexeren” kan niet worden beoordeeld met dit onderzoek. Hiervoor dient onderzoek gedaan te worden naar de economische en maatschappelijke haalbaarheid.

In de variantenstudie van het onderzoek, is het 3D printen van verbindingen, niet meegenomen. Hiervoor staat de ontwikkeling van het 3D printen nog te veel in de kinderschoenen. Wanneer de techniek zover gevorderd is dat de verbindingen op grote schaal geprint kunnen worden, zal dit gevolgen hebben op meerdere criteria uit dit onderzoek maar ook voor de te vergelijken verbindingen.

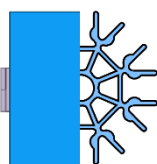
In dit onderzoek, zijn de verbindingen, als knoop in een vakwerkconstructie beschouwd. Dit mede omdat een vakwerkconstructie de meest voor de hand liggende constructie is om te knexeren. Omdat de capaciteit van de verbinding een zeer bepalende factor is bij de keuzematrix, heeft deze grote invloed op het eindresultaat. De wegingsfactoren in de keuzematrix van capaciteit zijn in dit onderzoek gebaseerd op een vakwerkconstructie, echter zijn voor een ander constructietype, andere wegingsfactoren van kracht, dit kan de eindscore beïnvloeden.

Bij sommige verbindingen is het bezwijkmechanisme het bezwijken van de kolomflens. Dat komt vaak door een ongunstige krachtsinleiding vanuit de ligger. Wanneer de kolom niet als koker uitgevoerd wordt maar als H-profiel kan een ander bezwijkmechanisme van kracht zijn. Dit heeft invloed op het resultaat voor capaciteit.

De technische flexibiliteit is in dit onderzoek met geringe toepassingsgebieden beschouwd. Het is dus mogelijk dat bij de beschouwing van technische flexibiliteit met andere toepassingsgebieden, of een heel specifiek toepassingsgebied, de score licht afwijkt ten opzichte van de score van dit onderzoek.

Met “startvervormingen” wordt de vervorming van de verbinding bedoeld voordat deze belast wordt. Dit komt meestal door toleranties. Door deze startvervormingen kunnen excentriciteiten ontstaan, die meestal gepaard gaan met een vermindering van capaciteit. Door in dit onderzoek geen rekening te houden met de zogenaamde startvervorming zijn de capaciteiten van de verbindingen wellicht te voordelig bepaald.

Door gebrek aan tijd is het criterium “duurzaamheid” niet meegenomen in de vergelijkingsanalyse. Wanneer dit criterium wel meegenomen wordt in het vergelijk kan dit tot andere eindresultaten leiden.



Hoofdstuk 8: Aanbevelingen

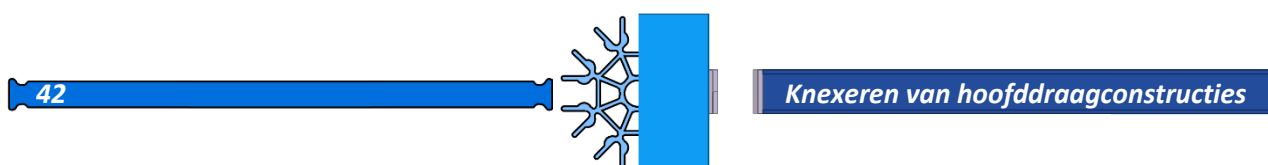
Aanbevolen wordt, om de Snap-fitverbinding toe te passen als “Plug & Play”-verbinding, wanneer hoofd-draagconstructies geknexeerd worden. De Snap-fitverbinding scoort het beste in de multicriteriumanalyse van de variantenstudie.

In het onderzoek is enkel de technische haalbaarheid van knexeren aangetoond. Om de gehele haalbaarheid van knexeren aan te tonen wordt aanbevolen vervolgonderzoek te doen betreffende:

- De economische haalbaarheid van knexeren;
- De maatschappelijke haalbaarheid van knexeren.

De wegingsfactoren van de beoordelingscriteria, zijn bepaald door verschillende beroepsgroepen uit de bouwsector, om zo min mogelijk de afhankelijkheid van een belanghebbende mee te nemen in de keuze matrix. Wanneer knexeren daadwerkelijk geïmplementeerd wordt en er een concrete belanghebbende is, wordt aangeraden de wegingsfactoren te herwaarderen naar de belanghebbende.

Aanvullende optimalisaties van de Snap-fitverbinding (of de ITP-verbinding) wordt aangeraden bij het in praktijk brengen van knexeren van hoofddraagconstructies. Dit onderzoek rijkt mogelijke optimalisatie aan.



Hoofdstuk 9: Literatuurlijst

Prof. Bijlaard, F.S.K., Brekelmans, W.P.M. (2008).

Plug and play type joints in steel and steel and steel-concrete composite constructions: Development guide and design considerations (Technical Paper).

Delft: auteur.

Prof. Bijlaard, F.S.K., Girao Coelho, A.M., Magelhaes, V.J.D.A. (2009).

Innovative joints in steel construction.

Steel Construction – Design and Research, 2 (December), 243-247.

Bouwen met Staal. (2018).

Duurzaam in Staal.

Geraadpleegd op 2 maart 2018, van www.duurzaaminstaal.nl

Bouwmeester, H. (in opdracht van SEV). (2000).

Demonstratieprojecten IFD- bouwen 2000: Een omslag in bouwen, een omslag in denken (pp. 11).

Rotterdam: Stuurgroep Experimenten Volkshuisvesting.

Con X Tech. (2018).

XR200 DESIGN CRITERIA/ LOAD MAP.

Verenigde Staten: Con X Tech.

Con X Tech. (2018).

The Connections' Unique characteristics. Geraadpleegd op 12 april 2018, van (<http://www.conx-tech.com/benefits/engineers/U>)

Dlubal RFEM (Versie 5.13.01) [Computerprogramma].

Tiefenbach: Dlubal software GmbH

Doodeman, M. (2018).

Personeelstekort in de bouw: De stand van zaken.

Geraadpleegd op 7 mei 2018, van <https://www-1cobouw-1nl-10000287301bb.stcproxy.han.nl/bouw-breed/artikel/2018/03/personeelstekort-in-de-bouw-101259475>

Durmisevic E. & Brouwer J. (2016).

DESIGN ASPECTS OF DECOMPOSABLE BUILDING STRUCTURES.

University of Twente.

Galama, M.J. (2000).

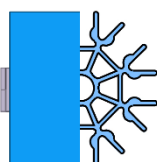
Demonstratieprojecten IFD- bouwen 2000: Een omslag in bouwen, een omslag in denken (pp. 118).

Rotterdam: Stuurgroep Experimenten Volkshuisvesting.

Ing. Groenendijk, R.J.G. (2017).

Constructieve "Plug and Play" verbindingen in tuinbouwkassen.

Nijmegen: Auteur.



Ing. de Groot, F. (1998).
Bouwsnelheid staalskeletbouw zichtbaar gemaakt.
Bouwen met Staal, november/december (145).

Ing. de Groot, F. (1998).
Bouwsnelheid staalskeletbouw zichtbaar gemaakt.
Bouwen met Staal, november/december (145), 22-25.

Heywood, M.D. (2004).
Quicon Design Guide to BS 5950-1. (SCI PUBLICATION P338).
Berkshire: The steel construction institute.

dr. Ir. Hoogenboom, P.C.J. (2007).
Piekspanningen in eindige elementenberekeningen.
Delft: Auteur.

Inalfa roof systems. (2018).
Interview J. Custers: 02-03-2018.
Venray: auteur.

Item (2018).
Interview M. Bastin: 01-03-2018.
Delft: auteur.

Prof. Dr. Ir. Kals, H.J.J., Ir. Buiting-Csikós, Cs., Ir. van Luttervelt, C.A., Ir. Moulijn, K.A., Ir. Ponsen, J.M. Ir. Streppel, A.H. (2007).
Industriële productie: Het voortbrengen van mechanische producten (4^e herziene druk).
Den Haag: Sdu Uitgevers bv.

K'NEX. (z.d.).
ABOUT K'NEX.
Geraadpleegd op 14 februari 2018, van <https://www.knex.com/about-knex>

Quesada, S. (2016).
Master: Optimization of a snap-fit connection: A steel connection for the built environment.
Eindhoven: Auteur.

Root B.V. (Z.D.).
PONTSTIJGER.
Geraadpleegd op 15 mei 2018, van <https://www.root-bv.nl/projecten/pontsteiger/>

SenterNovem (Rijksoverheid). (2007).
Industrieel, flexibel en demontabel bouwen (IFD). (Infoblad).
Rijksoverheid.

Slawik, H., Bergmann, J., Buchmeier, M., Tinney, S. (2010)
CONTAINER ATLAS: A PRACTICAL GUIDE TO CONTAINER ARCHITECTURE (pp. 38-41).
Berlijn: Die Gestalten Verlag GmbH & Co. KG.

Ssh&. (2018).

Helix Arnhem.

Geraadpleegd op 7 mei 2018, van <https://www.shhn.nl/ik-zoek-een-kamer/complexinformatie/woning/item/42/>

Prof.ir. Stark, J.W.B., prof.dr.ir. Wardenier, J. (2014).

Knopen: Berekenen van geboute en gelaste verbindingen in raamwerken en in buisconstructies volgens Eurocode 3.

Zoetermeer: Bouwen met Staal.

Technosoft Raamwerken (Versie 6) [Computerprogramma].

Deventer: Technosoft software development.

Tekla Structures (Versie TS 2017i) [Computerprogramma].

Zevenaar: Construsoft.

University of Cambridge. (2010).

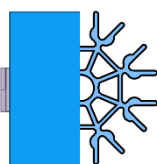
Novel Joining Techniques to Promote Deconstruction of Buildings.

Cambridge: auteur.

Van der Veen, R., Peschier, M., Stichting Stimular. (oktober, 2017).

Handvat duurzaam materiaalgebruik voor bouw- en infrabedrijven: Praktische tips en voorbeelden. (Publicatie).

Zoetermeer: Bouwend Nederland.



Hoofdstuk 10: Bijlagen

DEELRAPPORT 1	Literatuurstudie
DEELRAPPORT 2	Variantenstudie & Optimalisatie
DEELRAPPORT 3	Programma van Eisen & Casusbeschrijving
DEELRAPPORT 4	Plan van Aanpak
DEELRAPPORT 5	Procesmap

