

# Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:  
bouwkunde

## **Masterthesis**

**Ontwerp van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken (>2) in houtconstructies**

**Berend De Norre**

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

### **PROMOTOR :**

Prof. dr. ir. Jose GOUVEIA HENRIQUES

### **COPROMOTOR :**

ing. Glenn VAN VUGT

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek  
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



**2022**  
**2023**

# Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:  
bouwkunde

## ***Masterthesis***

***Ontwerp van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken (>2) in houtconstructies***

**Berend De Norre**

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

**PROMOTOR :**

Prof. dr. ir. Jose GOUVEIA HENRIQUES

**COPROMOTOR :**

ing. Glenn VAN VUGT



**KU LEUVEN**



## Woord vooraf

In deze masterproef kreeg ik de kans om mee te werken aan de ontwikkeling van WoodConnector, een ontwerptool van CERG die verschillende verbindingen in houtconstructies berekent. Mijn bijdrage hierbij was het opstellen van een analytische methode voor het ontwerp van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken en het implementeren van deze methode in WoodConnector. Voor het opstellen van een analytische methode onderzocht ik eerst bestaande analytische modellen voor stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken, omdat de huidige versie van Eurocode 5 slechts een zeer korte en vage uitleg voor dit type verbinding beschrijft. Ik was blij met de toewijzing van deze masterproefonderwerp, omdat ik hierbij onderzoek kon combineren met ontwikkeling en uitbreiding van een ontwerptool. Zo gebruikte ik meerdere vaardigheden die ik tijdens mijn opleiding als industrieel ingenieur in de bouwkunde geleerd heb. Tijdens dit onderzoek is het mij nogmaals duidelijk geworden dat de dimensionering van houtconstructies een complexe opdracht is. Het ontwerp van houtverbindingen hierbij is afhankelijk van veel verschillende factoren, waarbij de vakkennis en ervaring van een ingenieur cruciaal zijn om correct met deze factoren om te gaan.

Via deze weg wil ik ook graag een aantal mensen bedanken voor hun hulp tijdens deze masterproef. Eerst wil ik mijn promotor prof. dr. ir. José Henriques bedanken. Dankzij zijn bijstand, advies en feedback over de verschillende taken van de masterproef heen was het mogelijk om heel dit proces in mijn scriptie te bundelen. Daarnaast speelde mijn copromotor ing. Glenn van Vugt hierbij een belangrijke rol, maar hem wil ik nog extra bedanken voor zijn hulp tijdens de implementatie van de analytische methode in WoodConnector. Ook wil ik beide promotoren bedanken voor steeds tijd vrij te maken voor mij en voor de aangename samenwerking. Ten slotte wil ik mijn familie, vrienden en medestudenten in de kijker zetten, niet alleen voor hun bijstand tijdens deze masterproef, maar gedurende heel mijn academische carrière. Ik wil hen bedanken voor hun steun wanneer ik het moeilijk had, voor hun verdraagzaamheid tijdens mijn geklaag en gezaag, voor hun interesse en nieuwsgierigheid in wat ik moest doen en voor me scherp te houden op de belangrijke momenten. Zonder jullie allemaal was het me niet gelukt, daarom, nog eens, een welgemeende dankjewel.



# Inhoudsopgave

Woord vooraf .....	1
Lijst van tabellen.....	5
Lijst van figuren .....	7
Abstract .....	9
Abstract (English) .....	11
1. Inleiding.....	13
1.1 Situering .....	13
1.2 Probleemstelling.....	14
1.3 Doelstellingen.....	15
1.4 Methode.....	15
2. Houtverbindingen met stiftvormige metalen verbindingmiddelen .....	17
2.1 Inleiding.....	17
2.2 Deuvels en bouten.....	18
2.3 Laterale weerstand van een stiftvormig verbindingmiddel.....	19
2.3.1 Deuveffectbijdrage .....	19
2.3.2 Theorie van Johansen.....	22
2.3.3 Stuksterkte.....	24
2.3.4 Vloeimoment.....	28
2.3.5 Koordeffectbijdrage.....	29
2.4 Axiale weerstand van een stiftvormig verbindingmiddel.....	31
2.4.1 Kopdoortrekweerstand bij bouten.....	31
2.4.2 Trekweerstand van bouten .....	32
2.5 Sterktecontrole van de totale verbinding .....	33
2.5.1 Ontwerpwaarde van de weerstand van een individueel verbindingmiddel .....	33
2.5.2 Laterale ontwerpsterkte van de totale verbinding .....	34
2.5.3 Effectief aantal lateraal belaste verbindingmiddelen.....	35
2.5.4 Aanvullende ontwerpoverwegingen voor bouten en deuvels.....	37
2.6 Tussen-, rand- en eindafstanden van de verbindingmiddelen .....	37
2.7 Brosse breuk van het hout .....	40
2.8 Stijfheid van de verbinding.....	42
3. Verbindingen met meerdere afschuifvlakken (>2).....	45
3.1 Inleiding.....	45
3.2 Analyse volgens Eurocode 5.....	45
3.2.1 EC5.....	45
3.2.2 prEC5 .....	46

3.3	Analyse volgens literatuur .....	48
3.3.1	COST - Design of Connections in Timber Structures .....	48
3.3.2	M. U. Pedersen - Dowel Type Timber Connections: Strength modelling.....	52
3.3.3	Porteous en Kermani - STRUCTURAL TIMBER DESIGN to Eurocode 5 .....	53
3.3.4	Blaß en Sandhaas - Timber Engineering: Principles for Design .....	55
3.4	Analyse volgens buitenlandse normen .....	57
3.4.1	Verenigde Staten .....	57
3.4.2	Zwitserland .....	57
4.	Opstelling analysemethode in Excel.....	59
4.1	Flowchart analysemethode .....	59
4.2	Analysemethode in Excel .....	60
5.	Implementatie analysemethode in WoodConnector.....	69
5.1	Opbouw software.....	69
5.2	Interface .....	74
6.	Validatie analysemethode.....	81
6.1	Validatie via voorbeeldoefeningen .....	81
6.2	Validatie via testresultaten van Rossi .....	82
6.2.1	Validatie berekening laterale sterkte .....	82
6.2.2	Validatie berekening stijfheid.....	85
6.3	Validatie via testresultaten van Sawata .....	87
6.3.1	Validatie berekening laterale sterkte .....	87
6.3.2	Bespreking verbanden tussen ontwerpparameters en laterale sterkte .....	89
6.4	Vergelijking met de Amerikaanse analysemethode.....	91
7.	Besluit .....	93
	Referentielijst .....	95
	Bijlagenlijst .....	97
	Bijlage A: Volledige codes van de functies gedefinieerd in 'MSP.py' .....	99
	Bijlage B: Volledige code van de database voor hout in 'database.py' .....	105
	Bijlage C: Volledige codes van functies gedefinieerd in 'main.py' .....	107

## Lijst van tabellen

Tabel 2-1: Karakteristieke vloeigrens en treksterkte van deuvels en bouten.....	28
Tabel 2-2: Factoren voor de koordeffectbijdrage van bouten en deuvels.....	30
Tabel 2-3: Aanbevolen minimum tussen-, rand- en eindafstanden volgens prEC5 voor deuvels en bouten .....	38
Tabel 6-1: Berekende laterale verbindingsterktes en bezwijkcombinatie bij falen van de vier verbindingconfiguraties uit de voorbeeldoefeningen, volgens de analysemethode in WoodConnector en COST.....	81
Tabel 6-2: Vergelijking laterale sterkte van de volledige verbinding volgens WoodConnector $F_{v,Rk}$ en die uit de proeven $F_T$ .....	83
Tabel 6-3: Vergelijking verschuivingsmoduli van de verbinding volgens WoodConnector $K_{SLS}$ en die uit de proeven $K_T$ .....	85
Tabel 6-4: Vergelijking laterale sterkte van de volledige verbinding volgens Excel $F_{v,Rk}$ en die uit de proeven $F_T$ .....	87
Tabel 6-5: Effect wijziging van $T$ op de laterale sterkte van de verbinding.....	89
Tabel 6-6: Effect wijziging van $t_3/t_1$ op de laterale sterkte van de verbinding.....	90
Tabel 6-7: Effect wijziging van $\rho$ op de laterale sterkte van de verbinding.....	90
Tabel 6-8: Vergelijking laterale sterkte van de volledige verbinding volgens WoodConnector $F_{v,Rd,WoodC}$ en de Amerikaanse procedure $F_{v,Rd,Am}$ .....	91





## Lijst van figuren

Figuur 1-1: Stiftvormige verbindingen met één, twee en meerdere afschuifvlakken .....	14
Figuur 2-1: Voorbeelden van deuvels (a) en bouten (b) .....	18
Figuur 2-2: De zes mogelijke bezwijkmechanismen voor een stiftvormige verbinding met één afschuifvlak .....	19
Figuur 2-3: De vier mogelijke bezwijkmechanismen voor een stiftvormige verbinding met twee afschuifvlakken .....	20
Figuur 2-4: Mechanisch model voor bezwijkmechanisme (f) en vrijlichaamsschema van het verbindingsmiddel .....	22
Figuur 2-5: Testopstelling EN 383 met een typisch testresultaat .....	24
Figuur 2-6: Parameters voor bepaling stuiksterkte .....	24
Figuur 2-7: Verschil tussen houtvezels bij een voorgeboord en niet-voorgeboord gat .....	25
Figuur 2-8: Stuiksterkte bij een bout of deugel belast onder een hoek $\alpha$ .....	26
Figuur 2-9: Elastische (a) en plastische (b) spanningsverdeling in een metalen verbindingsmiddel ...	28
Figuur 2-10: Krachtwerking in een schuin vervormd verbindingsmiddel .....	29
Figuur 2-11: Krachtenevenwicht van een verbinding .....	34
Figuur 2-12: Verspringende stiftvormige verbindingsmiddelen parallel aan de houtvezel met $a = 1d$	36
Figuur 2-13: Definitie van de tussen-, rand- en eindafstandparameters .....	37
Figuur 2-14: Tussenafstanden van verspringende verbindingsmiddelen .....	39
Figuur 2-15: Voorbeelden van brosse faalwijzen .....	40
Figuur 2-16: Verschuiving in de verbinding, ten gevolge van de belasting, bij een (a) hout- en (b) staal-op-houtverbinding .....	42
Figuur 2-17: Geïdealiseerde slipkrommen voor verbindingen met (a) deuvels en (b) bouten .....	42
Figuur 2-18: Verschuivingsmodulus bij GGT en UGT .....	44
Figuur 3-1: Bezwijkmechanismen bij hout-op-houtverbindingen met (1) één afschuifvlak en (2) twee afschuifvlakken volgens EC5 .....	46
Figuur 3-2: Bezwijkmechanismen bij staal-op-houtverbinding volgens EC5 .....	46
Figuur 3-3: Bezwijkcombinaties voor een stiftvormig verbindingsmiddel in een verbinding met vier afschuifvlakken .....	47
Figuur 3-4: Analysemodel met discontinue verbindingsmiddelen .....	49
Figuur 3-5: Analysemodel met continue verbindingsmiddelen .....	50
Figuur 3-6: BOF-modellering van een staal-op-houtverbinding met twee afschuifvlakken .....	51
Figuur 3-7: Mogelijke bezwijkcombinaties in een verbinding met ingesloten stalen platen en vier afschuifvlakken volgens .....	52
Figuur 3-8: Procedure voor verbindingen met meerdere afschuifvlakken volgens Porteous en Kermani .....	53
Figuur 3-9: Bezwijkcombinaties van een verbindingsmiddel met vier afschuifvlakken in een hout-op-houtverbinding (links) en een staal-op-houtverbinding (rechts) .....	55
Figuur 3-10: Procedure voor de bepaling van de totale laterale sterkte van een symmetrische houtverbinding met vier afschuifvlakken.....	56
Figuur 4-1: Flowchart analysemethode voor het ontwerp van houtverbindingen met vier afschuifvlakken.....	59
Figuur 4-2: (a) Eerste en (b) tweede configuratie, beiden afgeleid uit het COST-rapport.....	60
Figuur 4-3: (a) Derde en (b) vierde configuratie, beiden afgeleid uit het boek van Porteous en Kermani .....	61
Figuur 4-4: Inputveld van de analysemethode in Excel, ingevuld met de ontwerpparameters van de vierde configuratie .....	62
Figuur 4-5: Eerste berekeningsveld van de analysemethode in Excel voor de vierde configuratie .....	63

Figuur 4-6: Tweede berekeningsveld van de analysemethode in Excel voor de vierde configuratie ...	64
Figuur 4-7: Derde berekeningsveld van de analysemethode in Excel voor de vierde configuratie .....	65
Figuur 4-8: Vierde berekeningsveld van de analysemethode in Excel voor de vierde configuratie .....	65
Figuur 4-9: Eerste outputveld van de analysemethode in Excel, met voorafgaande controle van de ontwerpparameters van de vierde configuratie .....	66
Figuur 4-10: Tweede outputveld van de analysemethode in Excel, met controle van de resultaten van de vierde configuratie .....	67
Figuur 5-1: Mappenstructuur WoodConnector-project in PyCharm .....	69
Figuur 5-2: Overzicht van de gedefinieerde functies in 'MSP.py', onderverdeeld in drie groepen .....	70
Figuur 5-3: Momentopname van de opbouw van de interface/applicatie van WoodConnector in Qt Creator .....	71
Figuur 5-4: Eerste deel van de code van 'woodconnector_ui.py' .....	71
Figuur 5-5: Eerste deel van lijst 'dtb_timber' in 'database.py' .....	72
Figuur 5-6: Overzicht van de coderegels in 'main.py' .....	73
Figuur 5-7: Overzicht tabblad voor de analyse van houtverbindingen met meerdere afschuifvlakken in WoodConnector .....	74
Figuur 5-8: Keuzebalk verbindingstype .....	74
Figuur 5-9: Volledig inputveld van de interface, bij een hout-op-houtverbinding met bouten als verbindingsmiddelen .....	75
Figuur 5-10: Gewijzigde ontwerpparametergroepen na de keuze voor staal-op-houtverbindingen ...	75
Figuur 5-11: Groep ontwerpparameters voor deuken als verbindingsmiddelen .....	76
Figuur 5-12: 2D-weergave van een hout-op-houtverbinding met vier afschuifvlakken in de interface van WoodConnector .....	77
Figuur 5-13: 3D-weergave van een hout-op-houtverbinding met vier afschuifvlakken in de interface van WoodConnector .....	77
Figuur 5-14: 2D-weergave van een staal-op-houtverbinding met vier afschuifvlakken in de interface van WoodConnector .....	78
Figuur 5-15: 3D-weergave van een staal-op-houtverbinding met vier afschuifvlakken in de interface van WoodConnector .....	78
Figuur 5-16: 3D-weergave van een groep bouten in de interface van WoodConnector .....	79
Figuur 5-17: 3D-weergave van een deuk in de interface van WoodConnector .....	79
Figuur 5-18: 2D-weergave van een geometrie van de totale verbinding in de interface van WoodConnector .....	79
Figuur 5-19: Pop-upvenster met resultaten van de analyse in WoodConnector .....	80
Figuur 6-1: Verbindingsconfiguraties uit proeven van Rossi met kenmerkende deukvorming voor elke bezwijkcombinatie .....	84
Figuur 6-2: Berekende en experimentele slipkromme voor proefverbinding T2.4 .....	85

## Abstract

Ontwerpen van verbindingen in houtconstructies is een uitdagende, tijdrovende taak. De Construction Research Engineering Group (CERG) van UHasselt ontwikkelt daarom WoodConnector, een ontwerptool die verschillende houtverbindingen berekent, die dus een snelle, eenvoudige oplossing biedt. Deze masterproef omvat het opstellen van een analytische methode voor het ontwerp van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken en het implementeren van deze methode in WoodConnector.

Ontwerprichtlijnen voor stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken uit de literatuur en normen vormen de basis van de analysemethode. Een Excelbestand brengt een eerste versie van de methode in kaart waarna validatie van de resultaten volgt. Vervolgens wordt de methode geïmplementeerd in WoodConnector door de interface uit te breiden en hierbij de nodige functionaliteiten en berekeningen aan te koppelen.

Validatie van berekeningen van houtverbindingen met vier afschuifvlakken gebeurt aan de hand van het Excelbestand voor 32 verschillende configuraties, afkomstig uit vier voorbeeldoefeningen en 28 testresultaten. De uitbreiding van WoodConnector met de berekening van stiftvormige verbindingen in hout met vier afschuifvlakken beperkt zich niet tot hout-op-houtverbindingen, maar behandelt ook staal-op-houtverbindingen en vakwerk-, balk-balk- en balk-kolomverbindingen.



## Abstract (English)

Designing connections in timber structures is a challenging, time-consuming task. Therefore, the Construction Research Engineering Group (CERG) at UHasselt is currently developing WoodConnector, a design tool that calculates various timber connections, providing a quick, simple solution. This master's thesis involves establishing an analytical method for the design of dowel-type connections with multiple shear planes and implementing this method in WoodConnector.

Design guidelines for dowel-type connections with multiple shear planes from the literature and standards form the basis of the analytical method. An Excel file maps a first version of the method followed by validation of the results. The model is then implemented in WoodConnector by extending the interface and adding the necessary functionalities and calculations.

Validation of calculations of timber connections with four shear planes is done using the Excel file for 32 different configurations taken from four example exercises and 28 test results. The extension of WoodConnector with the calculation of timber connections with four shear planes is not limited to timber-on-timber connections, but also covers steel-on-timber connections and truss, beam-beam and beam-column connections.



# 1. Inleiding

## 1.1 Situering

De belangrijkste opdracht van de opleiding 'master in de industriële wetenschappen: bouwkunde' is het realiseren van de masterproef. Het onderwerp voor deze masterproef werd aangeleverd door Construction Engineering Research Group (CERG). Deze onderzoeksgroep van UHasselt richt zich op het aangaan van bouwkundige uitdagingen bij gebouwstructuren en weginfrastructuren, door te focussen op het analytische, numerieke en experimentele ontwerp van deze constructies. CERG ontwikkelt daarom, met behulp van deze multidisciplinaire analysemethodes, praktische tools die de overgang van fundamenteel onderzoek naar de praktijk vergemakkelijken [1].

Bij houtconstructies is het ontwerp van de verbindingen tussen de verschillende elementen, één van de meest complexe stappen van het ontwerpproces. Het ontwerp van deze verbindingen is dus een voorbeeld van een bouwkundige uitdaging die CERG onderzoekt. In een houtconstructie spreekt men van een verbinding als twee of meerdere structurele en/of niet-structurele elementen samenkomen in één punt. De configuratie van deze verbinding kan op verschillende manieren worden gerealiseerd en is afhankelijk van verschillende parameters zoals:

- het structureel systeem (verbinding is scharnierend of ingeklemd);
- de op te nemen belastingen;
- het materiaal van de te verbinden elementen;
- de verbindingsmiddelen.

De verbindingen zorgen voor de continuïteit tussen de elementen van de houtconstructie, waarbij deze continuïteit wordt uitgedrukt als de stijfheid van de verbinding. Deze stijfheid is een belangrijk ontwerpcriterium van de verbinding, dat bepalend is voor de keuze van verschillende ontwerpparameters. Wanneer een verbinding een verhoogde stijfheid vereist, wordt meestal het ontwerp hiervan complexer [2].

Het ontwerp en de berekening van verbindingen in houtconstructies zijn vervolgens ook afhankelijk van de gekozen soort verbinding. Er zijn drie hoofdsoorten verbindingen in houtconstructies te onderscheiden, namelijk verbindingen met metalen verbindingsmiddelen, contactverbindingen en gelijmde verbindingen. Elke hoofdsoort kan vervolgens verder opgedeeld worden in deelsoorten. Verschillende deelsoorten van verbindingen met metalen verbindingsmiddelen zijn onder andere stiftvormige metalen verbindingen, verbindingen met metalen hechtplaten, verbindingen met ring- of plaatdeuvels en verbindingen met kramplaten [2].

Voor de berekening van deze verbindingen kunnen de richtlijnen van EN1995-1-1 (Eurocode 5) gevolgd worden, die deel uitmaakt van de Eurocodes. Dit zijn Europese normen en richtlijnen voor het berekenen en ontwerpen van gebouwen en structuren van burgerlijke bouwkunde, die als doel hebben om de Europese markt één te maken voor aannemers, fabrikanten van bouwproducten en studie bureaus. Er bestaan in totaal 10 Eurocodes, genummerd van 0 tot 9, waarbij Eurocode 5 (EC5) regels en richtlijnen bevat voor structuren in hout [3]. Hoofdstuk 8 van EC5 geeft meer specifieke richtlijnen over verbindingen met metalen verbindingsmiddelen in houtconstructies. In dit hoofdstuk is de informatie over de berekening van stiftvormige metalen verbindingen eerder uitgebreid, terwijl de informatie over de rest van de metalen verbindingsmiddelen eerder beperkt is. De richtlijnen over de berekening van contact- en gelijmde verbindingen zijn daarentegen zeer beperkt.

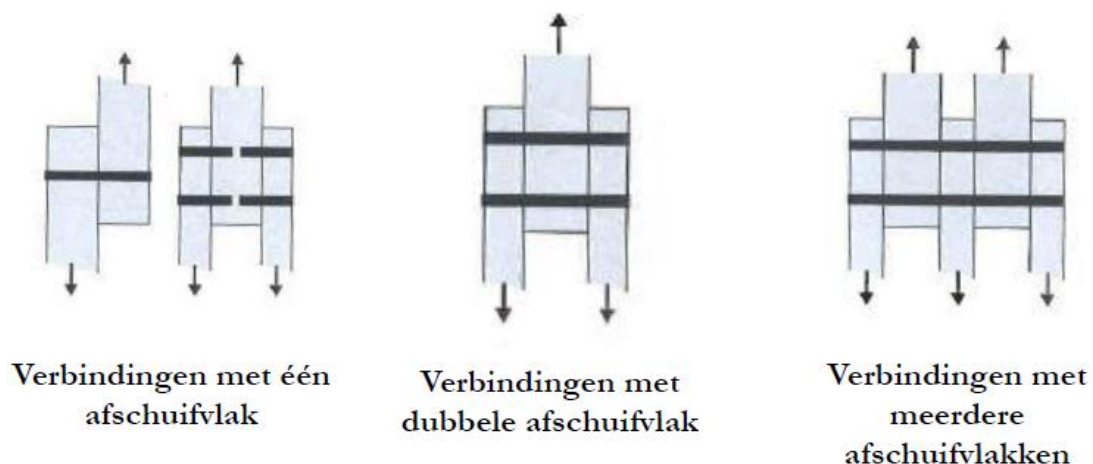
De huidige versie van EC5 geeft dus relatief weinig informatie over de berekening van de verbindingen. Daarom is er een vernieuwde versie van EC5 in voorbereiding (prEN1995-1-1), die dieper ingaat op de berekening van de verschillende verbindingen.



Wanneer een ingenieur een verbinding in een houtconstructie moet ontwerpen en berekenen, dan is dit een zeer uitdagende en tijdrovende opdracht, omdat deze verbinding afhankelijk is van meerdere parameters en verschillende mogelijke bezwijkmechanismen. Dit geldt voor berekeningen volgens de richtlijnen van zowel de huidige als vernieuwde versie van EC5. Ook kunnen er in een latere fase van het ontwerpproces één of meerdere ontwerpparameters wijzigen, waardoor heel de berekening opnieuw moet gebeuren. Het ontwerp zal dan nog meer tijd kosten en de complexiteit van de verbinding kan mogelijk nog toenemen. Om deze problemen bij het ontwerp van verbindingen in houtconstructies op te lossen, is er binnen CERG een ontwerptool in ontwikkeling. Deze tool heet WoodConnector en is een software die verschillende configuraties van houtverbindingen met stiftvormige metalen verbindingen kan berekenen, volgens de richtlijnen van de huidige versie van EC5. Met behulp van WoodConnector kan een ingenieur deze verbindingen op snellere en gebruiksvriendelijke manier ontwerpen.

## 1.2 Probleemstelling

Er is een brede waaier aan mogelijkheden om verbindingen in houtconstructies uit te voeren. Een vaak voorkomende configuratie voor een houtverbinding is een stiftvormige metalen verbinding met meerdere afschuifvlakken (>2). Het probleem bij deze verbinding is dat de huidige versie van EC5 weinig informatie geeft over de berekening van deze verbinding. Deze versie geeft daarentegen uitgebreide richtlijnen over de berekening van stiftvormige verbindingen met één of twee afschuifvlakken in houtconstructies. In de vernieuwde versie van EC5 worden stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken dan weer wel dieper behandeld. Figuur 1-1 toont het verschil tussen stiftvormige verbindingen met één, twee en meerdere afschuifvlakken.



*Figuur 1-1: Stiftvormige verbindingen met één, twee en meerdere afschuifvlakken [2]*

Naast de vernieuwde versie van EC5, zijn er ook andere bronnen in de literatuur terug te vinden die informatie geven over de berekening van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken. Toch blijft het ontwerp van deze complexe verbinding een uitdaging en tijdrovende taak. Het eerste probleem is dat er nog geen eenduidige methode is om stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken te berekenen. Hierbij zijn er nog onduidelijkheden over hoe de bezwijkmechanismen van deze verbindingen gemodelleerd moeten worden. Een tweede probleem blijft de hoeveelheid tijd die nodig is om deze houtverbindingen te ontwerpen. WoodConnector kan wel stiftvormige verbindingen met één of twee afschuifvlakken in houtconstructies uitrekenen, maar in deze ontwerptool is er geen optie beschikbaar om deze verbindingen met meerdere afschuifvlakken te ontwerpen. Het implementeren van deze uitbreiding vormt bijgevolg een meerwaarde voor deze tool van CERG.

### 1.3 Doelstellingen

De hoofddoelstelling van deze masterproef is om een analysemethode voor stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken op te stellen en om deze methode te implementeren in WoodConnector. Door deze masterproef uit te voeren, kunnen ingenieurs stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken in houtconstructies op een snellere en gebruiksvriendelijke manier ontwerpen met behulp van WoodConnector. Deze hoofddoelstelling wordt verder opgedeeld in drie deeldoelstellingen:

- De eerste doelstelling is het opstellen van een analytische methode voor het ontwerp van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken, voor hout-op-hout- en staal-op-houtverbindingen, in Excel. Verder dient deze eerste doelstelling als voorbereiding voor de tweede doelstelling.
- De tweede doelstelling is het implementeren van de analytische methode, uit de eerste doelstelling, in WoodConnector. Deze doelstelling is bereikt wanneer er resultaten worden gegenereerd na het ontwerpen van een stiftvormige verbinding met meerdere afschuifvlakken in de software. Zonder deze gegenereerde resultaten kan er niet aan de laatste doelstelling gestart worden.
- De laatste doelstelling is het valideren van deze uitbreiding in WoodConnector. Deze validatie bestaat uit het vergelijken van de resultaten uit de analytische methode in Excel, de resultaten gegenereerd uit de software en de resultaten uit voorbeeldoefeningen en testen. De laatste doelstelling is bereikt wanneer deze groepen van resultaten overeenkomen, of wanneer er afwijkingen zijn, er een verklaring is voor deze afwijkingen.

### 1.4 Methode

Het uitvoeren van deze masterproef verloopt op basis van vijf werkpakketten. Het eerste werkpakket is het uitvoeren van een literatuurstudie. Deze studie onderzoekt eerst enkele algemene topics over stiftvormige verbindingen in houtconstructies, zodat er voldoende achtergrondkennis vergaard wordt. Deze topics zijn bijvoorbeeld boutverbindingen, de berekening van stiftvormige verbindingen met één of twee afschuifvlakken en praktijkvoorbeelden van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken. Vervolgens gaat de literatuurstudie dieper in op de analysemethode van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken. Hierbij worden de analysemodellen van verschillende bronnen met elkaar vergeleken. Deze bronnen zijn de huidige en vernieuwde versie van EC5, meerdere wetenschappelijke artikels en boeken, maar ook normen uit andere landen.

Het tweede werkpakket is het opstellen van een analytische methode voor het ontwerp van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken. Dit werkpakket start met de selectie van minstens twee verschillende configuraties van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken uit de literatuurstudie. Deze configuraties zijn idealiter een hout-op-hout- en staal-op-houtverbinding uit voorbeeldoefeningen en testen, waarvan de resultaten in de bronnen beschikbaar zijn. De volgende taak is een stap-voor-stapprocedure voorbereiden met de benodigde vergelijkingen om alle parameters, de sterkte en de stijfheid van de verbinding te bepalen. Daarna volgt het opstellen van de analysemethode in Excel om stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken te ontwerpen. Op deze manier kan het effect van de wijziging van één van de verschillende parameters van de configuratie van de verbinding op de sterkte en de stijfheid van de verbinding onderzocht worden. Na het opstellen van de analysemethode in Excel, volgt de vergelijking van de resultaten uit Excel met de resultaten van de verschillende configuraties uit de bronnen. Deze laatste stap van het tweede werkpakket valideert de eerste implementatie van de

analysemethode in Excel. Het tweede werkpakket verloopt dus gedeeltelijk parallel met de literatuurstudie, maar kan niet afgerond worden vooraleer de literatuurstudie afgerond is.

Na het afronden van het tweede werkpakket volgt de start van het derde werkpakket. Dit werkpakket bestaat uit de implementatie van de opgestelde analysemethode in WoodConnector, geprogrammeerd in Python. Het derde werkpakket bestaat uit drie stappen. De eerste stap is het plannen van de code en de interface. De volgende stap is het creëren van de interface en het schrijven van de code in Python. De laatste stap is het testen van de geschreven code, waarbij er resultaten gegenereerd worden in WoodConnector.

Het vierde werkpakket is de validatie van de uitbreiding van WoodConnector in Python, die pas kan starten nadat de implementatie volledig is afgerond. Bij deze validatie wordt er een vergelijking gemaakt tussen de resultaten van de geïmplementeerde code uit WoodConnector en de resultaten van de verzamelde en gebruikte verbindingconfiguraties uit het tweede werkpakket. Deze vergelijking wordt gemaakt door de resultaten samen te vatten in tabellen en grafieken. Het nut van dit vierde werkpakket is om te controleren of de implementatie succesvol verlopen is.

Ten slotte is er nog een vijfde werkpakket, namelijk het schrijven van de scriptie. Dit laatste werkpakket gaat van start wanneer het eerste werkpakket, namelijk de literatuurstudie, is afgerond. Verder verloopt het schrijven van de scriptie parallel met de overige werkpakketten. Het laatste werkpakket kan wel pas afgerond worden, wanneer alle andere werkpakketten afgerond zijn.

## 2. Houtverbindingen met stiftvormige metalen verbindingsmiddelen

### 2.1 Inleiding

PrEC5 bespreekt een groot deel van hoofdstuk 11 het ontwerp van houtverbindingen met stiftvormige metalen verbindingsmiddelen, terwijl in EC5 dat gebeurt in hoofdstuk 8 [4], [5]. Deze thesis focust zich op de richtlijnen volgens prEC5, maar benadrukt ook de belangrijkste verschillen met EC5.

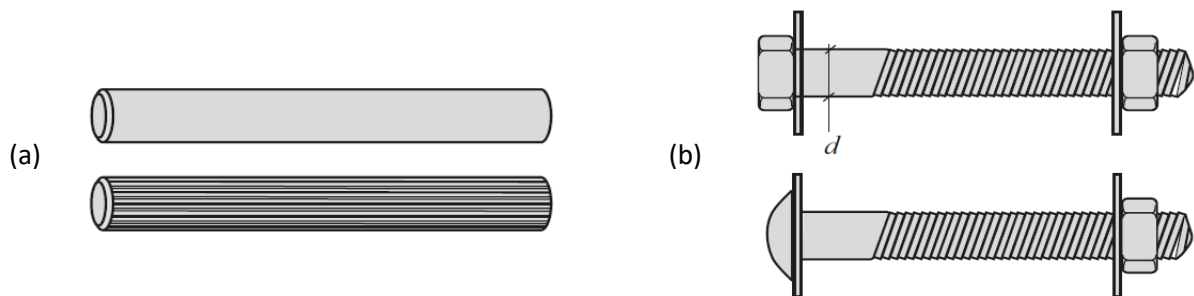
In prEC5 zijn er enkele termen opgenomen die sterk op elkaar lijken, maar toch anders gedefinieerd zijn. Daarom volgt een duidelijk onderscheid. Een stiftvormige verbinding is een verbinding tussen twee of meer elementen, die met elkaar zijn verbonden door middel van stiftvormige verbindingsmiddelen, waarbij een stiftvormig verbindingsmiddel een staaf is, met of zonder profilering, punt en kop, met of zonder coating. De bekendste voorbeelden hiervan zijn nagels, nieten, schroeven, bouten en deuvels. Een stiftverbinding daarentegen is een verbinding gemaakt met een ronde cilindrische staaf, meestal van staal, met of zonder kop, die strak in voorgeboorde gaten past en belastingen loodrecht op de staafas overbrengt. Stiftverbindingen zijn stiftvormige verbindingen, maar de omgekeerde redenering is niet altijd geldig. De definitie van een stiftverbinding slaat meestal enkel op verbindingen met deuvels en bouten als verbindingsmiddel.

Minder sterke verbindingen, bijvoorbeeld plaat-stijlverbindingen en verbindingen met niet-structurele elementen, gebruiken nagels, nieten en schroeven als verbindingsmiddelen. Bouten en deuvels daarentegen worden toegepast bij verbindingen die een grote sterkte moeten kunnen leveren, bijvoorbeeld balk-balk- en kolom-balkverbindingen [2]. Deze thesis onderzoekt stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken, die in de praktijk enkel als sterke structurele verbindingen voorkomen. Daarom zijn enkel houtverbindingen met deuvels en bouten als verbindingsmiddel geanalyseerd. De berekening van een stiftvormige verbinding is grotendeels hetzelfde voor de verschillende stiftvormige verbindingsmiddelen, maar verschilt voor de stiftverbindingen met enkele parameters. Het ontwerp van deze verbindingen in prEC5 omvat:

- de bepaling van de laterale en axiale weerstand van een verbindingsmiddel;
- de bepaling van de totale sterkte van de verbinding;
- de bepaling van de tussen-, rand- en eindafstanden;
- een controle op brosse breuk in het hout [4].

## 2.2 Deuvels en bouten

Deuvels zijn cilindervormige staven, hebben een glad of recht gegroefd oppervlak en zijn meestal in staal vervaardigd. Ze zijn verkrijgbaar in diameters van 6 tot 30 mm. Bouten daarentegen zijn bewerkte deuvels met schroefdraad en een vierkante, zeskantige of half bolvormige kop. Ze zijn verkrijgbaar in diameters tussen 12 en 30 mm en moeten, in tegenstelling tot andere verbindingmiddelen, uitgevoerd zijn met sluitringen en vierkante of zeskantige moeren. De functie van de sluitringen onder de boutkop en onder de moer is het verdelen van de drukspanningen op het houtcontactoppervlak, waardoor het risico op pons in het hout vermindert. Een bijkomende ontwerpregel is dat bij het aandraaien van de moer, er minimaal één volledige schroefdraad van de bout uit de moer moet steken [6]-[8]. Figuur 2-1 weergeeft enkele typische voorbeelden van deuvels en bouten.



*Figuur 2-1: Voorbeelden van deuvels (a) en bouten (b) [6]*

Stiftverbindingen vormen zich door de deuvels of bouten in voorgeboorde gaten in het hout aan te brengen. Om het aanbrengen van de bouten te vergemakkelijken, vereisen de Eurocodes dat de diameter van deze gaten 1 mm groter is dan de boutdiameter. Dit heet de boutgattolerantie en naarmate deze tolerantie toeneemt, vermindert de stijfheid van de boutverbinding. In de praktijk kan het nodig zijn om deze tolerantie te vergroten, wat dus nadelig is voor de capaciteit van de verbinding. Bij het gebruik van stalen platen in de verbinding, heeft de tolerantie op de gatdiameter in de stalen plaat ook invloed op de karakteristieke sterkte van de verbinding. Om deze redenen en esthetische overwegingen, kunnen verbindingen met deuvels de voorkeur krijgen op die met bouten [6]-[8]. In EC5 en prEC5 zijn dezelfde eisen opgenomen om te verzekeren dat deze verbindingmiddelen voldoende vastgeklemd zijn en tegelijkertijd in de voorgeboorde gaten passen. Deze eisen zijn terug te vinden in prEC5, en zijn in feite toegestane tolerantie voor het geval dat het de bout of deuvel niet nauw aansluit op het gat.

Deuvels en bouten zijn gewoonlijk de verbindingmiddelen in dwarsverbindingen die een grote laterale weerstand vereisen. Deze verbindingen kunnen bestaan uit twee elementen, maar meestal komt een configuratie met drie of meerdere elementen voor, waarbij de stiftverbinding meerdere afschuifvlakken bevat. De elementen kunnen van hout of staal zijn. Verbindingen met nagels, nieten of schroeven kunnen dezelfde laterale weerstanden niet realiseren. Verder kunnen boutverbindingen ook nog axiale trekbelastingen opnemen, maar deuvelverbindingen niet [6]-[8].

## 2.3 Laterale weerstand van een stiftvormig verbindingsmiddel

In prEC5 bestaat de berekening van de laterale weerstand van een individueel stiftvormig verbindingsmiddel uit de som van twee bijdrages. De eerste bijdrage is de deuveffectbijdrage, die bepaald is aan de hand van de theorie van Johansen, oftewel de European Yield Model (EYM). De tweede bijdrage is de koordeffectbijdrage. De karakteristieke laterale weerstand per afschuifvlak  $F_{v,k}$  van een individueel verbindingsmiddel is vervolgens gelijk aan:

$$F_{v,k} = \min \begin{cases} F_{D,k,a} \\ F_{D,k,b} \\ F_{D,k,c} + F_{rp,k,c} \\ F_{D,k,d} + F_{rp,k,d} \\ F_{D,k,e} + F_{rp,k,e} \\ F_{D,k,f} + F_{rp,k,f} \end{cases} \quad (2-1)$$

waarbij:

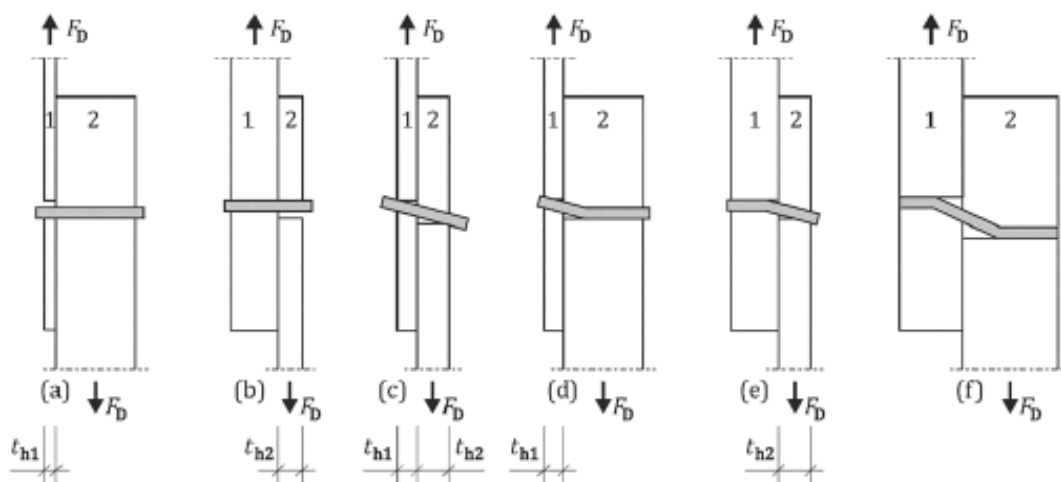
$F_{D,k,i}$  is de karakteristieke waarde van de deuveffectbijdrage per afschuifvlak volgens 2.3.1, in Newton;

$F_{rp,k,i}$  is de karakteristieke waarde van de koordeffectbijdrage volgens 2.3.5, in Newton [4].

De minimumwaarde van de som van de deuveel- en koordeffectbijdrage bepaalt dus de laterale weerstand van de verbinding. Hierbij valt op te merken dat niet bij elke deuveffectbijdrage er een koordeffectbijdrage mag opgeteld worden.

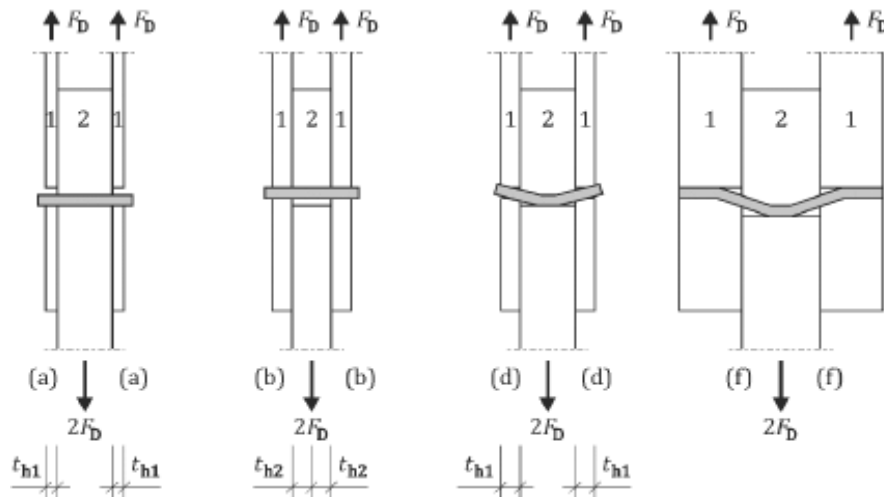
### 2.3.1 Deuveffectbijdrage

De berekening van de deuveffectbijdrage in prEC5 is gebaseerd op de formules voor de zes bezwijkmechanismen van een stiftvormige houtverbinding tussen twee elementen met één afschuifvlak, die afgeleid zijn uit de theorie van Johansen. Sectie 2.3.2 gaat dieper in op deze theorie. In EC5 heet deze bijdrage daarom het Johansendeel van de laterale weerstand [5]. In Figuur 2-2 zijn de bezwijkmechanismen (a) tot en met (f) afgebeeld die in aanmerking komen bij het bepalen van de karakteristieke waarde van de deuveffectbijdrage van een stiftvormige verbinding met één afschuifvlak.



Figuur 2-2: De zes mogelijke bezwijkmechanismen voor een stiftvormige verbinding met één afschuifvlak [4]

Wanneer een stiftvormige houtverbinding tussen drie elementen met twee afschuifvlakken symmetrisch is, dan komen de bezwijkmechanismen die zich mogelijk kunnen ontwikkelen in deze configuratie overeen met bezwijkmechanisme (a), (b), (d) en (f) van een verbinding met één afschuifvlak. Bezwijkmechanismen (c) en (e) uit Figuur 2-2 kunnen in een configuratie met twee afschuifvlakken niet voorkomen wanneer element 2 een middelste element is, anders is de voorwaarde voor symmetrie en compatibiliteit niet gerespecteerd [4]. Vervolgens toont Figuur 2-3 de vier bezwijkmechanismen die in aanmerking komen bij het bepalen van de karakteristieke waarde van de deuveffectbijdrage van een stiftvormige verbinding met twee afschuifvlakken.



Figuur 2-3: De vier mogelijke bezwijkmechanismen voor een stiftvormige verbinding met twee afschuifvlakken [4]

Elk bezwijkmechanisme uit Figuur 2-2 en Figuur 2-3 heeft een specifieke deuveffectbijdrage per afschuifvlak, deze bijdrages zijn gelijk aan:

$$F_{D,k} = \begin{cases} f_{h,1,k} t_{h1} d & \text{(a)} \\ f_{h,2,k} t_{h2} d & \text{(b)} \\ \frac{f_{h,1,k} t_{h1} d}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 * \left[ 1 + \frac{t_{h2}}{t_{h1}} + \left( \frac{t_{h2}}{t_{h1}} \right)^2 \right] + \beta^3 \left( \frac{t_{h2}}{t_{h1}} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_{h2}}{t_{h1}} \right) \right] & \text{(c)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_{h1} d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{h,1,k} t_{h1}^2 d}} - \beta \right] & \text{(d) (2-2)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_{h2} d}{1 + 2\beta} \left[ \sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,k}}{f_{h,1,k} t_{h2}^2 d}} - \beta \right] & \text{(e)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{h,1,k} d} & \text{(f)} \end{cases}$$

met

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (2-3)$$

waarbij:

- $f_{h,1,k}$  en  $f_{h,2,k}$  de karakteristieke stuiksterktes van element 1 en 2 zijn volgens 2.3.3, in MPa;
- $t_{h1}$  en  $t_{h2}$  de diktes van element 1 en 2 zijn, bij deuvelds en bouten, in mm;
- $M_{y,k}$  het karakteristieke vloeimoment van het verbindingsmiddel is volgens 2.3.4, in Nmm;
- $d$  de diameter van het verbindingsmiddel is, in mm.

Vergelijking (2-3), oftewel de verhouding tussen de stuksterktes van de elementen, maakt in prEC5 elke combinatie van hout met staal, of andere metalen, mogelijk. Zo kan een ontwerper een onderscheid maken tussen hout-op-hout- en staal-op-houtverbindingen [4]. In EC5 daarentegen zijn er aparte formulereeksen opgesteld om het onderscheid tussen hout-op-hout- en staal-op-houtverbindingen te kunnen maken.

Vervolgens zijn er in vergelijking (2-2) nog enkele zaken op te merken. Ten eerste komt de deuveffectbijdrage van elk bezwijkmechanisme in prEC5 overeen met de laterale sterkte van elk bezwijkmechanisme zoals geformuleerd in EC5, indien EC5 de bijdrage van het koordeffect buiten beschouwing laat voor bezwijkmechanismen (c) tot en met (f). De deuveffectbijdrage voor elk bezwijkmechanisme is afhankelijk van de configuratie van de houtverbinding met een stiftvormig verbindingsmiddel. De bepalende ontwerpparameters hiervoor zijn dus de stuksterktes en diktes van de elementen, en het vloeimoment en diameter van het verbindingsmiddel. Verder valt er een belangrijk detail op te merken bij bezwijkmechanisme (b) in Figuur 2-3, waarbij de dikte van het middelste element  $2t_{h2}$  moet zijn, omdat  $t_{h2}$  samenhangt met het bezwijkmechanisme van elk afschuifvlak [4], [5]. Ten slotte hebben bezwijkmechanismen (d) tot en met (f) van vergelijking (2-2) voorafgaande factoren opgenomen, die niet afgeleid zijn uit de theorie van Johansen. Deze factoren houden rekening met verschillende partiële veiligheidsfactoren, waarbij de factor 1,15 opgenomen is bij bezwijkmechanisme (f) met twee plastische scharnieren en factor 1,05 opgenomen is bij bezwijkmechanismen (d) en (e) met één plastisch scharnier [4]. De pre-factoren in vergelijking (2-2) compenseren hierbij dus de verschillende partiële veiligheidsfactoren  $\gamma_M$  voor staal en hout en de modificatiefactor  $k_{mod}$ , die wordt toegepast om de laterale ontwerpsterkte van de verbinding te bepalen. Hierbij kunnen het vochtgehalte en de belastingsduur enkel invloed hebben op de stuksterkte van het hout, maar niet op het vloeimoment van het verbindingsmiddel. Aangezien  $F_{v,Rd}$  wordt bepaald met  $k_{mod}$  en een gedeeltelijke veiligheidsfactor van  $\gamma_M = 1,3$ , heeft dit een negatief effect op de stalen componenten in verbindingen, met een verhoging van respectievelijk 5 of 15% tot gevolg [8]. Larsen [9] toont aan dat de factor 1,15 wiskundig af te leiden is en dat de factor 1,05 niet wiskundig af te leiden is, maar is gekozen.

Na de vergelijking tussen de richtlijnen volgens prEC5 en EC5 voor de benadering van de bijdrage van het deuveffect, vallen de volgende verschillen op. PrEC5 heeft slechts één reeks formules en twee figuren, bestaande uit tien bezwijkmechanismen, nodig om alle combinaties van houtverbindingen met één of twee afschuifvlakken te realiseren. In EC5 daarentegen zijn zeven formulereeksen en vier figuren, bestaande uit 21 bezwijkmechanismen, nodig om dezelfde combinaties te realiseren. Deze reductie aan formulereeksen en bezwijkmechanismen in prEC5 is het gevolg van twee belangrijke wijzigingen in de benadering.

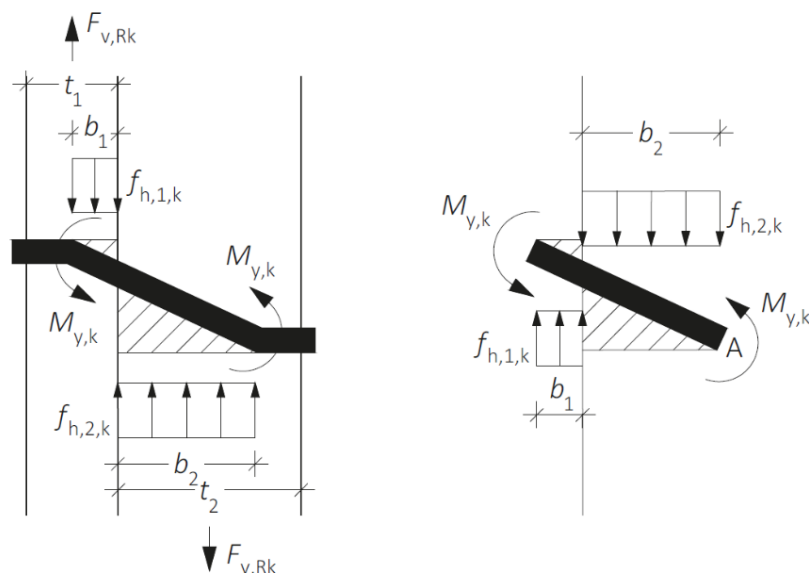
De eerste wijziging in prEC5 is de uitbreiding in materiaalkeuze voor de stuksterkte van de elementen. Deze uitbreiding laat toe de stuksterktes van zacht- en hardhoutmaterialen, andere engineered wood products (EWP's) én metalen, zoals aluminium en staal, op te nemen in de berekening van de deuveffectbijdrage. De richtlijnen volgens EC5 laten enkel het gebruik van de stuksterktes van houtmaterialen toe, waarbij deze versie van de norm veronderstelt dat de verbinding niet kan bezwijken door stuik in de staalplaat, terwijl dit eigenlijk wel te controleren is. Het gevaar bij deze veronderstelling is dus dat een ingenieur deze controle kan vergeten uit te voeren. In prEC5 heeft de uitbreiding, in materiaalkeuze voor de stuksterkte, tot gevolg dat vergelijking (2-2) al automatisch een eerste controle uitvoert op stuik in de staalplaat. Een tweede wijziging is dat prEC5 geen onderscheid maakt tussen een dunne of dikke staalplaat. De invloed van de dikte van de staalplaat is in de nieuwe norm al verrekend in de stuksterkte van de staalplaat, zie sectie 2.3.3. EC5 maakt wel dit onderscheid tussen een dunne en dikke staalplaat en doet dat al in de berekening van de deuveffectbijdrage, waardoor er hier meer formulereeksen en bezwijkmechanismen nodig zijn.



### 2.3.2 Theorie van Johansen

De formules van vergelijking (2-2), om de deuveffectbijdrage van de zes bezwijkmechanismen uit Figuur 2-2 te berekenen, zijn afgeleid uit de theorie van Johansen. Deze theorie bepaalt de bezwijklast voor elk bezwijkmechanisme van een stiftvormige verbinding door het translatie- en rotatie-evenwicht uit te werken, waarbij deze theorie een star-perfect plastisch model voor de samenstellende materialen veronderstelt [10]. De sterkte van een houtverbinding beperkt zich volgens deze theorie tot het punt waar de stuiksterkte overschreden is in ten minste één van de elementen van de verbinding en in specifieke gevallen door het gelijktijdig ontstaan van plastische scharnieren in het verbindingsmiddel.

Om deze theorie vervolgens te verduidelijken, is de methode om de formule voor bezwijkmechanisme (f) uit vergelijking (2-2) te bekomen als voorbeeld uitgeschreven. Figuur 2-4 weergeeft het mechanisch model voor bezwijkmechanisme (f), waarbij zich twee plastische scharnieren vormen in het verbindingsmiddel en de maximale stuikdruk van de elementen is bereikt tussen de scharnieren [8].



Figuur 2-4: Mechanisch model voor bezwijkmechanisme (f) en vrijlichaamsschema van het verbindingsmiddel [8]

De theorie van Johansen werkt eerst het translatie-evenwicht uit, rekening houdend met vergelijking (2-3) en waarbij het evenwicht van de dwarskrachten gelijk aan nul is. Dit resulteert in:

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot d \cdot b_1 = f_{h,2,k} \cdot d \cdot b_2 = \beta \cdot f_{h,1,k} \cdot d \cdot b_2 \quad (2-4)$$

Bijgevolg:

$$b_1 = \beta \cdot b_2 \quad (2-5)$$

Het rotatie-evenwicht, waarbij het evenwicht van de momenten in het verbindingsmiddel rond punt A gelijk is aan nul, geeft:

$$M_{y,k} + M_{y,k} = f_{h,1,k} \cdot d \cdot b_1 \cdot \left( b_2 + \frac{b_1}{2} \right) = f_{h,2,k} \cdot d \cdot b_2 \cdot \frac{b_2}{2} \quad (2-6)$$

Samenvoegen van vergelijking (2-3), (2-5) en (2-6) en oplossen naar  $b_1$  geeft:

$$b_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \quad (2-7)$$

Het samenvoegen van vergelijking (2-4) en (2-7) resulteert vervolgens in:

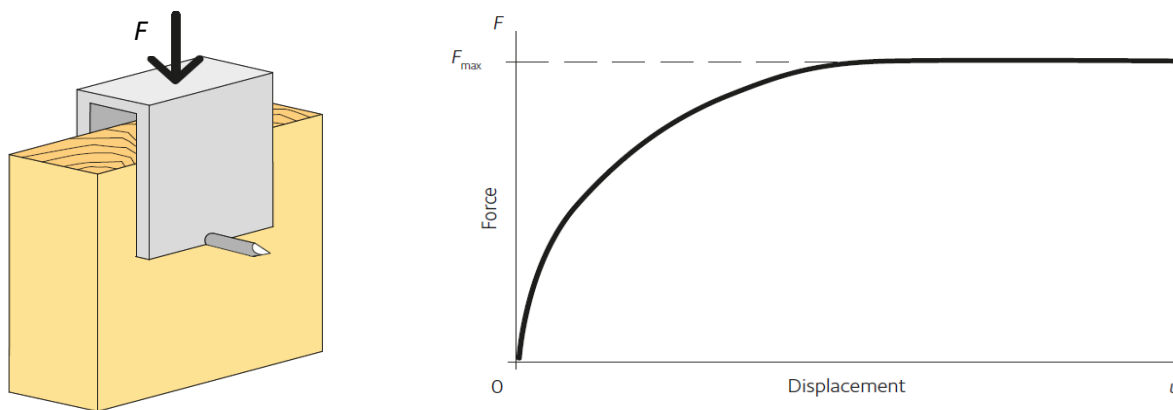
$$F_{v,Rk} = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad (2-8)$$

Vergelijking (2-8) is opgenomen in vergelijking (2-2) voor bezwijkmechanisme (f), alleen is de voorafgaande factor van 1,15 nog toe te voegen [8]. Met deze werkwijze van de theorie van Johansen is het mogelijk om de formules van elk bezwijkmechanisme uit vergelijking (2-2) te bekomen. Blaß en Sandhaas [8] beschrijven de uitwerking van deze resterende formules.

De benadering van de theorie van Johansen voor stiftvormige verbindingen met één afschuifvlak is ook toepasbaar op verbindingen met twee afschuifvlakken. Bij het afleiden van de formules volgens Johansen is het belangrijk om op te merken dat deze formules per afschuifvlak zijn bepaald, waarbij de verbindingen conceptueel in het midden zijn gescheiden, namelijk op  $t_{h2}/2$ , zoals getoond in Figuur 2-3. Bijgevolg zijn de formules volgens Johansen voor twee afschuifvlakken slechts uitbreidingen van de formules voor één afschuifvlak [8]. Hierdoor kunnen de bezwijkmechanismen in Figuur 2-2 en Figuur 2-3 dezelfde reeks formules van vergelijking (2-2) gebruiken om de deuveffectbijdrage te bepalen.

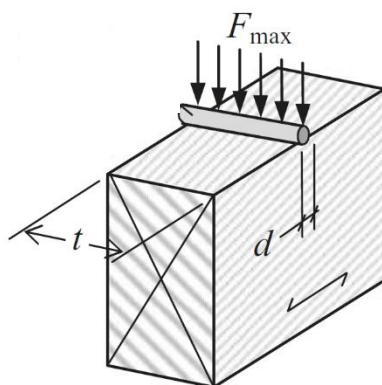
### 2.3.3 Stuiksterkte

De stuiksterkte is de drukspanning die het hout, of andere materialen in prEC5, rond het stiftvormig verbindingsmiddel kan verdragen. Voor houten elementen is deze materiaaleigenschap bepaald aan de hand van beproevingen volgens EN 383. In Figuur 2-5 is de testopstelling volgens EN 383 afgebeeld, waarbij een stijve metalen stift tegen het gat in een houten proefstuk drukt, samen met een typisch testresultaat [11].



Figuur 2-5: Testopstelling EN 383 met een typisch testresultaat [11]

In het testresultaat is het verband weergegeven tussen de belasting uitgeoefend door de stift  $F$  en verplaatsing van de stift in het proefstuk  $u$ . Vervolgens is de stuiksterkte te formuleren als de maximaal uitgeoefende kracht  $F_{max}$ , vóór een verplaatsing van 5 mm in de test, gedeeld door de geprojecteerde oppervlakte van de stift en is gemeten in MPa. Deze oppervlakte is gelijk aan de diameter van de metalen stift  $d$  vermenigvuldigd met de dikte van het houten proefstuk  $t$  [6], [8], [11]. Figuur 2-6 visualiseert deze parameters voor de formulering van de stuiksterkte.

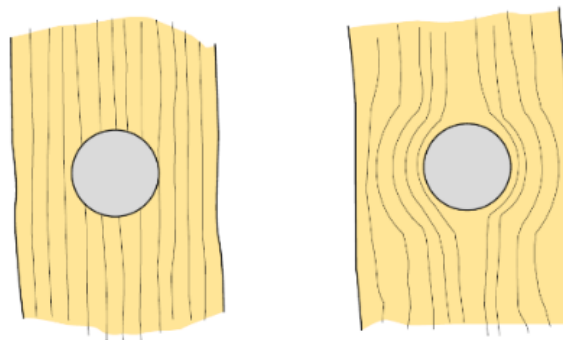


Figuur 2-6: Parameters voor bepaling stuiksterkte [6]

In principe is de stuiksterkte van een houten materiaal geen materiaaleigenschap, maar eerder een systeemeigenschap, omwille van de complexe cellulaire aard van hout en houtproducten. De stuiksterkte, beschouwd als systeemeigenschap, is daarom nog afhankelijk van meerdere factoren:

- De dichtheid van het hout  $\rho_k$ : hoe hoger deze dichtheid is, hoe hoger de stuiksterkte is.
- De wrijving tussen verbindingsmiddel en hout: verbindingsmiddelen met een ruw oppervlak hebben een hogere stuiksterkte dan die met een glad oppervlak.

- De hoek tussen de houtvezel en de belastingsrichting  $\alpha$ : de stuiksterkte is het hoogst bij samendrukking evenwijdig aan de vezel ( $\alpha = 0^\circ$ ) en het laagst is bij samendrukking loodrecht op de houtvezel ( $\alpha = 90^\circ$ ).
- De diameter van het verbindingsmiddel: waarbij kleine diameters een hogere stuiksterkte geven dan grotere diameters. Bij de testen volgens EN 383 kunnen kleinere diameters problemen geven, omdat de kans groot is dat de slanke stift eerder gaat plooiën dan dat de stift in het hout dringt. Wanneer de stift plooit, is er geen uniforme spanning meer, waardoor de meting niet zuiver verloopt en dus onbruikbaar zal zijn. Een uniforme stuik in het hout verzekeren kan door de uiteinden van de stift in de zijdelingse stalen platen te klemmen en de dikte van het proefstuk te beperken, meestal tot tweemaal de diameter van de stift.
- Het vochtgehalte in hout: een hoog vochtgehalte beïnvloedt de stuiksterkte negatief, zoals voor alle andere sterkte-eigenschappen van houten materialen. Een laag vochtgehalte is positief voor de stuiksterkte.
- Elke versterking van hout in trek loodrecht op de houtvezel: het falen van hout door stuik initieert door een scheur langs de vezel. Deze scheur ontstaat wanneer het gat van de stift uitzet bij het drukken tegen het hout. Het is dus de treksterkte loodrecht op de vezel die de stuiksterkte beperkt, waardoor elke versterking hiervan de stuiksterkte verhoogt.
- Wel of geen voorgeboord gat: bij voorgeboorde gaten is het grootste deel van de belasting parallel aan de houtvezel gedragen door druk parallel aan de vezel. Dit is het gevolg van het afsnijden van de houtvezels door de voorboring. Niet-voorgeboorde gaten daarentegen leveren een belastingssituatie op waarbij de stuiksterkte een combinatie is van druk parallel en loodrecht op de vezel. Dit is het gevolg van het verbuigen van de houtvezels doordat er geen voorboring is [6], [8], [10], [11]. De gaten voor bouten en deuvels zijn altijd voorgeboord, waarbij de eisen voor het voorboren gegeven zijn in prEC5. Figuur 2-7 verduidelijkt het verschil tussen de afgesneden en de verbogen houtvezels.



Figuur 2-7: Verschil tussen houtvezels bij een voorgeboord en niet-voorgeboord gat [11]

De empirisch bepaalde formules voor de berekening van de karakteristieke stuiksterkte bij houten materialen zijn verschillend voor de verschillende types verbindingsmiddelen in prEC5. Voor bouten en deuvels met een diameter tussen 8 en 30 mm, zijn de volgende formules gegeven [4]:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k}{k_{mat}} \quad (2-9)$$

met

$$k_{mat} = \begin{cases} k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha & \text{voor SL, PL en CL} \\ (k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) \cdot (\sin^2 \beta + k_4 \cdot \cos^2 \beta) & \text{voor LVL en GLVL} \end{cases} \quad (2-10)$$

en

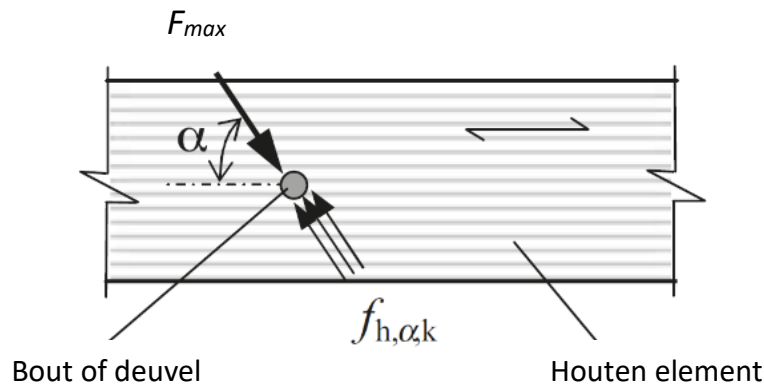
$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015 \cdot d & \text{voor zacht hout SL, PL en CL} \\ 1,15 + 0,015 \cdot d & \text{voor zacht hout LVL} \\ 0,90 + 0,01 \cdot d & \text{voor ST-d, DGL en hardhout LVL en GLVL} \end{cases} \quad (2-11)$$

en

$$k_4 = \begin{cases} 1,4 & \text{voor hardhout LVL-C of GLVL-C} \\ \max \left\{ \begin{array}{l} d/(d-2) \\ 1,15 \end{array} \right. & \text{voor zacht hout LVL en GLVL of hardhout LVL-P} \\ & \text{en GLVL-P} \end{cases} \quad (2-12)$$

waarbij:

- $f_{h,\alpha,k}$  de karakteristieke stuiksterkte van het hout is onder een hoek  $\alpha$ , in MPa;  
 $d$  de diameter van de deugel of bout is, in mm;  
 $\rho_k$  de karakteristieke dichtheid van het hout is, in kg/m<sup>3</sup>;  
 $\alpha$  de hoek tussen de houtvezel en de belastingsrichting is, in °, zie Figuur 2-8;  
 $\beta$  de hoek tussen de bout- of deugelas en de oppervlakte is, in °.



Figuur 2-8: Stuiksterkte bij een bout of deugel belast onder een hoek  $\alpha$  [6]

Voor bouten en deugels met een diameter kleiner dan 8 mm zijn vergelijking (2-9)-(2-12) niet geldig. De karakteristieke stuiksterkte bij houten materialen voor deze deugels en bouten zijn in prEC5 gelijk aan die van voorgeboorde nagels met een diameters kleiner dan 8 mm. Hiervoor zijn de volgende formules gegeven [4]:

$$f_{h,\alpha,\beta,k} = \frac{0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k}{k_{mat}} \quad (2-13)$$

met

$$k_{mat} = \begin{cases} 1 & \text{voor SL, PL en CL} \\ \sin^2 \beta + k_1 \cdot \cos^2 \beta & \text{voor zacht hout LVL} \\ (k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) \cdot (\sin^2 \beta + k_1 \cdot \cos^2 \beta) & \text{en GLVL} \\ & \text{voor hardhout LVL} \\ & \text{en GLVL} \end{cases} \quad (2-14)$$

en

$$k_{90} = 0,5 + 0,024 \cdot d \quad (2-15)$$

en

$$k_1 = \begin{cases} 1 & \text{voor zacht hout LVL-P en GLVL-P} \\ 1,2 & \text{voor hardhout LVL-P en GLVL-P} \\ \min \left\{ \begin{array}{l} d/(d-2) \\ 3 \end{array} \right. & \text{voor LVL-C en GLVL-C} \end{cases} \quad (2-16)$$

In vergelijking (2-2) en (2-3) is het ook mogelijk om de stuijsterkte van verschillende soorten metalen, zoals aluminium en staal, te gebruiken. Dit is een gevolg van een aanname in prEC5, waarbij metalen elementen te beschouwen zijn zoals elk ander element door gebruik te maken van de relevante stuijsterkte. Voor staalplaat is de bepaling en controle van de stuijsterkte terug te vinden in prEN 1993-1-8, de Eurocode voor stalen constructies. Hierbij is op te merken dat de stuijsterkte van de staalplaat volgens prEN 1993-1-8 te controleren is, maar dat in deze scriptie niet zal worden gedaan. Dit zou anders te ver afwijken van het doel van dit onderzoek. In prEC5 is er ook een alternatieve, vereenvoudigde methode opgenomen voor de bepaling van de stuijsterkte, waardoor de volledige berekening binnen prEC5 kan blijven, zonder dat een ontwerper/ingenieur moet overschakelen naar andere Eurocodes. Voor dit onderzoek krijgt deze methode volgens prEC5 dus de voorkeur. De sterkte van de staalplaat is hier in het algemeen voldoende verondersteld wanneer de verbinding niet bezwijkt door een te lage laterale sterkte van de staalplaat. De karakteristieke stuijsterkte van voorgeboorde staalplaten is in prEC5 te bepalen aan de hand van de volgende formules [4]:

$$f_{h,k} = k_{pl} \cdot 600 \text{ MPa} \quad (2-17)$$

met

$$k_{pl} = \begin{cases} 1 & \text{voor stalen binnenplaten} \\ 1/2 & \text{voor stalen buitenplaten, wanneer } t/d \leq 1/2 \\ 1 & \text{voor stalen buitenplaten, wanneer } t/d > 1 \end{cases} \quad (2-18)$$

In vergelijking (2-18) is de reductiefactor  $k_{pl}$  bij stalen buitenplaten afhankelijk van de verhouding tussen de diameter van het verbindingsmiddel  $d$  en de dikte van de staalplaat  $t$ . De reductiefactor kan niet kleiner zijn dan  $1/2$ , wanneer  $t/d$  kleiner is dan  $1/2$  en kan niet groter zijn dan 1, wanneer  $t/d$  groter is dan 1. Voor tussenliggende verhoudingen van  $t/d$  is interpolatie van de reductiefactor toegestaan. In EC5 maakt de verhouding  $t/d$  het onderscheid tussen dunne of dikke staalplaten, terwijl in prEC5 dit onderscheid niet aanwezig is. Doordat vergelijking (2-17) en (2-18) de benaderende waarde van deze stuijsterkte, die hier 600 MPa bedraagt, automatisch interpoleert, zal de bekomen stuijsterkte zorgen voor de juiste deuveffectbijdrage. De gevoeligheid van de dikte van de staalplaat voor de stuijsterkte is zeer klein [4].

De benaderende waarde voor de stuijsterkte is gelijk aan driemaal de staalsterkte van de plaat genomen volgens prEN 1993-1-8, omdat het onwaarschijnlijk is dat de staalsterkte minder dan 200 MPa bedraagt, kan de stuijsterkte van een stalen plaat 600 MPa bedragen. De toekenning van deze waarde aan de stuijsterkte van stalen platen is te verantwoorden, aangezien hogere waarden weinig praktische gevolgen hebben. Lagere waarden kunnen relevant zijn voor aluminium platen of andere harde plaatmaterialen. Bij gebruik van andere metalen, zal deze benaderende waarde voor de stuijsterkte dus verschillen, en moet er een controle met de desbetreffende Eurocode uitgevoerd zijn [4].

### 2.3.4 Vloeimoment

Het vloeimoment van een verbindingsmiddel is het moment dat nodig is om een plastisch scharnier in het verbindingsmiddel te veroorzaken. In het staalontwerp wordt daarom soms gerefereerd naar het plastisch moment. Voor de verbindingsmiddelen is deze materiaaleigenschap bepaald aan de hand van beproevingen volgens EN 409 [6], [11]. De empirisch bepaalde formules voor de berekening van het karakteristieke vloeimoment  $M_{y,k}$  van een verbindingsmiddel zijn verschillend voor de verschillende types verbindingsmiddelen in prEC5. Voor bouten en deuvels is de volgende formule gegeven [4]:

$$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (2-19)$$

waarbij:

$f_{u,k}$  de karakteristieke treksterkte van de deugel of bout is, zie Tabel 2-1, in MPa;

$d$  de diameter van de deugel of bout is, in mm.

Tabel 2-1: Karakteristieke vloeigrens en treksterkte van deuvels en bouten [4]

Verbindingsmiddel	Sterkteklasse of materiaal	$f_{y,k}$ in MPa	$f_{u,k}$ in MPa
		$t \leq 40$	$t \leq 40$
Deugel	S235	235	360
	S275	275	390
	S355	355	490
	1.404	600	800
Bout	4.6	240	400
	4.8	320	400
	5.6	300	500
	5.8	400	500
	6.8	480	600

De formules voor de bepaling van het vloeimoment van een verbindingsmiddel in prEC5 zijn experimenteel bepaald, maar achter deze formules zit ook een fysische verklaring, namelijk het ontstaan van een plastisch scharnier in het verbindingsmiddel. Figuur 2-9 toont het ontstaan van dit scharnier.



Figuur 2-9: Elastische (a) en plastische (b) spanningsverdeling in een metalen verbindingsmiddel [10]

In Figuur 2-9a zijn de normaalspanningen ten gevolge van buiging in het verbindingsmiddel eerst nog elastisch. Daarna zal de normaalspanning de vloeigrens bereiken bij een bepaald buigmoment. Verder opdrijven van het buigmoment resulteert vervolgens in een groter plastisch gebied, wanneer perfect plastisch gedrag is verondersteld, maar de vloeigrens blijft op hetzelfde niveau. Dit effect van

de vloeigrens is weergegeven in Figuur 2-9b. Vanuit deze benadering is het plastisch moment te formuleren als volgt:

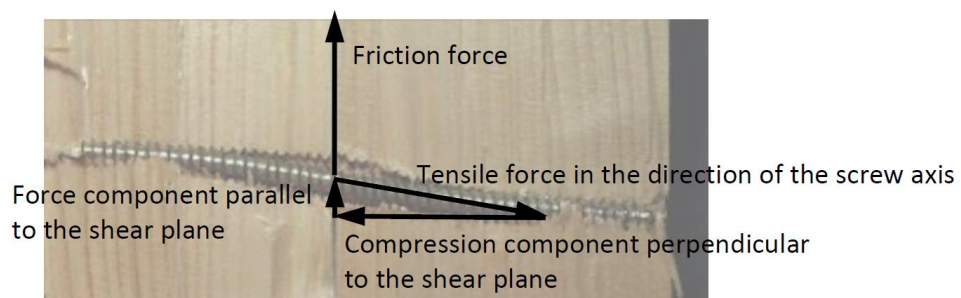
$$M_{y,Rk} = f_y \cdot \frac{d}{2} \cdot d \cdot \frac{d}{2} = f_y \cdot \frac{d^3}{4} \quad (2-20)$$

Een belangrijk verschil tussen vergelijking (2-19) en (2-20) is dat in vergelijking (2-20) het vloeimoment evenredig is met de diameter van het verbindingsmiddel tot de derdemacht, terwijl in vergelijking (2-19) deze macht 2,6 bedraagt. De reden hiervoor is de kwaliteit van de verbindingsmiddelen uit het verleden. Toen was staal zachter, waardoor grotere vervormingen moesten ontstaan om het volledig plastisch scharnier te kunnen vormen. Vervolgens is de macht verkleind, omdat de vervormingen in een verbinding niet zo groot kunnen zijn [10].

### 2.3.5 Koordeffectbijdrage

Bij de berekening van de laterale weerstand van een stiftvormig verbindingsmiddel in prEC5 moet de koordeffectbijdrage per afschuifvlak voor bezwijkmechanismen (c) tot en met (f), uit Figuur 2-2 en Figuur 2-3, ingerekend zijn. Dit is duidelijk te zien in vergelijking (2-1). Voor bezwijkmechanismen (a) en (b) daarentegen mag er geen koordeffectbijdrage ingerekend zijn, omdat het koordeffect alleen kan ontstaan bij verbindingsmiddelen die schuin vervormen bij bezwijken [4], [8]. Door de schuine vervorming treden er normaalkrachten op in de richting van de as van de verbindingsmiddelen. Deze normaalkrachten kunnen leiden tot aanzienlijke sterkte-toenames van de verbinding in vergelijking met zuivere Johansencomponenten. In tegenstelling tot verbindingsmiddelen met schroefdraad of moeren en sluitringen (bouten), zijn bevestigingen met gladde schacht, zoals deuvels of nagels met gladde schacht, slechts bestand tegen geringe normaalkrachten [8]. In dit onderzoek kunnen dus alleen bouten normaalkrachten opvangen, bijgevolg schuin vervormen en dus een koordeffectbijdrage leveren. Deuvels kunnen geen normaalkrachten opvangen en bijgevolg geen koordeffectbijdrage leveren.

De koordeffectbijdrage is in principe een combinatie tussen terugtrek- en wrijvingskrachten in een verbinding [6]. Figuur 2-10 toont de krachtwerking in een schuin vervormd verbindingsmiddel, die het koordeffect helpt te verklaren.



Figuur 2-10: Krachtwerking in een schuin vervormd verbindingsmiddel [8]

De schuine vervorming van het verbindingsmiddel creëert een verankering, die op zijn beurt een trekkracht genereert in de richting van de as van het verbindingsmiddel. In Figuur 2-10 is de driehoek van krachten, die bij de huidige vervorming ontstaan is, gemarkeerd. De optredende trekkracht is hier verdeeld in twee componenten, respectievelijk parallel en loodrecht op het afschuifvlak. De drukkrachtcomponent loodrecht op het afschuifvlak genereert een wrijvingskracht tussen beide houtelementen, die een positief effect heeft op het draagvermogen van de verbinding. De krachtcomponent parallel aan het afschuifvlak wordt buiten beschouwing gelaten, omdat deze enkel



kan ontstaan wanneer het verbindingsmiddel aanzienlijk helt ten opzichte van het afschuifvlak. Dit komt bij deuvels en bouten in principe nooit voor [8].

PrEC5 bepaalt de karakteristieke koordeffectbijdrage per afschuifvlak per verbindingsmiddel  $F_{rp,k}$  als volgt [4]:

$$F_{rp,k} = \min \begin{cases} k_{rp,1} \cdot F_{ax,t,k} \\ k_{rp,2} \cdot F_{D,k} \end{cases} \quad (2-21)$$

met

$$F_{ax,t,k} = \min \begin{cases} F_{p,k} \\ F_{w,k} \\ F_{t,k} \end{cases} \quad (2-22)$$

Waarbij:

- $k_{rp,1}$  de factor voor het koordeffect is, zie Tabel 2-2;
- $k_{rp,2}$  de beperkingsfactor voor het koordeffect is, zie Tabel 2-2;
- $F_{D,k}$  de ontwerpwaarde van de deuveffectbijdrage is, zie vergelijking (2-2), in Newton;
- $F_{ax,t,k}$  de karakteristieke axiale trekweerstand is, zie sectie 2.4, in Newton;
- $F_{p,k}$  de karakteristieke kopdoortrekweerstand is, zie sectie 2.4.1 in Newton;
- $F_{w,k}$  de karakteristieke uittrekweerstand is, in Newton;
- $F_{t,k}$  de karakteristieke trekweerstand is, zie sectie 2.4.2, in Newton.

*Tabel 2-2: Factoren voor de koordeffectbijdrage van bouten en deuvels [4]*

Type verbindingsmiddel	$k_{rp,1}$	$k_{rp,2}$
Bouten	0,25	0,25
Deuvels	0,25	0

Uit Tabel 2-2 en vergelijking (2-21) en (2-22) is af te leiden dat deuvels niet over een koordeffectbijdrage kunnen beschikken, omdat de beperkingsfactor voor het koordeffect nul is, waardoor de karakteristieke koordeffectbijdrage per afschuifvlak per verbindingsmiddel in vergelijking (2-21) altijd in 0 N resulteert. Dit is logisch omdat deuvels geen axiale trekweerstand kunnen hebben, terwijl bouten dat wel kunnen hebben. Meer uitleg hierover is terug te vinden in sectie 2.4.

## 2.4 Axiale weerstand van een stiftvormig verbindingsmiddel

Om de koordeffectbijdrage te kunnen berekenen, is de axiale trekweerstand van het verbindingsmiddel nodig. De karakteristieke axiale trekweerstand  $F_{\alpha x, t, k}$  van een axiaal belast verbindingsmiddel is gelimiteerd door:

- de karakteristieke kopdoortrekweerstand  $F_{p, k}$  in de houten elementen;
- de karakteristieke uittrekweerstand  $F_{w, k}$  in de houten elementen;
- de karakteristieke trekweerstand  $F_{t, k}$  van het verbindingsmiddel [4].

Deuvels hebben geen axiale trekweerstand, omdat het verbindingsmiddelen zijn met meestal een gladde schachtoppervlakte. Ze zijn hierdoor slecht bestand tegen geringe normaalkrachten, en kunnen vervolgens geen axiale trek opvangen. Bouten daarentegen kunnen wel axiale trek opvangen, omdat ze verankerd zijn aan de kop- en puntzijde van de staaf door sluitringen en moeren. De axiale trekweerstand van bouten is gelijk aan de minimumwaarde van de kopdoortrekweerstand en de trekweerstand van de bout [8], [11]. De uittrekweerstand van bouten berekenen gaat niet, omdat bouten in voorgeboorde gaten aangebracht aan.

De axiale drukweerstand van een axiaal belast verbindingsmiddel is in deze thesis niet besproken, omdat deze weerstand niet relevant is voor dit onderzoek.

### 2.4.1 Kopdoortrekweerstand bij bouten

De kopdoortrekweerstand bij bouten is afhankelijk van de draagkracht van het materiaal waarop de sluitring rust en is van toepassing voor boutkoppen en moeren [6]. Deze weerstand heeft in prEC5 daarom voor verschillende materialen een andere kopdoortrekweerstand met verschillende voorwaarden. Ook zijn er enkele algemene voorwaarden:

- De boutkopdiameter is ten minste 1,8 keer de boutdiameter.
- Er zijn sluitringen aanwezig onder de boutkop en de moer, waarbij de diameter of zijde van de sluitring ten minste 3,4 keer de boutdiameter bedraagt en de sluitringdikte ten minste 0,2 keer de boutdiameter bedraagt, bijvoorbeeld volgens EN ISO 7094.
- De sluitringen moeten een volledig draagvlak hebben [4].

De karakteristieke doortrekweerstand van de kop of moer  $F_{p, k}$  per verbindingsmiddel voor SL, PL en CL is in prEC5 als volgt bepaald:

$$F_{p, k} = \begin{cases} f_{head, k} \cdot A_{head} & \text{voor } A_{head} \leq 4072 \text{ mm}^2 \\ 3 \cdot f_{c, 90, k} \cdot A_{head} & \text{voor } A_{head} > 4072 \text{ mm}^2 \end{cases} \quad (2-23)$$

met

$$f_{head, k} = 19 \cdot e^{\left(-\frac{d_{head}}{50}\right) \cdot \left(\frac{\rho_k}{350}\right)^{0,8}} \quad (2-24)$$

waarbij:

$A_{head}$	de oppervlakte binnen de omtrek van de boutkop, sluitring of stalen plaat is, in $\text{mm}^2$ ;
$d$	de boutdiameter is, in mm;
$d_{head}$	de boutkopdiameter is, in mm;
$f_{head, k}$	de karakteristieke kopdoortrekparameter is, in MPa;
$f_{c, 90, k}$	de karakteristieke druksterkte loodrecht op de vezelrichting van het hout is, in MPa;
$\rho_k$	de karakteristieke dichtheid van het hout is, in $\text{kg/m}^3$ .

Om vergelijking (2-23) en (2-24) te mogen gebruiken, geldt het volgende:

$$t_1 \geq 4 \cdot d \quad (2-25)$$

waarbij  $t_1$  de dikte van element 1 is, in mm.

Voor LVL en GLVL is er in prEC5 ook een karakteristieke doortrekweerstand van de kop  $F_{p,k}$  per verbindingsmiddel bepaald:

$$F_{p,k} = d_{head}^2 \cdot \begin{cases} 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \\ 70 - 0,8 \cdot d_{head} \end{cases} \quad \text{voor } \rho_k \geq \frac{730 \text{ kg}}{\text{m}^3} \quad (2-26)$$

Om vergelijking (2-26) te mogen gebruiken, gelden de volgende voorwaarden:

$$t_1 \geq \max \left\{ \begin{array}{l} 5 \cdot d \\ (10 \cdot d - 30) \cdot \frac{\rho_k}{400} \end{array} \right. \quad (2-27)$$

en

$$\varepsilon \geq 30^\circ \quad (2-28)$$

waarbij  $\varepsilon$  de hoek tussen de as van het verbindingsmiddel en de vezelrichting van het hout, in  $^\circ$ .

Ten slotte zijn staalplaten, bij het doortrekken van moeren en de koppen van bouten, te beschouwen als sluitringen waarvan de plaatdikte van de stalen plaat gelijk is aan de sluitringdikte [4].

## 2.4.2 Trekweerstand van bouten

De karakteristieke trekweerstand  $F_{t,k}$  van een bout is te bepalen met behulp van de respectieve prestatieverklaring, de sterktevergelijkingen in prEN 1993-1-8 of de volgende vergelijking uit prEC5:

$$F_{t,k} = 0,9 \cdot A_s \cdot f_{u,k} = 0,9 \cdot \frac{d_{sp}^2}{4} \cdot f_{u,k} \quad (2-29)$$

waarbij:

- $A_s$  de nominale spanningsoppervlakte van het verbindingsmiddel op basis van de relevante diameter is, in  $\text{mm}^2$ ;
- $d_{sp}$  de relevante diameter voor bouten is, die ongeveer  $0,86d$  bedraagt, in mm;
- $d$  de boutdiameter is, in mm;
- $f_{u,k}$  de karakteristieke staalsterkte is, volgens Tabel 2-1 [4].

## 2.5 Sterktecontrole van de totale verbinding

In de voorgaande secties zijn enkel de karakteristieke laterale en axiale weerstand van een individueel verbindingsmiddel besproken. De volgende stap in prEC5 is deze karakteristieke waarden om te zetten in ontwerpwaarden voor de laterale en axiale weerstand van een individueel verbindingsmiddel. Vervolgens is de ontwerpwaarde van de totale sterkte van de stiftvormige verbinding, bestaande uit meerdere verbindingsmiddelen van hetzelfde type en dezelfde afmetingen, te bepalen. Het is belangrijk om op te merken dat deze totale sterkte van de verbinding, altijd lager of gelijk is dan de som van de individuele weerstanden van elk verbindingsmiddel. Dit fenomeen is in te rekenen via het effectief aantal verbindingsmiddelen. De laatste stap is het controleren van de laterale en axiale ontwerpsterkte van de totale verbinding, die groter moet zijn dan de representatieve optredende ontwerpbelasting in de verbinding, wanneer van toepassing voor het type verbindingsmiddelen. Bij verbindingen met deuvels is enkel de laterale ontwerpsterkte te controleren, terwijl voor verbindingen met bouten, de axiale ontwerpsterkte ook te controleren is [4].

Voor dit onderzoek was enkel de controle van de laterale ontwerpsterkte van de totale verbinding relevant, daarom is de controle van de axiale ontwerpsterkte buiten beschouwing gelaten. De axiale weerstanden van bouten zijn wel eerder besproken in sectie 2.4, omdat die nodig zijn voor de berekening van het koordeffect.

### 2.5.1 Ontwerpwaarde van de weerstand van een individueel verbindingsmiddel

Het omzetten van de karakteristieke waarde in de ontwerpwaarde voor de laterale weerstand van een individueel verbindingsmiddel, kan met behulp van de volgende formule:

$$F_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,k}}{\gamma_R} \quad (2-30)$$

waarbij:

$F_{v,d}$	de ontwerpwaarde van de laterale weerstand van één verbindingsmiddel is, in Newton;
$F_{v,k}$	de karakteristieke laterale weerstand van één verbindingsmiddel is, in Newton;
$\gamma_R$	de partiële veiligheidsfactor voor de weerstand is, die voor verbindingen met stiftvormige verbindingsmiddelen altijd 1,3 bedraagt;
$k_{mod}$	de modificatiefactor is die rekening houdt met de belastingsduur en het vochtgehalte.

De modificatiefactor is in een verbinding met stiftvormige verbindingsmiddelen tussen twee elementen met verschillend tijdsafhankelijk gedrag gelijk aan het geometrische gemiddelde van de modificatiefactoren van elk afzonderlijk element:

$$k_{mod} = \sqrt{k_{mod,1} \cdot k_{mod,2}} \quad (2-31)$$

waarbij  $k_{mod,i}$  de modificatiefactor is van element  $i$ , terug te vinden in [4].

## 2.5.2 Laterale ontwerpsterkte van de totale verbinding

Vaak zijn er meerdere verbindingmiddelen nodig om de laterale belasting in de verbinding te kunnen dragen. De laterale ontwerpsterkte van de totale verbinding dan moet voldoen aan de volgende voorwaarde:

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} \quad (2-32)$$

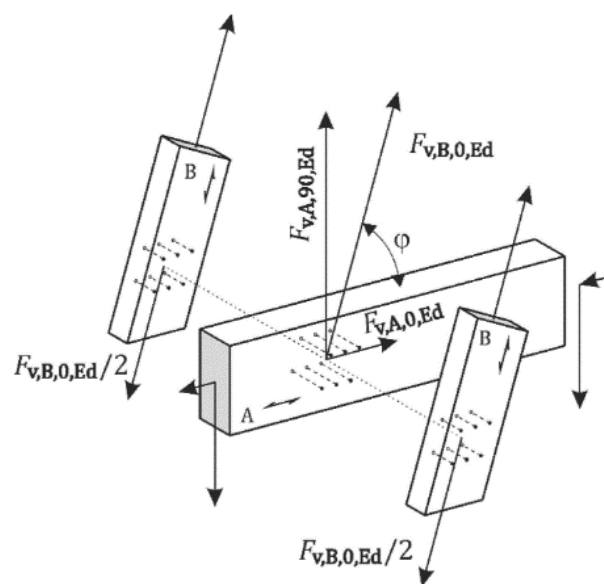
met

$$F_{v,ef,Rd} = n_{sp} \cdot n_{row} \cdot n_{ef,L} \cdot F_{v,d} \quad (2-33)$$

waarbij:

- $F_{v,Ed}$  de laterale ontwerpkracht op de totale verbinding is, die de rijen van de verbindingmiddelen parallel aan hun uitlijning belast, in Newton;
- $F_{v,ef,Rd}$  de laterale ontwerpsterkte van de totale verbinding is, volgens de richting van de ontwerpkracht, in Newton;
- $n_{sp}$  het aantal afschuifvlakken in de verbinding is;
- $n_{row}$  het aantal rijen in de verbinding is;
- $n_{ef,L}$  het effectief aantal lateraal belaste verbindingmiddelen in een rij is, zie sectie 2.5.3;
- $F_{v,d}$  de ontwerpwaarde voor de laterale weerstand per verbindingmiddel is, volgens de richting van de ontwerpkracht, in Newton [4], [6].

In het ontwerp van de totale verbinding is het belangrijk om rekening te houden met het effectief aantal verbindingmiddelen in elke rij en houtelement afzonderlijk. Daarom kan het in sommige situaties nodig zijn om de laterale ontwerpkracht op de verbinding te ontbinden in de richtingen parallel aan en loodrecht op de houtvezel, om dan deze ontbonden krachtcomponenten te controleren met de laterale ontwerpsterkte van het element in die richtingen berekend met vergelijking (2-33) [4]. In Figuur 2-11 is een voorbeeldverbinding afgebeeld waarbij de ontwerpsterkte te bepalen is volgens de richtingen van de laterale ontwerpkracht  $F_{v,B,0,Ed}$  en zijn componenten  $F_{v,A,0,Ed}$  en  $F_{v,A,90,Ed}$ .



Figuur 2-11: Krachtenevenwicht van een verbinding [4]

De richting van de laterale ontwerpkracht in element B ( $F_{v,B,0,Ed}/2$ ) uit Figuur 2-11 is parallel met de draagrichting van element B, wat voor houten elementen overeen komt met de richting van de houtvezel. In element B is daarom enkel de laterale ontwerpsterkte parallel met de houtvezel te controleren. De richting van de laterale ontwerpkracht in het houten element A ( $F_{v,B,0,Ed}$ ) daarentegen maakt een hoek  $\varphi$  met de richting van de houtvezel, daarom is in dit element de ontwerpkracht ontbonden in krachtcomponenten  $F_{v,A,0,Ed}$  en  $F_{v,A,90,Ed}$ . Vervolgens moet de ontwerpsterkte parallel met de houtvezel van element A groter zijn dan ontwerpkrachtcomponent  $F_{v,A,0,Ed}$  en moet de ontwerpsterkte loodrecht op de houtvezel van element A groter zijn dan ontwerpkrachtcomponent  $F_{v,A,90,Ed}$ . Een belangrijk verschil hierbij is dat de ontwerpsterkte parallel met de houtvezel moet bepaald zijn met  $n_{ef,L}$  en de ontwerpsterkte loodrecht op de houtvezel moet bepaald zijn met  $n_{ef,A}$  [4].

### 2.5.3 Effectief aantal lateraal belaste verbindingsmiddelen

De  $n_{ef,L}$  is afhankelijk van de richting van de laterale ontwerpkracht in het houtelement, ten opzichte van de houtvezel, het type verbindingsmiddel en de aanwezigheid van verspringing tussen de verbindingsmiddelen in een rij [4], [6].

Wanneer de ontwerpkracht in het element parallel met de houtvezel verloopt en de verbindingsmiddelen in de rijen niet verspringen, dan is het effectief aantal lateraal belaste verbindingsmiddelen in de rij parallel aan de houtvezel te bepalen [6]. PrEC5 berekent  $n_{ef,L}$  voor bouten en deuvels bij deze situatie aan de hand van de volgende vergelijkingen:

$$n_{ef,L} = \min \left\{ n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \cdot d}} \right. \quad \text{voor SL, PL en CL} \quad (2-34)$$

$$n_{ef,L} = \min \left\{ n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{t \cdot a}{50 \cdot d^2}} \right. \quad \text{voor LVL en GLVL} \quad (2-35)$$

met

$$a = \begin{cases} a_3 & \text{wanneer } n = 1 \\ \min \begin{cases} a_1 \\ a_{3,t} \end{cases} & \text{wanneer } n \geq 2 \end{cases} \quad (2-36)$$

$$t = \begin{cases} \min \begin{cases} t_1 \\ t_2 \end{cases} & \text{voor verbindingen met} \\ & \text{één afschuifvlak} \\ \min \begin{cases} 2 \cdot t_1 \\ 2 \cdot t_2 \\ t_{ms} \end{cases} & \text{voor verbindingen met} \\ & \text{twee afschuifvlakken} \end{cases} \quad (2-37)$$

waarbij:

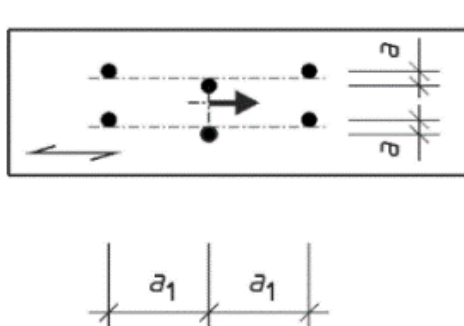
- $n$  het werkelijk aantal verbindingsmiddelen in de rij parallel aan de houtvezel is;
- $a_1$  de tussenafstand van de verbindingsmiddelrij parallel aan de houtvezel is, zie sectie 2.6;
- $a_{3,t}$  de belaste eindafstand van de verbindingsmiddelrij parallel aan de houtvezel is, zie sectie 2.6;
- $a_3$  de eindafstand van de verbindingsmiddelrij parallel aan de houtvezel is, in mm;
- $d$  de diameter van het verbindingsmiddel is, in mm;
- $t_1$  en  $t_2$  de diktes van de buitenste houten elementen zijn, in mm;
- $t_{ms}$  de dikte van het binnenste element van verbindingen met twee afschuifvlakken of de kleinste dikte van het binnenste element van verbindingen met meerdere afschuifvlakken, in mm [4].

Splijten langs de houtvezel door een rij verbindingsmiddelen parallel aan deze houtvezel is een vorm van brosse breuk van het hout, die al in rekening gebracht is door vergelijking (2-34) en (2-35) toe te passen. In sectie 2.7 is het fenomeen van brosse breuk van hout kort besproken. Dit fenomeen kan ontstaan bij verbindingen die meerdere verbindingsmiddelen bevatten. Het nadeel van dit fenomeen is dat het de totale sterkte van de verbinding kan verminderen ten opzichte van de som van de individuele weerstanden van elk verbindingsmiddel. Wanneer er zich dus een rij verbindingsmiddelen parallel aan de houtvezel vormt, zal de totale sterkte van deze rij verminderen, omdat de verbindingsmiddelen niet tegelijkertijd hun maximale sterkte bereiken. Dit is te wijten aan plaatselijke variaties in houtsterkte, afmetingen van de gaten, verkeerde uitlijning van de gaten en een ongelijke belastingoverdracht tussen de verbindingsmiddelen uit de rij parallel met de houtvezel [4], [6], [8].

Verschillende onderzoekers hebben dit effect onderzocht, waarbij  $n_{ef,L}$  bepaald is met behulp van regressieanalyses op talrijke experimentele testresultaten voor elk type verbindingsmiddel. De sterkte van deze rij hangt af van de stijfheid van het verbindingsmiddel en de stuiksterkte van het element, hierbij geldt: hoe stijver het verbindingsmiddel, hoe groter de ontwerpsterkte van de rij. Aangezien bouten en deuvels stijver zijn dan andere verbindingsmiddelen, is de vermindering van de rijsterkte parallel aan de vezel minder groot dan bij andere verbindingsmiddelen. Uit vergelijking (2-34) en (2-35) is ook het volgende af te leiden: wanneer het hout niet voortijdig splijt of breekt, zullen er plastische vervormingen mogelijk zijn, waardoor de krachten zich over de afzonderlijke verbindingsmiddelen verdelen. De totale sterkte van de verbinding is dan gelijk aan de som van de individuele weerstanden van elk verbindingsmiddel [4], [6], [8].

Wanneer de ontwerpkracht in het element loodrecht op de houtvezel verloopt, dan is het effectief aantal lateraal belaste verbindingsmiddelen in de rij loodrecht op de houtvezel te bepalen [6]. Voor deze situatie bij bouten en deuvels schrijft prEC5 voor dat  $n_{ef,L}$  gelijk is aan het werkelijk aantal verbindingsmiddelen in de rij loodrecht op de houtvezel  $n_{90}$  [4].

Wanneer de ontwerpkracht in het element parallel met de houtvezel verloopt en de verbindingsmiddelen in de rijen ten minste de diameter van het verbindingsmiddel loodrecht op de houtvezel verspringen, dan is het effectief aantal lateraal belaste verbindingsmiddelen in de rij parallel aan de houtvezel volgens prEC5 gelijk aan het werkelijk aantal verbindingsmiddelen in de rij parallel aan de houtvezel  $n$  [4]. Figuur 2-12 weergeeft deze verspringing van de verbindingsmiddelen.



Figuur 2-12: Verspringende stiftvormige verbindingsmiddelen parallel aan de houtvezel met  $a = 1d$  [4]

## 2.5.4 Aanvullende ontwerpoverwegingen voor bouten en deuvels

In prEC5 zijn er nog enkele aanvullende ontwerpoverwegingen voor verbindingen met stiftvormige verbindingsmiddelen opgenomen die van toepassing zijn op bouten en deuvels. Ten eerste is het aangeraden dat een bout- of deuvelverbinding ten minste vier afschuifvlakken en ten minste twee verbindingsmiddelen heeft. Dit betekent dat verbindingen waarvan de verbindingsmiddelen één afschuifvlak hebben, ten minste vier deuvels of bouten zouden moeten gebruiken. Bij verbindingen met twee of meer afschuifvlakken is het daarentegen aangeraden dat ten minste twee deuvels of bouten gebruikt worden. Verder zijn verbindingen met slechts één bout wel toegestaan, maar dan is het aangeraden om de berekende weerstand van het verbindingsmiddel met 50% te laten afnemen [4], [8].

Verder zijn er ook voorwaarden aangeraden voor het voorboren van de gaten waarin de bouten en deuvels in te brengen zijn. Deze voorwaarden zijn gegeven in prEC5 [4]. Ook is er een uitvoeringsregel, die stelt dat houtverbindingen met stalen buitenplaten geen deuvels mogen gebruiken, maar montagebouten moet gebruiken [8].

Ten slotte is er in prEC5 een minimale dikte  $t_{min}$  voor houten elementen met verbindingsmiddelen in de brede zijde aangeraden, die als volgt te bepalen is:

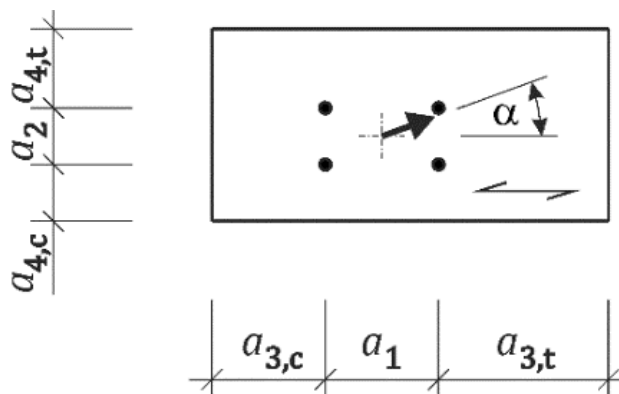
$$t_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 7 \cdot d \\ (13 \cdot d - 30) \cdot \frac{\rho_k}{400} \end{array} \right. \quad (2-38)$$

waarbij:

- $\rho_k$  de karakteristieke houtdichtheid is, in  $\text{kg/m}^3$ ;
- $d$  de diameter van het verbindingsmiddel is, in mm [4], [6].

## 2.6 Tussen-, rand- en eindafstanden van de verbindingsmiddelen

De minimum tussen-, rand- en eindafstanden van axiaal en lateraal belaste stiftvormige verbindingsmiddelen moeten ervoor zorgen dat de verbinding zijn berekende ontwerpsterkte volgens sectie 2.5 kan bereiken. Figuur 2-13 definieert de tussen-, rand- en eindafstanden op basis van de kracht in het zwaartepunt van de verbindingsmiddelen, waarbij de aangegeven houtvezelrichting voor gelaagde houtproducten overeenkomt met de vezelrichting van de buitenste laag [4].



Figuur 2-13: Definitie van de tussen-, rand- en eindafstandparameters [4]



De tussen-, rand- en eindafstandparameters uit Figuur 2-13 zijn in prEC5 als volgt gedefinieerd:

- $a_1$  is de tussenafstand van de verbindingsmiddelen parallel met de houtvezel;
- $a_2$  is de tussenafstand van de verbindingsmiddelen loodrecht op de houtvezel;
- $a_{3,t}$  is de belaste eindafstand van de verbindingsmiddelen parallel met de houtvezel;
- $a_{3,c}$  is de onbelaste eindafstand van de verbindingsmiddelen parallel met de houtvezel;
- $a_{4,t}$  is de belaste randafstand van de verbindingsmiddelen loodrecht op de houtvezel;
- $a_{4,c}$  is de onbelaste randafstand van de verbindingsmiddelen loodrecht op de houtvezel;
- $\alpha$  is de hoek tussen de belastingsrichting en de houtvezel [4].

In prEC5 zijn er minimum tussen-, rand- en eindafstanden aanbevolen voor de verschillende verbindingsmiddelen, waarbij het opvalt dat deze afstanden kunnen verminderen wanneer de verbinding versterkt is of wanneer de verbindingsmiddelen zijn vorgeboord. Dit is voordelig voor deuvels en bouten, die altijd in vorgeboorde gaten moeten zijn aangebracht, omdat als de minimumafstanden kleiner zijn, er meer ruimte is voor extra deuvels of bouten, waardoor het mogelijk is om de verbinding nog verder te versterken indien nodig. Tabel 2-3 toont de aanbevolen minimum tussen-, rand- en eindafstanden volgens prEC5 voor deuvels en bouten, die afhankelijk zijn van de diameter van deze verbindingsmiddelen en het materiaaltype van de te verbinden elementen.

Tabel 2-3: Aanbevolen minimum tussen-, rand- en eindafstanden volgens prEC5 voor deuvels en bouten [4]

	Materiaaltype	Criteria	$a_1$	$a_2$	$a_{3,t}$	$a_{3,c}$	$a_{4,t}$	$a_{4,c}$
Bouten	SL, PL, CL, SB, WFB, WPB	/	$5d$	$4d$	$\max(7d; 80 \text{ mm})$	$4d$	$4d$	$3d$
Deuvels	SL, PL, CL, SB, WFB, WPB	/	$5d$	$3d$	$\max(7d; 80 \text{ mm})$	$4d$	$4d$	$3d$
	LVL brede zijde	$6 \leq d \leq 30 \text{ mm}$	$4d$	$3d$	$\max(4d; 60 \text{ mm})$	$4d$	$4d$	$3d$
	LVL rand zijde	$6 \leq d \leq 30 \text{ mm}$	$7d$	$3d$	$\max(7d; 105 \text{ mm})$	$\max(7d; 60 \text{ mm})$	$4d$	$3d$

Een bout- of deuvolverbinding die de aanbevolen minimumafstanden uit Tabel 2-3 respecteert, voorkomt dat de houten elementen splijten tijdens het aanbrengen van het verbindingsmiddel of door veranderingen in het vochtgehalte. Wanneer de gerealiseerde tussen-, rand- en eindafstanden in de verbinding toch kleiner zijn dan de aanbevolen minimumwaarden, dan kan dit leiden tot het voortijdig falen van het hout als gevolg van brosheid. Er zijn dan maatregelen nodig die dit splijten voorkomt, bijvoorbeeld wapening aanbrengen [4], [8].

De minimumafstanden uit Tabel 2-3 zijn gebaseerd op ervaring of uitgebreid experimenteel onderzoek. Bij deze afstanden zijn de volgende fundamentele en belangrijke aspecten op te merken:

- $a_1$  beïnvloedt  $n_{ef,L}$  in vergelijking (2-33) tot en met (2-37) en vervolgens ook de laterale ontwerpsterkte van de totale verbinding. Een onvoldoende grote afstand  $a_1$  kan leiden tot

voortijdige splitsing van de verbinding langs de rij verbindingsmiddelen parallel met de houtvezel.

- $a_2$  is nooit groter dan  $a_1$ , waardoor er geen splitsing ontstaat loodrecht op de houtvezel.
- De aanbevolen onbelaste rand- en eindafstand is nooit groter dan die van de belaste rand- en eindafstand. Een te kleine rand- of eindafstand kan dan leiden tot voortijdige splitsing.
- De minimumafstanden van bouten en deuvels verschillen, dit is te wijten aan de grootte van de sluitringen [4], [8].

In prEC5 is het ook mogelijk om aangepaste tussenafstanden te bepalen voor lateraal belaste verbindingsmiddelen die van elkaar verspringen, door toegestane minimumcombinaties van  $a_1$  en  $a_2$  te nemen:

$$\frac{a_{2s}}{a_2} \geq 1 - \left(\frac{a_{1s}}{a_1}\right)^2 \quad (2-39)$$

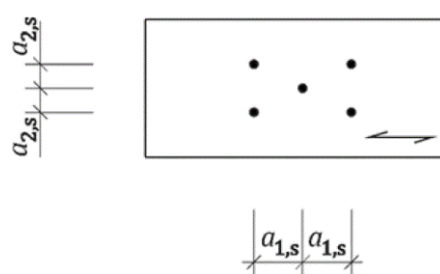
met

$$\frac{a_{1s}}{a_1} \leq 1 \quad (2-40)$$

waarbij:

$a_1, a_2$  de aanbevolen tussenafstanden zijn, respectievelijk parallel met en loodrecht op de houtvezel, uit Tabel 2-3, in mm;

$a_{1s}, a_{2s}$  de verspringende tussenafstanden zijn, respectievelijk parallel met en loodrecht op de houtvezel, zie Figuur 2-14, in mm [4].

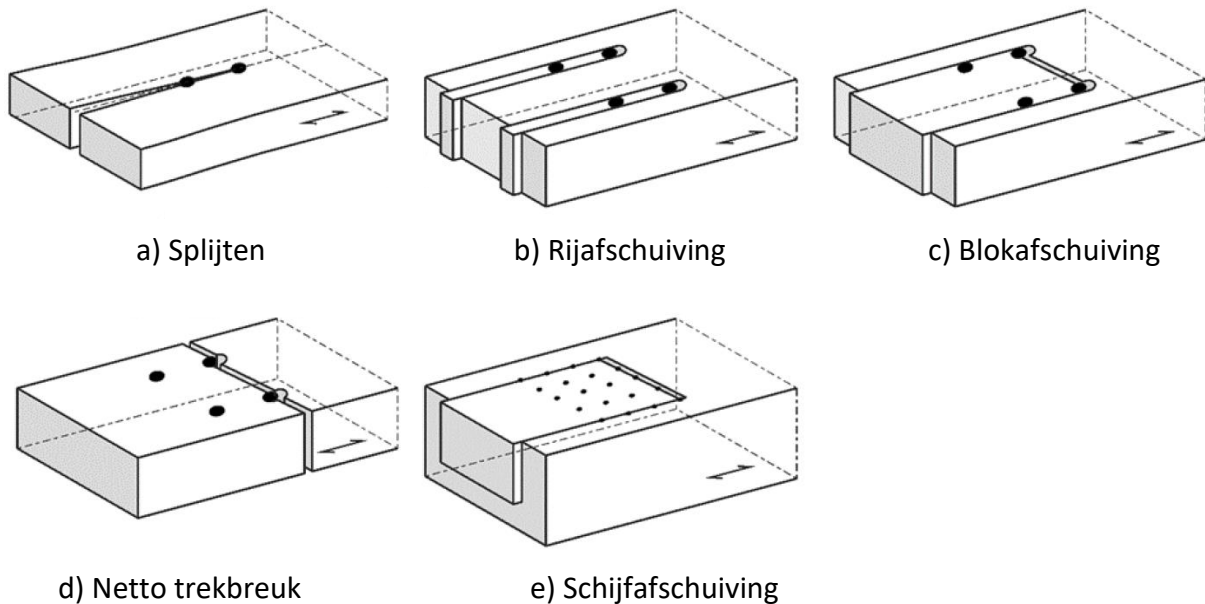


Figuur 2-14: Tussenafstanden van verspringende verbindingsmiddelen [4]

Ten slotte is het op te merken dat prEC5 de tussen-, rand- en eindafstanden aanbeveelt en dus niet verplicht. De reden hiervoor is om ontwerpers, die gebruik maken van deze normen, niet te verwarren met vast bepaalde afstanden. De richtlijnen in prEC5 maken de bepaling voor de tussen-, rand- en eindafstanden parallel met en loodrecht op de houtvezel flexibel, zodat de verbinding naar zijn noden te modelleren is. Vergelijking (2-39) en (2-40) creëren in principe een methode die het mogelijk maakt de verbindingsmiddelen te spreiden door de afstand in de ene richting te verkleinen op voorwaarde dat de afstand in de andere richting vergroot [4].

## 2.7 Brosse breuk van het hout

Brosse breuk van het hout verwijst naar meerdere faalwijzen die kunnen ontstaan bij hout-op-houtverbindingen en staal-op-houtverbindingen met meerdere stiftvormige verbindingsmiddelen, wanneer deze verbinding lateraal is belast [4]. Figuur 2-15 toont de vijf bekendste voorbeelden van brosse faalwijzen, namelijk: splijten, rijafschuiving, blokafschuiving, netto trekbreuk en schijfafschuiving.



Figuur 2-15: Voorbeelden van brosse faalwijzen [4]

Bij het ontwerp van een houtverbinding gaat de voorkeur naar een ontwerp waarbij de verbinding bezwijkt door het plastisch vervormen van het verbindingsmiddel en stuik in het hout, zoals de bezwijkmechanismen beschreven in sectie 2.3.1, en dus niet door brosse breuk in het hout [4]. Het plastisch vervormen van het verbindingsmiddel en stuik in het hout zijn beide ductiele mechanismen en krijgen de voorkeur in het ontwerp, omdat deze vorm van bezwijken veiliger is en de analyse van de verbinding vereenvoudigd. Deze bezwijkmechanismen zijn veiliger omdat het bezwijken niet plots gebeurt en de gevolgen daardoor minder groot zijn dan bij brosse breuk van het hout [12]. Deze thesis focust daarom op een ontwerp van de houtverbinding op basis van de ductiele bezwijkmechanismen.

De berekening van de laterale ontwerpsterkte van de totale verbinding, zoals beschreven in sectie 2.5.2, is dus op basis van ductiele bezwijkmechanismen, maar rekent ook het brosse splijten van hout in via  $n_{ef,L}$  uit vergelijking (2-33) tot en met (2-37). Om een ontwerp van een houtverbinding op basis van ductiele bezwijkmechanismen te garanderen, zijn er minimum tussen-, rand- en eindafstanden aanbevolen in prEC5 aanbevolen, zoals beschreven in sectie 2.6. In sommige gevallen, waarbij deze minimumafstanden zijn gerespecteerd, kan er toch brosse breuk van het hout optreden voordat een ductiel mechanisme ontstaat. De brosse faalwijzen in het hout treden vaak sneller op bij verbindingen met meerdere dicht op elkaar geplaatste verbindingsmiddelen, die zich als een groep gedragen.

In prEC5 zijn er twee methodes beschikbaar om brosse breuk in het hout te behandelen in het ontwerp van de verbinding. De ene methode is een gedetailleerde methode, waarbij het ontwerp van de houtverbinding ook op basis is van brosse breuk in het hout. Hierbij zijn de brosse faalwijzen,

veroorzaakt door rijafschuiving, blokafschuiving, netto trekbreuk en schijfafschuiving, nog extra te bepalen door middel van een gedetailleerde berekening. Een voorwaarde bij deze berekening is dat de opgebouwde verbinding symmetrisch is, waarbij buitenste en binnenste elementen symmetrisch zijn in dikte. De andere methode is een vereenvoudigde methode [4]. Omdat deze thesis zich focust op het ontwerp van een houtverbinding op basis van de ductiele bezwijkmechanismen, is er niet dieper ingegaan op de gedetailleerde methode om brossse breuk in het hout te behandelen. De vereenvoudigde methode daarentegen is in de volgende alinea's besproken.

De vereenvoudigde methode om brossse breuk in het hout te behandelen neemt aan dat brossse faalwijzen niet kunnen optreden wanneer:

- bezwijkmechanisme (f) in vergelijking uit (2-2) sectie 2.3.1 het ontwerp van de verbinding bepaalt en/of
- er aan de aanbevolen minimumafstanden uit sectie 2.6 voldaan is, waarbij de tussenafstanden  $a_1$  en  $a_2$  en de belaste eindafstand  $a_{3,t}$  verhoogd is met de factor  $k_{br}$  [4].

Wanneer de volledige dikte van het houten element doorboord is door de schacht van het verbindingsmiddel, wat normaal altijd het geval is bij deuvels en bouten, dan is de factor  $k_{br}$  in prEC5 als volgt te bepalen:

$$k_{br} = \max \left\{ (1 + k_{rp,2}) \cdot k_{pos} \cdot n_0^{0,5} \cdot n_{90}^{0,3} \cdot d^{-0,2} \right. \quad (2-41)$$

met

$$k_{pos} = \begin{cases} 0,65 & \text{voor buitenste elementen} \\ 1,10 & \text{voor binnenste elementen} \end{cases} \quad (2-42)$$

waarbij:

- $k_{br}$  de factor is om  $a_1$ ,  $a_2$  en  $a_{3,t}$  te vergroten;
- $k_{rp,2}$  de beperkingsfactor voor de koordeffectbijdrage is, gegeven in Tabel 2-2;
- $k_{pos}$  de factor is die betrekking heeft op de positie van het houtelement;
- $n_0, n_{90}$  het aantal verbindingsmiddelen in een rij zijn, respectievelijk parallel met en loodrecht op de houtvezel;
- $d$  de diameter van de deuvel of bout is, in mm [4].

De vereenvoudigde methode biedt dus een manier om brossse breuk niet te moeten verifiëren. Hierbij zijn grotere minimumafstanden tussen de verbindingsmiddelen vereist, en is er aangeraden dat bezwijkmechanisme (f) het ontwerp bepaald. Deze methode is afgeleid uit een parameteranalyse die gebruik maakt van het ontwerp van een houtverbinding op basis van ductiele bezwijkmechanismen en brossse breuk in het hout. Het belangrijkste concept achter deze analyse is dat de brossse sterkte van de houtverbinding groter moet zijn dan de ductiele sterkte, zodat plastisch bezwijken van de verbinding verzekerd is. Aangezien de brossse sterkte van de houtverbinding in functie staat van materiaal- en geometrische parameters, is het mogelijk om de factor  $k_{br}$  aan te nemen als de vereiste factor, zodat plastisch bezwijken verzekerd is [4].

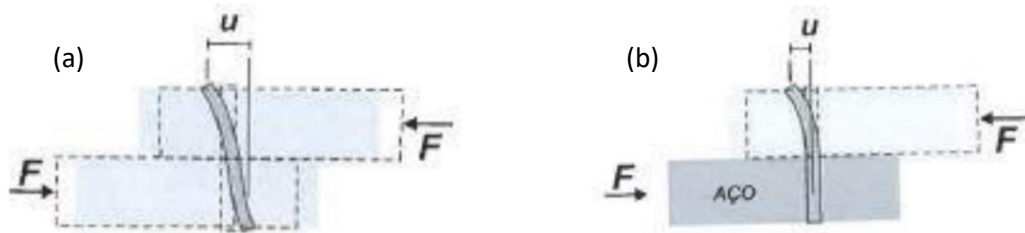
## 2.8 Stijfheid van de verbinding

Bij het ontwerp van verbindingen met stiftvormige metalen verbindingsmiddelen in houtconstructies moet er naast de totale sterkte ook de stijfheid van die verbinding bepaald worden. Deze stijfheid wordt hier uitgedrukt als de verschuivingsmodulus die experimenteel bepaald kan worden of berekend kan worden via empirische formules uit prEC5. De verschuivingsmodulus is de verhouding tussen de belasting op de verbinding en de inkeping die het verbindingsmiddel maakt in het hout, ook wel de verschuiving in de verbinding genoemd, door deze belasting [1]. Deze modulus is een niet te onderschatten ontwerpparameter en kan als volgt in een formule gegoten worden:

$$k_{ser} = \frac{F}{u} \quad (2-43)$$

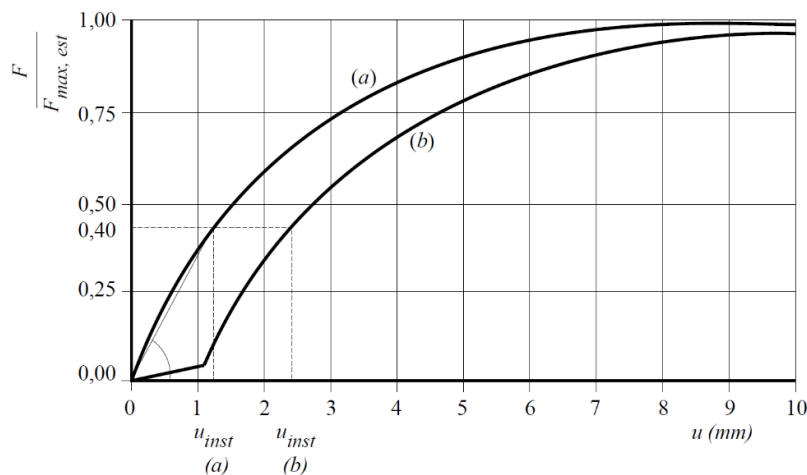
waarbij:

- $k_{ser}$  de verschuivingsmodulus is, in N/mm;
- $F$  de belasting op de verbinding is, zie Figuur 2-16, in kg/m<sup>2</sup>;
- $u$  de verschuiving in de verbinding is, zie Figuur 2-16, in mm [1].



Figuur 2-16: Verschuiving in de verbinding, ten gevolge van de belasting, bij een (a) hout- en (b) staal-op-houtverbinding [1]

Met vergelijking (2-43) is vervolgens eenvoudig om de experimentele verschuivingsmodulus te bepalen, rekening houdende dat “de stijfheidseigenschappen worden gemeten tussen 10% en 40% van de sterkte” [10, p. 25]. De verhouding tussen de belasting en vervormingsgedrag van verbindingen met stiftvormige verbindingsmiddelen is te weergegeven aan de hand van slijpkrommen. Vanuit deze soort krommen is het mogelijk om de experimentele verschuivingsmodulus af te leiden. Figuur 2-17 geeft de geïdealiseerde slijpkrommen voor verbindingen met deuvels en bouten met ongeveer hetzelfde draagvermogen, waarbij  $F_{max,est}$  de geschatte maximale belasting aangeeft [8].



Figuur 2-17: Geïdealiseerde slijpkrommen voor verbindingen met (a) deuvels en (b) bouten [8]

De berekening van de stijfheid van de totale verbinding start met de berekening van de gemiddelde laterale verschuivingsmodulus  $K_{SLS,v,mean}$  per afschuifvlak per verbindingsmiddel voor twee balkelementen met dezelfde houtdichtheid in de gebruikgrenstoestand (GGT). In prEC5 wordt deze modulus voor deuvels en bouten als volgt bepaald:

$$K_{SLS,v,mean} = \frac{\rho_{mean}^{1,5} \cdot d}{23} \quad (2-44)$$

waarbij:

- $K_{SLS,v,mean}$  de verschuivingsmodulus voor hout-op-houtverbindingen bij GGT is, in N/mm;
- $\rho_{mean}$  de gemiddelde houtdichtheid is, in kg/m<sup>3</sup>;
- $d$  de diameter van het verbindingsmiddel is, in mm [4].

De waarden voor  $K_{SLS,v,mean}$  zijn dus afhankelijk van het type en de diameter van het verbindingsmiddel en van de houtdichtheid. Vergelijking (2-44) is hierbij gebaseerd op uitgebreide testresultaten. Wanneer de hout-op-houtverbinding bestaat uit twee verschillende houtsoorten met verschillende houtdichtheden, dan is  $\rho_{mean}$  te berekenen met het geometrisch gemiddelde van beide dichtheden:

$$\rho_{mean} = \sqrt{\rho_{mean,1} \cdot \rho_{mean,2}} \quad (2-45)$$

waarbij  $\rho_{mean,i}$  de gemiddelde houtdichtheid van element  $i$  is, in kg/m<sup>3</sup> [1].

Voor staal-op-houtverbindingen, waarbij het verbindingsmiddel stijf is ingebed in het staal, is de waarde van  $K_{SLS,v,mean}$  te verdubbelen:

$$K'_{SLS,v,mean} = 2 \cdot K_{SLS,v,mean} \quad (2-46)$$

waarbij  $K'_{SLS,v,mean}$  de verschuivingsmodulus voor staal-op-houtverbindingen bij GGT is, in N/mm [1], [4].

De volgende stap in de bepaling van de stijfheid van de totale verbinding is het berekenen van de verschuivingsmodulus van de totale verbinding bij GGT. Hierbij is de verbinding met meerdere verbindingsmiddelen te aanschouwen als een systeem van veren die parallel staan ten opzichte van elkaar [1]. De verschuivingsmodulus van de verbinding is dan als volgt te bepalen:

$$K_{SLS,Vb} = \sum K_{SLS,v,mean,i,j} = n_{sp} \cdot n_0 \cdot n_{90} \cdot K_{SLS,v,mean} \quad (2-47)$$

waarbij:

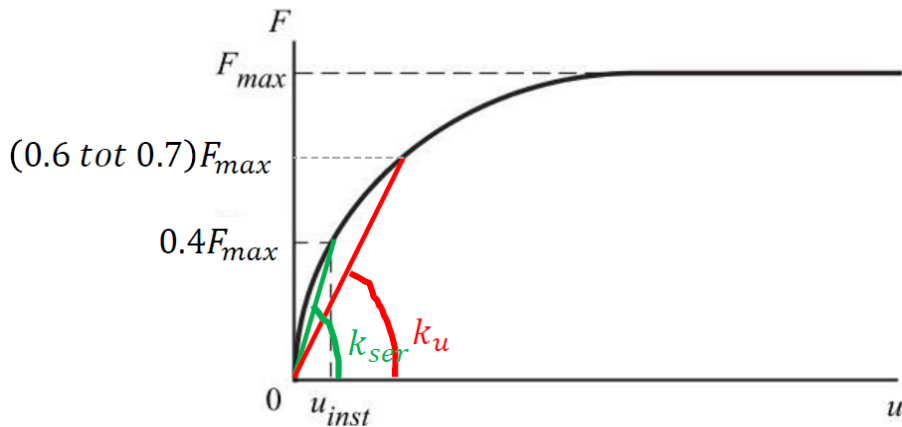
- $K_{SLS,Vb}$  de verschuivingsmodulus voor de totale verbinding bij GGT is, in N/mm;
- $n_{sp}$  het aantal afschuifvlakken in de verbinding is;
- $n_0, n_{90}$  het aantal verbindingsmiddelen in een rij zijn, respectievelijk parallel met en loodrecht op de houtvezel [1].

De verschuivingsmodulus in de voorgaande formules zijn van toepassing bij GGT, maar moet in veel gevallen omgezet worden naar de uiterste grenstoestand (UGT). Bijvoorbeeld wanneer het nodig is om de effectieve buigstijfheden van mechanisch verbonden balken, zoals genagelde I-balken, te bepalen [4]. Het omzetten van deze modulus naar UGT verloopt als volgt:

$$K_{ULS} = \frac{2}{3} \cdot K_{SLS} \quad (2-48)$$

waarbij  $K_{ULS}$  de verschuivingsmodulus bij UGT is, in N/mm [4].

Figuur 2-18 visualiseert het verschil tussen de verschuivingsmodulus bij GGT en UGT op een typische slipkromme.



Figuur 2-18: Verschuivingsmodulus bij GGT en UGT [1]

Ten slotte zijn er nog enkele opmerkingen te vermelden. Ten eerste moeten de waarden van de verschuivingsmodulus voor verbindingsmiddelen die de houtvezel loodrecht belasten ( $\alpha = 90^\circ$ ) met 50% worden verminderd [4]. Deze voorwaarde is in dit onderzoek niet verder toegepast, omdat de stijfheid van de verbinding enkel berekend zal worden voor verbindingen waarvan de houtvezelrichting van de elementen en de richting van de opgelegde krachten parallel ( $\alpha = 0^\circ$ ) zijn ten opzichte van elkaar. De tweede opmerking is dat verbindingen met meerdere verbindingsmiddelen beschouwd zijn als een systeem van veren die in serie staan ten opzichte van elkaar, ook niet verder onderzocht zijn in deze thesis. Als laatste opmerking is er te vermelden dat het effect op lange termijn van de belastingsduur en vocht op vervormingen, en bijgevolg de stijfheid, ook niet aanschouwd zijn in dit onderzoek.

## 3. Verbindingen met meerdere afschuifvlakken (>2)

### 3.1 Inleiding

Wanneer een houtverbinding zeer grote krachten moet overbrengen tussen de constructiedelen en de afmetingen van deze onderdelen gelijk zijn, kan het handig zijn om het aantal afschuifvlakken in stiftvormige verbindingen te vermeerderen. Het vermeerderen van het aantal afschuifvlakken is een manier om de laterale sterkte van de verbinding te optimaliseren en verder te vergroten.

Houtverbindingen met meerdere afschuifvlakken komen daarom in de praktijk vaak voor wanneer sterke structurele verbindingen gevraagd zijn. Deze verbindingen hebben daarom ook altijd deuels of bouten als verbindingsmiddelen. Een typisch voorbeeld van een verbinding met meerdere afschuifvlakken is een verbinding die bestaat uit twee stalen platen en drie houten elementen, die vervolgens vier afschuifvlakken heeft [12].

De analyse van verbindingen met meerdere afschuifvlakken is moeilijk te veralgemenen, enerzijds omdat het zeer complex is analytische formules op te stellen voor een willekeurig aantal afschuifvlakken en anderzijds omdat het aantal configuraties niet volledig is. Er zijn dus meerdere onduidelijkheden over de modellering van de bezwijkmechanismen van deze verbindingen. Het gevolg hiervan is dat er geen eenduidige methode is opgesteld voor deze analyse [12].

Dit hoofdstuk bespreekt de bestaande analysemodellen van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken volgens verschillende bronnen. Deze bronnen zijn EC5, prEC5, een COST-publicatie over het ontwerp van verbindingen in houtstructuren, een doctoraatsthesis over de sterktemodellering van stiftvormige houtverbindingen, enkele boeken over het structureel ontwerp van houtstructuren en enkele buitenlandse normen voor het structureel ontwerp van houtstructuren. Het analysemodel volgens prEC5 is in deze thesis het basisanalysemodel, die telkens kort vergeleken is met de andere analysemodellen.

### 3.2 Analyse volgens Eurocode 5

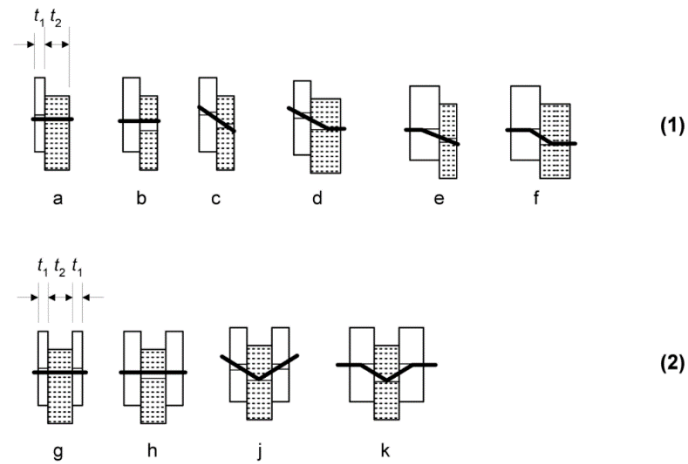
#### 3.2.1 EC5

De analysemethode in EC5 is als volgt te citeren:

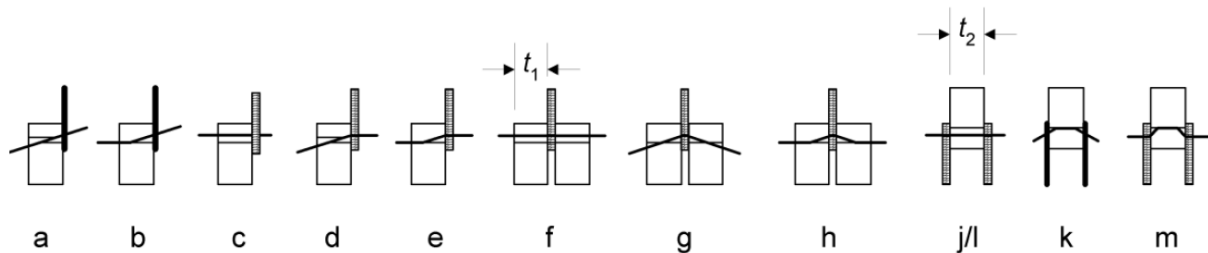
In verbindingen met meerdere afschuifvlakken behoort de weerstand van elk afschuifvlak te zijn bepaald door te veronderstellen dat elk afschuifvlak deel uitmaakt van een reeks verbindingen met drie elementen.

Om de weerstand van de afzonderlijke afschuifvlakken in een verbinding met meerdere afschuifvlakken te kunnen combineren, moet het bepalend bezwijkmechanisme van de verbindingsmiddelen in de respectievelijke afschuifvlakken compatibel met elkaar zijn en niet bestaan uit een combinatie van de bezwijkmechanismen a), b), g) en h) uit Figuur 3-1 of de bezwijkmechanismen c), f) en j/l) van Figuur 3-2 met andere bezwijkmechanismen [5, p. 56].





Figuur 3-1: Bezwijkmechanismen bij hout-op-houtverbindingen met (1) één afschuifvlak en (2) twee afschuifvlakken volgens EC5 [5]



Figuur 3-2: Bezwijkmechanismen bij staal-op-houtverbinding volgens EC5 [5]

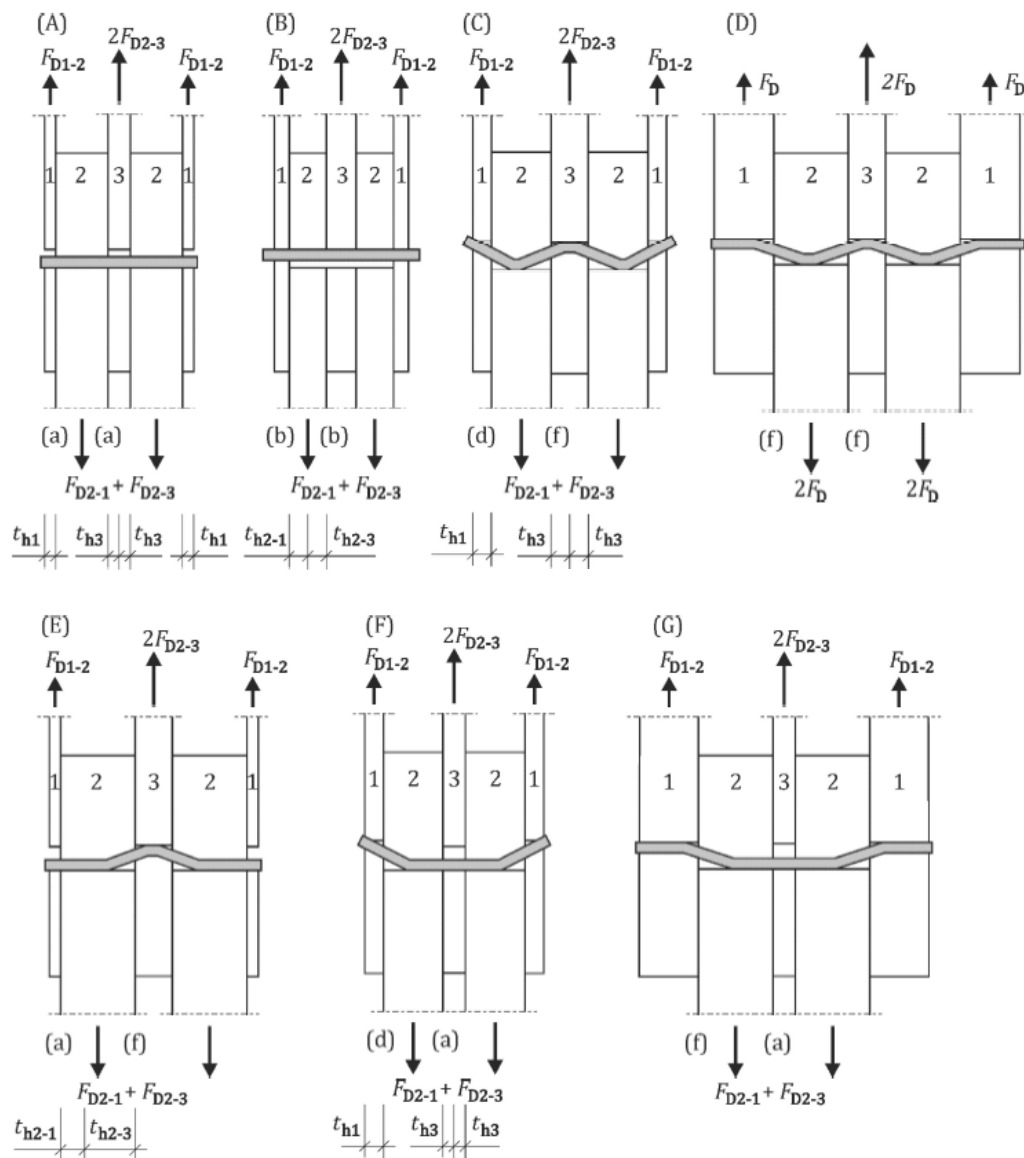
De vorige twee geciteerde alinea's zijn de enige beschikbare richtlijnen in EC5 voor het ontwerp van stiftvormige verbindingen met meerderde afschuifvlakken. Deze beknopte toelichting kan vaag, onduidelijk en verwarrend zijn voor de ontwerper/ingenieur, wat van de analyse van dit type verbinding een nog grotere uitdaging maakt. Er is hierbij een gebrek aan figuren voor visuele ondersteuning en aan richtlijnen voor de berekening van dit type verbindingen.

### 3.2.2 prEC5

De richtlijnen van prEC5 voor de analyse van verbindingen met meerdere afschuifvlakken zijn uitgebreider en starten bij het berekenen van de deuveffectbijdrage voor dit type verbinding. Hierbij is de deuveffectbijdrage per verbindingsmiddel te bepalen als de som van de deuveffectbijdrage van elk afzonderlijk afschuifvlak onder de volgende voorwaarden:

- De individuele bezwijkmechanismen en de verplaatsingen van de elementen zijn compatibel.
- De binnenste elementen zijn te behandelen als de binnenste elementen van verbindingen met twee afschuifvlakken.

Deze voorwaarden zijn voldaan voor verbindingsmiddelen die alleen volgens bezwijkmechanismen (a) en (b) falen, of alleen volgens bezwijkmechanismen (d) en (f) falen, omdat deze bezwijkmechanismen zorgen voor compatibiliteit van het verplaatsingsgedrag van de elementen. Deze voorwaarden komen eigenlijk neer op het feit dat de opgebouwde verbinding met meerdere afschuifvlakken symmetrisch moet zijn, waarbij buitenste en binnenste elementen symmetrisch zijn in dikte en de combinatie van de bezwijkmechanismen symmetrisch moet zijn [4]. Figuur 3-3 toont de zeven mogelijke bezwijkcombinaties van een verbinding met vier afschuifvlakken.



Figuur 3-3: Bezwijkcombinaties voor een stiftvormig verbindingsmiddel in een verbinding met vier afschuifvlakken [4]

In Figuur 3-3 zijn het middelste element (3) en de buitenste elementen (1) in dezelfde richting en zin belast, terwijl de tussenliggende elementen (2) in dezelfde richting, maar tegengestelde zin, zijn belast. Er zijn zeven bezwijkcombinaties mogelijk volgens prEC5, aangeduid met (A) tot (G). Andere bezwijkcombinaties dan deze zeven zijn te vermijden. Een bezwijkcombinatie is dus de combinatie van verschillende bezwijkmechanismen. De bijdrage van het deuveffect van het afschuifvlak tussen element 1 en 2 is aangeduid als  $F_{D1-2}$  en eveneens  $F_{D2-3}$  tussen element 2 en 3. Op dezelfde manier is de dikte van element 2 gelijk zijn aan  $t_{h2-1} + t_{h2-3}$  [4].

De compatibiliteit van het belasting-verplaatsingsgedrag van de elementen 1 en 3 is het best verzekerd bij het nastreven van bezwijkcombinatie (C). Bij deze bezwijkcombinatie ontwikkelt bezwijkmechanisme (d) zich in de buitenste afschuifvlakken en zal bezwijkmechanisme (f) zich ontwikkelen in de binnenste afschuifvlakken, wanneer bezwijkmechanisme (b) en respectievelijk (a) zijn vermeden. De trekspanningen in elementen 1 en 3 zijn dan ongeveer gelijk. Bezwijkcombinaties (E) tot en met (G) zijn ook best te vermijden, omdat de vervormingen in element 1 en 3 zeer verschillend zijn bij deze combinaties. Dergelijke verbindingsgeometrieën gaan inefficiënt kunnen zijn [4].

Na de vergelijking tussen de analysemodellen volgens EC5 en prEC5, vallen de volgende zaken op:

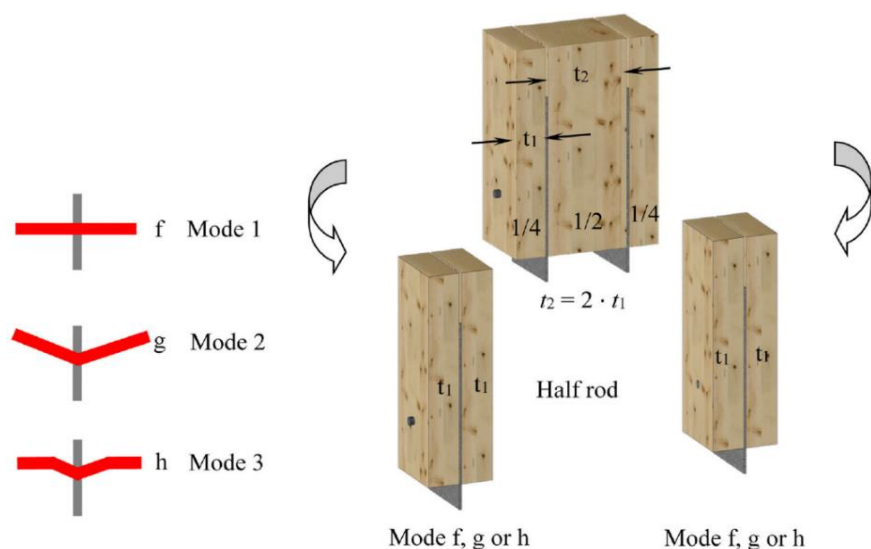
- Het analysemodel volgens prEC5 bevat duidelijk meer richtlijnen voor de berekening van een verbinding met meerdere afschuifvlakken. Dit is vooral te danken aan de toevoeging van Figuur 3-3 waarin de zeven mogelijke bezwijkcombinaties afgebeeld zijn. In prEC5 is het hierdoor duidelijk welke bezwijkcombinaties te behandelen zijn, terwijl dit in EC5 niet duidelijk aangegeven is.
- De basis van beide analysemodellen is in principe hetzelfde. De weerstand, oftewel de deuveffectbijdrage, van elk apart afschuifvlak van de verbinding met meerdere afschuifvlakken moet bepaald zijn met de veronderstelling dat elk apart afschuifvlak deel uitmaakt van een reeks verbindingen met drie elementen. Deze veronderstelling anders verwoord: de binnenste elementen van de verbinding met meerdere afschuifvlakken zijn te behandelen als de binnenste elementen van verbindingen met twee afschuifvlakken. Vervolgens is de weerstand van de verbinding met meerdere afschuifvlakken te bepalen door de weerstand van de aparte afschuifvlakken te combineren, waarbij het weerstandbepalende bezwijkmechanisme van de verbindingsmiddelen in de aparte afschuifvlakken compatibel met elkaar moeten zijn. De basis van het analysemodel is dus dat het mogelijk is om berekeningen van verbindingen met meerdere afschuifvlakken uit te voeren, door gebruik te maken van de formules voor verbindingen met enkele en dubbele afschuifvlakken.
- Het grote verschil tussen beide analysemodellen zit in de berekening van de deuveffectbijdrage per afschuifvlak volgens prEC5 en EC5, waarbij deze bijdrage een basisbouwsteen vormt in het analysemodel. Het verschil tussen de berekening van de deuveffectbijdrage volgens beide normen is al uitvoerig besproken in sectie 2.3.1. Dit verschil is vooral te wijten aan de uitbreiding in materiaalkeuze in prEC5 voor de stuksterkte van de elementen in vergelijking (2-2) en (2-3) en dat prEC5 geen onderscheid maakt tussen dunne of dikke staalplaat.

### 3.3 Analyse volgens literatuur

#### 3.3.1 COST - Design of Connections in Timber Structures

Dit rapport van de European Cooperation in Science and Technology (COST) bevat een hoofdstuk waarin meerdere optimalisatiestudies zijn beschreven voor de dimensionering van een staal-op-houtverbinding met vier afschuifvlakken, bestaande uit twee dunne stalen platen en drie houten elementen. Vanuit deze studies zijn er vier analysemodellen af te leiden voor de analyse van een verbinding met meerdere afschuifvlakken. De eerste twee analysemodellen gebruiken de richtlijnen voor de berekening van een verbinding met meerdere afschuifvlakken volgens EC5. Ze verschillen enkel van elkaar door de gemaakte aanname in verband met de continuïteit van het verbindingsmiddel. De andere twee analysemodellen maken gebruik van een numeriek model met eindige-elementenberekeningen. Het aanbod van analysemodellen zorgt ervoor dat een ontwerper niet beperkt is tot het gebruik van geavanceerde hulpmiddelen voor de analyse, maar een bepaald technisch niveau kan kiezen voor een betrouwbaar ontwerp. De eenvoudigere en betrouwbare analysemodellen zijn die volgens de ontwerpprincipes van EC5, die de basis van het ontwerp vormen. Vervolgens kan het ontwerp verder uitgedetailleerd worden door geavanceerde hulpmiddelen, op basis van numerieke modellen, te gebruiken. Bij deze analysemodellen volgens de COST-publicatie is op te merken dat wanneer de complexiteit van het model toeneemt, er een grotere stijfheid en sterkte van de verbinding kan bepaald worden [12].

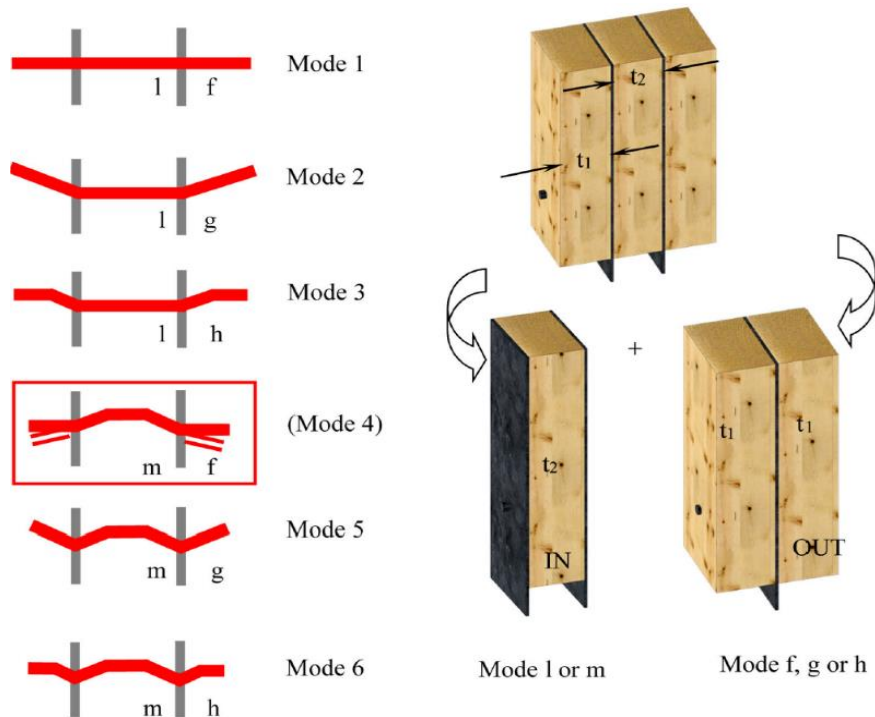
Het eerste analysemodel volgens de richtlijnen van EC5 veronderstelt dat de verbinding met meerdere afschuifvlakken gebruik maakt van discontinue verbindingsmiddelen. De discontinue verbindingsmiddelen zijn hierbij fictief, het is dus een aanname, terwijl in de werkelijkheid continue verbindingsmiddelen toegepast zouden zijn. Door te veronderstellen dat het verbindingsmiddel onderbroken is in het midden van het centrale houtelement van de totale verbinding, is het mogelijk om deze verbinding met meerdere afschuifvlakken te beschouwen als twee verbindingen naast elkaar, elk met twee afschuifvlakken waarvan het centrale element een stalen plaat is. Deze aanname volgt bijna alle richtlijnen van EC5, alleen negeert het dus de compatibiliteitsregel van de bezwijkmechanismen. Het gebruikt verbindingsmiddel bij deze twee fictieve verbindingen is dus een halve deugel, waarvan de lengte de helft bedraagt van de totale lengte van de echte verbinding met meerdere afschuifvlakken. In de totale verbinding moet dan de houtdikte van het centrale houtelement de helft van de totale houtdikte bedragen en moet de houtdikte van de zijdelingse houtelementen een vierde van de totale houtdikte bedragen. Deze verdeling van de houtdiktes is optimaal, omdat hierdoor evenveel belasting naar het centrale element als naar de zijdelingse elementen wordt overgebracht. Ook is deze verdeling nodig omwille van symmetrievoorwaarden en omdat de halve deugels dan aan beide zijden van de stalen platen even lang zijn, waardoor dezelfde ontwerpvergelijkingen toe te passen zijn voor de berekening van de weerstand per afschuifvlak van bezwijkmechanisme (f), (g) en (h) uit Figuur 3-2. De weerstand van de totale verbinding is vervolgens gelijk aan som van afschuifvlakken waarin het bezwijkmechanisme met de kleinste weerstand zich afspeelt. De aanname van de discontinue deugel maakt het mogelijk om de verdeling van de belasting in de houten elementen rechtstreeks te controleren, onafhankelijk van de plastische faalwijzen van de halve deugels, maar verliest wel een deel van de weerstand ten opzichte van de totaal beschikbare weerstand van deugels die continue over de breedte van de totale verbinding zijn [12]. Figuur 3-4 visualiseert het analysemodel met discontinue verbindingsmiddelen, waarbij een verbinding met vier afschuifvlakken is ontleed in twee verbindingen met twee afschuifvlakken, door middel van twee halve deugels.



Figuur 3-4: Analysemodel met discontinue verbindingsmiddelen [12]

Het tweede analysemodel volgens de richtlijnen van EC5 veronderstelt continue verbindingsmiddelen over de totale breedte van de verbinding met meerdere afschuifvlakken. Hierbij zijn de specifieke richtlijnen volgens EC5 voor het ontwerp van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken gevolgd. De analyse voor de bepaling van de laterale weerstand van verbindingen met meerdere afschuifvlakken is hier beperkt tot de mogelijke compatibele combinaties van de bezwijkmechanismen uit Figuur 3-2. De weerstand van de afschuifvlakken van

elke combinatie is te verkrijgen door de combinatie te ontbinden in een binnenste en buitenste verbinding met twee afschuifvlakken en vervolgens de som van de weerstanden van deze verbindingen te nemen. Dit analysemodel volgens de richtlijnen van EC5 voor een verbinding met meerdere afschuifvlakken met twee dunne stalen platen en drie houtelementen resulteert in zes bezwijkcombinaties [12]. Figuur 3-5 weergeeft deze zes bezwijkcombinaties en dus ook het analysemodel met continue verbindingsmiddelen, waarbij een verbinding met vier afschuifvlakken is ontleed in een binnenste en buitenste verbinding met twee afschuifvlakken.

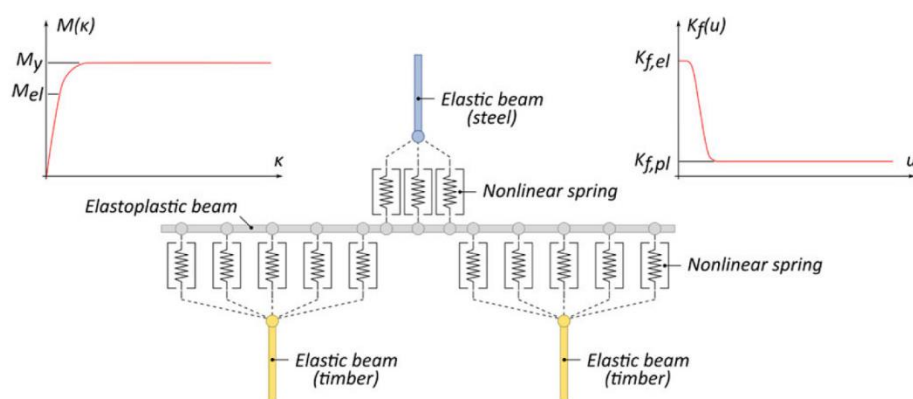


Figuur 3-5: Analysemodel met continue verbindingsmiddelen [12]

In Figuur 3-5 is op te merken dat het binnenste deel van de totale verbinding enkel kan bezwijken volgens bezwijkmechanisme (l) of (m) uit Figuur 3-2 en het buitenste deel dat enkel kan volgens bezwijkmechanismen (f), (g) en (h). Bij dit tweede analysemodel is er aangegeven dat bezwijkcombinatie (4), waarbij de binnenste verbinding bezwikt volgens bezwijkmechanisme (m) en de buitenste verbinding bezwikt volgens bezwijkmechanisme (f), eigenlijk niet gaat voorkomen. Deze bezwijkcombinatie ontstaat pas als stalen platen zeer dun zijn en de breedte van de zijdelingse houten elementen klein zijn. De totale verbindingconfiguratie met deze voorwaarden is dus niet optimaal. De weerstand van de totale verbinding met meerdere afschuifvlakken is uiteindelijk gelijk aan de minimumwaarde afgeleid uit de zes bezwijkcombinaties. Met dit tweede analysemodel is het ten slotte ook mogelijk om twee optimalisatiemethodes uit te werken om de optimale houtdiktes te bepalen binnen een vaste totale breedte van de verbinding met meerdere afschuifvlakken. De eerste optimalisatie realiseert een maximale plastische weerstand per afschuifvlak, de tweede daarentegen zorgt voor een gelijkmatige spanningsverdeling in houten elementen. Het afleiden van deze optimale houtdiktes is mogelijk omdat er een niet-lineair verband is tussen de houtdiktes en de laterale weerstand van de verbinding bij de verschillende bezwijkcombinaties [12].

De laatste twee analysemodellen zijn beiden op basis van een numeriek model opgebouwd. In deze modellen zijn de stiftvormige verbindingsmiddelen numeriek gemodelleerd als elastoplastische balken op een elastische of niet-lineaire fundering in hout of samengestelde houtproducten. Deze type modellering heet Beam-On-Foundation (BOF)-modellering en biedt enorme mogelijkheden voor

technische ontwerpen, omdat het stuikgedrag, oftewel de complexe en plaatselijke vervorming en spanningstoestand in het hout dicht aan het stiftvormig verbindingsmiddel, kan benaderen. Het verschil tussen de twee laatste analysemodellen is de keuze tussen de benadering van het hout als een elastische of niet-lineaire fundering voor de verbindingsmiddelen in het numeriek model. Het analysemodel waarbij het hout als een elastische fundering verondersteld is, is in principe een vereenvoudigde versie van het model met een niet-lineaire fundering, omdat de funderingsmodulus van hout als lineair-elastisch is beschouwd. De complexiteit neemt dus toe wanneer het analysemodel het niet-lineaire karakter van het hout als fundering en het niet-lineaire gedrag van het staal inrekenet. De niet-lineaire BOF-modellering gebruikt niet-lineaire veren voor het modelleren van het stuikgedrag, waarbij de veren wiskundige functies zijn die het niet-lineaire gedrag van de relatieve verplaatsing ten opzichte van het stiftvormig verbindingsmiddel voorstellen. In de meeste van deze vergelijkingen zijn de parameters gerelateerd aan fysische eigenschappen afgeleid uit stuikproeven. De verbindingsmiddelen zijn gemodelleerd als ééndimensionale balkelementen, waaraan een elastoplastisch materiaalgedrag toegewezen is. Het voorschrijven van verplaatsingen van de verbonden structurele elementen leveren overeenkomstige reactiekrachten op, wat toegang geeft tot het globale belasting-verplaatsingsgedrag van de verbinding [12]. In Figuur 3-6 is deze BOF-modellering afgebeeld met een voorbeeld van een vermaasde staal-op-houtverbinding met twee afschuifvlakken. De analysemodellen op basis van numerieke modellen zijn in deze masterproef niet verder behandeld, omdat deze modellen te complex zijn en niet de basis van dit onderzoek vormen.



Figuur 3-6: BOF-modellering van een staal-op-houtverbinding met twee afschuifvlakken [12]

Na de vergelijking tussen de analysemodellen volgens de COST-publicatie en prEC5, vallen de volgende zaken op:

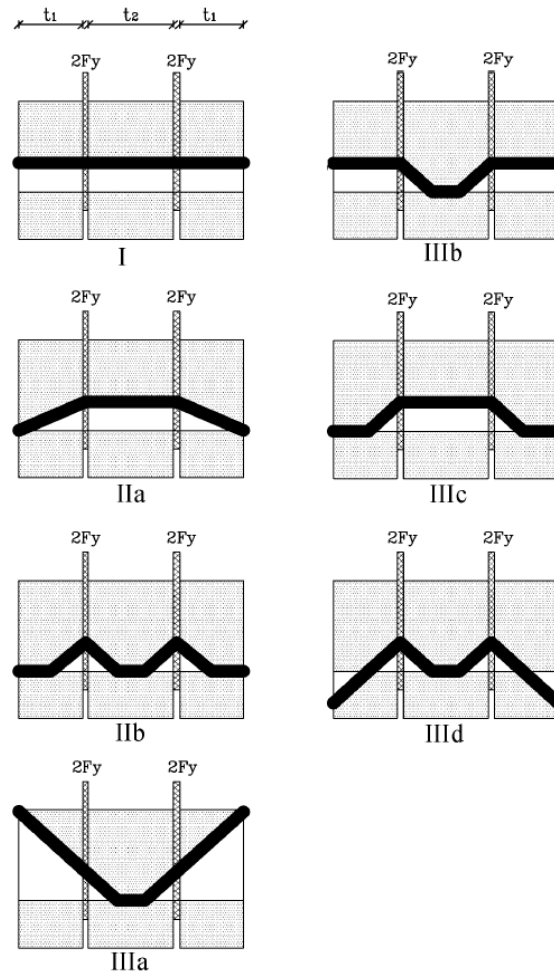
- In de COST-publicatie zijn er vier analysemodellen af te leiden voor de dimensionering van een verbinding met meerdere afschuifvlakken. Het aanbod aan analysemodellen zorgt ervoor dat een ontwerper een bepaald technisch niveau kan kiezen voor een betrouwbaar ontwerp van deze soort verbindingen. In prEC5 is er één analysemodel gegeven en kan er dus geen keuze gemaakt worden voor een bepaald technisch niveau van het ontwerp.
- Het tweede analysemodel uit de COST-publicatie die gebruik maakt van de richtlijnen volgens EC5, lijkt sterk op het analysemodel van prEC5. De zes bezwijkcombinaties volgens de COST-publicatie zijn terug te vinden in prEC5, samen met een zevende combinatie. Dit is bezwijkcombinatie (B) die volgens prEC5 wel te controleren is, omdat de richtlijnen uit deze norm wel rekening houdt met het bezwijken van de stalen platen. EC5, en vervolgens ook de COST-publicatie, gaat altijd uit van bezwijken in de houten elementen. Voor verdere gelijkenissen en verschillen tussen deze twee analysemodellen is het mogelijk te verwijzen

naar de eerder beschreven bevindingen tussen de analysemodellen volgens EC5 en prEC5.

- De analysemodellen uit de COST-publicatie zijn vooral gericht op staal-op-houtverbindingen met meerdere afschuifvlakken, terwijl het model volgens prEC5 ook hout-op-houtverbindingen toelaat.

### 3.3.2 M. U. Pedersen - Dowel Type Timber Connections: Strength modelling

Deze doctoraatsthesis onderzoekt de algemene sterktemodellering van houtverbindingen met stiftvormige verbindingsmiddelen. Dit document bevat een korte sectie waarin de analyse van verbindingen met ingesloten stalen platen, en dus ook met meerdere afschuifvlakken, besproken is. Deze analyse is ook gebaseerd op de richtlijnen van EC5, waarbij er vervolgens weer meerdere bezwijkcombinaties zijn afgeleid. Hierbij is er opgemerkt dat deze procedure conservatief is voor alle bezwijkmechanismen die voordeel halen uit de rotatiebeperking van het verbindingsmiddel in het vlak tussen de fictieve verbindingen met twee afschuifvlakken. Ook is het mogelijk de geometrie te optimaliseren door te profiteren van de rotatiebeperking in de centrale sectie [13]. Figuur 3-7 toont de mogelijk af te leiden bezwijkcombinaties volgens deze bron.



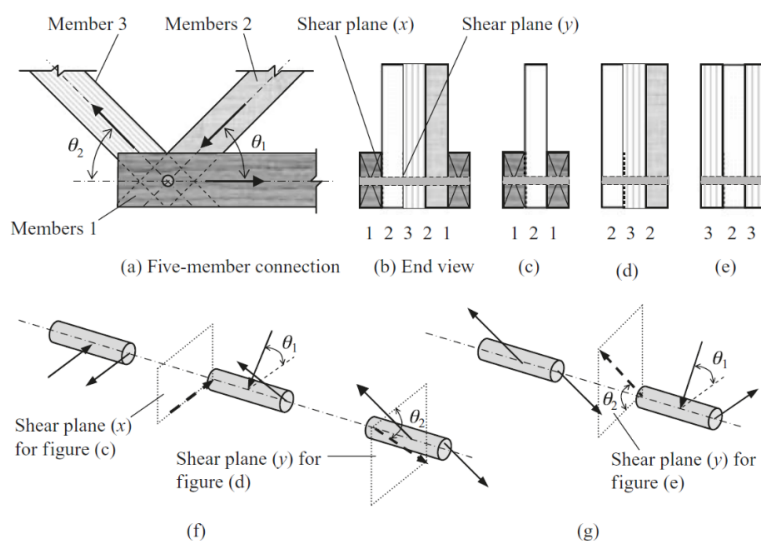
Figuur 3-7: Mogelijke bezwijkcombinaties in een verbinding met ingesloten stalen platen en vier afschuifvlakken volgens [13]

Pedersen [13] heeft ook vergelijkingen opgesteld voor de laterale weerstand van deze zeven bezwijkcombinaties uit Figuur 3-7 te berekenen. Vervolgens vallen de volgende zaken op na de vergelijking tussen de analysemodellen volgens deze doctoraatsthesis en prEC5:

- De vergelijkingen opgesteld door Pedersen [13] voor de berekening van de laterale weerstand van de bezwijkcombinaties komen overeen met die volgens prEC5, alleen zijn de voorgaande factoren van 1,05 en 1,15 niet aan de vergelijkingen in de doctoraatsthesis toegevoegd.
- Het analysemodel uit de doctoraatsthesis maakt gebruik van de richtlijnen volgens EC5, maar heeft wel zeven bezwijkcombinaties afgeleid. Dit zijn er evenveel als het analysemodel van prEC5, maar ze komen niet allemaal overeen. Bezwijkcombinatie (B) uit Figuur 3-3 is volgens prEC5 wel te controleren, omdat de richtlijnen uit deze norm wel rekening houdt met het bezwijken van de stalen platen. EC5, en vervolgens ook de doctoraatsthesis, gaat enkel uit van bezwijken in de houtelementen. Vervolgens is bezwijkcombinatie (IIIa) uit Figuur 3-7 mogelijk in de doctoraatsthesis, terwijl dat volgens prEC5 niet mogelijk is. Voor verdere gelijkenissen en verschillen tussen deze twee analysemodellen is het mogelijk te verwijzen naar de eerder beschreven bevindingen tussen de analysemodellen volgens EC5 en prEC5.
- Het analysemodel uit de doctoraatsthesis is vooral gericht op staal-op-houtverbindingen met meerdere afschuifvlakken, terwijl het model volgens prEC5 ook hout-op-houtverbindingen toelaat.

### 3.3.3 Porteous en Kermani - STRUCTURAL TIMBER DESIGN to Eurocode 5

Uit de titel van dit boek, over het structureel ontwerp van houtstructuren, is al af te leiden dat het analysemodel volgens deze bron ook gebaseerd is op de richtlijnen van EC5. In dit boek zijn er geen mogelijke bezwijkcombinaties afgeleid, maar er is wel een procedure beschreven om verbindingen met meerdere afschuifvlakken te berekenen. Dit voor zowel staal-op-hout- en hout-op-houtverbindingen, waarbij de elementen onder verschillende hoeken ten opzichte van elkaar kunnen staan. Ook bevat dit boek enkele uitgewerkte oefeningen waarin de sterkte van dit soort verbindingen berekend is. Figuur 3-8 biedt visuele ondersteuning voor de procedure volgens Porteous en Kermani [6].



Figuur 3-8: Procedure voor verbindingen met meerdere afschuifvlakken volgens Porteous en Kermani [6]



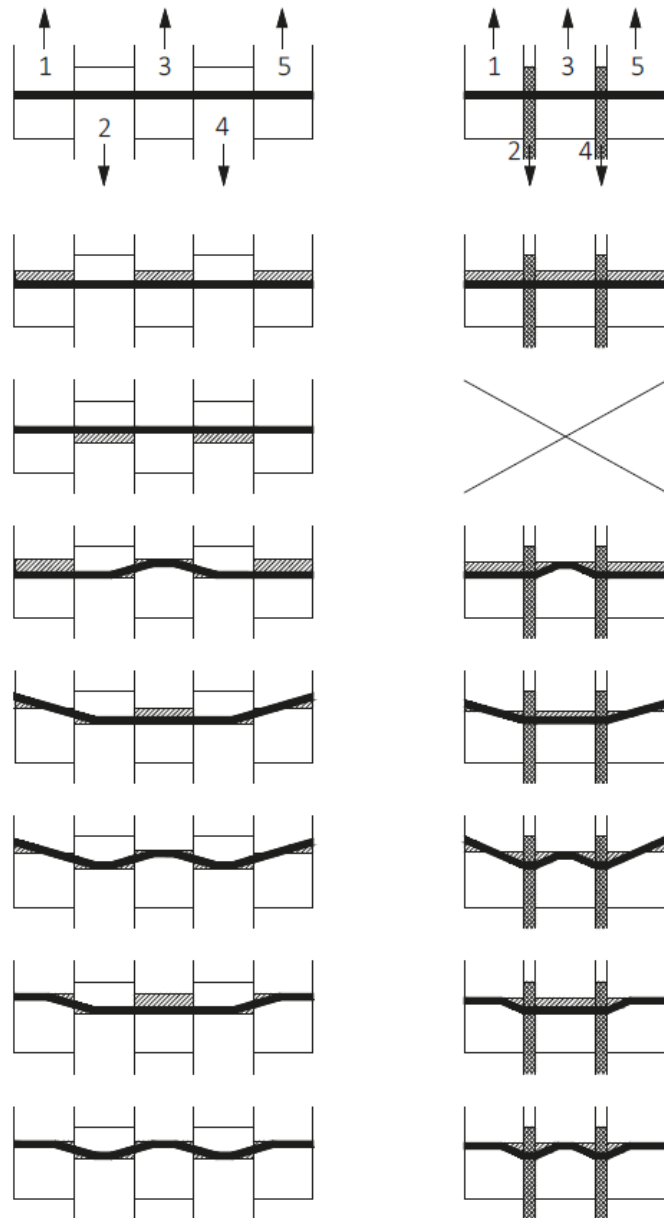
Deze procedure voor de bepaling van de laterale weerstand van elk afschuifvlak in een verbinding met meerdere afschuifvlakken verloopt als volgt. De procedure start vanuit één zijde van de totale verbinding, bijvoorbeeld de linkerzijde, waarbij een reeks symmetrische verbindingen met twee afschuifvlakken, die dus uit drie verbonden elementen bestaat, zijn opgezet zodanig dat het centrale element van elke opgezette verbinding het element van de echte verbinding is en de buitenste elementen de aangrenzende elementen zijn. Wanneer de aangrenzende elementen verschillende eigenschappen hebben, bijvoorbeeld verschillend materiaal, dwarsdoorsnede of richting, zal de procedure het element aan de rechterkant van de opgezette verbinding vervangen door het element aan de linkerkant, waardoor zich een symmetrische verbinding vormt. De waarde en de richting van de ontwerpkracht die inwerkt op het afschuifvlak tussen de elementen, is uit de statica af te leiden. Wanneer de richting van de ontwerpkracht dan gekend is, kan voor elke configuratie van het afschuifvlak de weerstand van het bezwijkmechanisme worden bepaald door toepassing van vergelijking (2-2). Beginnend met het linker afschuifvlak, zal de laterale weerstand van het afschuifvlak de laagste waarde hebben en nadat de niet-compatibele bezwijkcombinaties in de overige afschuifvlakken zijn verwijderd, kan de totale sterkte van de verbinding worden bepaald [6].

Na de vergelijking tussen de analysemodellen volgens Porteous en Kermani en prEC5, vallen de volgende zaken op:

- Het analysemodel uit het boek maakt gebruik van de richtlijnen volgens EC5, maar heeft geen bezwijkcombinaties afgeleid. In dit boek is wel een uitgebreidere procedure beschreven die de complexe berekening van verbindingen met meerdere afschuifvlakken helpt te verduidelijken. Er is dus in het boek een analyse van compatibiliteit tussen mogelijke bezwijkmechanismen gegeven, maar de zeven bezwijkcombinaties uit PrEC5 zijn er niet afgeleid. PrEC5 mist dus deze procedure uit het boek, terwijl het boek de afgeleide bezwijkcombinaties uit prEC5 mist. Ook verduidelijkt de procedure in het boek hoe de analyse moet gebeuren wanneer elementen onder een bepaalde hoek van elkaar staan.
- Het analysemodel uit het boek is in de procedure en voorbeeldoefeningen vooral gericht op hout-op-houtverbindingen met meerdere afschuifvlakken, terwijl het model volgens prEC5 ook staal-op-houtverbindingen toelaat.
- Voor verdere gelijkenissen en verschillen tussen deze twee analysemodellen is het mogelijk te verwijzen naar de eerder beschreven bevindingen tussen de analysemodellen volgens EC5 en prEC5.

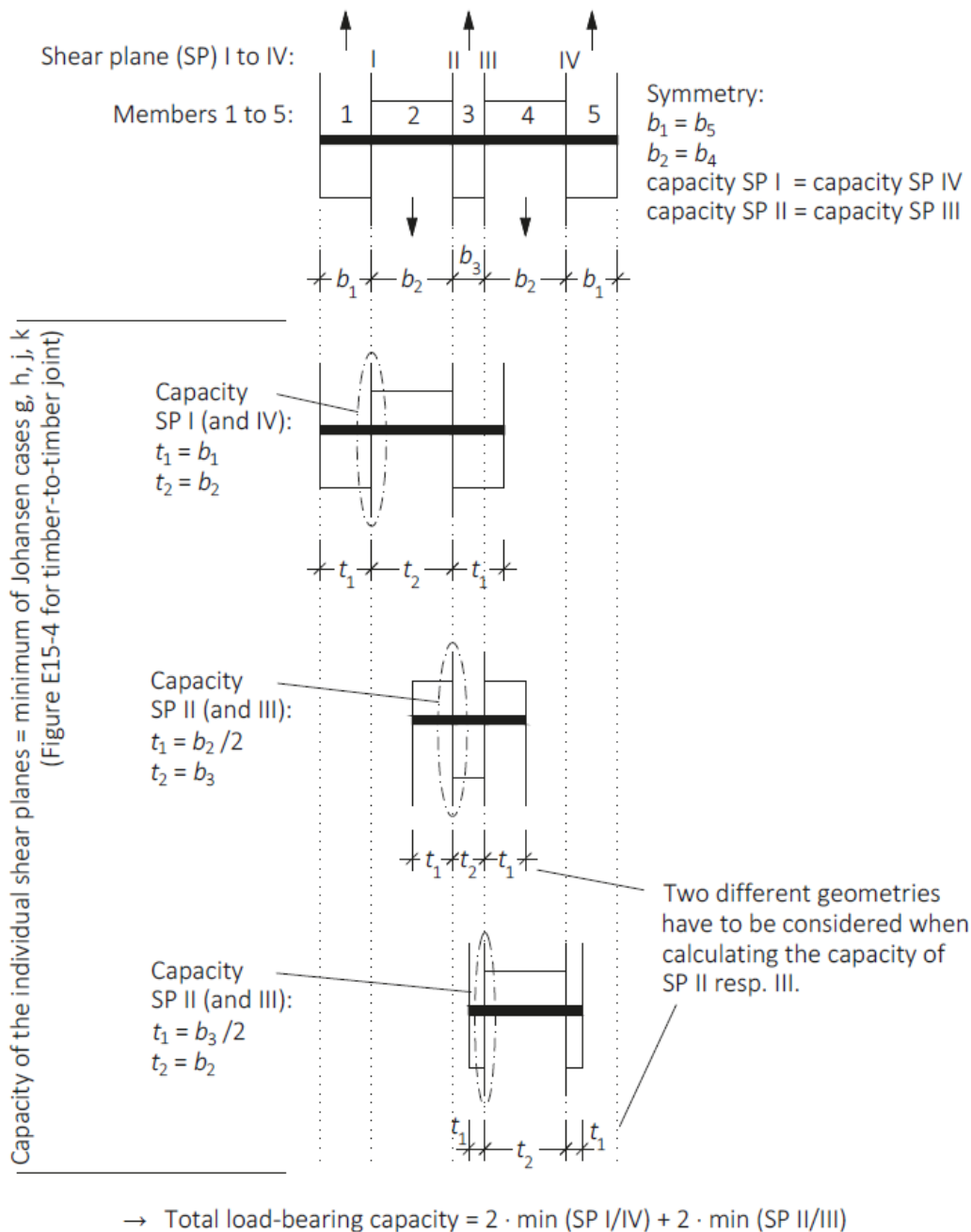
### 3.3.4 Blaß en Sandhaas - Timber Engineering: Principles for Design

Deze bron is een boek over het structureel ontwerp van houtstructuren. De ontwerpregels in dit boek zijn gebaseerd op de ontwerprichtlijnen van EC5, dus ook voor de analysemethode van verbindingen met meerdere afschuifvlakken. In dit boek zijn er bezwijkcombinaties afgeleid voor hout-op-hout- en staal-op-houtverbindingen en is er een procedure opgesteld die de berekening van de laterale weerstand van de totale verbinding verduidelijkt [8]. Figuur 3-9 weergeeft de afgeleide bezwijkcombinaties, waarbij het boek benadrukt dat deze bezwijkcombinaties praktisch uitvoerbaar zijn, maar ze vanuit constructief oogpunt wellicht niet allemaal te prefereren zijn.



*Figuur 3-9: Bezwijkcombinaties van een verbindingsmiddel met vier afschuifvlakken in een hout-op-houtverbinding (links) en een staal-op-houtverbinding (rechts) [8]*

Figuur 3-10 toont de te volgen procedure om de totale sterkte van de verbinding met meerdere afschuifvlakken te bepalen.



Figuur 3-10: Procedure voor de bepaling van de totale laterale sterkte van een symmetrische houtverbinding met vier afschuifvlakken [8]

Na de vergelijking tussen de analysemodellen volgens Blaß en Sandhaas [8] en prEC5, vallen de volgende zaken op:

- Het analysemodel uit het boek maakt gebruik van de richtlijnen volgens EC5 en heeft bezwijkcombinaties afgeleid. Ook is er in dit boek een uitgebreidere procedure beschreven die de complexe berekening van verbindingen met meerdere afschuifvlakken helpt te verduidelijken. PrEC5 mist deze verduidelijkende procedure uit het boek.
- Het analysemodel uit het boek en prEC5 zijn beide gericht op hout-op-hout- en staal-op-houtverbindingen met meerdere afschuifvlakken. Voor verdere gelijkenissen en verschillen tussen deze twee analysemodellen is het mogelijk te verwijzen naar de eerder beschreven bevindingen tussen de analysemodellen volgens EC5 en prEC5.

## 3.4 Analyse volgens buitenlandse normen

### 3.4.1 Verenigde Staten

Voor verbindingen met meer dan twee afschuifvlakken is in de Amerikaanse norm als volgt te bepalen. Elk afschuifvlak in de verbinding met meerdere afschuifvlakken moet geanalyseerd zijn als een verbinding met één afschuifvlak. Vervolgens is de laterale ontwerpsterkte van de totale verbinding gelijk aan de laagste laterale referentie-ontwerpwaarde van één afschuifvlak, die voor de enkele afschuifvlakken in de totale verbinding gevonden is, vermenigvuldigd met het aantal afschuifvlakken die in de totale verbinding aanwezig zijn. Deze laterale ontwerpwaarde van één afschuifvlak is in de Amerikaanse norm op dezelfde bezwijkmechanismen gebaseerd als in EC5. De berekeningswijze volgens de Amerikaanse norm verschilt wel sterk, want dit gebeurt via gestandaardiseerde waarden in tabellen [14]. Het opstellen van bezwijkcombinaties voor compatibele bezwijkmechanismen is in de Amerikaanse norm helemaal niet van toepassing.

Deze manier van werken kan mogelijk het ontwerpproces versnellen. De Amerikaanse methode om de laterale ontwerpsterkte van de verbinding te bepalen lijkt dus eerder een conservatieve procedure, maar wel een methode die tijd kan besparen voor een ingenieur die verbindingen met meerdere afschuifvlakken moet ontwerpen. Om te controleren of deze Amerikaanse procedure effectief sneller en conservatiever is dan die van prEC5, is er verder onderzoek nodig, zodat deze aanname bevestigd kan worden. Dit onderzoek is uitgevoerd in sectie 6.4.

### 3.4.2 Zwitserland

De analysemethode volgens de Zwitserse norm voor verbindingen met meerdere afschuifvlakken komt overeen met die van prEC5, omdat er bij de analyse volgens prEC5 verwezen is naar Zwitsers onderzoek die gebaseerd is op studies van (Mischler, 1998) en geïmplementeerd in SIA 265:2012 [4].

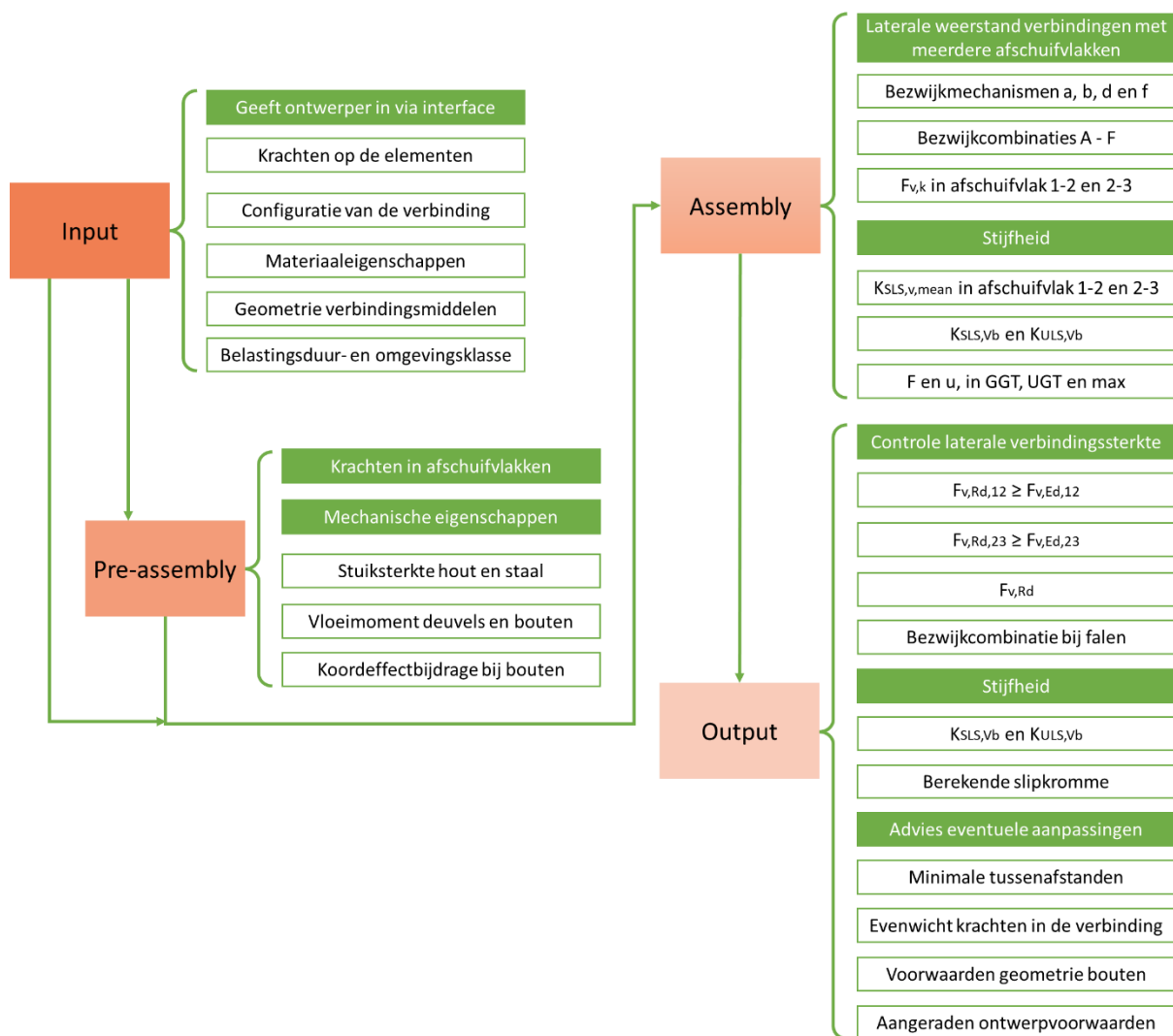


## 4. Opstelling analysemethode in Excel

Met de verzamelde informatie uit hoofdstukken 2 en 3 is het nu mogelijk om een analysemethode op te stellen voor het ontwerp van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken in houtconstructies. Dit hoofdstuk vertelt hoe deze methode opgesteld is en het proces dat daarvoor nodig was. Eerst is de opgestelde analysemethode samengevat in een flowchart. Vervolgens is er beschreven hoe deze analysemethode in Excel werd opgesteld, waarvan de voorafgaande flowchart dus het resultaat is.

### 4.1 Flowchart analysemethode

De opstelling van de analysemethode in Excel is moeilijk in één beeld vast te leggen, wat duidelijk te merken is in sectie 4.2. Daarom is in deze sectie een flowchart opgesteld die een overzicht van de analysemethode visualiseert, die later kan helpen bij de implementatie van de analysemethode in WoodConnector. Figuur 4-1 weergeeft deze flowchart.

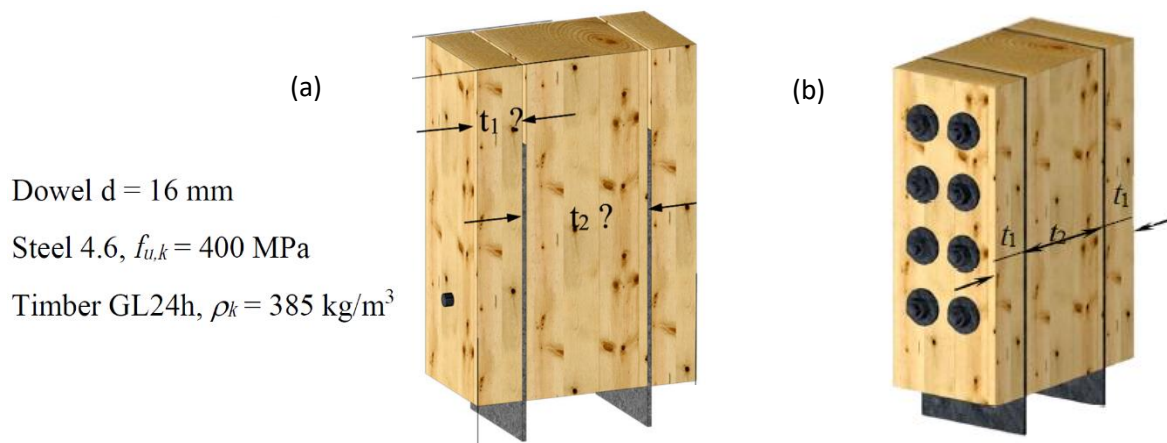


Figuur 4-1: Flowchart analysemethode voor het ontwerp van houtverbindingen met vier afschuifvlakken

De opgestelde analysemethode is te verdelen in vier verschillende blokken, dit zijn de input, de pre-assembly, de assembly en de output. De input bestaat uit een opsomming van bepaalde ontwerpparameters van de verbindingconfiguratie die nodig zijn voor de analyse van het ontwerp. De ontwerper geeft deze input dus in via een interface, die vervolgens doorgegeven worden naar de pre-assembly. Deze tweede blok voert tussenberekeningen uit en geeft tussenresultaten die wel belangrijk zijn voor de eindberekening, maar niet direct door de ontwerper gekend moeten zijn. Deze tussenresultaten van de pre-assembly zijn vervolgens, samen met nog andere parameters uit de input, nodig om de eindberekeningen uit te voeren in de assembly. De resultaten van de berekeningen in de assembly worden daarna getoond via de output, die dus de controle van de laterale verbindingsterkte, de stijfheid van de verbinding en advies voor eventuele aanpassingen geeft.

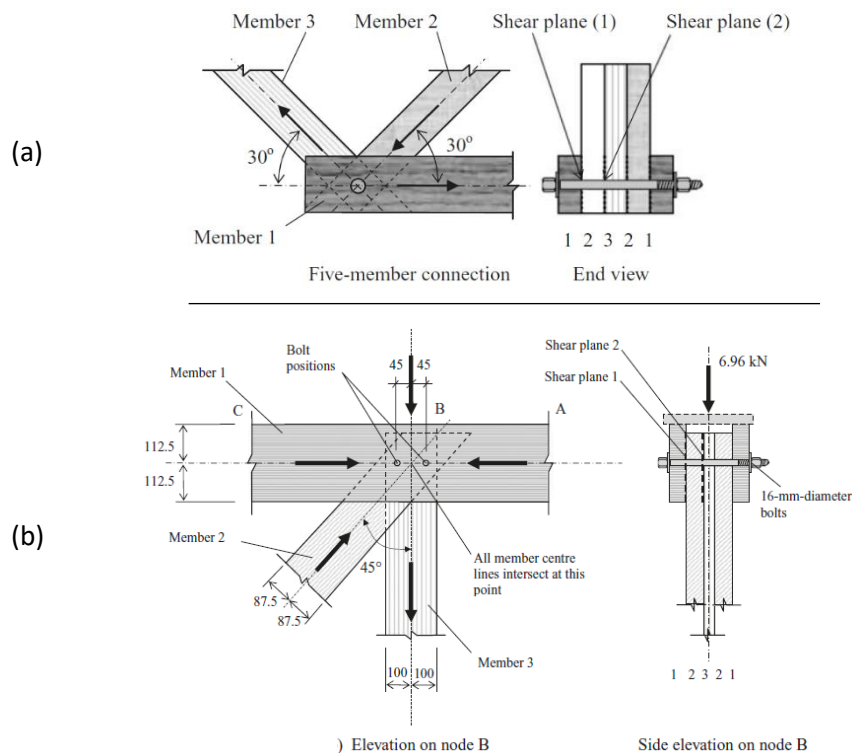
## 4.2 Analysemethode in Excel

De eerste stap bij het opstellen van de analysemethode was een selectie maken van minstens twee verschillende configuraties van stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken. In de voorgaande, gebruikte bronnen zijn er vier voorbeeldoefeningen terug te vinden. Hieruit zijn vervolgens vier verschillende configuraties afgeleid, doordat deze oefeningen beschikte over alle benodigde begingegevens en resultaten. De eerste twee configuraties zijn afgeleid uit het COST-rapport en zijn beide staal-op-houtverbindingen met vier afschuifvlakken, waarvan de houtvezelrichting van de elementen en de richting van de opgelegde krachten parallel ( $\alpha = 0^\circ$ ) zijn ten opzichte van elkaar. Het verschil tussen beide configuraties is de keuze in verbindingsmiddelen. De eerste configuratie gebruikt één deugel, terwijl de tweede configuratie acht bouten gebruikt. In Figuur 4-2 zijn beide configuraties uit het COST-rapport als een 3D-model afgebeeld.



Figuur 4-2: (a) Eerste en (b) tweede configuratie, beiden afgeleid uit het COST-rapport [12]

De andere twee configuraties zijn afgeleid uit het boek van Porteous en Kermani. Deze configuraties zijn beiden hout-op-houtverbindingen met vier afschuifvlakken en met bouten als verbindingsmiddelen. Bij deze verbindingen kruisen de houtvezelrichting van de elementen en de richting van de opgelegde krachten ten opzichte van elkaar. Figuur 4-3 toont beide configuraties afgeleid uit het boek van Porteous en Kermani, waarin duidelijke verschillen merkbaar zijn onderling en met configuraties uit het COST-rapport.



Figuur 4-3: (a) Derde en (b) vierde configuratie, beiden afgeleid uit het boek van Porteous en Kermani [6]

Na het selecteren van vier verschillende configuraties, was het mogelijk om te starten met het opstellen van de analysemethode in Excel. De berekening van de eerste configuratie afgeleid uit het COST-rapport vormde de basis van de analysemethode in Excel. Deze basis alleen was niet voldoende om ook de andere configuraties te kunnen analyseren, daarom werd de berekening in het Excelbestand stapsgewijs uitgebreid. Eerst door de tweede configuratie van het COST-rapport toe te voegen en daarna de twee configuraties uit het boek van Porteous en Kermani. Na nog enkele ontwerprichtlijnen uit prEC5 toe te voegen, is het eindresultaat een Excelbestand die het ontwerp van hout-op-hout en staal-op-houtverbindingen met vier afschuifvlakken volledig kan analyseren. Deze verbindingen kunnen hierbij uitgevoerd worden als vakwerk-, balk-balk- en balk-kolomverbindingen met deuvels of bouten als verbindingsmiddelen. Figuur 4-4 tot en met Figuur 4-10 weergeven samen de volledige lay-out van de analysemethode in het Excelbestand, waarbij de vierde configuratie geanalyseerd is. Dit bestand bestaat uit één inputveld, vier berekeningsvelden en twee outputvelden.

Het inputveld is weergegeven in Figuur 4-4 en is onderverdeeld in vijf subvelden. In de grijze cellen in de subvelden dienen de ontwerpparameters van de desbetreffende configuratie ingevuld te zijn, zodat de volledige analyse van de verbinding correct kan verlopen. De eerste drie subvelden zijn gericht op het invullen van de ontwerpparameters van de drie elementen, waarbij elk subveld een onderscheid maakt tussen de parameters die betrekking hebben tot de geometrie en materiaal van het element, en de ontwerpkracht in dit element. Het subveld van element 2 verschilt licht met die van element 1 en 3, omdat het in dit veld mogelijk is om het materiaal te wijzigen in hout of staal, waarvoor ook verschillende ontwerpparameters ingevuld moeten worden. Meer uitleg over elke ontwerpparameter is terug te vinden in hoofdstuk 2. Merk op dat enkel de  $\delta$ 's voor de geometrie van de elementen niet terug te vinden zijn in hoofdstuk 2. Deze parameters zijn aan de analysemethode toegevoegd om de hoek tussen de aslijnen, waarvan de richting overeenkomt met de houtvezelrichting, van de drie elementen te kunnen inrekenen. Hierdoor is het onderscheid te maken tussen een vakwerk-, balk-balk- en balk-kolomverbindingen. Ten slotte zijn er nog twee subvelden voor de ontwerpparameters van het verbindingsmiddel en voor de totale verbinding, waarin er ook een onderscheid gemaakt is tussen de parameters met betrekking tot de geometrie en het materiaal.



Input	
Element 1	
Geometrie	Materiaal
$t_1 = 47$ mm $\delta_0 = 0^\circ$ hoek tussen aslijn/houtvezelrichting element 1 en de horizontale	C22 $f_{c,90,k} = 2,2$ MPa $\rho_k = 340$ kg/m <sup>3</sup> $\rho_m = 410$ kg/m <sup>3</sup> $k_{mod} = 0,8$
Ontwerpkraft in element 1	
$F_{v,Ed,1} = -6273,66$ N $\alpha_1 = 33,69^\circ$	
Element 2	
Geometrie	Materiaal
$t_2 = 47$ mm $\delta_{1-2} = 225^\circ$ hoek tussen aslijn/houtvezelrichting element 1 en 2	Staal of hout? --> <input type="text" value="Hout"/>
Ontwerpkraft in element 2	
$F_{v,Ed,2} = -7382$ N $\alpha_2 = 0^\circ$	Staal $f_s = 600$ MPa $k_{pl,binnen} = 1$ $k_{pl,buiten} = 1$ $t/d = 2,9375$
Element 3	
Geometrie	Materiaal
$t_3 = 37$ mm $\delta_{2-3} = 45^\circ$ hoek tussen aslijn/houtvezelrichting element 2 en 3	C18 $f_{c,90,k} = 2,2$ MPa $\rho_k = 320$ kg/m <sup>3</sup> $\rho_m = 380$ kg/m <sup>3</sup> $k_{mod} = 0,8$
Ontwerpkraft in element 3	
$F_{v,Ed,3} = 3480$ N $\alpha_3 = 0^\circ$	
Verbindingsmiddel	
Geometrie	Materiaal
Deugel of bout $d = 16$ mm $k_{rp,1} = 0,25$ $k_{rp,2} = 0,25$ (bout) $D_{ring} = 36$ mm $d_{ring} = 13$ mm $t_{ring} = 3,2$ mm $d_{head} = 28,8$ mm	Staal $f_{u,k} = 400$ MPa 4.6
Totale verbinding	
Geometrie	Materiaal
$n_0 = 2$ $n_{90} = 1$ $a_1 = 90$ mm $a_2 = 90$ mm $a_{3,t} = 225$ mm $a_{3,c} = 225$ mm $a_{4,t} = 112,5$ mm $a_{4,c} = 112,5$ mm	Service class 2 Load duration: medium-term variable loading $\gamma_R = 1,3$

Figuur 4-4: Inputveld van de analysemethode in Excel, ingevuld met de ontwerpparameters van de vierde configuratie

Vervolgens toont Figuur 4-5 het eerste berekeningsveld, waarin de focus ligt op de berekening van de deuveleffectbijdrage per verbindingsmiddel. Dit veld is hiervoor onderverdeeld in zes subvelden met elk zijn eigen specifieke berekening. De eerste twee subvelden zijn opgesteld op basis van de berekeningen van de derde en vierde configuratie uit het boek van Porteous en Kermani, en zijn noodzakelijk om de hoeken tussen de elementen in te rekenen. Het eerste subveld zet hierbij de ontwerpkrachten in de elementen om naar ontwerpkrachten in de afschuifvlakken tussen de elementen. Op basis van deze belasting in het afschuifvlak, berekent het tweede subveld de hoek tussen de houtvezelrichting van het element en de belastingsrichting in het afschuifvlak. De hoeken berekend in dit tweede subveld zijn belangrijke waarden voor de berekening van de stuksterktes van de elementen per afschuifvlak in het derde subveld. De formules voor de berekening van deze stuksterktes zijn in sectie 2.3.3 terug te vinden. Verder berekent het vierde subveld het vloei-moment van het verbindingsmiddel aan de hand van vergelijking (2-19). De berekende stuksterktes en

vloeimoment zijn vervolgens belangrijke waarden in de berekening van de uveffectbijdrage per bezwijkmechanisme per afschuifvlak in het vijfde subveld, die op zijn beurt als voorbereiding dient voor de berekening in het zesde subveld. Voor het vijfde subveld zijn vergelijkingen (2-2) en (2-3) toegepast, rekening houdende met de procedure uit Figuur 3-10. Ten slotte bepaalt het zesde subveld de de uveffectbijdrage per bezwijkcombinatie per afschuifvlak op basis van sectie 3.2.2.

Berekeningen: De uveffectbijdrage per verbindingmiddel			
Ontwerpr kracht in de verschillende afschuifvlakken			
<b>Ontwerpr kracht in afschuifvlak 1-2:</b>		<b>Ontwerpr kracht in afschuifvlak 2-3:</b>	
$F_{v,sp,1-2,x}$	= -5220 N	$F_{v,sp,2-3,x}$	= 0 N
$F_{v,sp,1-2,y}$	= -3480 N	$F_{v,sp,2-3,y}$	= 1740 N
$F_{v,sp,1-2}$	= 6274 N	$F_{v,sp,2-3}$	= 1740 N
$\alpha_{v,sp,1-2}$	= 34 °	$\alpha_{v,sp,2-3}$	= -90 °
Hoek tussen de houtvezelrichting en de belastingsrichting per afschuifvlak			
<b>Afschuifvlak 1-2:</b>		<b>Afschuifvlak 2-3:</b>	<b>Afschuifvlak 3-2:</b>
$\phi_{1,2}$	= -34 °	$\phi_{2,3,a}$	= 315 °
$\phi_{2,1}$	= 191 °	$\phi_{3,2,a}$	= 360 °
		$\phi_{3,2,b}$	= 360 °
		$\phi_{2,3,b}$	= 315 °
Stuiksterkte van de elementen per afschuifvlak			
<b>Stuiksterkte element 1:</b>			
$f_{h,\phi,1,2,k}$	= 19,82 MPa	$k_{mat}$	= 1,18
		$k_{90}$	= 1,59
<b>Stuiksterkte element 2 wanneer staal:</b>			
$f_{h,k,binnen}$	= 600 MPa	$f_{h,k,buiten}$	= 600 MPa
<b>Stuiksterkte element 2 wanneer hout:</b>			
$f_{h,\phi,2,1,k}$	= 21,55 MPa	$k_{mat}$	= 1,02
$f_{h,\phi,2,3,a,k}$	= 17,02 MPa	$k_{mat}$	= 1,30
$f_{h,\phi,2,3,b,k}$	= 17,02 MPa	$k_{mat}$	= 1,30
<b>Stuiksterkte element 2:</b>			
$f_{h,2,1,k}$	= 21,55 MPa	$f_{h,2,3,a,k}$	= 17,02 MPa
		$f_{h,2,3,b,k}$	= 17,02 MPa
<b>Stuiksterkte element 3:</b>			
$f_{h,\phi,3,2,a,k}$	= 22,04 MPa	$k_{mat}$	= 1,00
$f_{h,\phi,3,2,b,k}$	= 22,04 MPa	$k_{mat}$	= 1,00
		$k_{90}$	= 1,59
Vloeimoment verbindingmiddel			
$M_{y,k}$	= 162141 Nmm		
De uveffectbijdrage per bezwijkmechanisme per afschuifvlak			
<b>Afschuifvlak 1-2:</b>		<b>Afschuifvlak 2-3a:</b>	<b>Afschuifvlak 3-2b:</b>
$\beta_{12}$	= 1,09	$\beta_{23a}$	= 1,30
$F_{D,k,a}$	= 14905 N	$F_{D,k,a}$	= 6399 N
$F_{D,k,b}$	= 8104 N	$F_{D,k,b}$	= 6524 N
$F_{D,k,d}$	= 8506 N	$F_{D,k,f}$	= 11480 N
$F_{D,k,f}$	= 11904 N		
		$\beta_{32b}$	= 0,77
		$F_{D,k,a}$	= 6524 N
		$F_{D,k,b}$	= 6399 N
		$F_{D,k,f}$	= 11480 N
<b>Minimum van afschuifvlak 2-3:</b>			
		$F_{D,k,a}$	= 6399 N
		$F_{D,k,b}$	= 6399 N
		$F_{D,k,f}$	= 11480 N
De uveffectbijdrage per bezwijkcombinatie per afschuifvlak			
<b>Bezwijkcombinatie A:</b>			
$F_{D,k,1-2}$	= 14905 N	$F_{D,k,2-3}$	= 6399 N
		$F_{D,k,A}$	= 21305 N
<b>Bezwijkcombinatie B:</b>			
$F_{D,k,1-2}$	= 8104 N	$F_{D,k,2-3}$	= 6399 N
		$F_{D,k,B}$	= 14503 N
<b>Bezwijkcombinatie C:</b>			
$F_{D,k,1-2}$	= 8506 N	$F_{D,k,2-3}$	= 11480 N
		$F_{D,k,C}$	= 19987 N
<b>Bezwijkcombinatie D:</b>			
$F_{D,k,1-2}$	= 11904 N	$F_{D,k,2-3}$	= 11480 N
		$F_{D,k,D}$	= 23384 N
<b>Bezwijkcombinatie E:</b>			
$F_{D,k,1-2}$	= 14905 N	$F_{D,k,2-3}$	= 11480 N
		$F_{D,k,E}$	= 26386 N
<b>Bezwijkcombinatie F:</b>			
$F_{D,k,1-2}$	= 8506 N	$F_{D,k,2-3}$	= 6399 N
		$F_{D,k,F}$	= 14906 N
<b>Bezwijkcombinatie G:</b>			
$F_{D,k,1-2}$	= 11904 N	$F_{D,k,2-3}$	= 6399 N
		$F_{D,k,G}$	= 18303 N

Figuur 4-5: Eerste berekeningsveld van de analysemethode in Excel voor de vierde configuratie

In Figuur 4-6 is het tweede berekeningsveld, die onderverdeeld is in vier subvelden, afgebeeld. Het doel van dit tweede veld is het berekenen van de koordeffectbijdrage, per bout per bezwijkcombinatie per afschuifvlak, wanneer bouten als verbindingsmiddelen toegepast zijn. In het eerste subveld vindt de berekening plaats van de kopdoortrekweerstand, gebaseerd op sectie 2.4.1. Verder berekent het tweede subveld de trekweerstand van de bout aan de hand van vergelijking (2-29). Het derde subveld bepaalt daarna de axiale trekweerstand, op basis van de resultaten van de twee voorgaande subvelden, zoals in vergelijking (2-22). Ten slotte zal in het vierde subveld de koordeffectbijdrage berekend worden voor elk afschuifvlak van elke bezwijkcombinatie met behulp van vergelijking (2-21). In deze vergelijking is af te leiden dat de koordeffectbijdrage afhankelijk is van de deuveffectbijdrage en de axiale trekweerstand, daarom is het dus belangrijk dat de berekening van de koordeffectbijdrage na de berekening van de deuveffectbijdrage komt.

Berekeningen: Koordeffectbijdrage per bout per bezwijkcombinatie per afschuifvlak			
<b>Kopdoortrekweerstand</b>			
<b>Oppervlakte binnen de omtrek van de boutkop, sluitring of stalen plaat:</b>			
Ahead,kop =	651 mm <sup>2</sup>	Ahead,ring =	885 mm <sup>2</sup>
		Ahead,plaat =	388628 mm <sup>2</sup>
<b>Karakteristieke kopdoortrekparameter:</b>			
fhead,k =	10,82 MPa	fhead,k =	9,40 MPa
<b>Karakteristieke kopdoortrekweerstand:</b>			
Fp,k =	7050 N	Fp,k =	8322 N
		Fp,k =	2564942 N
<b>Trekweerstand</b>			
<b>Karakteristieke trekweerstand:</b>			
Ft,k =	53534 N		
<b>Axiale trekweerstand</b>			
<b>Karakteristieke axiale trekweerstand:</b>			
Fax,t,k =	8322 N		
<b>Koordeffectbijdrage per bezwijkcombinatie per afschuifvlak</b>			
<b>Bezwijkcombinatie A:</b>			
Frp,k,1-2 =	0 N	Frp,k,2-3 =	0 N
		Frp,k,A =	0 N
<b>Bezwijkcombinatie B:</b>			
Frp,k,1-2 =	0 N	Frp,k,2-3 =	0 N
		Frp,k,B =	0 N
<b>Bezwijkcombinatie C:</b>			
Frp,k,1-2 =	2081 N	Frp,k,2-3 =	2081 N
		Frp,k,C =	4161 N
<b>Bezwijkcombinatie D:</b>			
Frp,k,1-2 =	2081 N	Frp,k,2-3 =	2081 N
		Frp,k,D =	4161 N
<b>Bezwijkcombinatie E:</b>			
Frp,k,1-2 =	0 N	Frp,k,2-3 =	2081 N
		Frp,k,E =	2081 N
<b>Bezwijkcombinatie F:</b>			
Frp,k,1-2 =	2081 N	Frp,k,2-3 =	0 N
		Frp,k,F =	2081 N
<b>Bezwijkcombinatie G:</b>			
Frp,k,1-2 =	2081 N	Frp,k,2-3 =	0 N
		Frp,k,G =	2081 N

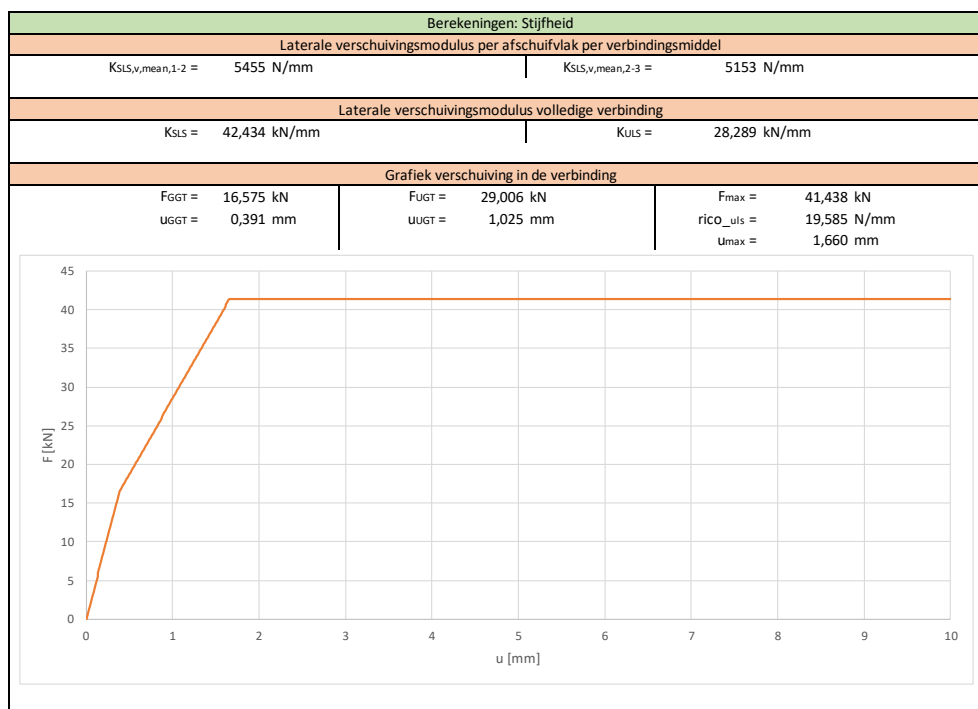
Figuur 4-6: Tweede berekeningsveld van de analysemethode in Excel voor de vierde configuratie

Het derde berekeningsveld is in Figuur 4-7 weergegeven en bestaat uit twee subvelden die samen de karakteristieke laterale weerstand per afschuifvlak per verbindingsmiddel bepalen. In het eerste subveld wordt de laterale weerstand per bezwijkcombinatie en per afschuifvlak berekend door de desbetreffende deuveffectbijdrage en koordeffectbijdrage bij elkaar op te tellen. Daarna bepaalt het tweede subveld de karakteristieke laterale weerstand per afschuifvlak per verbindingsmiddel, die gelijk moet zijn aan die van de bezwijkcombinatie met de laagste laterale weerstand. Hierbij is het ook belangrijk de bezwijkcombinatie te kennen waaronder de verbinding zal falen. Ten slotte moet er opgemerkt worden dat deze derde berekeningsveld over een belangrijke outputwaarde beschikt wanneer de houtvezelrichting van de elementen en de richting van de opgelegde krachten parallel ( $\alpha = 0^\circ$ ) zijn ten opzichte van elkaar. Aan deze voorwaarde voldoen de derde en vierde configuratie dus niet, maar de eerste en tweede configuratie wel. Voor de eerste en tweede configuratie is  $F_{v,Rd}$  dus de laterale ontwerpsterkte van de volledige verbinding.

Berekeningen: Karakteristieke laterale weerstand per verbindingsmiddel			
Karakteristieke laterale weerstand per bezwijkcombinatie per afschuifvlak			
<b>Bezwijkcombinatie A:</b>	$F_{v,k,1-2} = 14905 \text{ N}$	$F_{v,k,2-3} = 6399 \text{ N}$	$F_{v,k,helftA} = 21305 \text{ N}$
<b>Bezwijkcombinatie B:</b>	$F_{v,k,1-2} = 8104 \text{ N}$	$F_{v,k,2-3} = 6399 \text{ N}$	$F_{v,k,helftB} = 14503 \text{ N}$
<b>Bezwijkcombinatie C:</b>	$F_{v,k,1-2} = 10587 \text{ N}$	$F_{v,k,2-3} = 13561 \text{ N}$	$F_{v,k,helftC} = 24148 \text{ N}$
<b>Bezwijkcombinatie D:</b>	$F_{v,k,1-2} = 13984 \text{ N}$	$F_{v,k,2-3} = 13561 \text{ N}$	$F_{v,k,helftD} = 27545 \text{ N}$
<b>Bezwijkcombinatie E:</b>	$F_{v,k,1-2} = 14905 \text{ N}$	$F_{v,k,2-3} = 13561 \text{ N}$	$F_{v,k,helftE} = 28466 \text{ N}$
<b>Bezwijkcombinatie F:</b>	$F_{v,k,1-2} = 10587 \text{ N}$	$F_{v,k,2-3} = 6399 \text{ N}$	$F_{v,k,helftF} = 16986 \text{ N}$
<b>Bezwijkcombinatie G:</b>	$F_{v,k,1-2} = 13984 \text{ N}$	$F_{v,k,2-3} = 6399 \text{ N}$	$F_{v,k,helftG} = 20384 \text{ N}$
Karakteristieke laterale weerstand per afschuifvlak			
$F_{v,Rk,1-2} = 8104 \text{ N}$	$F_{v,Rk,2-3} = 6399 \text{ N}$	$F_{v,Rk,helft} = 14503 \text{ N}$	$F_{v,Rk} = 29006 \text{ N}$
		$F_{v,Rd} = 35700 \text{ N}$	

Figuur 4-7: Derde berekeningsveld van de analysemethode in Excel voor de vierde configuratie

Figuur 4-8 toont het vierde berekeningsveld waarin de stijfheid van de volledige verbinding berekend is en er een slipkromme is geplot. Dit veld is hiervoor onderverdeeld in drie subvelden, waarbij de berekeningen in deze velden gebaseerd zijn op de informatie gegeven in sectie 2.8. Het eerste subveld berekent de verschuivingsmodulus per verbindingsmiddel voor elk afschuifvlak in GGT, die in het tweede subveld nodig zijn om de verschuivingsmodulus van de volledige verbinding in GGT en UGT te berekenen. Deze twee resultaten in het tweede subveld zijn in feite ook belangrijke outputwaarden. Het derde subveld heeft als doel een grafiek te plotten die het verband geeft tussen de verschuiving in de verbinding en de berekende sterkte van de verbinding. Dit creëert een mogelijkheid om een experimenteel bepaalde slipkromme te vergelijken met een berekende slipkromme voor een verbinding. Ten slotte moet hierbij opgemerkt worden dat heel dit vierde berekeningsveld alleen maar geldig is voor verbindingen waarvan de houtvezelrichting van de elementen en de richting van de opgelegde krachten parallel ( $\alpha = 0^\circ$ ) zijn ten opzichte van elkaar. Aan deze voorwaarde voldoen de derde en vierde configuratie dus weer niet, maar de eerste en tweede configuratie wel.



Figuur 4-8: Vierde berekeningsveld van de analysemethode in Excel voor de vierde configuratie

Vervolgens toont Figuur 4-9 het eerste outputveld, die onderverdeeld is in vier subvelden, waarin de focus ligt op het controleren van de ontwerpparameters. Hierbij moet een deel van de ingegeven parameters voldoen aan ontwerpregels voor verbindingen die vanuit prEC5 zijn aangeraden. Wanneer een ingegeven parameter voldoet aan zijn specifieke ontwerpregel, dan zal er in de cel langs of onder de ontwerpregel "OK" verschijnen. Wanneer deze parameter niet voldoet, zal er in deze cel "NOK" verschijnen. Een cel ingevuld met "OK" krijgt hierbij een groene opvulkleur en een cel ingevuld met "NOK" krijgt hierbij een rode opvulkleur. Het eerste subveld controleert de minimum tussen-, rand- en eindafstanden van de verbindingsmiddelen. Dit is een belangrijke controle waaraan voldaan moet zijn, om de kans op brosse breuk van het hout te verkleinen en dus de kans op plastisch bezwijken te vergroten. Vervolgens controleert het tweede subveld de ontwerpparameters van de bouten, indien van toepassing. Het derde subveld bevat enkele aanvullende ontwerpoverwegingen voor bouten en deuvels, maar zijn minder belangrijk dan de andere controles. Ten slotte controleert het vierde subveld of de optredende ontwerpkrachten in de elementen aan de evenwichtsvoorwaarden voldoen.

Output: Controles vooraf			
Minimum tussen-, rand- en eindafstanden van de verbindingsmiddelen			
<b>Bouten</b>			<b>Deuvels</b>
$a_1 \geq 5d$		OK	$a_1 \geq 5d$
$a_2 \geq 4d$		OK	$a_2 \geq 3d$
$a_{3,t} \geq \max(7d ; 80\text{mm})$		OK	$a_{3,t} \geq \max(7d ; 80\text{mm})$
$a_{3,c} \geq 4d$		OK	$a_{3,c} \geq 4d$
$a_{4,t} \geq 4d$		OK	$a_{4,t} \geq 4d$
$a_{4,c} \geq 3d$		OK	$a_{4,c} \geq 3d$
Kopdoortrekweerstand bij bouten			
Boutkopdiameter:			Sluitringen:
$d_{\text{head}} \geq 1,8*d$			$D_{\text{ring}} \geq 3,4*d$
28,8 $\geq$ 28,8		OK	36 $\geq$ 54,4
Dikte element 1:			$t_{\text{ring}} \geq 0,2*d$
$t_1 \geq 4*d$			3,2 $\geq$ 3,2
47 $\geq$ 64		N-OK	
Aanvullende ontwerpoverwegingen voor bouten en deuvels			
Minstens 2 verbindingsmiddelen:			Minimale dikte houten elementen:
$n_{\text{tot}} \geq 2$		2	$t_{\text{hout}} \geq t_{\text{min}}$
2 $\geq$ 2		OK	37 $\geq$ 151,3
Evenwicht optredende ontwerpkrachten			
$F_{v,\text{res}} \approx 0$			$F_{v,\text{Ed},3,x} \approx 2 * F_{v,\text{sp},2-3,x}$
0,39 $\approx$ 0		OK	0,00 $\approx$ -0,28
			$F_{v,\text{Ed},3,y} \approx 2 * F_{v,\text{sp},2-3,y}$
			-3480,00 $\approx$ 3479,72

Figuur 4-9: Eerste outputveld van de analysemethode in Excel, met voorafgaande controle van de ontwerpparameters van de vierde configuratie

In Figuur 4-10 is het tweede outputveld afgebeeld, die controleert of de laterale ontwerpkrachten in beide afschuifvlakken kleiner zijn dan de laterale ontwerpsterktes van deze afschuifvlakken. De berekening van deze laterale ontwerpsterktes gaat enkel uit van plastisch bezwijken van de verbinding, en dus niet door het splijten van de houten elementen. Verder omvat de berekening van de laterale ontwerpsterktes zowel de laterale ontwerpsterkte parallel met de houtvezel  $F_{v,0,Rd}$ , als de sterkte loodrecht op de houtvezel  $F_{v,90,Rd}$ . Er is dus geen aparte controle nodig voor de sterkte van de houten elementen loodrecht op de houtvezel. Ten slotte geven de cellen hier ook "OK" of "NOK" aan wanneer de sterkte van de verbindingen respectievelijk wel of niet voldoen. Dit is feitelijk de belangrijkste controle binnen deze analysemethode.

Output: Controles achteraf					
Plastisch bezwijken					
Controle afschuifvlak 1-2			Controle afschuifvlak 2-3		
$F_{v,Rd,sp,1-2}$	$\geq$	$F_{v,sp,1-2}$	$F_{v,Rd,sp,2-3}$	$\geq$	$F_{v,sp,2-3}$
9974	$\geq$	6274	7876	$\geq$	1740
		OK			OK

Figuur 4-10: Tweede outputveld van de analysemethode in Excel, met controle van de resultaten van de vierde configuratie

Met deze analysemethode in Excel is het ook mogelijk om het effect van de wijziging van één van de verschillende ontwerpparameters van de verbindingconfiguratie op de sterkte en de stijfheid van de verbinding te onderzoeken, wat ook interessant is voor de ontwerper/ingenieur. Dit soort verbanden zijn verder onderzocht in sectie 6.3.2. Ten slotte werkt deze analysemethode in Excel dus snel, maar is het niet gebruiksvriendelijk. Ook is het risico er dat bepaalde berekeningen verwijderd of foutief aangepast worden. Daarom is het veiliger om deze analysemethode te implementeren in WoodConnector.

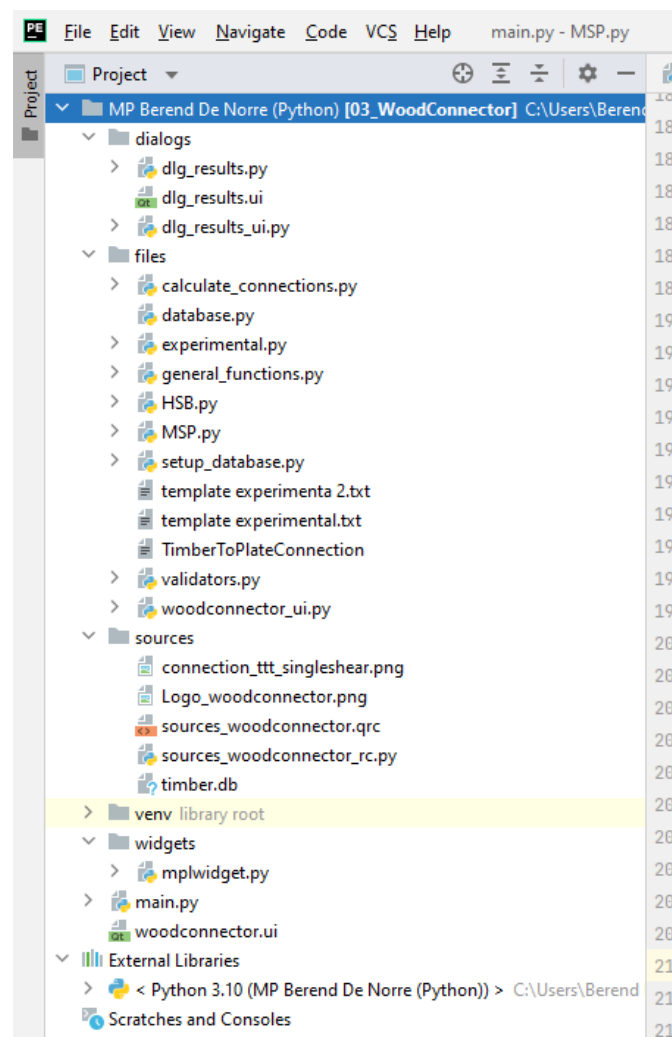


## 5. Implementatie analysemethode in WoodConnector

Het resultaat van het vorig hoofdstuk is een analysemethode voor het ontwerp van de uvel- of boutverbindingen met vier afschuifvlakken in houtconstructies. In dit hoofdstuk is uitgelegd hoe deze methode geïmplementeerd is in WoodConnector. Eerst is er dieper ingegaan over hoe de software van deze uitbreiding in WoodConnector is uitgebouwd. Daarna volgt een overzicht van de uitbreiding in de interface van WoodConnector.

### 5.1 Opbouw software

De software van WoodConnector is een project die voornamelijk in Python is opgebouwd, waarbij PyCharm de integrated development environment (IDE) is. De software is ontwikkeld door met meerdere bestanden met codes in een mappenstructuur te werken. Wat ten goede komt voor de beheersbaarheid van de ontwikkeling van de software [15]. Figuur 5-1 toont deze mappenstructuur van het volledige WoodConnector-project in PyCharm. Hieruit is ook af te leiden dat het grootste deel van de bestanden bestaat uit Pythonbestanden. Deze bestanden bestaan uit codes die geschreven zijn in de programmeertaal Python. Voor de uitbreiding van de software met de vooropgestelde analysemethode zijn er vier belangrijke Pythonbestanden te vermelden. Dit zijn 'MSP.py', 'woodconnector\_ui.py' en 'database.py', die in de 'files'-map staan, en 'main.py'.



Figuur 5-1: Mappenstructuur WoodConnector-project in PyCharm



Het eerste belangrijke Pythonbestand voor de uitbreiding in WoodConnector is 'MSP.py', waarbij 'MSP' een afkorting is van 'multiple shear plane'. Dit bestand komt in feite overeen met de blokken pre-assembly en assembly uit Figuur 4-1. In dit bestand zijn alle functies gedefinieerd die nodig zijn voor de analysemethode van een houtverbinding met vier afschuifvlakken. 'MSP.py' is dus een bestand met een verzameling van functies die volledig in dienst staan van de uitbreiding. Figuur 5-2 weergeeft een overzicht van al deze functies in 'MSP.py'. De gedefinieerde functies en kunnen hierbij onderverdeeld worden in drie groepen. Groep A verzamelt de functies die nodig zijn om de berekening en controles op te stellen. Vervolgens is groep B enkel de functie die de berekening uitvoert. Ten slotte verzamelt groep C alle functies die de controles uitvoeren. In Bijlage A: Volledige codes van de functies gedefinieerd in 'MSP.py' zijn de volledige codes van deze functies uit 'MSP.py' toegevoegd.

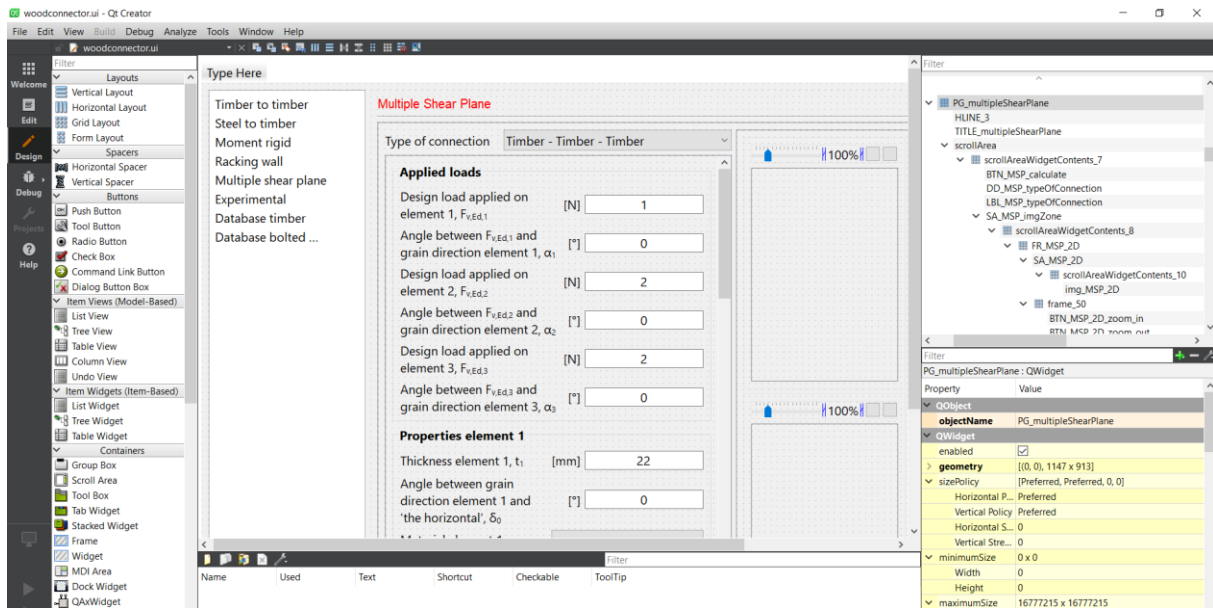
```

1  import numpy as np
2
3  from files.database import *
4  def conn_MSP_axialWithdrawalCapacity(f_u, d, D_w, d_w, rho_k, fc90k):...
20
21 def conn_MSP_momentYielding(f_u, d):...
25
26 def conn_MSP_alpha12(f_vEd1, theta0, alpha1):...
32
33 def conn_MSP_alpha23(f_vEd1, theta0, alpha1, f_vEd2, theta12, alpha2):...
41
42 def conn_MSP_phi12(theta0, alpha12):...
46
47 def conn_MSP_phi21(theta0, theta12, alpha12):...
51
52 def conn_MSP_phi23(theta0, theta12, alpha23):...
56
57 def conn_MSP_phi32(theta0, theta12, theta23, alpha23):...
61
62 def conn_MSP_embedmentStrengthTimber(rho_k, d, phi):...
74
75 def conn_MSP_embedmentStrengthSteel(f_s, t, d, p):...
94
95 def conn_MSP_lateralResistance_SP12(fh1k, fh2k, t1, t2, d, MyRk, fax_t_k, k_rp1, k_rp2):...
118
119 def conn_MSP_lateralResistance_SP23(fh23ak, fh23bk, fh32ak, fh32bk, t2, t3, d, MyRk, fax_t_k, k_rp1, k_rp2):...
151
152 def conn_MSP_lateralResistance(fvk12_A, fvk12_B, fvk12_C, fvk12_D, fvk12_E, fvk12_F, fvk12_G, fvk23_A, fvk23_B, fvk23_C,
153     fvk23_D, fvk23_E, fvk23_F, fvk23_G):...
197
198 def conn_MSP_charToDes(fvk, n0, n90, kmod1, kmod2, gamma_m):...
201
202 def conn_MSP_stiffness(idx_type, rho_m1, rho_m2, d):...
209
210 def conn_MSP_calculate(idx_type, f_vEd1, theta0, alpha1, f_vEd2, theta12, alpha2, theta23, k_rp2, f_u, d, D_w, d_w,
211     rho_k1, rho_k2, rho_k3, rho_m1, rho_m2, rho_m3, f_s2, t1, t2, t3, fc90k1, n0, n90, kmod1, kmod2,
212     kmod3, gamma_m):...
303
304 def conn_MSP_checkSpacing(idx_fastener, a1, a2, a3c, a3t, a4c, a4t, d):...
348
349 def conn_MSP_checkEqui(f_vEd1, theta0, alpha1, f_vEd2, theta12, alpha2, f_vEd3, alpha3, theta23):...
364
365 def conn_MSP_checkBolt(d, d_head, t1, D_w, t_w):...
389
390 def conn_MSP_checkExtra(n0, n90, idx_type, t1, t2, t3, d, rho_k1, rho_k2, rho_k3):...
417
  
```

The code is grouped into three sections marked with orange dashed boxes and letters A, B, and C on the right side of the image. Group A (lines 4-197) contains functions for capacity, yielding, alpha, phi, embedment strength, and lateral resistance. Group B (lines 202-212) contains the main calculation function. Group C (lines 304-390) contains functions for spacing, equilibrium, bolt, and extra checks.

Figuur 5-2: Overzicht van de gedefinieerde functies in 'MSP.py', onderverdeeld in drie groepen

Vervolgens is 'woodconnector\_ui.py' een tweede belangrijke Pythonbestand die te bespreken is voor de uitbreiding in WoodConnector. De code in dit bestand is verantwoordelijk voor de opbouw van de interface die de ontwerper te zien krijgt en waarin hij de ontwerpparameters van de houtverbinding moet invullen of aanduiden. Dit bestand is dus voor te stellen als de input-blok uit Figuur 4-1. Vervolgens valt op te merken dat de code voor deze interface niet zelf uitgeschreven is in een Pythonbestand, maar gegenereerd is door de interface op te bouwen in Qt Creator, een andere IDE. Dit is een computersoftware die applicatieontwikkelaars een platform aanbiedt dat hen ondersteunt bij het ontwikkelen van applicaties. In Qt Creator is dus een interface als een applicatie opgebouwd en opgeslagen als een UI-bestand. Vervolgens toont Figuur 5-3 deze interface in opbouw.



Figuur 5-3: Momentopname van de opbouw van de interface/applicatie van WoodConnector in Qt Creator

Voor de interface van WoodConnector was er al een origineel UI-bestand beschikbaar. Vervolgens is in dit bestand een tabblad toegevoegd, die in Figuur 5-3 afgebeeld is, speciaal voor de analyse van verbindingen met meerdere afschuifvlakken. Daarna is het nieuwe UI-bestand, uitgebreid met het tabblad voor de analysemethode, in het project van WoodConnector gezet. In dit project wordt het UI-bestand dan geconverteerd naar een Pythonbestand, wat dus in 'woodconnector\_ui.py' resulteert. Dit bestand was er dus al in het originele project van WoodConnector, maar beschikt na de conversie dus ook over een implementatie van de analysemethode, voor verbindingen met meerdere afschuifvlakken, in de interface van WoodConnector. Figuur 5-4 weergeeft het eerste deel van de code van 'woodconnector\_ui.py'. Meer van deze code tonen is niet relevant voor deze scriptie.

```

2
3 # Form implementation generated from reading ui file 'woodconnector.ui'
4 #
5 # Created by: PyQt5 UI code generator 5.15.6
6 #
7 # WARNING: Any manual changes made to this file will be lost when pyuic5 is
8 # run again. Do not edit this file unless you know what you are doing.
9
10
11 from PyQt5 import QtCore, QtGui, QtWidgets
12
13
14 class Ui_MainWindow(object):
15     def setupUi(self, MainWindow):
16         MainWindow.setObjectName("MainWindow")
17         MainWindow.resize(1426, 1000)
18         MainWindow.setMinimumSize(QtCore.QSize(0, 0))
19         font = QtGui.QFont()
20         font.setPointSize(12)
21         font.setBold(False)
22         MainWindow.setFont(font)
23         MainWindow.setLocale(QtCore.QLocale(QtCore.QLocale.English, QtCore.QLocale.Belgium))
24         self.centralwidget = QtWidgets.QWidget(MainWindow)
25         self.centralwidget.setObjectName("centralwidget")
26         self.gridLayout = QtWidgets.QGridLayout(self.centralwidget)
27         self.gridLayout.setObjectName("gridLayout")
28         self.SW_interface = QtWidgets.QStackedWidget(self.centralwidget)
29         self.SW_interface.setObjectName("SW_interface")

```

Figuur 5-4: Eerste deel van de code van 'woodconnector\_ui.py'

Het derde te vermelden Pythonbestand is 'database.py'. Dit bestand was al in het project van WoodConnector aanwezig en had geen aanpassingen of uitbreidingen nodig ten gevolge van de implementatie van de analysemethode, maar was wel een belangrijk bestand om rekening mee te houden tijdens deze implementatie. In dit bestand zijn er namelijk lijsten aanwezig die meerdere materiaal-, sterkte- of geometrische eigenschappen koppelen aan het bijhorend product. De analysemethode is hierbij gekoppeld aan de lijst 'dtb\_timber', die vervolgens verschillende structurele houtsoorten koppelen aan hun bijhorende sterkte- en materiaaleigenschappen. Het grote voordeel bij het gebruik van deze database is dat de ontwerper niet alle benodigde materiaaleigenschappen van de houten onderdelen zal moeten opzoeken om in te geven in de interface. In plaats daarvan moet hij enkel de structurele houtsoort van het desbetreffende element aanduiden in de interface. Figuur 5-5 toont het eerste deel van de lijst die dient als database voor verschillende structurele houtsoorten. In Bijlage B: Volledige code van de database voor hout in 'database.py' is de volledige versie van deze lijst terug te vinden.

```

1 dtb_timber =
2     # Column 0: f_m,k      characteristic bending strength
3     # Column 1: f_t,0,k   characteristic tensile strength parallel to the grain
4     # Column 2: f_t,90,k  characteristic tensile strength perpendicular to the grain
5     # Column 3: f_c,0,k   characteristic compressive strength parallel to the grain
6     # Column 4: f_c,90,k  characteristic compressive strength perpendicular to the grain
7     # Column 5: f_v,k     characteristic longitudinal shear strength out of plane
8     # Column 6: f_r,k     characteristic rolling shear strength
9     # Column 7: E_0,mean  mean modulus of elasticity parallel to the grain
10    # Column 8: E_0,05
11    # Column 9: E_90,mean  mean modulus of elasticity perpendicular to the grain
12    # Column 10: E_90,05
13    # Column 11: G_mean
14    # Column 12: rho_k     characteristic density
15    # Column 13: rho_mean  mean density
16    # Column 14: gamma_m   partial safety factor
17    # Column 15: kc90     load arrangement factor
18    # Column 16:          indicates the type of timber
19    #                      - 100: solid timber
20    #                      - 1: Glulam
21    # Column 17:          indicates if the property is a default material
22    # -----
23    'C14': [14, 7.2, 0.4, 16, 2, 3, 0, 7000, 4700, 230, 0, 440, 290, 350, 1.3, 1.25, 100, 0],
24    'C16': [16, 8.5, 0.4, 17, 2, 3.2, 0, 8000, 5400, 270, 0, 500, 310, 370, 1.3, 1.25, 100, 0],
25    'C18': [18, 10, 0.4, 18, 2.2, 3.4, 0, 9000, 6000, 300, 0, 560, 320, 380, 1.3, 1.25, 100, 0],
26    'C20': [20, 11.5, 0.4, 19, 2.3, 3.6, 0, 9500, 6400, 320, 0, 590, 330, 400, 1.3, 1.25, 100, 0],
27    'C22': [22, 13, 0.4, 20, 2.4, 3.8, 0, 10000, 6700, 330, 0, 630, 340, 410, 1.3, 1.25, 100, 0],
28    'C24': [24, 14.5, 0.4, 21, 2.5, 4, 0, 11000, 7400, 370, 0, 690, 350, 420, 1.3, 1.25, 100, 0],

```

Figuur 5-5: Eerste deel van lijst 'dtb\_timber' in 'database.py'

Ten slotte is 'main.py' het laatste en belangrijkste Pythonbestand in WoodConnector, want dit bestand maakt de nodige koppelingen tussen andere Pythonbestanden van het project. Dit bestand komt dus in principe overeen met de verbindingspijlen uit Figuur 4-1. In dit bestand zijn alle bijkomende functies gedefinieerd die nodig zijn voor de koppelingen te maken bij de implementatie van de analysemethode. In het project was 'main.py' dus al een origineel bestand, maar is vervolgens verder uitgebreid door de implementatie. Figuur 5-6 weergeeft een overzicht van de coderegels in 'main.py', waarbij de nieuwe functies die nodig waren voor de implementatie een groene asterisk gekregen hebben. In Bijlage C zijn de volledige codes van die functies uit 'main.py' toegevoegd.

```

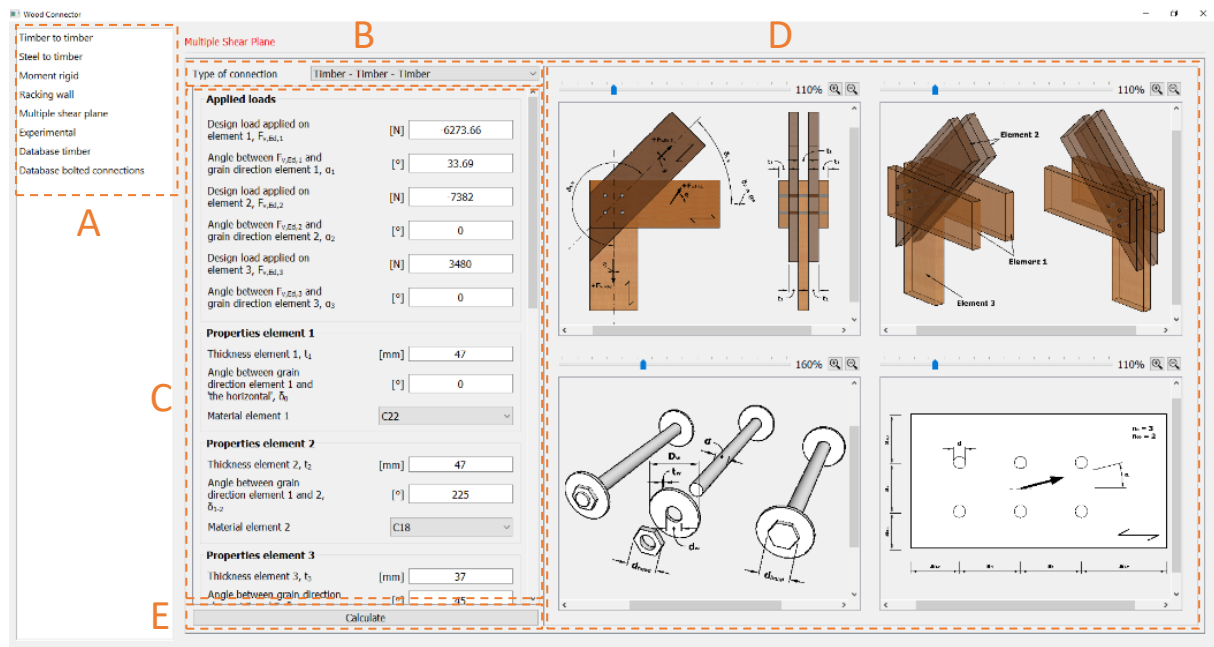
main.py x MSP.py x database.py x woodconnector_ui.py x
1 # (1) create main_window_ui.py file by running in Terminal:
2 #   pyuic5 -o files/woodconnector_ui.py woodconnector.ui
3 #   pyuic5 -o dialogs/dlg_results_ui.py dialogs/dlg_results.ui
4 #   "C:\Users\Berend De Norre\AppData\Local\Programs\Python\Python39\Scripts\pyuic5.exe" -o "C:\Users\Berend De Norre
5 # (2) create rsc_resources.py file by running ... in Terminal:
6 #   pyrcc5 -o sources/sources_woodconnector_rc.py sources/sources_woodconnector.qrc
7
8 # from widgets.mplwidget import MPLWidget
9
10 import sys
11 import numpy as np
12
13 from io import StringIO
14 from dialogs.dlg_results import Dialog_results as dlg_results
15 from files.MSP import * *
16 from files.woodconnector_ui import Ui_MainWindow
17 from files.database import *
18 from files.validators import *
19 from files.calculate_connections import *
20 from files.general_functions import *
21 from files.experimental import *
22 from files.HSB import *
23
24 from PyQt5.QtWidgets import (QApplication, QMainWindow, QTableWidgetItem)
25
26
27 class Window(QMainWindow, Ui_MainWindow):...
1132
1133
1134 if __name__ == "__main__":
1135     self = QApplication(sys.argv)
1136     win = Window()
1137     win.show()
1138     sys.exit(self.exec_())
27 class Window(QMainWindow, Ui_MainWindow):
28     def __init__(self, parent=None):...
47
48     def css_experimental(self):...
69
70     def css_msp(self):... *
120
121     def css_rw(self):...
156
157     def css_ttt(self):...
277
278     def connect_signals_slots(self):... *
298
299     def changeSelection(self):...
305
306     def disp_dtb_bolts(self):...
344
345     def disp_dtb_timber(self):...
371
372     def execute_msp(self):... *
560
561     def execute_rw(self):...
721
722     def execute_ttt(self):...
800
801     def rw_set_kmod(self):...
813
814     def msp_set_kmod(self):... *
837
838     def rw_set_detail_images(self, scale=1):...
858     def set_up_database(self):...
863
864     def set_up_drawings(self):...
886
887     def set_up_dropdowns(self):... *
902
903     def set_up_tables(self):...
908
909     def set_up_tabs(self):... *
918
919     def set_up_tab_rw(self):...
969
970     def set_up_tab_rw_connector(self):...
984
985     def set_up_tab_msp(self):... *
921
922     def set_up_tab_msp_fastener(self):... *
937
938     def set_up_tab_ttt(self):...
946
947     def tbl_dtb_bolts(self):...
974
975     def tbl_dtb_timber(self):...
102
103     def tbl_exp_overview(self):...

```

Figur 5-6: Overzicht van de coderegels in 'main.py'

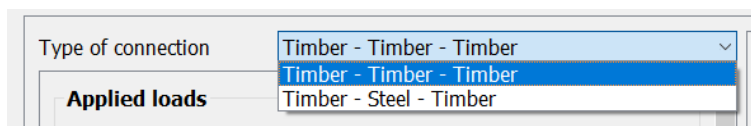
## 5.2 Interface

Figuur 5-7: toont de interface van het tabblad in WoodConnector voor de analyse van houtverbindingen met meerdere afschuifvlakken. Dit is het beeld van de applicatie na het ‘runnen van main.py in de Python Console’. In dit geval zijn ook de ontwerpparameters ingegeven van de vierde configuratie uit sectie 4.2. In deze interface zijn er vijf zones te onderscheiden.



Figuur 5-7: Overzicht tabblad voor de analyse van houtverbindingen met meerdere afschuifvlakken in WoodConnector

Zone A is het keuzemenu van WoodConnector, waarin de ontwerper kan kiezen welke soort houtverbinding hij wil laten berekenen door deze software. Bij het klikken op ‘Multiple shear plane’ in zone A, zal dus het tabblad voor de analyse van houtverbindingen met meerdere afschuifvlakken verschijnen. Vervolgens moet de ontwerper in zone B aanduiden of deze verbinding een hout-op-hout- of staal-op-houtverbinding is, door middel van een keuzebalk. Deze aanduiding heeft natuurlijk invloed op de berekening in de software, maar zorgt ook voor wijzigingen in de weergave van zone C en D. Figuur 5-8 geeft een beeld van de keuzebalk voor het aanduiden van het verbindingstype.



Figuur 5-8: Keuzebalk verbindingstype

Zone C is het inputveld van deze interface en is volledig weergegeven in Figuur 5-9, wanneer de verbinding een hout-op-houtverbinding met bouten als verbindingsmiddel is. In Figuur 5-7 is dit veld niet volledig zichtbaar, maar door verticaal te schuiven met de schuifbalk aan de rechterzijde van dit veld is het mogelijk om alle benodigde ontwerpparameters aan te duiden of in te vullen. Ook is er steeds links van de lege cellen, voor de in te vullen parameters, een eenheid gegeven. Verder zijn deze parameters in zeven groepen verdeeld, waarbij deze groepen steeds een titel in het vetgedrukt krijgen, zodat de ontwerper overzicht kan blijven bewaren over deze gegevens. De eerste groep bundelt de in te vullen gegevens van de krachten die opgelegd zijn aan de elementen van de verbinding. Daarna volgen drie groepen die telkens de eigenschappen verzamelen van één van de

drie elementen. De geometrische eigenschappen van het element zijn hierbij in te vullen, maar de benodigde materiaaleigenschappen van het houten element niet. De software zal zelf uit zijn database deze materiaaleigenschappen selecteren, na dat de ontwerper de structurele houtsoort via de daarvoor voorziene keuzebalk aanduidt. De vijfde groep ontwerpparameters bestaat uit de in te vullen eigenschappen van het gekozen type verbindingsmiddel, wat dus bouten of deuvels kunnen zijn. Voor deze keuze is ook weer een keuzebalk voorzien in deze groep. Vervolgens is er een zesde groep parameters gebundeld, die samen de geometrie van de totale verbinding bepalen. In de zevende groep zijn ten slotte de modificatie- en veiligheidsfactoren verzameld. Hierbij kan de ontwerper de modificatiefactoren invullen, of zal WoodConnector deze factoren automatisch invullen wanneer de ontwerper de klimaat- en belastingduurklasse aanduidt.

The figure shows three panels of the software interface for a timber-timber-timber connection using bolts. The first panel, 'Applied loads', includes design loads for three elements and their orientations. The second panel, 'Properties element 3' and 'Properties fastener', details the dimensions and material of the third element and the bolt. The third panel, 'Geometry connection' and 'Modification- and safety factors', defines the fastener layout and safety parameters.

Figuur 5-9: Volledig inputveld van de interface, bij een hout-op-houtverbinding met bouten als verbindingsmiddelen

Wanneer de ontwerper vervolgens het verbindingstype zou wijzigen naar een staal-op-houtverbinding, gaan bepaalde delen van het inputveld ook automatisch wijzigen, omdat de verschillende verbindingstypes niet exact dezelfde ontwerpparameters nodig hebben. Enkel de benodigde parameters zullen dus zichtbaar zijn voor de ontwerper. Figuur 5-10 toont de twee groepen die licht wijzigen na de keuze voor staal-op-houtverbindingen. Deze keuze heeft vooral invloed op de ontwerpparameters van element 2, want die zal vervolgens uit staal bestaan. De eerste wijziging is het verdwijnen van de materiaalkeuze voor de structurele houtsoort van element 2. Ter vervanging moet de ontwerper hier de stuiksterkte van de staalplaat invullen. De tweede wijziging is het verdwijnen van de modificatiefactor voor element 2, omdat deze factor enkel geldig is voor houten materialen en dus niet voor de staalplaat.

The figure shows two panels of the software interface for a steel-on-timber connection. The first panel, 'Properties element 2', shows the thickness, angle, and embedment strength of the steel plate. The second panel, 'Modification- and safety factors', shows the service class, load-duration class, and safety factors.

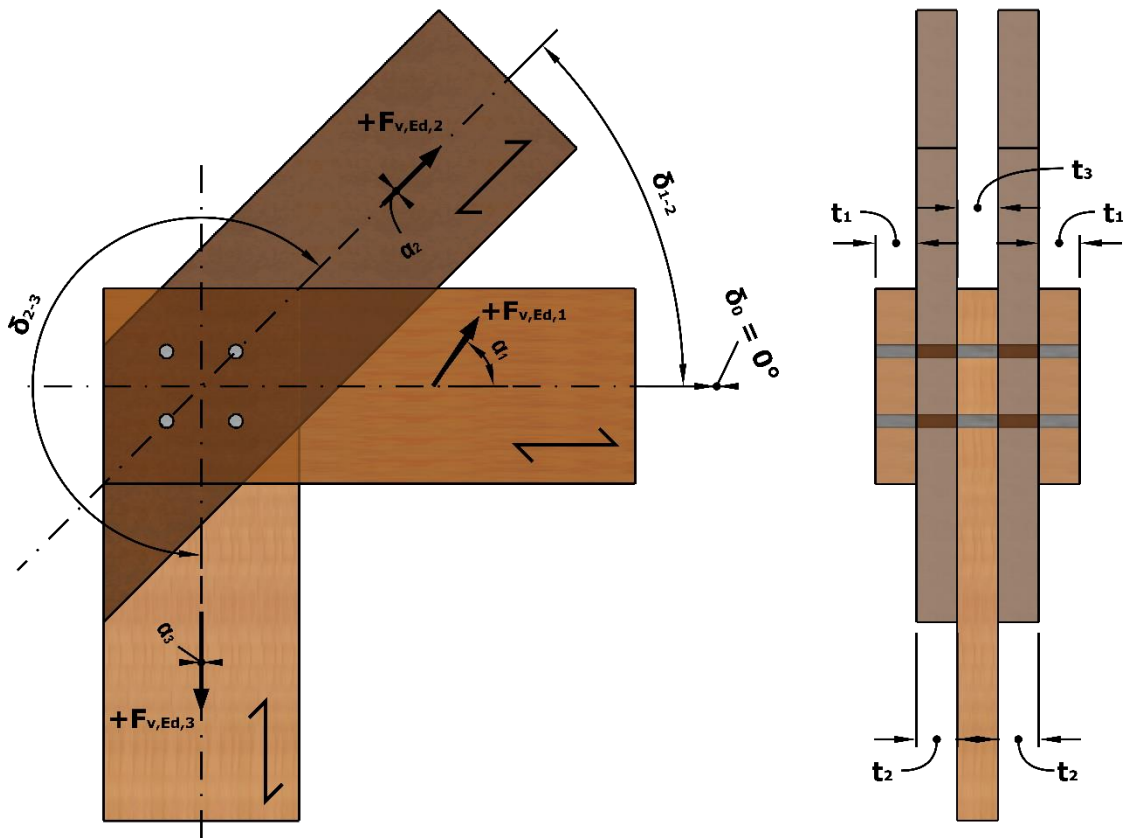
Figuur 5-10: Gewijzigde ontwerpparametergroepen na de keuze voor staal-op-houtverbindingen

Het wijzigen van bouten naar deuvels gaat ook gepaard met een reductie van benodigde ontwerpparameters in de groep van de eigenschappen van het verbindingsmiddel. In Figuur 5-11 is het gevolg van deze wijziging afgebeeld, waarbij de in te vullen afmetingen van de boutkop en sluitring niet meer zichtbaar zijn voor de ontwerper.

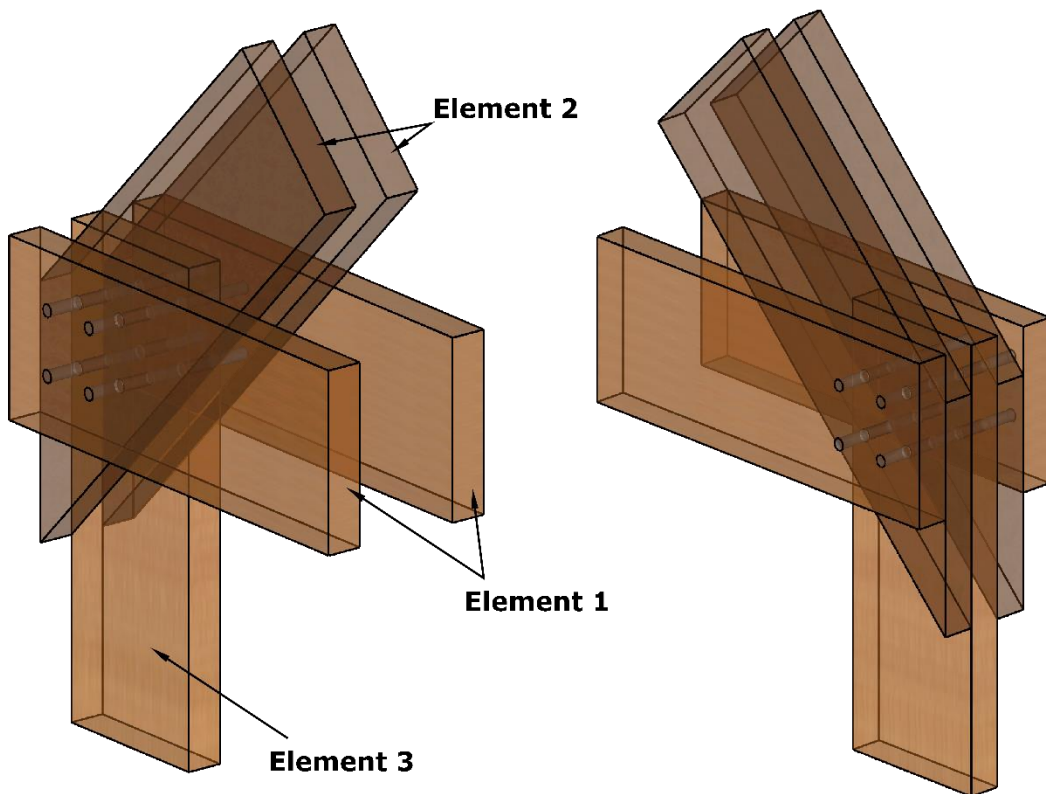
Proprieties fastener	
Type of fastener	Dowel
Characteristic tensile strength of the fastener, $f_{u,k}$	[MPa] 400
Diameter, d	[mm] 12

Figuur 5-11: Groep ontwerpparameters voor deuvels als verbindingsmiddelen

Vervolgens zijn er in zone D vier afbeeldingen weergegeven, zoals getoond in Figuur 5-7. Het doel van deze zone is het visualiseren van de ontwerpparameters van de verbindingsconfiguraties, zodat die voor de ontwerper duidelijk zijn. Dit is een belangrijke toevoeging in WoodConnector, die nog ontbrak ten opzichte van het Excelbestand. Bij elke afbeelding zijn er daarom ook schuifbalken en knoppen beschikbaar die kunnen in- en uitzoomen op de afbeelding, samen met horizontale en verticale schuifbalken om in de afbeelding te kunnen verschuiven. In de eerste rij van zone E zijn twee afbeeldingen weergegeven van een verbindingsconfiguratie, met aanduiding van de ontwerpparameters die in de eerste vier parametergroepen van het inputveld in te vullen zijn. De afbeelding links in de eerste rij is een 2D-weergave van deze configuratie en de afbeelding rechts is een 3D-weergave. Deze twee afbeeldingen wijzigen afhankelijk van de keuze tussen een hout-op-hout- of staal-op-houtverbinding. Bij een hout-op-houtverbinding zal Figuur 5-12 weergegeven zijn als de linker afbeelding van de eerste rij en Figuur 5-13 als de rechter afbeelding. Bij een staal-op-houtverbinding daarentegen zal Figuur 5-14 weergegeven zijn als de linker afbeelding van de eerste rij en Figuur 5-15 als de rechter afbeelding. In de tweede rij weergeeft de linkse afbeelding het gekozen verbindingsmiddel, met aanduiding van de ontwerpparameters die in de vijfde groep van het inputveld in te vullen zijn. Bij bouten als verbindingsmiddelen zal Figuur 5-16 weergegeven zijn als deze afbeelding, en bij deuvels zal Figuur 5-17 weergegeven zijn. In de tweede rij weergeeft de rechtse afbeelding, die getoond is in Figuur 5-18, een geometrie van de totale verbinding met aanduiding van de ontwerpparameters die in de zesde groep van het inputveld in te vullen zijn. Deze laatste afbeelding is voor elke verbindingsconfiguratie van toepassing.

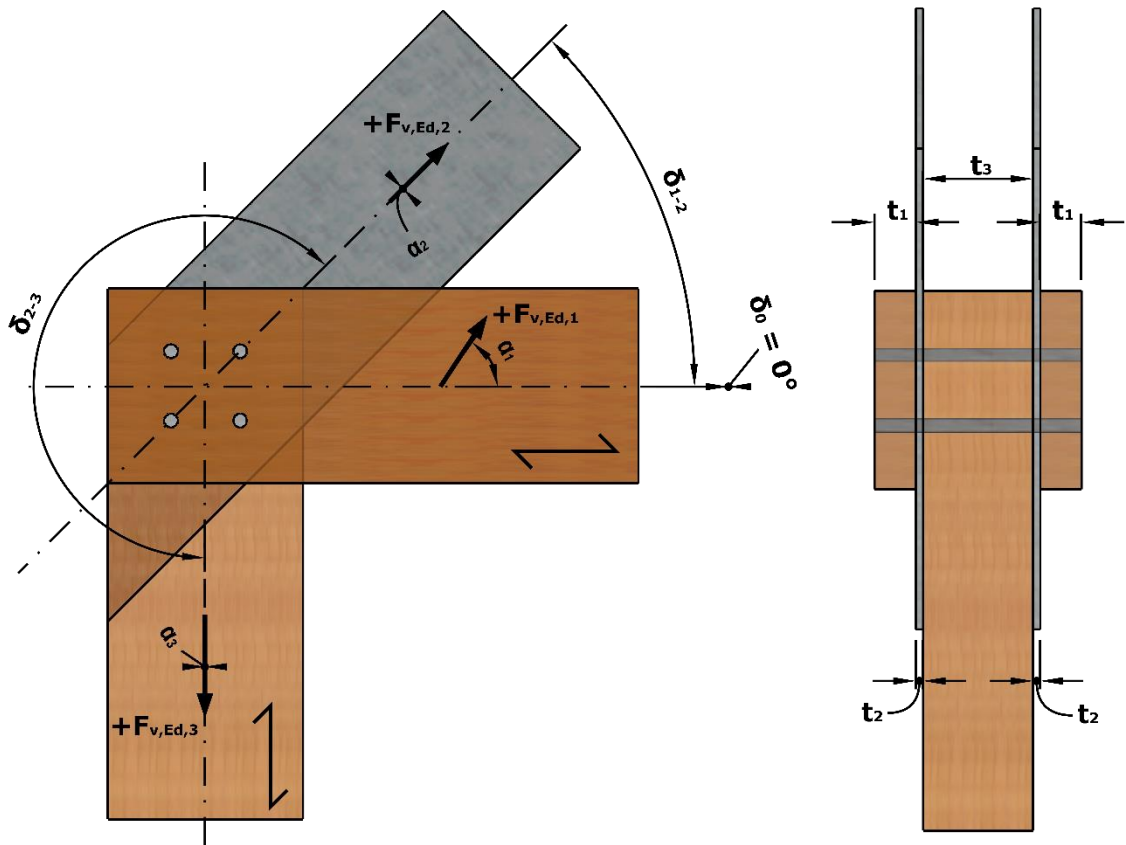


Figuur 5-12: 2D-weergave van een hout-op-houtverbinding met vier afschuifvlakken in de interface van WoodConnector

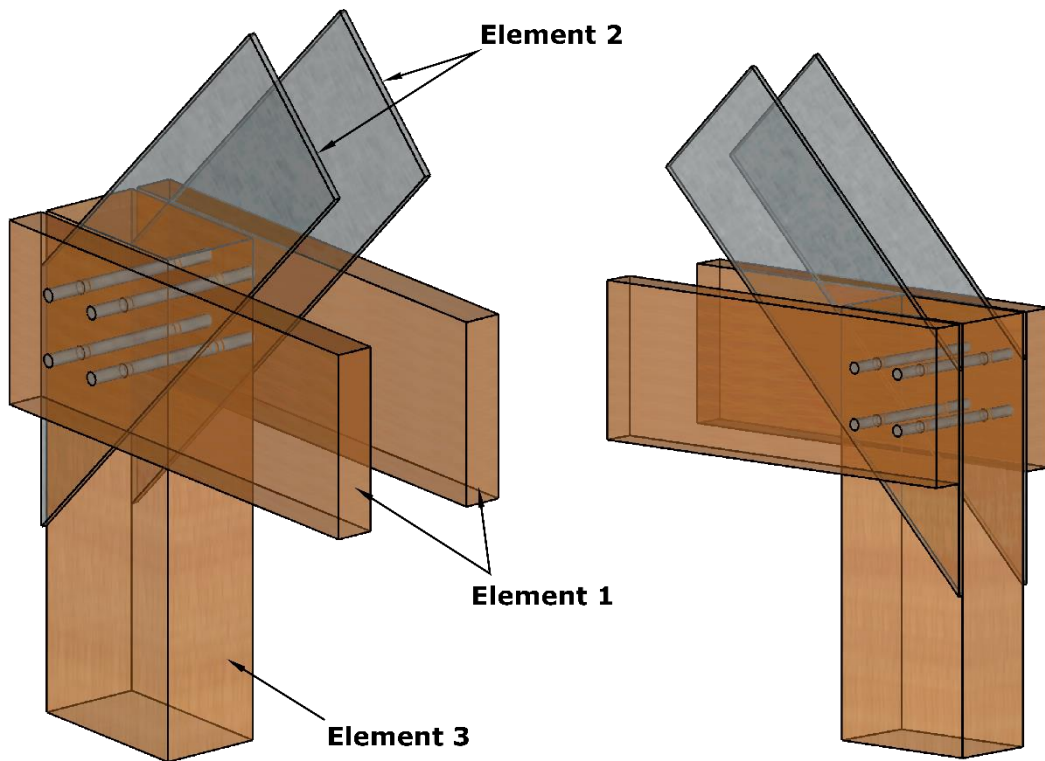


Figuur 5-13: 3D-weergave van een hout-op-houtverbinding met vier afschuifvlakken in de interface van WoodConnector

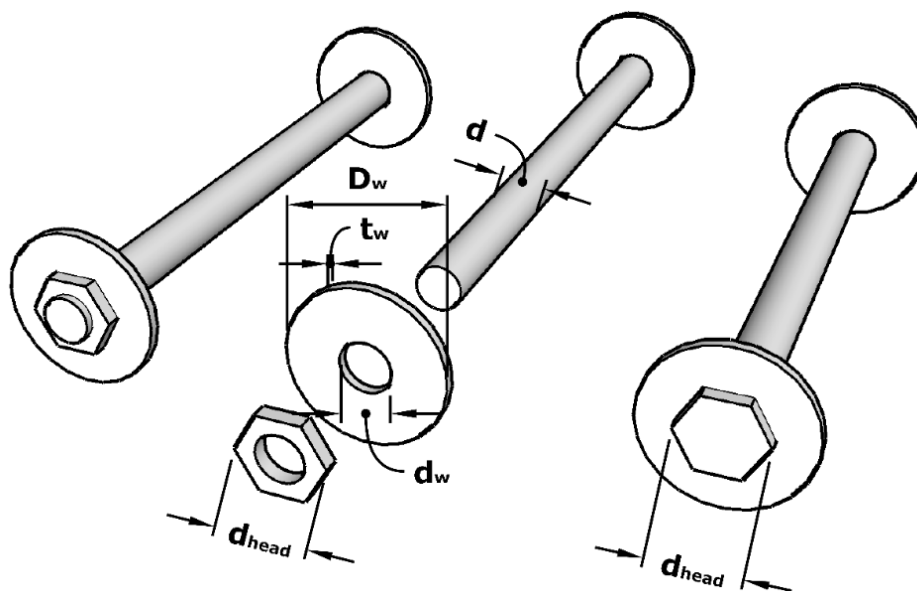




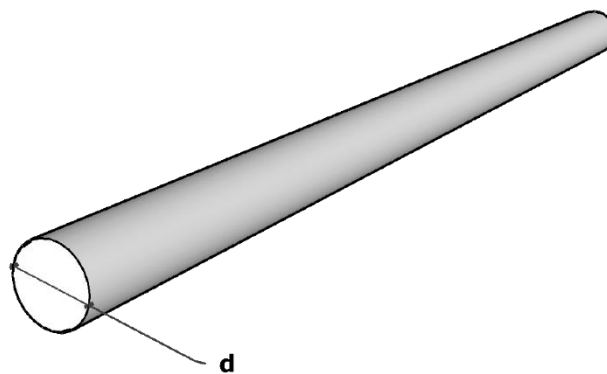
Figuur 5-14: 2D-weergave van een staal-op-houtverbinding met vier afschuifvlakken in de interface van WoodConnector



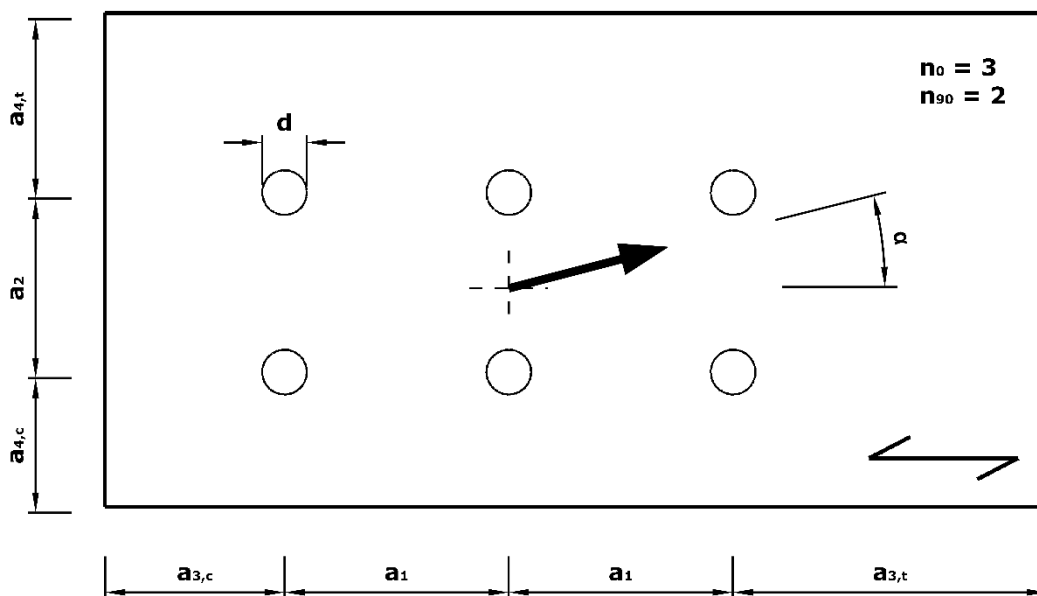
Figuur 5-15: 3D-weergave van een staal-op-houtverbinding met vier afschuifvlakken in de interface van WoodConnector



Figuur 5-16: 3D-weergave van een groep bouten in de interface van WoodConnector

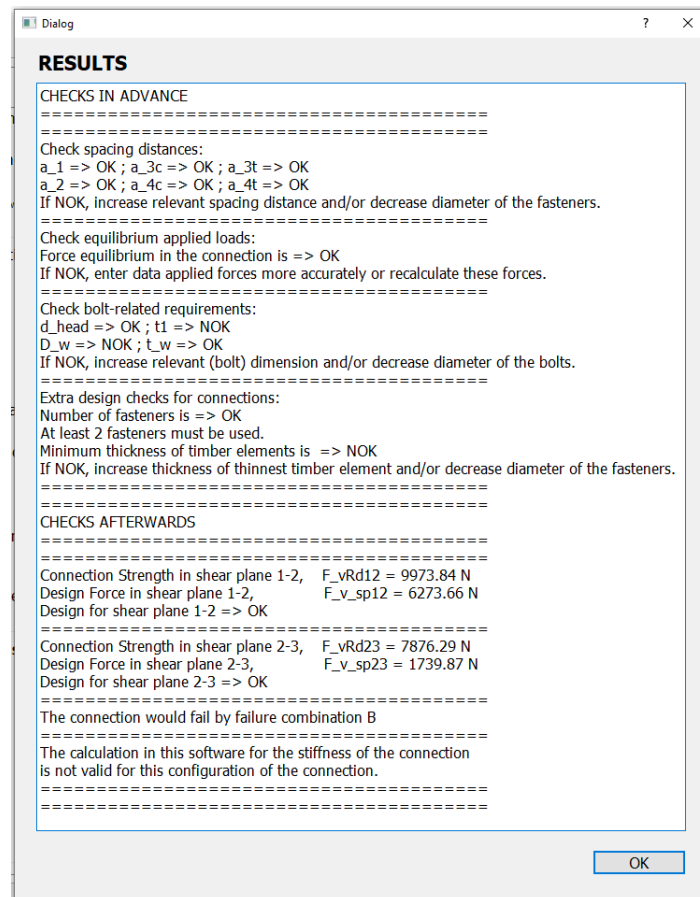


Figuur 5-17: 3D-weergave van een deugel in de interface van WoodConnector



Figuur 5-18: 2D-weergave van een geometrie van de totale verbinding in de interface van WoodConnector

Ten slotte staat in zone E één knop, waarop de ontwerper moet klikken om de analyse van de ingegeven verbinding met vier afschuifvlakken te laten uitvoeren door de software. Vervolgens weergeeft Figuur 5-19 het pop-upvenster waarin de resultaten staan van deze analyse. Merk op dat deze resultaten overeenkomen met die van de twee outputvelden uit Figuur 4-9 en Figuur 4-10. Dit venster komt dus in principe overeen met de output-blok uit Figuur 4-1.



Figuur 5-19: Pop-upvenster met resultaten van de analyse in WoodConnector

In dit pop-upvenster is een onderscheid gemaakt tussen de controle voor- en achteraf. De controle vooraf zijn de controles van enkele ontwerpparameters en komt dus overeen met het eerste outputveld uit de analysemethode in Excel. In het venster is wel nog bijkomend ontwerpadvies gegeven en zal er geen controle zijn van ontwerpparameters voor bouten bij toepassing van deuvels als verbindingsmiddelen. De controle achteraf bestaat uit de controles van de laterale ontwerpsterktes van de afschuifvlakken, wat overeenkomt met het tweede outputveld uit de analysemethode in Excel. In het venster is wel nog bijkomend vermeld bij welke bezwijkcombinatie, volgens prEC5, de ingegeven verbindingconfiguratie zou falen. Voor de stijfheid van de verbinding is er ook de verschuivingsmodulus van de volledige verbinding in GGT en UGT berekend, maar zullen enkel zichtbaar zijn in het venster voor verbindingen waarvan de houtvezelrichting van de elementen en de richting van de opgelegde krachten parallel ( $\alpha = 0^\circ$ ) zijn ten opzichte van elkaar. Daarnaast geeft de software in geen enkel geval een plot van een berekende slipkromme, wat het Excelbestand dus wel doet.

## 6. Validatie analysemethode

De laatste stap van deze masterproef was het valideren van de opgestelde analysemethode voor verbindingen met vier afschuifvlakken. De validatie start met een eerste vergelijking tussen de resultaten uit de vier voorbeeldoefeningen en de resultaten uit de analysemethode, waarin dezelfde configuratie als de oefeningen ingevuld zijn. Vervolgens is er een eerste reeks van negen testresultaten, uitgevoerd door Rossi [16], vergeleken met de resultaten van de berekening, van de laterale verbindingsterkte en de stijfheid van dezelfde verbindingen, uit de analysemethode. Daarna zijn er nog 15 testresultaten, uitgevoerd door Sawata [17], geanalyseerd om verbanden tussen de ontwerpparameters van de verbinding en de berekende laterale verbindingsterkte te onderzoeken, en als extra validatie. In totaal is de opgestelde analysemethode dus gevalideerd aan de hand van 32 verschillende verbindingconfiguraties, waarbij elk resultaat uit het Excelbestand exact hetzelfde is als uit WoodConnector. Ten slotte is er een vergelijking gemaakt tussen de laterale ontwerpsterkte volgens de opgestelde analysemethode en volgens de Amerikaanse analysemethode uit sectie 3.4.1. Uit deze vergelijking valt af te leiden of de Amerikaanse methode te conservatief is of niet.

### 6.1 Validatie via voorbeeldoefeningen

De vier voorbeeldoefeningen hebben geholpen met het opstellen van de analysemethode in Excel, maar hebben tegelijkertijd deze methode ook helpen valideren. Tabel 6-1 toont de berekende verbindingsterktes en bezwijkcombinatie bij falen van de vier verbindingconfiguraties uit de voorbeeldoefeningen, volgens de opgestelde analysemethode en hun eigen bron.  $F_{v,Rd,sp,1-2}$  en  $F_{v,Rd,sp,2-3}$  zijn de laterale ontwerpsterktes van het afschuifvlak tussen respectievelijk element 1 en 2 en element 2 en 3. Vervolgens is ook de laterale ontwerpsterkte van de volledige verbinding  $F_{v,Rd}$  gegeven voor de configuraties waarbij dit mogelijk is. Ook is steeds de bezwijkcombinatie bij falen van de verbinding vermeld, die een belangrijke factor speelt bij de berekening van de laterale ontwerpsterkte.

Tabel 6-1: Berekende laterale verbindingsterktes en bezwijkcombinatie bij falen van de vier verbindingconfiguraties uit de voorbeeldoefeningen, volgens de analysemethode in WoodConnector en COST

Configuratie	Bron	$F_{v,Rd,sp,1-2}$ [kN]	$F_{v,Rd,sp,2-3}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]	Beziijkcombinatie volgens prEC5
1	WoodConnector	14,66	18,29	65,90	C
	COST	14,18	19,08	66,52	C
2	WoodConnector	142,94	153,60	593,08	F
	COST	139,09	178,25	634,67	C
3	WoodConnector	3,76	3,05	/	B
	P&K	3,76	3,05	/	B
4	WoodConnector	9,97	7,88	/	B
	P&K	9,97	7,88	/	B

Na een vergelijking van deze resultaten in Tabel 6-1 zijn de volgende zaken op te merken:

- In configuratie 1 is een zeer licht verschil te merken tussen de resultaten uit WoodConnector en COST, die te wijten is aan vergelijkingen (2-2) en (2-3). Deze vergelijkingen uit prEC5 zijn in WoodConnector toegepast, maar die verschillen met de vergelijkingen die gebruikt zijn in de voorbeeldoefening. In COST zijn namelijk de vergelijkingen uit EC5 voor de laterale sterkte van een individueel verbindingsmiddel bij een staal-op-houtverbinding toegepast. Dit verschil tussen de toegepaste vergelijkingen is al eerder vermeld in sectie 2.3.1.

- De resultaten in configuratie 2 verschillen om dezelfde reden als configuratie 1, maar ook door een combinatie van twee bijkomende redenen, waardoor ook de bezwijkcombinaties verschillen. De eerste bijkomende reden is dat in COST de analyseprocedure om de deuveffectbijdrage van de bezwijkcombinaties te bepalen verschilt met die van Figuur 3-10, toegepast in de methode in WoodConnector. In COST is er geen halvering van de elementdiktes bij de berekening van de bezwijkmechanismen in het afschuifvlak tussen element 2 en 3, terwijl dit in de methode in WoodConnector dus wel gebeurt. Waarom COST deze halvering niet uitvoert, is in het document zelf geen reden voor gegeven. De tweede bijkomende reden is dat in COST de koordeffectbijdrage voor elk afschuifvlak ingerekend is, omdat hier verondersteld is dat bezwijkcombinatie C het falen van de verbinding veroorzaakt. Er is hierbij geen rekening gehouden dat bij bezwijkcombinatie F de koordeffectbijdrage enkel voor het afschuifvlak tussen element 1 en 2 in te rekenen is, wat de methode in WoodConnector dus wel doet. Het gevolg is dat de laterale sterkte van configuratie 2 bij bezwijkcombinatie F lager is dan bij C in de methode in WoodConnector, waardoor F het falen van de verbinding bepaald.

Hierbij valt nog op te merken dat het inrekenen van de koordeffectbijdrage volgens de opgestelde analysemethode in WoodConnector niet de enigste juiste methode moet zijn. Voor bijvoorbeeld bezwijkcombinatie F is in WoodConnector dus geen koordeffectbijdrage ingerekend voor het afschuifvlak tussen element 2 en 3, omdat bezwijkmechanisme (a) zich daar ontwikkelt, maar wel voor het afschuifvlak tussen element 1 en 2, omdat bezwijkmechanisme (d) zich daar ontwikkelt. In principe kan er ook geredeneerd worden dat wanneer in het afschuifvlak tussen element 1 en 2 het koordeffect ontstaat en het verbindingsmiddel continu is over heel de verbinding, er ook een koordeffect ontstaat in het afschuifvlak tussen element 2 en 3. Deze redenering is niet in COST gegeven, maar is daar dus wel in toegepast. Het gevolg van de methode in WoodConnector is dat de totale laterale sterkte van de verbinding lager of gelijk is aan die uit de methode in COST, wat de methode in WoodConnector een veiligere optie maakt. Het zou een meerwaarde zijn voor prEC5 om te vermelden hoe de koordeffectbijdrage in te rekenen is voor verbindingen met meerdere afschuifvlakken, wat tot nu toe dus niet het geval is.

- In configuratie 3 en 4 komen de resultaten exact overeen, wat een gevolg is van het falen van de hout-op-houtverbinding bij bezwijkcombinatie B. Dit is te wijten aan de berekeningsprocedure bij hout-op-houtverbindingen om tot bezwijkcombinatie B te komen, die volgens EC5 (Porteous en Kermani) en prEC5 (WoodConnector) in principe hetzelfde zijn.
- Alle resultaten komen dus overeen, of verschillen zeer licht, daarom kan er gesproken worden van een eerste succesvolle validatie van de berekening van de laterale ontwerpsterktes van een stiftvormige houtverbinding met vier afschuifvlakken. Configuratie 1 en 2 valideren de staal-op-houtverbindingen, deuvelds en bouten als verbindingsmiddelen en balk-balkverbindingen. Configuratie 3 en 4 daarentegen valideren de hout-op-houtverbindingen, bouten als verbindingsmiddelen en vakwerk- en balk-kolomverbindingen.

## 6.2 Validatie via testresultaten van Rossi

### 6.2.1 Validatie berekening laterale sterkte

Rossi [16] voerde negen laboproeven uit op verbindingen met vier afschuifvlakken waarvan de testresultaten de berekening van de laterale verbindingsterkte uit de analysemethode van WoodConnector moeten helpen valideren. Tabel 6-2 weergeeft de vergelijking tussen de laterale sterkte van de volledige verbinding uit WoodConnector  $F_{v,Rk}$  en die uit de proeven  $F_T$ .

Tabel 6-2: Vergelijking laterale sterkte van de volledige verbinding volgens WoodConnector  $F_{v,Rk}$  en die uit de proeven  $F_T$

	$F_{v,Rk}$ [kN]	$F_T$ [kN]	$r_T$ [%]	Bezwijkcombinatie volgens prEC5
T2.1	26,97	30,7	12,14	A
T2.2	37,15	40,3	7,82	E
T2.3	37,15	40,5	8,27	E
T2.4	31,02	49,0	36,70	F
T2.5	41,19	47,1	12,54	C
T2.6	41,19	52,2	21,09	C
T2.7	37,69	44,9	16,05	G
T2.8	47,87	56,9	15,88	D
T2.9	47,87	76,4	37,35	D

Deze tabel toont eerst deze laterale sterktes. Vervolgens is de verhouding berekend tussen het verschil van deze laterale sterktes en de laterale sterkte uit de proeven ( $r_T = (F_T - F_{v,Rk})/F_T$ ), in percentage. Als laatste is in Tabel 6-2 ook vermeld onder welke bezwijkcombinatie de verbinding faalt, waarbij deze cel groen kleurt als de bezwijkcombinatie uit de berekening in WoodConnector overeenkomt met de bezwijkcombinatie die plaatsgevonden heeft in de laboproef. Als dit niet het geval is, kleurt deze cel rood.

Na een vergelijking van deze resultaten in Tabel 6-2 zijn de volgende zaken op te merken:

- Verhouding  $r_T$  is altijd een positief percentage, wat dus betekent dat de berekende laterale sterkte van de verbinding altijd kleiner is dan de experimenteel bepaalde laterale sterkte. Verder zijn in drie van de negen gevallen het percentage van de verhouding groter dan 20%, met twee uitschieters van ongeveer 37%. Dit verschil is te verklaren aan de karakteristieke materiaaleigenschappen, die in de software ingegeven zijn voor de berekening van de laterale sterkte, en de werkelijke materiaaleigenschappen tijdens de proeven, waarbij de karakteristieke waarden vaak kleiner zijn dan de werkelijke waarden. Voor de uitschieterende waarde bij T2.4 en T2.9 is geen verklaring gevonden. De berekening in WoodConnector maakt in het algemeen dus geen te grote onderschatting van de laterale sterkte van de verbinding.
- Alle verbindingen falen in de laboproeven onder dezelfde bezwijkcombinatie als voorspeld met de berekening in WoodConnector. In Figuur 6-1 is een deel van de verbindingsconfiguraties uit de laboproeven afgebeeld, waarbij elke mogelijke bezwijkcombinatie getoond is met zijn kenmerkende vervorming van de deugel. Hierbij valt het op dat de houtdikte van element 1 en 3 ontwerpparameters zijn die invloed hebben op de bezwijkcombinatie waaronder de verbinding faalt, en dus ook de laterale sterkte van de verbinding. Dit soort verbanden zijn verder onderzocht in sectie 6.3.2.
- Na de vergelijking van deze resultaten in Tabel 6-2 kan er gesproken worden van een tweede succesvolle validatie van de berekening van de laterale ontwerpsterkte van een stiftvormige houtverbinding met vier afschuifvlakken. De configuraties uit deze laboproeven valideren de staal-op-houtverbindingen, deugels als verbindingsmiddelen en balk-balkverbindingen.

T2.1  
Bezwijkcombinatie A



T2.2  
Bezwijkcombinatie E



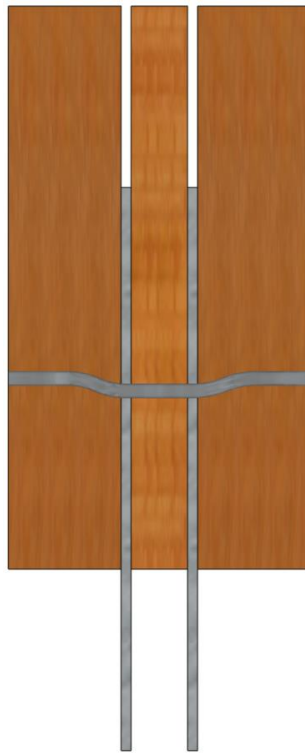
T2.4  
Bezwijkcombinatie F



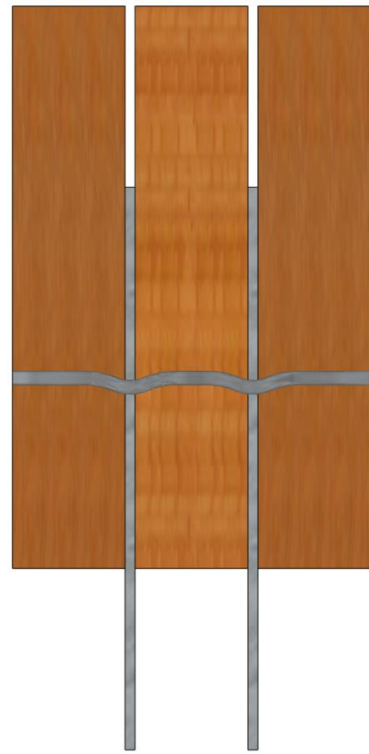
T2.5  
Bezwijkcombinatie C



T2.7  
Bezwijkcombinatie G



T2.8  
Bezwijkcombinatie D



Figuur 6-1: Verbindingsconfiguraties uit proeven van Rossi met kenmerkende deuvelforming voor elke bezwijkcombinatie

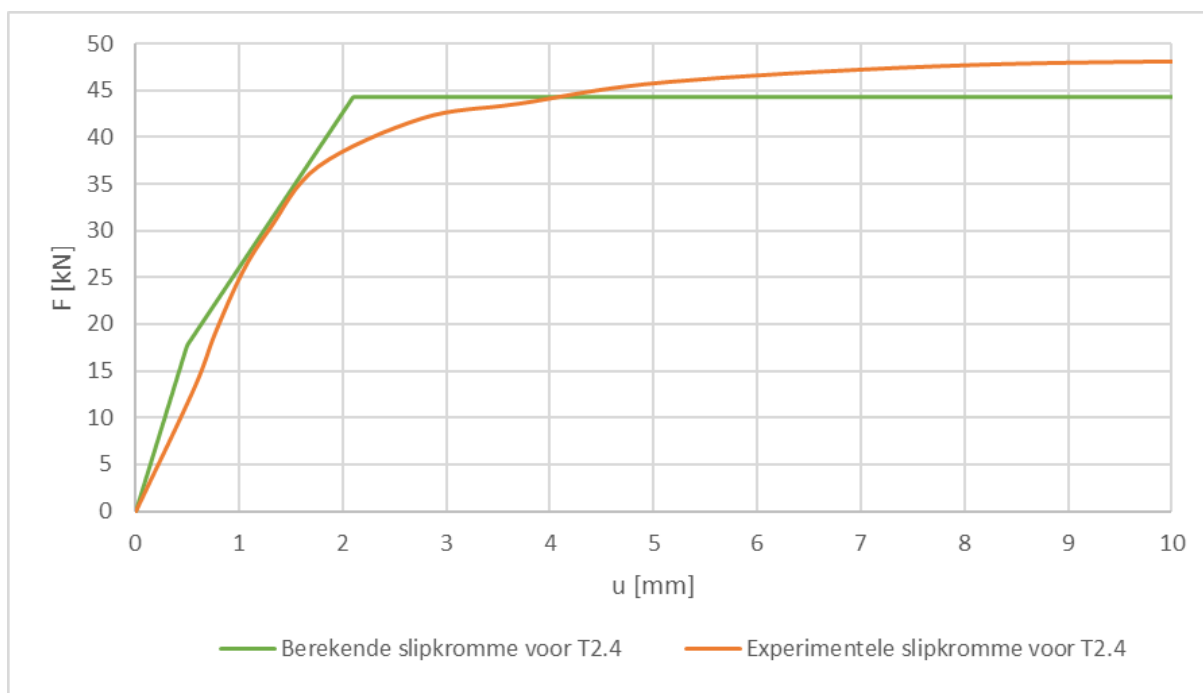
## 6.2.2 Validatie berekening stijfheid

Rossi [16] voerde negen laboproeven uit op verbindingen met vier afschuifvlakken waarvan de testresultaten de berekening van de stijfheid uit de analysemethode, in Excel en van WoodConnector, moeten helpen valideren. Tabel 6-3 toont de vergelijking tussen de verschuivingsmodulus van de volledige verbinding uit WoodConnector  $K_{SLS}$  en die uit de proeven  $K_T$ . Hierbij is  $K_T$  gemeten tussen 10% en 40% van de gemeten laterale sterkte. Deze tabel toont eerst deze verschuivingsmoduli en daarna de verhouding tussen het verschil van deze moduli en de verschuivingsmodulus uit WoodConnector ( $r_K = (K_T - K_{SLS})/K_T$ ), in percentage.

Tabel 6-3: Vergelijking verschuivingsmoduli van de verbinding volgens WoodConnector  $K_{SLS}$  en die uit de proeven  $K_T$

	$K_{SLS}$ [Kn/mm]	$K_T$ [kN/mm]	$r_K$ [%]
T2.1	35,93	24,77	-45,05
T2.2	35,93	25,35	-41,71
T2.3	35,93	21,03	-70,85
T2.4	35,93	23,39	-53,61
T2.5	35,93	21,16	-69,81
T2.6	35,93	29,13	-23,32
T2.7	35,93	25,92	-38,62
T2.8	35,93	26,38	-36,18
T2.9	35,93	22,49	-59,71

Ook is in de analysemethode in Excel voor elke proefverbinding een berekende slijpkromme vergeleken met de experimenteel bepaalde slijpkromme, waarvan de initiële slip verwaarloosd is. Deze berekende en experimentele slijpkrommes zijn voor alle negen proefverbindingen gelijkaardig, daarom is in deze sectie maar één vergelijking afgebeeld. Figuur 6-2 weergeeft in één beeld de berekende slijpkromme uit Excel voor proefverbinding T2.4, samen met de experimenteel bepaalde slijpkromme voor deze verbinding.



Figuur 6-2: Berekende en experimentele slijpkromme voor proefverbinding T2.4



Na een vergelijking van de resultaten in Tabel 6-3 en de slipkrommen in Excel, zoals Figuur 6-2, zijn de volgende zaken op te merken:

- $K_{SL5}$  is voor elke proefverbinding hetzelfde. Dit is een gevolg van de toepassing van de empirische formules uit prEC5 voor de berekening van de stijfheid van de volledige verbinding. De verschuivingsmodulus van de volledige verbinding uit WoodConnector gaat dus door vergelijking (2-44) tot en met (2-47) steeds hetzelfde zijn, bij dezelfde gegeven deuveldiameter en houtmaterialen van de element 1 en 3. De stijfheid is bij deze vergelijkingen ook onafhankelijk verondersteld van de verschillende houtdiktes die zijn toegepast in element 1 en 3, terwijl in de testresultaten af te leiden is de houtdikte van de elementen wel een belangrijke invloed heeft op de verschuivingsmodulus. De toegepaste formules lijken dus te simplistisch. Een duidelijk verband is niet direct af te leiden, maar het lijkt wel dat een verhoging van de houtdikte van de elementen, een hogere verschuivingsmodulus veroorzaakt.
- Verhouding  $r_K$  is altijd een negatief percentage, waarvan de absolute waarde meer dan 23% bedraagt, en in zes van de negen gevallen meer dan 41%. De berekende verschuivingsmodulus van de verbinding is daarmee altijd veel groter dan de experimenteel bepaalde verschuivingsmodulus. De berekening in WoodConnector voor de stijfheid van de verbinding maakt dus altijd een te grote overschatting van de verschuivingsmodulus. Wat in principe geen veilige aanname is.
- De vergelijking van de berekende en experimentele slipkrommen in de analysemethode in Excel, vertoont in het algemeen hetzelfde gedrag. Hierbij verlopen de elastische gebieden van de berekende en experimentele slipkrommen verschillend, waarbij die van de berekende slipkromme altijd steiler verloopt dan de experimentele slipkromme. Wanneer de experimentele slipkromme vervolgens begint af te vlakken en ongeveer horizontaal te verlopen, wat wijst op het bereiken van de maximale laterale sterkte van de verbinding, komt dit wel overeen met de maximale laterale sterkte in de berekende slipkromme. Deze overeenkomst wijst wel eerder naar een validatie van de berekening van de laterale sterkte van de verbinding en niet die van de stijfheid.
- Na de vergelijking van deze resultaten voor de stijfheid van de verbinding is te concluderen dat de berekening van de verschuivingsmodulus, van een stiftvormige houtverbinding met vier afschuifvlakken, volgens de analysemethode in WoodConnector niet gevalideerd is. Deze validatie voor de stijfheid van de verbinding met vier afschuifvlakken zal dus pas mogelijk zijn wanneer er formules, voor de gebruikgrenstoestand, ontwikkeld zijn die ook rekening houden met de toename van de verschuivingsmodulus in functie van de dikte van de houten elementen.

## 6.3 Validatie via testresultaten van Sawata

### 6.3.1 Validatie berekening laterale sterkte

Sawata [17] voerde 19 laboproeven uit op verbindingen met vier afschuifvlakken, waarvan de testresultaten de berekening van de laterale verbindingsterkte uit de analysemethode in Excel moeten helpen valideren. In deze validatie zijn de berekende resultaten dus niet via WoodConnector verkregen, omdat de gebruikte structurele houtsoorten in deze laboproeven niet beschikbaar zijn in de database van WoodConnector. In het Excelbestand daarentegen is het wel mogelijk om de benodigde gegevens van deze houtsoorten in te geven. Vervolgens toont Tabel 6-4 de vergelijking tussen de laterale sterkte van de volledige verbinding uit Excel  $F_{v,Rk}$  en die uit de Japanse proeven  $F_T$ . Deze tabel toont eerst deze laterale sterktes. Vervolgens is de verhouding berekend tussen het verschil van deze laterale sterktes en de laterale sterkte uit Excel ( $r_T = (F_T - F_{v,Rk})/F_T$ ), in percentage. Als laatste is in Tabel 6-4 ook vermeld onder welke bezwijkcombinatie de verbinding faalt, waarbij deze cel groen kleurt als de bezwijkcombinatie uit de berekening in Excel overeenkomt met de bezwijkcombinatie die plaatsgevonden heeft in de laboproef. Als dit niet het geval is, kleurt deze cel rood en is er links van de pijl aangegeven welke bezwijkcombinatie door de berekening voorspeld is en rechts welke bezwijkcombinatie effectief plaatsvond tijdens de laboproef.

Tabel 6-4: Vergelijking laterale sterkte van de volledige verbinding volgens Excel  $F_{v,Rk}$  en die uit de proeven  $F_T$

	$F_{v,Rk}$ [kN]	$F_T$ [kN]	$r_T$ [%]	Beziijkcombinatie volgens prEC5
Td.4-tt.0,5	28,87	42,6	32,22	A
Td.4-tt.1	28,87	42,2	31,58	A
Td.4-tt.2	28,87	42,9	32,69	A
Td.4-tt.5	45,70	55,7	17,95	A
Td.8-tt.0,5	52,32	55,0	4,87	F
Td.8-tt.1	59,95	71,1	15,68	F
Td.8-tt.2	70,12	83,8	16,32	A ---> F
Td.8-tt.5	98,73	88,9	-11,06	E
Td.12-tt.0,5	69,94	66,1	-5,81	F
Td.12-tt.1	80,12	89,6	10,58	F
Td.12-tt.2	92,51	94,0	1,58	C
Td.12-tt.5	111,57	114,0	2,13	C ---> E
Td.20-tt.0,5	93,82	84,8	-10,64	G
Td.20-tt.1	109,35	106,5	-2,67	D
Td.20-tt.2	104,63	99,8	-4,84	C
k.Td.4-tt.2	40,56	62,4	35,01	A
k.Td.8-tt.2	91,52	106,2	13,82	F
k.Td.12-tt.2	111,43	108,4	-2,79	C
k.Td.20-tt.2	128,20	117,9	-8,74	D ---> C

In de eerste kolom van Tabel 6-4 zijn de reeksnamen van de proefverbindingen gegeven, waarbij de opbouw van de reeksnaam informatie geeft over de ontwerpparameters van zijn verbindingconfiguratie. De reeksnamen zijn voornamelijk uit twee delen opgebouwd, waarvan de betekenis uitgelegd is aan de hand van een voorbeeld, zoals 'Td.8-tt.2', waarvan het eerste deel dus bestaat uit 'Td.8'. Dit betekent dat de verhouding tussen de totale dikte van de verbinding  $T$  ten opzichte van de deuveldiameter  $d$  gelijk is aan 8 ( $T/d = 8$ ). Het tweede deel bestaat uit 'tt.2' en

betekent dat de verhouding tussen de houtdikte van element 3  $t_3$  ten opzichte van de houtdikte van element 1  $t_1$ , gelijk is aan 2 ( $t_3/t_1 = 2$ ). Uit deze verhoudingen die gegeven zijn in de reeksnaam van de proefverbinding, is het dus mogelijk om een groot deel van de verbindingconfiguratie af te leiden, wanneer de deuveldiameter en de dikte van de staalplaten  $t_2$  gegeven zijn. Deze twee laatste ontwerpparameters waren voor alle proefverbindingen altijd hetzelfde, waarbij de deuveldiameter gelijk was aan 20 mm en de dikte van de staalplaten 12 mm. In 'Td.8-tt.2' was de totale dikte van de verbinding gelijk aan 160 mm, de houtdikte van element 1 gelijk aan 34 mm en de houtdikte van element 3 gelijk aan 68 mm. Ten slotte zijn er bij deze proeven verschillende structurele houtsoorten toegepast voor element 1 en 3, wat ook aangeduid is in de reeksnamen. Wanneer deze naam niet voorafgegaan is met 'k.', dan is Sugi toegepast als houtsoort van element 1 en 3. Wanneer de reeksnaam wel voorafgegaan is met 'k.', dan is Karamatsu toegepast. Het verschil tussen beide houtsoorten is dat de houtdensiteit van Karamatsu hoger is dan die van Sugi.

Na een vergelijking van deze resultaten in Tabel 6-4 zijn de volgende zaken op te merken:

- Verhouding  $r_T$  is afwisselend een positief of negatief percentage, wat dus betekent dat de berekende laterale sterkte van de verbinding respectievelijk soms kleiner of groter is dan de experimenteel bepaalde laterale sterkte. Deze afwisseling tussen positieve en negatieve waarden is te wijten aan de waarde van de houtdensiteit van elementen 1 en 3, waarvoor geen karakteristieke waarde genomen is, maar een grotere, werkelijke waarde, die tijdens deze laboproeven gemeten zijn. Hierdoor zal de berekende laterale sterkte van de verbinding meer de realiteit benaderen en dus net boven of onder de experimenteel bepaalde laterale sterkte liggen.
- De absolute waarde van het percentage van verhouding  $r_T$  is nooit groter dan 16,5% voor alle verbindingconfiguraties, behalve die met een verhouding  $T/d$  gelijk aan 4. De berekening van de analysemethode maakt in het algemeen dus geen te grote over- en onderschatting van de laterale sterkte van de verbinding. Met een kritische blik is op te merken dat verbindingen met een verhouding  $T/d$  gelijk aan 4, maar een totale dikte hebben van 80 mm, wat voor staal-op-houtverbindingen met vier afschuifvlakken zeer weinig is en in de praktijk bijna niet zal voorkomen. Een verklaring voor de onderschatting van de verbindingen met deze verhouding door de berekening, is niet gevonden.
- Bijna alle verbindingen falen in de laboproeven onder dezelfde bezwijkcombinatie als voorspeld met de berekening van de analysemethode in Excel. Bij slechts drie van de 19 verbindingconfiguraties was dit niet het geval. Hierbij is op te merken dat wanneer de voorspelde bezwijkcombinatie uit de berekening niet klopte, de berekende laterale sterkte van deze bezwijkcombinatie zeer weinig verschilt met de berekende sterkte afkomstig van de bezwijkcombinatie die wel plaatsgevonden heeft.
- Na deze vergelijking van de resultaten in Tabel 6-4 kan er gesproken worden van een derde succesvolle validatie van de berekening van de laterale ontwerpsterkte van een stiftvormige houtverbinding met vier afschuifvlakken. De configuraties uit deze laboproeven valideren de staal-op-houtverbindingen, deuvels als verbindingsmiddelen en balk-balkverbindingen.

### 6.3.2 Bespreking verbanden tussen ontwerpparameters en laterale sterkte

De totale dikte van de verbinding  $T$ , de verhouding tussen de houtdiktes van element 1 en 3  $t_3/t_1$  en de dichtheid van de houten elementen  $\rho$  zijn de onderzochte ontwerpparameters. Hierbij is het effect van de wijziging van één van deze parameters op de laterale sterkte van de volledige verbinding en zijn bezwijkcombinatie bestudeert met behulp van aangepaste tabellen, gebaseerd op Tabel 6-4.

Tabel 6-5 toont het effect van de wijziging van  $T$  op de laterale sterkte van de volledige verbinding, waarbij de andere onderzochte ontwerpparameters constant zijn gehouden. Hieruit is af te leiden dat hoe groter  $T$  is, hoe groter de berekende en experimenteel bepaalde laterale sterkte van de verbinding is. De bezwijkcombinatie wijzigt vervolgens ook naar combinaties die geassocieerd zijn met een hogere laterale sterkte.

Tabel 6-6 toont het effect van de wijziging van  $t_3/t_1$  op de laterale sterkte van de volledige verbinding, waarbij de andere onderzochte ontwerpparameters constant zijn gehouden. Hieruit is af te leiden dat hoe groter  $t_3/t_1$  is, hoe groter de berekende en experimenteel bepaalde laterale sterkte van de verbinding is. De bezwijkcombinatie wijzigt vervolgens ook naar combinaties die geassocieerd zijn met een hogere laterale sterkte.

Tabel 6-7 toont het effect van de wijziging van  $\rho$  op de laterale sterkte van de volledige verbinding, waarbij de andere onderzochte ontwerpparameters constant zijn gehouden. Hieruit is af te leiden dat hoe groter  $\rho$  is, hoe groter de berekende en experimenteel bepaalde laterale sterkte van de verbinding is. De bezwijkcombinatie wijzigt vervolgens ook naar combinaties die geassocieerd zijn met een hogere laterale sterkte.

Tabel 6-5: Effect wijziging van  $T$  op de laterale sterkte van de verbinding

	$F_{v,Rk}$ [kN]	$F_T$ [kN]	Bezuikcombinatie volgens prEC5
Td.4-tt.0,5	28,87	42,6	A
Td.8-tt.0,5	52,32	55,0	F
Td.12-tt.0,5	69,94	66,1	F
Td.20-tt.0,5	93,82	84,8	G
Td.4-tt.1	28,87	42,2	A
Td.8-tt.1	59,95	71,1	F
Td.12-tt.1	80,12	89,6	F
Td.20-tt.1	109,35	106,5	D
Td.4-tt.2	28,87	42,9	A
Td.8-tt.2	70,12	83,8	A ---> F
Td.12-tt.2	92,51	94,0	C
Td.20-tt.2	104,63	99,8	C
Td.4-tt.5	45,70	55,7	A
Td.8-tt.5	98,73	88,9	E
Td.12-tt.5	111,57	114,0	C ---> E
k.Td.4-tt.2	40,56	62,4	A
k.Td.8-tt.2	91,52	106,2	F
k.Td.12-tt.2	111,43	108,4	C
k.Td.20-tt.2	128,20	117,9	D ---> C

Tabel 6-6: Effect wijziging van  $t_3/t_1$  op de laterale sterkte van de verbinding

	$F_{v,RK}$ [kN]	$F_T$ [kN]	Bezwijkcombinatie volgens prEC5
Td.4-tt.0,5	28,87	42,6	A
Td.4-tt.1	28,87	42,2	A
Td.4-tt.2	28,87	42,9	A
Td.4-tt.5	45,70	55,7	A
Td.8-tt.0,5	52,32	55,0	F
Td.8-tt.1	59,95	71,1	F
Td.8-tt.2	70,12	83,8	A ---> F
Td.8-tt.5	98,73	88,9	E
Td.12-tt.0,5	69,94	66,1	F
Td.12-tt.1	80,12	89,6	F
Td.12-tt.2	92,51	94,0	C
Td.12-tt.5	111,57	114,0	C ---> E
Td.20-tt.0,5	93,82	84,8	G
Td.20-tt.1	109,35	106,5	D
Td.20-tt.2	104,63	99,8	C

Tabel 6-7: Effect wijziging van  $p$  op de laterale sterkte van de verbinding

	$F_{v,RK}$ [kN]	$F_T$ [kN]	Bezwijkcombinatie volgens prEC5
Td.4-tt.2	28,87	42,9	A
k.Td.4-tt.2	40,56	62,4	A
Td.8-tt.2	70,12	83,8	A ---> F
k.Td.8-tt.2	91,52	106,2	F
Td.12-tt.2	92,51	94,0	C
k.Td.12-tt.2	111,43	108,4	C
Td.20-tt.2	104,63	99,8	C
k.Td.20-tt.2	128,20	117,9	D ---> C

Na de bespreking van verbanden tussen de onderzochte ontwerpparameters en laterale sterkte van de verbinding is er te concluderen dat de laterale sterkte, en de daarbij horende bezwijkcombinatie, te controleren zijn door de configuratie van de verbinding aan te passen. Door een juiste materiaalkeuze en geometrie is plastisch bezwijken van de verbinding met vier afschuifvlakken te bereiken. Dit is voordelig, omdat plastisch bezwijken de veiligheid en betrouwbaarheid van het ontwerp van de verbinding bevordert.

## 6.4 Vergelijking met de Amerikaanse analysemethode

In dit deel is onderzocht of de Amerikaanse procedure, voor de berekening van de laterale sterkte van een verbinding met meerdere afschuifvlakken, effectief sneller en conservatiever is dan die volgens prEC5. Het grote verschil tussen beide procedures is dat de Amerikaanse methode geen bezwijkcombinaties opstelt voor de compatibele bezwijkmechanismen in de afschuifvlakken. In plaats daarvan gaat de Amerikaanse procedure het afschuifvlak met de laagste laterale weerstand selecteren en vervolgens die weerstand vermenigvuldigen met het aantal afschuifvlakken in de verbinding. Wat in dit onderzoek dus altijd vier afschuifvlakken zijn.

Tabel 6-8 weergeeft de vergelijking tussen de laterale sterkte van de volledige verbinding volgens WoodConnector  $F_{v,Rd,WoodC}$  en volgens de Amerikaanse procedure  $F_{v,Rd,Am}$ . Hierbij zijn de resultaten van de verbindingconfiguraties uit COST en de laboproeven van Rossi [16] gegeven. Deze tabel toont eerst  $F_{v,Rd,sp,1-2}$  en  $F_{v,Rd,sp,2-3}$ , dit zijn de laterale ontwerpsterktes van het afschuifvlak tussen respectievelijk element 1 en 2 en element 2 en 3. Vervolgens zijn de laterale sterktes volgens WoodConnector en de Amerikaanse procedure gegeven. Daarna is de verhouding berekend tussen het verschil van deze laterale sterktes en de laterale sterkte uit WoodConnector ( $r_{Am} = (F_{v,Rd,WoodC} - F_{v,Rd,Am})/F_{v,Rd,WoodC}$ ), in percentage.

Tabel 6-8: Vergelijking laterale sterkte van de volledige verbinding volgens WoodConnector  $F_{v,Rd,WoodC}$  en de Amerikaanse procedure  $F_{v,Rd,Am}$

	$F_{v,Rd,sp,1-2}$ [kN]	$F_{v,Rd,sp,2-3}$ [kN]	$F_{v,Rd,WoodC}$ [kN]	$F_{v,Rd,Am}$ [kN]	$r_{Am}$ [%]
Configuratie 1 (COST)	14,66	18,29	65,90	58,65	11,00
Configuratie 2 (COST)	142,94	153,60	593,08	571,76	3,59
T2.1 (WCTE)	6,67	6,82	26,97	26,67	1,12
T2.2 (WCTE)	6,67	11,91	37,15	26,67	28,21
T2.3 (WCTE)	6,67	11,91	37,15	26,67	28,21
T2.4 (WCTE)	8,69	6,82	31,02	27,28	12,06
T2.5 (WCTE)	8,69	11,91	41,19	34,76	15,62
T2.6 (WCTE)	8,69	11,91	41,19	34,76	15,62
T2.7 (WCTE)	12,03	6,82	37,69	27,28	27,63
T2.8 (WCTE)	12,03	11,91	47,87	47,63	0,50
T2.9 (WCTE)	12,03	11,91	47,87	47,63	0,50

In Tabel 6-8 is op te merken verhouding  $r_{Am}$  is altijd een positieve percentage, wat dus betekent dat de laterale sterkte van de verbinding volgens de Amerikaanse procedure altijd kleiner is dan die volgens WoodConnector. De grootte van de percentages van verhouding  $r_{Am}$  varieert sterk tussen de verschillende verbindingconfiguraties en is het grootste wanneer het verschil tussen de laterale sterktes van de individuele afschuifvlakken van de verbinding het grootste is. Vervolgens is dit verschil tussen de laterale sterktes van de individuele afschuifvlakken te wijten aan het dikteverschil tussen de houten elementen 1 en 3 in de verbindingconfiguraties. Hoe groter dit dikteverschil, wat bij T2.2, T2.3 en T2.7 het grootst is, hoe lager de laterale sterkte volgens de Amerikaanse procedure gaat zijn, en hoe conservatiever deze procedure dus gaat zijn.

Ten slotte is te concluderen dat de Amerikaanse procedure in het algemeen conservatiever is dan deze volgens prEC5. In principe kan er niet gesproken worden van een sneller procedure, omdat het verschil in berekeningstijd in de software te verwaarlozen is. Wel is de Amerikaanse procedure meer simplistisch dan die volgens prEC5.



## 7. Besluit

De hoofddoelstelling van deze masterproef is het opstellen van een analysemethode voor stiftvormige verbindingen met meerdere afschuifvlakken en het implementeren van deze methode in WoodConnector. Het resultaat van deze masterproef is een uitbreiding in WoodConnector met de analyse van stiftvormige verbindingen in hout met vier afschuifvlakken die zich niet enkel beperkt tot hout-op-houtverbindingen, maar ook staal-op-houtverbindingen en vakwerk-, balk-balk- en balk-kolomverbindingen behandelt. Hierbij kunnen deuvels en bouten als verbindingsmiddelen gekozen worden. Deze analysemethode veronderstelt ook enkel plastisch bezwijken van de verbinding.

De analysemethode is opgesteld met behulp van een Excelbestand, waaruit een flowchart is afgeleid die deze methode visualiseert en samenvat. Deze flowchart bestaat uit vier blokken. Het eerste blok is de input voor de analysemethode, waarbij alle de benodigde ontwerpparameters zijn samengevat. De pre-assembly is het tweede blok en voert tussenberekeningen uit en geeft belangrijke tussenresultaten. Daarna volgt de assembly als derde blok, die eigenlijk de eindberekeningen van de analysemethode uitvoert met de verkregen tussenresultaten en de ingegeven ontwerpparameters. Ten slotte is het vierde blok de output, die de benodigde eindresultaten voor de ontwerper weergeeft.

De implementatie in WoodConnector van de opgestelde analysemethode in Excel is gelukt. Wanneer in de interface van WoodConnector dezelfde ontwerpparameters ingegeven zijn als in het Excelbestand, zijn de resultaten gegenereerd uit WoodConnector identiek aan die uit het Excel. Door de implementatie in WoodConnector, is het mogelijk om stiftvormige verbindingen met vier afschuifvlakken in houtconstructies op een snellere en gebruiksvriendelijke manier te ontwerpen.

Na de validatie van de analysemethode is er te concluderen dat de berekeningen van de laterale sterktes van de verbinding met vier afschuifvlakken gevalideerd is. De berekeningen van de verschuivingsmoduli voor de stijfheid van deze verbinding zijn daarentegen niet representatief ten opzichte van de testresultaten. De berekende stijfheidseigenschappen uit WoodConnector zijn dus niet gevalideerd. De vergelijking van de verschillende resultaten tijdens de validatie hebben aangetoond dat de laterale sterkte, en de daarbij horende bezwijkcombinatie, te controleren zijn door de configuratie van de verbinding aan te passen. Door een juiste materiaalkeuze en geometrie is plastisch bezwijken van de verbinding met vier afschuifvlakken te bereiken. Dit is voordelig, omdat plastisch bezwijken de veiligheid en betrouwbaarheid van het ontwerp van de verbinding bevordert. Daarnaast is ook bewezen dat de Amerikaanse analysemethode conservatiever is dan die volgens WoodConnector.

Ten slotte zijn er nog veel mogelijkheden waaraan verder gewerkt kan worden met deze masterproef als basis. De opgestelde analysemethode heeft hierbij nog potentieel tot verdere uitbreiding. Ten eerste zijn controles van de staalplaten volgens prEN 1993-1-8 nog toe te voegen, maar ook controles op brosse breuk van de houten elementen in de verbinding. Daarnaast is de methode nog uit te breiden met analyses voor verbindingen met meer dan vier afschuifvlakken. Vervolgens is de bepaling van de stijfheid van verbindingen met meerdere afschuifvlakken verder uit te werken totdat er een succesvolle validatie ervan plaatsvindt. Verder is de inrekening van de koordeffectbijdrage bij de opgestelde analysemethode nog te valideren aan de hand van experimentele resultaten. Ook zijn er in de implementatie in WoodConnector nog mogelijkheden tot verdere uitbreiding. Ten eerste zijn de net opgesomde uitbreidingen van de analysemethode ook mee te implementeren. Daarnaast is de output van de uitbreiding in WoodConnector nog aan te vullen met het plotten van de berekende en experimentele slipkrommes en met het genereren van een rekennota in een Excelbestand. Vervolgens is het misschien interessant om de ontwerper de optie te geven in WoodConnector om alle materiaaleigenschappen zelf te kunnen ingeven. Deze optie geeft de mogelijkheid om werkelijke



testresultaten in te geven, waardoor WoodConnector ook meer geschikt is voor onderzoek. Ten slotte kunnen de weergeven afbeeldingen in de interface vervangen worden door figuren die zich automatisch aanpassen aan de ingegeven ontwerpparameters. Zo zou de ontwerper een direct beeld kunnen krijgen van de ontworpen verbindingsconfiguratie, wat zeker een meerwaarde kan zijn.

## Referentielijst

- [1] J. Henriques, „4387 Dimensioneren van hout - HC-HS5: Ontwerp van Verbindingen,” UHasselt, Diepenbeek, 2021.
- [2] S. Schaerlebens, „Hoe en waarom... De Eurocodes?,” *BIN-Revue*, pp. 1-3, 29 Maart 2000.
- [3] UHasselt, „About CERG,” UHasselt, 2022. [Online]. Available: <https://www.uhasselt.be/cerg>. [Geopend 29 September 2022].
- [4] CEN: European Committee for Standardization, „prEN 1995-1-1,” CEN: European Committee for Standardization, Brussel, 2024.
- [5] CEN: European Committee for Standardization, „NBN EN 1995-1-1,” CEN: European Committee for Standardization, Brussel, 2015.
- [6] J. Porteous en A. Kermani, *STRUCTURAL TIMBER DESIGN to Eurocode 5*, Oxford: Blackwell Publishing, 2007.
- [7] Centrum Hout, *Timber Engineering STEP 1*, Deventer: Salland De Lange , 1995.
- [8] H. J. Blaß en C. Sandhaas, *Timber Engineering: Principles for Design*, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2017.
- [9] H. J. Larsen, „Dowel-type fasteners loaded parallel-to-grain,” CIB-W18, Nelson, 2010.
- [10] K. De Proft, *Dimensioneren van houten constructies [cursus]*, Diepenbeek: UHasselt, 2014.
- [11] Swedish Wood, *Design of timber structures Volume 1, Structural aspects of timber construction*, Stockholm: Swedish Forest Industries Federation, 2016.
- [12] COST, „Design of Connections in Timber Structures,” Shaker Verlag GmbH, Aken, 2018.
- [13] M. B. U. Pedersen, „Dowel Type Timber Connections Strength modelling,” Technical University of Denmark, Lyngby, 2001.
- [14] American Wood Council, „National Design Specification for Wood Construction,” American Wood Council, Leesburg, 2017.
- [15] K. Aerts, *BICEPS [cursus]*, Diepenbeek: UHasselt, 2019.
- [16] S. Rossi, R. Crocetti, D. Honfi en E. Frühwald Hansson, „Load-bearing capacity of ductile multiple shear steel-to-timber connections,” in *World Conference on Timber Engineering*, Wenen, 2016.
- [17] K. Sawata, T. Sasaki en S. Kanetaka, „Estimation of shear strength of dowel-type timber connections with multiple slotted-in steel plates by European yield theory,” The Japan Wood Research Society, Noshiro, 2006.



## Bijlagenlijst

Bijlage A: Volledige codes van de functies gedefinieerd in 'MSP.py' .....	99
Bijlage B: Volledige code van de database voor hout in 'database.py' .....	105
Bijlage C: Volledige codes van functies gedefinieerd in 'main.py' .....	107



## Bijlage A: Volledige codes van de functies gedefinieerd in 'MSP.py'

```
3 def conn_MSP_axialWithdrawalCapacity(f_u, d, D_w, d_w, rho_k, fc90k):
4     """Calculates characteristic axial tensile resistance of a bolt in MPA, according to prEN1995-1-1:20XX 11.2.2.1 remark (1)"""
5     # Head pull-through resistance, according to prEN1995-1-1:20XX table 11.1(1)-(2)
6     Ahead = np.pi * (D_w**2 - d_w**2) / 4
7     f_head = 19 * np.exp((-D_w/50) * (rho_k/350)**0.8)
8     if Ahead > 4072:
9         f_pk = 3 * fc90k * Ahead
10    else:
11        f_pk = f_head * Ahead
12
13    # Bolt tensile resistance, according to prEN1995-1-1:20XX eq 11.6
14    f_tk = 0.9 * np.pi * (0.86 * d)**2 * f_u / 4
15
16    # Axial tensile resistance is equal to the minimum between the head pull-through resistance and the bolt tensile resistance
17    # Also according to prEN1995-1-1:20XX eq. 11.17
18    fax_t_k = min(f_tk, f_pk)
19    return fax_t_k
20
21 def conn_MSP_momentYielding(f_u, d):
22     """Calculates moment yielding strength in Nmm, according to prEN1995-1-1:20XX table 11.8(2)"""
23     MyRk = 0.3 * f_u * d**2.6
24     return MyRk
25
26 def conn_MSP_alpha12(f_vEd1, theta0, alpha1):
27     """Calculates the angle between the shear plane force and "the horizontal" between element 1 and 2 in """
28     f_v_sp12_x = f_vEd1 * np.cos((theta0 + alpha1) * np.pi / 180)
29     f_v_sp12_y = f_vEd1 * np.sin((theta0 + alpha1) * np.pi / 180)
30     alpha12 = np.arctan(f_v_sp12_y / f_v_sp12_x) * 180 / np.pi
31     return alpha12
32
33 def conn_MSP_alpha23(f_vEd1, theta0, alpha1, f_vEd2, theta12, alpha2):
34     """Calculates the angle between the shear plane force and "the horizontal" between element 2 and 3 in """
35     f_v_sp23_x = f_vEd1 * np.cos((theta0 + alpha1) * np.pi / 180) + f_vEd2 * np.cos((theta0 + theta12 + alpha2) * np.pi / 180)
36     f_v_sp23_y = f_vEd1 * np.sin((theta0 + alpha1) * np.pi / 180) + f_vEd2 * np.sin((theta0 + theta12 + alpha2) * np.pi / 180)
37     alpha23 = np.arctan(f_v_sp23_y / f_v_sp23_x) * 180 / np.pi
38
39     list_alpha23 = list([f_v_sp23_x, f_v_sp23_y, alpha23])
40     return list_alpha23
41
42 def conn_MSP_phi12(theta0, alpha12):
43     """Calculates the angle between the shear plane force 1-2 and the grain direction of element 1 in """
44     phi12 = theta0 - alpha12
45     return phi12
46
47 def conn_MSP_phi21(theta0, theta12, alpha12):
48     """Calculates the angle between the shear plane force 1-2 and the grain direction of element 2 in """
49     phi21 = theta0 + theta12 - alpha12
50     return phi21
51
52 def conn_MSP_phi23(theta0, theta12, alpha23):
53     """Calculates the angle between the shear plane force 2-3 and the grain direction of element 2 in """
54     phi23 = theta0 + theta12 - alpha23
55     return phi23
56
57 def conn_MSP_phi32(theta0, theta12, theta23, alpha23):
58     """Calculates the angle between the shear plane force 2-3 and the grain direction of element 3 in """
59     phi32 = theta0 + theta12 + theta23 - alpha23
60     return phi32
61
62 def conn_MSP_embedmentStrengthTimber(rho_k, d, phi):
63     """Calculates embedment strength of timber elements in MPA, according to prEN1995-1-1:20XX table 11.7(27)-(29)"""
64     # Determine factor k90
65     k90 = 1.35 + 0.015*d
66     # Determine factor k_mat
67     if d < 8:
68         k_mat = 1
69     else:
70         k_mat = k90 * (np.sin(phi * np.pi / 180)) ** 2 + (np.cos(phi * np.pi / 180)) ** 2
71     # Determine fhk
72     fhk = 0.082 * (1 - 0.01 * d) * rho_k / k_mat
73     return fhk
```

```

75 def conn_MSP_embedmentStrengthSteel(f_s, t, d, p):
76     """Calculates embedment strength of steel elements in MPa, according to prEN1995-1-1:20XX table 11.7(1)"""
77     # Determine factor k_pl
78     td = t/d
79     if td <= 0.5:           # kpl = 0,5 for the ratio t/d ≤ 0,5 for outer steel plates
80         k_plOut = 0.5
81     elif 0.5 < td < 1:    # for intermediate values interpolation is allowed
82         k_plOut = td
83     else:                  # kpl = 1,0 t/d > 1,0 outer steel plates
84         k_plOut = 1
85
86     if p == "Out":
87         k_pl = k_plOut
88     else:
89         k_pl = 1           # kpl = 1,0 for inner steel plates
90
91     # Determine fhk
92     fhk = f_s * k_pl
93     return fhk
94
95 def conn_MSP_lateralResistance_SP12(fh1k, fh2k, t1, t2, d, MyRk, fax_t_k, k_rp1, k_rp2):
96     """Calculates the characteristic lateral resistances of the shear plane between element 1 and 2 in N"""
97     # Dowel-effect contribution in shear plane 1-2 of failure mode a, b, d and f, according to prEN1995-1-1:20XX eq. 11.10
98     beta = fh2k / fh1k
99     fDK12_a = fh1k * t1 * d
100    fDK12_b = fh2k * t2 * d * 0.5
101    fDK12_d = 1.05 * ((fh1k * t1 * d) / (2 + beta)) * ((2 * beta * (1 + beta) + (4 * beta * (2 + beta) * MyRk)
102                / (fh1k * d * t1 ** 2)) ** 0.5 - beta)
103    fDK12_f = 1.15 * ((2 * beta) / (1 + beta)) ** 0.5 * (2 * MyRk * fh1k * d) ** 0.5
104
105    # Dowel-effect contribution and rope-effect contribution of shear plane 1-2 for failure combination A-F
106    # Dowel-effect contribution according to prEN1995-1-1:20XX section 11.2.3.5
107    # Rope-effect contribution according to prEN1995-1-1:20XX eq. 11.16
108    fvk12_A = fDK12_a
109    fvk12_B = fDK12_b
110    fvk12_C = fDK12_d + min(k_rp1*fax_t_k, k_rp2 * fDK12_d)
111    fvk12_D = fDK12_f + min(k_rp1*fax_t_k, k_rp2 * fDK12_f)
112    fvk12_E = fDK12_a
113    fvk12_F = fDK12_d + min(k_rp1*fax_t_k, k_rp2 * fDK12_d)
114    fvk12_G = fDK12_f + min(k_rp1*fax_t_k, k_rp2 * fDK12_f)
115
116    list_SP12 = list([fvk12_A, fvk12_B, fvk12_C, fvk12_D, fvk12_E, fvk12_F, fvk12_G])
117    return list_SP12
118
119 def conn_MSP_lateralResistance_SP23(fh23ak, fh23bk, fh32ak, fh32bk, t2, t3, d, MyRk, fax_t_k, k_rp1, k_rp2):
120     """Calculates the characteristic lateral resistances of the shear plane between element 2 and 3 in N"""
121     # Dowel-effect contribution in shear plane 2-3 of failure mode a, b and f, according to prEN1995-1-1:20XX eq. 11.10
122     # For shear plane 2-3a
123     beta23a = fh32ak / fh23ak
124     fDK_23a_a = fh23ak * t2 * d * 0.5
125     fDK_23a_b = fh32ak * t3 * d * 0.5
126     fDK_23a_f = 1.15 * ((2 * beta23a) / (1 + beta23a)) ** 0.5 * (2 * MyRk * fh23ak * d) ** 0.5
127     # For shear plane 3-2b
128     beta32b = fh23bk / fh32bk
129     fDK_32b_a = fh32bk * t3 * d * 0.5
130     fDK_32b_b = fh23bk * t2 * d * 0.5
131     fDK_32b_f = 1.15 * ((2 * beta32b) / (1 + beta32b)) ** 0.5 * (2 * MyRk * fh32bk * d) ** 0.5
132     # Dowel-effect contribution in shear plane 2-3 is equal to the minimum between 2-3a and 3-2b
133     fDK23_a = min(fDK_23a_a, fDK_32b_a)
134     fDK23_b = min(fDK_23a_b, fDK_32b_b)
135     fDK23_f = min(fDK_23a_f, fDK_32b_f)
136
137     # Dowel-effect contribution and rope-effect contribution of shear plane 2-3 for failure combination A-F
138     # Dowel-effect contribution according to prEN1995-1-1:20XX section 11.2.3.5
139     # Rope-effect contribution according to prEN1995-1-1:20XX eq. 11.16
140     fvk23_A = fDK23_a
141     fvk23_B = fDK23_b
142     fvk23_C = fDK23_f + min(k_rp1*fax_t_k, k_rp2 * fDK23_f)
143     fvk23_D = fDK23_a + min(k_rp1*fax_t_k, k_rp2 * fDK23_a)
144     fvk23_E = fDK23_f + min(k_rp1*fax_t_k, k_rp2 * fDK23_f)
145     fvk23_F = fDK23_a
146     fvk23_G = fDK23_a
147
148     list_SP23 = list([fvk23_A, fvk23_B, fvk23_C, fvk23_D, fvk23_E, fvk23_F, fvk23_G])
149
150     return list_SP23

```

```

152 def conn_MSP_lateralResistance(fvk12_A, fvk12_B, fvk12_C, fvk12_D, fvk12_E, fvk12_F, fvk12_G, fvk23_A, fvk23_B, fvk23_C,
153                               fvk23_D, fvk23_E, fvk23_F, fvk23_G):
154     """Calculates the characteristic lateral resistance of the multiple shear plane connection in N"""
155     # Lateral resistance of the multiple shear plane connection of failure combination A-F, according to prEN1995-1-1:20XX section 11.2.3.5
156     fvk_A = fvk12_A + fvk23_A
157     fvk_B = fvk12_B + fvk23_B
158     fvk_C = fvk12_C + fvk23_C
159     fvk_D = fvk12_D + fvk23_D
160     fvk_E = fvk12_E + fvk23_E
161     fvk_F = fvk12_F + fvk23_F
162     fvk_G = fvk12_G + fvk23_G
163     # Lateral resistance of the multiple shear plane connection, according to prEN1995-1-1:20XX section 11.2.3.5
164     fvk = min(fvk_A, fvk_B, fvk_C, fvk_D, fvk_E, fvk_F, fvk_G)
165     if fvk == fvk_A:
166         fvk12 = fvk12_A
167         fvk23 = fvk23_A
168         bezwijkcombinatie = "A"
169     elif fvk == fvk_B:
170         fvk12 = fvk12_B
171         fvk23 = fvk23_B
172         bezwijkcombinatie = "B"
173     elif fvk == fvk_C:
174         fvk12 = fvk12_C
175         fvk23 = fvk23_C
176         bezwijkcombinatie = "C"
177     elif fvk == fvk_D:
178         fvk12 = fvk12_D
179         fvk23 = fvk23_D
180         bezwijkcombinatie = "D"
181     elif fvk == fvk_E:
182         fvk12 = fvk12_E
183         fvk23 = fvk23_E
184         bezwijkcombinatie = "E"
185     elif fvk == fvk_F:
186         fvk12 = fvk12_F
187         fvk23 = fvk23_F
188         bezwijkcombinatie = "F"
189     else:
190         fvk12 = fvk12_G
191         fvk23 = fvk23_G
192         bezwijkcombinatie = "G"
193
194     list_fvk = list([fvk, fvk12, fvk23, bezwijkcombinatie])
195     return list_fvk
196
197 def conn_MSP_charToDes(fvk, n0, n90, kmod1, kmod2, gamma_m):
198     """Convert the characteristic value of the lateral resistance into a design value in N, according to prEN1995-1-1:20XX"""
199     fvRd = fvk * n0 * n90 * (kmod1 * kmod2)**0.5 / gamma_m
200     return fvRd
201
202 def conn_MSP_stiffness(idx_type, rho_m1, rho_m2, d):
203     """Calculates the lateral slip modulus of a shear plane of the multiple shear plane connection in N/mm, according to prEN1995-1-1:20XX"""
204     if idx_type in [0]: # Timber - Timber - Timber
205         k_ser = (((rho_m1*rho_m2)**0.5)**1.5)*d/23
206     elif idx_type in [1]: # Timber - Steel - Timber
207         k_ser = (rho_m1**1.5)*2*d/23
208     return k_ser
209
210 def conn_MSP_calculate(idx_type, f_vEd1, theta0, alpha1, f_vEd2, theta12, alpha2, theta23, k_rp2, f_u, d, d_w, d_w,
211                        rho_k1, rho_k2, rho_k3, rho_m1, rho_m2, rho_m3, f_s2, t1, t2, t3, fc90k1, n0, n90, kmod1, kmod2,
212                        kmod3, gamma_m):
213     """Calculates a multiple shear plane connection"""
214     # Angle between shear plane force and "the horizontal"
215     alpha12 = conn_MSP_alpha12(f_vEd1, theta0, alpha1)
216     list_alpha23 = conn_MSP_alpha23(f_vEd1, theta0, alpha1, f_vEd2, theta12, alpha2)
217     alpha23 = list_alpha23[2]
218
219     # Angle between shear plane force and grain direction
220     phi12 = conn_MSP_phi12(theta0, alpha12)
221     phi21 = conn_MSP_phi21(theta0, theta12, alpha12)
222     phi23 = conn_MSP_phi23(theta0, theta12, alpha23)
223     phi32 = conn_MSP_phi32(theta0, theta12, theta23, alpha23)
224
225     # Moment yielding strength
226     MyRK = conn_MSP_momentYielding(f_u, d)
227
228     # Embedment strength element 1
229     fh1k = conn_MSP_embedmentStrengthTimber(rho_k1, d, phi12)

```



```

231 # Embedment strengths element 2
232 if idx_type in [0]: # Timber - Timber - Timber
233     fh2k = conn_MSP_embedmentStrengthTimber(rho_k2, d, phi21)
234     fh23ak = conn_MSP_embedmentStrengthTimber(rho_k2, d, phi23)
235     fh23bk = conn_MSP_embedmentStrengthTimber(rho_k2, d, phi23)
236 elif idx_type in [1]: # Timber - Steel - Timber
237     fh2k = conn_MSP_embedmentStrengthSteel(f_s2, t2, d, "In")
238     fh23ak = conn_MSP_embedmentStrengthSteel(f_s2, t2, d, "Out")
239     fh23bk = conn_MSP_embedmentStrengthSteel(f_s2, t2, d, "In")
240
241 # Embedment strengths element 3
242 fh32ak = conn_MSP_embedmentStrengthTimber(rho_k3, d, phi32)
243 fh32bk = conn_MSP_embedmentStrengthTimber(rho_k3, d, phi32)
244
245 # Axial withdrawal capacity
246 fax_t_k = conn_MSP_axialWithdrawalCapacity(f_u, d, D_w, d_w, rho_k1, fc90k1)
247
248 # Lateral resistances of shear plane 1-2
249 list_SP12 = conn_MSP_lateralResistance_SP12(fh1k, fh2k, t1, t2, d, MyRk, fax_t_k, 0.25, k_rp2)
250 fvk12_A = list_SP12[0]
251 fvk12_B = list_SP12[1]
252 fvk12_C = list_SP12[2]
253 fvk12_D = list_SP12[3]
254 fvk12_E = list_SP12[4]
255 fvk12_F = list_SP12[5]
256 fvk12_G = list_SP12[6]
257
258 # Lateral resistances of shear plane 2-3
259 list_SP23 = conn_MSP_lateralResistance_SP23(fh23ak, fh23bk, fh32ak, fh32bk, t2, t3, d, MyRk, fax_t_k, 0.25, k_rp2)
260 fvk23_A = list_SP23[0]
261 fvk23_B = list_SP23[1]
262 fvk23_C = list_SP23[2]
263 fvk23_D = list_SP23[3]
264 fvk23_E = list_SP23[4]
265 fvk23_F = list_SP23[5]
266 fvk23_G = list_SP23[6]
267
268 # Lateral resistance of shear plane 1-2 and 2-3
269 list_fvk = conn_MSP_lateralResistance(fvk12_A, fvk12_B, fvk12_C, fvk12_D, fvk12_E, fvk12_F, fvk12_G, fvk23_A,
270                                     fvk23_B, fvk23_C, fvk23_D, fvk23_E, fvk23_F, fvk23_G)
271 fvk = list_fvk[0]
272 fvk12 = list_fvk[1]
273 fvk23 = list_fvk[2]
274 bezwijkcombinatie = list_fvk[3]
275
276 # Design lateral resistance of shear plane 1-2 and 2-3
277 fVRd12 = conn_MSP_charToDes(fvk12, n0, n90, kmod1, kmod2, gamma_m)
278 fVRd23 = conn_MSP_charToDes(fvk23, n0, n90, kmod2, kmod3, gamma_m)
279
280 # Check
281 f_v_sp12 = ((f_vEd1 * np.cos((theta0 + alpha1) * np.pi / 180))**2 + (f_vEd1 * np.sin((theta0 + alpha1) * np.pi / 180))**2)**0.5
282 f_v_sp23 = ((f_vEd1 * np.cos((theta0 + alpha1) * np.pi / 180) + f_vEd2 * np.cos((theta0 + theta12 + alpha2) * np.pi / 180))**2 +
283            (f_vEd1 * np.sin((theta0 + alpha1) * np.pi / 180) + f_vEd2 * np.sin((theta0 + theta12 + alpha2) * np.pi / 180))**2)**0.5
284
285 if f_v_sp12 <= fVRd12:
286     check12 = "OK"
287 else:
288     check12 = "NOK"
289
290 if f_v_sp23 <= fVRd23:
291     check23 = "OK"
292 else:
293     check23 = "NOK"
294
295 #Stiffness of the connection
296 k_ser_12 = conn_MSP_stiffness(idx_type, rho_m1, rho_m2, d)
297 k_ser_23 = conn_MSP_stiffness(idx_type, rho_m3, rho_m2, d)
298 k_sls = n0 * n90 * 2 * (k_ser_12 + k_ser_23)
299 k_uls = 2 * k_sls / 3
300
301 list_MSP_calculate = list([fVRd12, fVRd23, f_v_sp12, f_v_sp23, check12, check23, bezwijkcombinatie, k_sls, k_uls])
302 return list_MSP_calculate

```

```

304 def conn_MSP_checkSpacing(idx_fastener, a1, a2, a3c, a3t, a4c, a4t, d):
305     """Checks the spacing distances of the connection, according to prEN1995-1-1:20XX"""
306     a1_min = 5*d
307     if idx_fastener in [0]:
308         a2_min = 3*d
309     elif idx_fastener in [1]:
310         a2_min = 4*d
311     a3c_min = 4*d
312     a3t_min = max(7*d, 80)
313     a4c_min = 3*d
314     a4t_min = 4*d
315
316     if a1_min <= a1:
317         check_a1 = "OK"
318     else:
319         check_a1 = "NOK"
320
321     if a2_min <= a2:
322         check_a2 = "OK"
323     else:
324         check_a2 = "NOK"
325
326     if a3c_min <= a3c:
327         check_a3c = "OK"
328     else:
329         check_a3c = "NOK"
330
331     if a3t_min <= a3t:
332         check_a3t = "OK"
333     else:
334         check_a3t = "NOK"
335
336     if a4c_min <= a4c:
337         check_a4c = "OK"
338     else:
339         check_a4c = "NOK"
340
341     if a4t_min <= a4t:
342         check_a4t = "OK"
343     else:
344         check_a4t = "NOK"
345
346     list_MSP_checkSpacing = list([check_a1, check_a2, check_a3c, check_a3t, check_a4c, check_a4t])
347     return list_MSP_checkSpacing
348
349 def conn_MSP_checkEqui(f_vEd1, theta0, alpha1, f_vEd2, theta12, alpha2, f_vEd3, alpha3, theta23):
350     """Checks the force equilibrium the connection"""
351     list_alpha23 = conn_MSP_alpha23(f_vEd1, theta0, alpha1, f_vEd2, theta12, alpha2)
352     f_v_sp23_x = list_alpha23[0]
353     f_v_sp23_y = list_alpha23[1]
354
355     f_vEd3_x = f_vEd3 * np.cos((theta0 + theta12 + theta23 + alpha3) * np.pi / 180)
356     f_vEd3_y = f_vEd3 * np.sin((theta0 + theta12 + theta23 + alpha3) * np.pi / 180)
357
358     f_R = ((2 * f_v_sp23_x + f_vEd3_x)**2 + (2 * f_v_sp23_y + f_vEd3_y)**2)**0.5
359     if f_R <= 10:
360         checkEqui = "OK"
361     else:
362         checkEqui = "NOK"
363     return checkEqui
364
365 def conn_MSP_checkBolt(d, d_head, t1, D_w, t_w):
366     """Checks bolt-related requirements for the head pull-through resistance, according to prEN1995-1-1:20XX """
367     if 1.8 * d <= d_head:
368         check_d_head = "OK"
369     else:
370         check_d_head = "NOK"
371
372     if 4 * d <= t1:
373         check_t1 = "OK"
374     else:
375         check_t1 = "NOK"
376
377     if 3.4 * d <= D_w:
378         check_D_w = "OK"
379     else:
380         check_D_w = "NOK"
381
382     if 0.2 * d <= t_w:
383         check_t_w = "OK"
384     else:
385         check_t_w = "NOK"
386
387     list_MSP_checkBolt = list([check_d_head, check_t1, check_D_w, check_t_w])
388     return list_MSP_checkBolt

```

```

390 def conn_MSP_checkExtra(n0, n90, idx_type, t1, t2, t3, d, rho_k1, rho_k2, rho_k3):
391     """Some extra checks, according to prEN1995-1-1:20XX """
392     if 2 <= n0 * n90:
393         check_ntot = "OK"
394     else:
395         check_ntot = "NOK"
396
397     if idx_type in [0]:
398         t_timber = min(t1, t2, t3)
399     elif idx_type in [1]:
400         t_timber = min(t1, t3)
401
402     if t_timber == t1:
403         rho_k = rho_k1
404     elif t_timber == t2:
405         rho_k = rho_k2
406     elif t_timber == t3:
407         rho_k = rho_k3
408     t_min = max(7*d, (13*d-30)*rho_k/400)
409
410     if t_min <= t_timber:
411         check_t_timber = "OK"
412     else:
413         check_t_timber = "NOK"
414
415     list_MSP_checkExtra = list([check_ntot, check_t_timber])
416     return list_MSP_checkExtra

```

## Bijlage B: Volledige code van de database voor hout in 'database.py'

```
main.py x MSP.py x database.py x woodconnector_ui.py x
1 dtb_timber = {
2   # Column 0: f_m,k      characteristic bending strength
3   # Column 1: f_t,0,k    characteristic tensile strength parallel to the grain
4   # Column 2: f_t,90,k  characteristic tensile strength perpendicular to the grain
5   # Column 3: f_c,0,k    characteristic compressive strength parallel to the grain
6   # Column 4: f_c,90,k  characteristic compressive strength perpendicular to the grain
7   # Column 5: f_v,k     characteristic longitudinal shear strength out of plane
8   # Column 6: f_r,k     characteristic rolling shear strength
9   # Column 7: E_0,mean  mean modulus of elasticity parallel to the grain
10  # Column 8: E_0,05
11  # Column 9: E_90,mean mean modulus of elasticity perpendicular to the grain
12  # Column 10: E_90,05
13  # Column 11: G_mean
14  # Column 12: rho_k    characteristic density
15  # Column 13: rho_mean mean density
16  # Column 14: gamma_m  partial safety factor
17  # Column 15: kc90    load arrangement factor
18  # Column 16:         indicates the type of timber
19  #                   - 100: solid timber
20  #                   - 1: Glulam
21  # Column 17:         indicates if the property is a default material
22  # -----
23  'C14': [14, 7.2, 0.4, 16, 2, 3, 0, 7000, 4700, 230, 0, 440, 290, 350, 1.3, 1.25, 100, 0],
24  'C16': [16, 8.5, 0.4, 17, 2, 3.2, 0, 8000, 5400, 270, 0, 500, 310, 370, 1.3, 1.25, 100, 0],
25  'C18': [18, 10, 0.4, 18, 2.2, 3.4, 0, 9000, 6000, 300, 0, 560, 320, 380, 1.3, 1.25, 100, 0],
26  'C20': [20, 11.5, 0.4, 19, 2.3, 3.6, 0, 9500, 6400, 320, 0, 590, 330, 400, 1.3, 1.25, 100, 0],
27  'C22': [22, 13, 0.4, 20, 2.4, 3.8, 0, 10000, 6700, 330, 0, 630, 340, 410, 1.3, 1.25, 100, 0],
28  'C24': [24, 14.5, 0.4, 21, 2.5, 4, 0, 11000, 7400, 370, 0, 690, 350, 420, 1.3, 1.25, 100, 0],
29  'C27': [27, 16.5, 0.4, 22, 2.5, 4, 0, 11500, 7700, 30, 0, 720, 370, 430, 1.3, 1.25, 100, 0],
30  'C30': [30, 19, 0.4, 24, 2.7, 4, 0, 12000, 8000, 400, 0, 750, 380, 460, 1.3, 1.25, 100, 0],
31  'C35': [35, 22.5, 0.4, 25, 2.7, 4, 0, 13000, 8700, 430, 0, 810, 390, 470, 1.3, 1.25, 100, 0],
32  'C40': [40, 26, 0.4, 27, 2.8, 4, 0, 14000, 9400, 470, 0, 880, 400, 480, 1.3, 1.25, 100, 0],
33  'C45': [45, 30, 0.4, 29, 2.9, 4, 0, 15000, 10100, 500, 0, 940, 410, 490, 1.3, 1.25, 100, 0],
34  'C50': [50, 33.5, 0.4, 30, 3, 4, 0, 16000, 10700, 530, 0, 1000, 430, 520, 1.3, 1.25, 100, 0],
35  'D18': [18, 11, 0.6, 18, 4.8, 3.5, 0, 9500, 8000, 630, 0, 590, 475, 570, 1.3, 1.25, 100, 0],
36  'D24': [24, 14, 0.6, 21, 4.9, 3.7, 0, 10000, 8400, 670, 0, 630, 485, 580, 1.3, 1.25, 100, 0],
37  'D27': [27, 16, 0.6, 22, 5.1, 3.8, 0, 10500, 8800, 700, 0, 660, 510, 610, 1.3, 1.25, 100, 0],
38  'D30': [30, 18, 0.6, 24, 5.3, 3.9, 0, 11000, 9200, 730, 0, 690, 530, 640, 1.3, 1.25, 100, 0],
39  'D35': [35, 21, 0.6, 25, 5.4, 4.1, 0, 12000, 10100, 800, 0, 750, 540, 650, 1.3, 1.25, 100, 0],
40  'D40': [40, 24, 0.6, 27, 5.5, 4.2, 0, 13000, 10900, 870, 0, 810, 550, 660, 1.3, 1.25, 100, 0],
41  'D45': [45, 27, 0.6, 29, 5.8, 4.4, 0, 13500, 11300, 900, 0, 840, 580, 700, 1.3, 1.25, 100, 0],
42  'D50': [50, 30, 0.6, 30, 6.2, 4.5, 0, 14000, 11800, 930, 0, 880, 620, 740, 1.3, 1.25, 100, 0],
43  'D55': [55, 33, 0.6, 32, 6.6, 4.7, 0, 15500, 13000, 1030, 0, 970, 660, 790, 1.3, 1.25, 100, 0],
44  'D60': [60, 36, 0.6, 33, 10.5, 4.8, 0, 17000, 14300, 1130, 0, 1060, 700, 840, 1.3, 1.25, 100, 0],
45  'D65': [65, 39, 0.6, 35, 11.3, 5, 0, 18500, 15500, 1230, 0, 1160, 750, 900, 1.3, 1.25, 100, 0],
46  'D70': [70, 42, 0.6, 36, 12, 5, 0, 20000, 16800, 1330, 0, 1250, 800, 960, 1.3, 1.25, 100, 0],
47  'D75': [75, 45, 0.6, 37, 12.8, 5, 0, 22000, 18500, 1470, 0, 1380, 850, 1020, 1.3, 1.25, 100, 0],
48  'D80': [80, 48, 0.6, 38, 13.5, 5, 0, 24000, 20200, 1600, 0, 1500, 900, 1080, 1.3, 1.25, 100, 0],
49  'GL22h': [20, 16, 0.5, 20, 2.5, 3.5, 1.2, 8400, 7000, 300, 250, 650, 340, 370, 1.25, 1.5, 100, 0],
50  'GL22h': [22, 17.6, 0.5, 22, 2.5, 3.5, 1.2, 10500, 8800, 300, 250, 650, 370, 410, 1.25, 1.5, 100, 0],
51  'GL24h': [24, 19.2, 0.5, 24, 2.5, 3.5, 1.2, 11500, 9600, 300, 250, 650, 385, 420, 1.25, 1.5, 100, 0],
52  'GL26h': [26, 20.8, 0.5, 26, 2.5, 3.5, 1.2, 12100, 10100, 300, 250, 650, 405, 445, 1.25, 1.5, 100, 0],
53  'GL28h': [28, 22.3, 0.5, 28, 2.5, 3.5, 1.2, 12600, 10500, 300, 250, 650, 425, 460, 1.25, 1.5, 100, 0],
54  'GL28hs': [28, 22.3, 0.5, 28, 2.5, 3.5, 1.2, 12600, 10500, 300, 250, 650, 425, 460, 1.25, 1.5, 100, 0],
55  'GL30h': [30, 24, 0.5, 30, 2.5, 3.5, 1.2, 13600, 11300, 300, 250, 650, 430, 480, 1.25, 1.5, 100, 0],
56  'GL32h': [32, 25.6, 0.5, 32, 2.5, 3.5, 1.2, 14200, 11800, 300, 250, 650, 440, 490, 1.25, 1.5, 100, 0],
57  'GL20c': [20, 15, 0.5, 18.5, 2.5, 3.5, 1.2, 10400, 8600, 300, 250, 250, 355, 390, 1.25, 1.5, 100, 0],
58  'GL22c': [22, 16, 0.5, 20, 2.5, 3.5, 1.2, 10400, 8600, 300, 250, 650, 355, 390, 1.25, 1.5, 100, 0],
59  'GL24c': [24, 17, 0.5, 21.5, 2.5, 3.5, 1.2, 11000, 9100, 300, 250, 650, 365, 400, 1.25, 1.5, 100, 0],
60  'GL26c': [26, 19, 0.5, 23.5, 2.5, 3.5, 1.2, 12000, 10000, 300, 250, 650, 385, 420, 1.25, 1.5, 100, 0],
61  'GL28c': [28, 19.5, 0.5, 24, 2.5, 3.5, 1.2, 12500, 10400, 300, 250, 650, 390, 420, 1.25, 1.5, 100, 0],
62  'GL28cs': [28, 19.5, 0.5, 24, 2.5, 3.5, 1.2, 12500, 10400, 300, 250, 650, 390, 420, 1.25, 1.5, 100, 0],
63  'GL30c': [30, 19.5, 0.5, 24.5, 2.5, 3.5, 1.2, 13000, 10800, 300, 250, 650, 390, 430, 1.25, 1.5, 100, 0],
64  'GL32c': [32, 19.5, 0.5, 24.5, 2.5, 3.5, 1.2, 13500, 11200, 300, 250, 650, 400, 440, 1.25, 1.5, 100, 0]
65 }
```



## Bijlage C: Volledige codes van functies gedefinieerd in 'main.py'

```
70 def css_msp(self):
71     # Buttons
72     self.BTN_MSP_calculate.clicked.connect(lambda: self.execute_msp())
73     self.BTN_MSP_detailFastener_zoom_in.clicked.connect(lambda: self.slider_MSP_detailFastener.setValue(self.slider_MSP_detailFastener.value()+10))
74     self.BTN_MSP_detailFastener_zoom_out.clicked.connect(lambda: self.slider_MSP_detailFastener.setValue(self.slider_MSP_detailFastener.value()-10))
75     self.BTN_MSP_2D_zoom_in.clicked.connect(lambda: self.slider_MSP_2D.setValue(self.slider_MSP_2D.value()+10))
76     self.BTN_MSP_2D_zoom_out.clicked.connect(lambda: self.slider_MSP_2D.setValue(self.slider_MSP_2D.value()-10))
77     self.BTN_MSP_3D_zoom_in.clicked.connect(lambda: self.slider_MSP_3D.setValue(self.slider_MSP_3D.value()+10))
78     self.BTN_MSP_3D_zoom_out.clicked.connect(lambda: self.slider_MSP_3D.setValue(self.slider_MSP_3D.value()-10))
79     self.BTN_MSP_detailGeoConn_zoom_in.clicked.connect(lambda: self.slider_MSP_detailGeoConn.setValue(self.slider_MSP_detailGeoConn.value()+10))
80     self.BTN_MSP_detailGeoConn_zoom_out.clicked.connect(lambda: self.slider_MSP_detailGeoConn.setValue(self.slider_MSP_detailGeoConn.value()-10))
81
82     # Dropdowns
83     self.DD_MSP_MS_serviceClass.currentIndexChanged.connect(lambda: self.msp_set_kmod())
84     self.DD_MSP_MS_loadDurationClass.currentIndexChanged.connect(lambda: self.msp_set_kmod())
85     self.DD_MSP_typeOfConnection.currentIndexChanged.connect(lambda: self.set_up_tab_msp())
86     self.DD_MSP_propF_type.currentIndexChanged.connect(lambda: self.set_up_tab_msp_fastener())
87
88     # Sliders
89     self.slider_MSP_detailFastener.valueChanged.connect(lambda: resize_image(
90         lbl=self.img_MSP_detailFastener,
91         frame=self.FR_MSP_detailFastener,
92         source_img= ["/multiple shear plane/dowel.png",
93                     "/multiple shear plane/bolt.png"][self.DD_MSP_propF_type.currentIndex()],
94         scale=0.01*self.slider_MSP_detailFastener.value(),
95         lbl_out=self.out_MSP_detailFastener_zoom
96     ))
97     self.slider_MSP_2D.valueChanged.connect(lambda: resize_image(
98         lbl=self.img_MSP_2D,
99         frame=self.FR_MSP_2D,
100        source_img= ["/multiple shear plane/hoh 2d.png",
101                    "/multiple shear plane/soh 2d.png"][self.DD_MSP_typeOfConnection.currentIndex()],
102        scale=0.01*self.slider_MSP_2D.value(),
103        lbl_out=self.out_MSP_2D_zoom
104    ))
105     self.slider_MSP_3D.valueChanged.connect(lambda: resize_image(
106         lbl=self.img_MSP_3D,
107         frame=self.FR_MSP_3D,
108         source_img= ["/multiple shear plane/hoh 3d.png",
109                     "/multiple shear plane/soh 3d.png"][self.DD_MSP_typeOfConnection.currentIndex()],
110         scale=0.01*self.slider_MSP_3D.value(),
111         lbl_out=self.out_MSP_3D_zoom
112    ))
113     self.slider_MSP_detailGeoConn.valueChanged.connect(lambda: resize_image(
114         lbl=self.img_MSP_detailGeoConn,
115         frame=self.FR_MSP_detailGeoConn,
116         source_img= "/multiple shear plane/geo conn.png",
117         scale=0.01*self.slider_MSP_detailGeoConn.value(),
118         lbl_out=self.out_MSP_detailGeoConn_zoom
119    ))
120
121 def connect_signals_slots(self):
122     # OVERVIEW
123     # ++++++
124     self.LW_overview.currentItemChanged.connect(self.changeSelection)
125
126     # TIMBER TO TIMBER
127     # ++++++
128     self.css_ttt()
129
130     # RACKING WALL
131     # ++++++
132     self.css_rw()
133
134     # MULTIPLE SHEAR PLANE
135     # ++++++
136     self.css_msp()
137
138     # EXPERIMENTAL
139     # ++++++
140     self.css_experimental()
```

```

372 def execute_msp(self):
373     # Determine selected type
374     idx_type = self.DD_MSP_typeOfConnection.currentIndex()
375
376     if idx_type in [0, 1]: # All connections
377         # Input applied loads
378         f_vEd1 = float(self.INP_MSP_appliedLoad1_0_load.text().replace(",","."))
379         alpha1 = float(self.INP_MSP_appliedLoad1_1_angle.text().replace(",","."))
380         f_vEd2 = float(self.INP_MSP_appliedLoad2_0_load.text().replace(",","."))
381         alpha2 = float(self.INP_MSP_appliedLoad2_1_angle.text().replace(",","."))
382         f_vEd3 = float(self.INP_MSP_appliedLoad3_0_load.text().replace(",","."))
383         alpha3 = float(self.INP_MSP_appliedLoad3_1_angle.text().replace(",","."))
384
385         # Input properties elements
386         t1 = float(self.INP_MSP_prop1_thickness1.text().replace(",","."))
387         theta0 = float(self.INP_MSP_prop1_angle0.text().replace(",","."))
388         timber1 = self.DD_MSP_prop1_materialElement1.currentText()
389         rho_k1 = self.dtb_timber[timber1][12]
390         rho_m1 = self.dtb_timber[timber1][13]
391         fc90k1 = self.dtb_timber[timber1][4]
392
393         t2 = float(self.INP_MSP_prop2_thickness2.text().replace(",","."))
394         theta12 = float(self.INP_MSP_prop2_angle12.text().replace(",","."))
395         timber2 = self.DD_MSP_prop2_materialElement2.currentText()
396         rho_k2 = self.dtb_timber[timber2][12]
397         rho_m2 = self.dtb_timber[timber2][13]
398         f_s2 = float(self.INP_MSP_prop2_embedStr2.text().replace(",","."))
399
400         t3 = float(self.INP_MSP_prop3_thickness3.text().replace(",","."))
401         theta23 = float(self.INP_MSP_prop3_angle23.text().replace(",","."))
402         timber3 = self.DD_MSP_prop3_materialElement3.currentText()
403         rho_k3 = self.dtb_timber[timber3][12]
404         rho_m3 = self.dtb_timber[timber3][13]
405
406         # Input properties fastener
407         # Input properties fastener
408         idx_fastener = self.DD_MSP_propF_type.currentIndex()
409         k_rp2 = [0, 0.25][idx_fastener]
410         f_u = float(self.INP_MSP_propF_fu.text().replace(",","."))
411         d = float(self.INP_MSP_propF_diameter.text().replace(",","."))
412         d_head = float(self.INP_MSP_propF_diameterBoltHead.text().replace(",","."))
413         D_w = float(self.INP_MSP_propF_diameterWasherOut.text().replace(",","."))
414         d_w = float(self.INP_MSP_propF_diameterWasherIn.text().replace(",","."))
415         t_w = float(self.INP_MSP_propF_washerThickness.text().replace(",","."))
416
417         # Input geometry connection
418         n0 = float(self.INP_MSP_geoConn_numberPara.text().replace(",","."))
419         n90 = float(self.INP_MSP_geoConn_numberPerp.text().replace(",","."))
420         a1 = float(self.INP_MSP_geoConn_a1.text().replace(",","."))
421         a2 = float(self.INP_MSP_geoConn_a2.text().replace(",","."))
422         a3c = float(self.INP_MSP_geoConn_a3c.text().replace(",","."))
423         a3t = float(self.INP_MSP_geoConn_a3t.text().replace(",","."))
424         a4c = float(self.INP_MSP_geoConn_a4c.text().replace(",","."))
425         a4t = float(self.INP_MSP_geoConn_a4t.text().replace(",","."))
426
427         # Input modification- and safety factors
428         kmod1 = float(self.INP_MSP_MS_kmod1.text().replace(",","."))
429         if idx_type in [0]: # Timber - Timber - Timber
430             kmod2 = float(self.INP_MSP_MS_kmod2.text().replace(",","."))
431         elif idx_type in [1]: # Timber - Steel - Timber
432             kmod2 = 1.00
433         kmod3 = float(self.INP_MSP_MS_kmod3.text().replace(",","."))
434         gamma_m = float(self.INP_MSP_MS_safetyfactor.text().replace(",","."))
435
436         # Execute calculation
437         list_MSP_calculate = conn_MSP_calculate(idx_type, f_vEd1, theta0, alpha1, f_vEd2, theta12, alpha2, theta23,
438             k_rp2, f_u, d, D_w, d_w, rho_k1, rho_k2, rho_k3, rho_m1, rho_m2,
439             rho_m3, f_s2, t1, t2, t3, fc90k1, n0, n90, kmod1, kmod2, kmod3, gamma_m)
440
441         f_vRd12 = list_MSP_calculate[0]
442         f_vRd23 = list_MSP_calculate[1]
443         f_v_sp12 = list_MSP_calculate[2]
444         f_v_sp23 = list_MSP_calculate[3]
445         check12 = list_MSP_calculate[4]
446         check23 = list_MSP_calculate[5]
447         bezwijkcombinatie = list_MSP_calculate[6]
448         k_sls = list_MSP_calculate[7]
449         k_uls = list_MSP_calculate[8]
450
451         #Execute checks

```

```

449 #Execute checks
450 list_MSP_checkSpacing = conn_MSP_checkSpacing(idx_fastener, a1, a2, a3c, a3t, a4c, a4t, d)
451 check_a1 = list_MSP_checkSpacing[0]
452 check_a2 = list_MSP_checkSpacing[1]
453 check_a3c = list_MSP_checkSpacing[2]
454 check_a3t = list_MSP_checkSpacing[3]
455 check_a4c = list_MSP_checkSpacing[4]
456 check_a4t = list_MSP_checkSpacing[5]
457
458 checkEqui = conn_MSP_checkEqui(f_vEd1, theta0, alpha1, f_vEd2, theta12, alpha2, f_vEd3, alpha3, theta23)
459
460 list_MSP_checkBolt = conn_MSP_checkBolt(d, d_head, t1, D_w, t_w)
461 check_d_head = list_MSP_checkBolt[0]
462 check_t1 = list_MSP_checkBolt[1]
463 check_D_w = list_MSP_checkBolt[2]
464 check_t_w = list_MSP_checkBolt[3]
465
466 list_MSP_checkExtra = conn_MSP_checkExtra(n0, n90, idx_type, t1, t2, t3, d, rho_k1, rho_k2, rho_k3)
467 check_ntot = list_MSP_checkExtra[0]
468 check_t_timber = list_MSP_checkExtra[1]
469
470 else:
471     fvRd12 = 0
472     fvRd23 = 0
473     f_v_sp12 = 0
474     f_v_sp23 = 0
475     check12 = 0
476     check23 = 0
477     bezwijkcombinatie = 0
478     k_sls = 0
479     k_uls = 0
480     check_a1 = 0
481     check_a2 = 0
482     check_a3c = 0
483     check_a3t = 0
484     check_a4c = 0
485     check_a4t = 0
486     checkEqui = 0
487     check_d_head = 0
488     check_t1 = 0
489     check_D_w = 0
490     check_t_w = 0
491     check_ntot = 0
492     check_t_timber = 0
493
494 # Show results in Python Console
495 print(f"The lateral resistance of shear plane 1-2 is {fvRd12:.2f}N, ")
496 print(f"The lateral resistance of shear plane 2-3 is {fvRd23:.2f}N, ")
497
498 # Create text to show in results dialog
499 s_result = f"{'CHECKS IN ADVANCE'}"
500 s_result += f"\n{40* '='}"
501 s_result += f"\n{40* '='}"
502
503 s_result += f"\n{'Check spacing distances:}'"
504 s_result += f"\n{'a_1'} => {check_a1} ; {'a_3c'} => {check_a3c} ; {'a_3t'} => {check_a3t}"
505 s_result += f"\n{'a_2'} => {check_a2} ; {'a_4c'} => {check_a4c} ; {'a_4t'} => {check_a4t}"
506 s_result += f"\n{'If NOK, increase relevant spacing distance and/or decrease diameter of the fasteners.'}"
507 s_result += f"\n{40* '='}"
508
509 s_result += f"\n{'Check equilibrium applied loads:}'"
510 s_result += f"\n{'Force equilibrium in the connection is'} => {checkEqui}"
511 s_result += f"\n{'If NOK, enter data applied forces more accurately or recalculate these forces.'}"
512 s_result += f"\n{40* '='}"
513
514 if idx_fastener in [0]:
515     s_result += f"\n{'When using dowels, no bolt-related requirements should be checked.'}"
516 elif idx_fastener in [1]:
517     s_result += f"\n{'Check bolt-related requirements:}'"
518     s_result += f"\n{'d_head'} => {check_d_head} ; {'t1'} => {check_t1}"
519     s_result += f"\n{'D_w'} => {check_D_w} ; {'t_w'} => {check_t_w}"
520     s_result += f"\n{'If NOK, increase relevant (bolt) dimension and/or decrease diameter of the bolts.'}"
521     s_result += f"\n{40* '='}"
522
523 s_result += f"\n{'Extra design checks for connections:}'"
524 s_result += f"\n{'Number of fasteners is'} => {check_ntot}"
525 s_result += f"\n{'At least 2 fasteners must be used.'}"
526 s_result += f"\n{'Minimum thickness of timber elements is'} => {check_t_timber}"
527 s_result += f"\n{'If NOK, increase thickness of thinnest timber element and/or decrease diameter of the fasteners.'}"
528

```



```

529 s_result += f"\n{40*'}"
530 s_result += f"\n{40*'}"
531 s_result += f"\n{'CHECKS AFTERWARDS'}"
532 s_result += f"\n{40*'}"
533 s_result += f"\n{40*'}"
534
535 s_result += f"\n{'Connection Strength in shear plane 1-2,   F_vRd12'} = {fvRd12:6.2f} N"
536 s_result += f"\n{'Design Force in shear plane 1-2,       F_v_sp12'} = {f_v_sp12:6.2f} N"
537 s_result += f"\n{'Design for shear plane 1-2'} => {check12}"
538 s_result += f"\n{40*'}"
539
540 s_result += f"\n{'Connection Strength in shear plane 2-3,   F_vRd23'} = {fvRd23:6.2f} N"
541 s_result += f"\n{'Design Force in shear plane 2-3,       F_v_sp23'} = {f_v_sp23:6.2f} N"
542 s_result += f"\n{'Design for shear plane 2-3'} => {check23}"
543 s_result += f"\n{40*'}"
544
545 s_result += f"\n{'The connection would fail by failure combination '}{bezwijkcombinatie}"
546 s_result += f"\n{40*'}"
547
548 if theta12 == 180 and theta12 == 180 and alpha1 == 0 and alpha2 == 0 and alpha3 == 0 :
549     s_result += f"\n{'Stiffness SLS,                       K_sls'} = {k_sls:6.2f} N/mm"
550     s_result += f"\n{'Stiffness ULS,                       K_uls'} = {k_uls:6.2f} N/mm"
551 else:
552     s_result += f"\n{'The calculation in this software for the stiffness of the connection'}"
553     s_result += f"\n{'is not valid for this configuration of the connection.'}"
554
555 # Show results dialog
556 s_result += f"\n{40*'}"
557 s_result += f"\n{40*'}"
558 dlg = dlg_results(list_results=s_result)
559 dlg.exec_()

```

```

814 def msp_set_kmod(self):
815     # Determine kmod values
816     idx_type = self.DD_MSP_typeOfConnection.currentIndex()
817     idx_sc = self.DD_MSP_MS_serviceClass.currentIndex()
818     idx_dur = self.DD_MSP_MS_loadDurationClass.currentIndex()
819     timber1 = self.DD_MSP_prop1_materialElement1.currentText()
820     timber2 = self.DD_MSP_prop2_materialElement2.currentText()
821     timber3 = self.DD_MSP_prop3_materialElement3.currentText()
822     idx_mat1 = self.dtb_timber[timber1][16]
823     idx_mat2 = self.dtb_timber[timber2][16]
824     idx_mat3 = self.dtb_timber[timber3][16]
825     idx = idx_dur + 5 * idx_sc
826     kmod1 = self.dtb_kmod[idx_mat1][idx]
827     if idx_type in [0]:
828         kmod2 = self.dtb_kmod[idx_mat2][idx]
829     elif idx_type in [1]:
830         kmod2 = 1.00
831     kmod3 = self.dtb_kmod[idx_mat3][idx]
832
833     # Display kmod values
834     self.INP_MSP_MS_kmod1.setText(f"{kmod1:.2f}")
835     self.INP_MSP_MS_kmod2.setText(f"{kmod2:.2f}")
836     self.INP_MSP_MS_kmod3.setText(f"{kmod3:.2f}")

```

```

887 def set_up_dropdowns(self):
888     # TIMBER PROPERTIES
889     s = self.dtb_timber.keys()
890     # Timber to timber
891     self.DD_TTT_material_1.addItem(s)
892     self.DD_TTT_material_2.addItem(s)
893     # Multiple Shear planes
894     self.DD_MSP_prop1_materialElement1.addItem(s)
895     self.DD_MSP_prop2_materialElement2.addItem(s)
896     self.DD_MSP_prop3_materialElement3.addItem(s)
897
898     # BOLT PROPERTIES
899     # Timber to timber
900     s = self.dtb_bolts.keys()
901     self.DD_TTT_bolts_type.addItem(s)
902
903 def set_up_tables(self):...
904
905 def set_up_tabs(self):
906     # Timber to timber
907     self.set_up_tab_ttt()
908
909     # RW
910     self.set_up_tab_rw()
911
912     # MSP
913     self.set_up_tab_msp()
914
915
916
917
918

```

```

985 def set_up_tab_msp(self):
986     # Enable/disable
987     idx = self.DD_MSP_typeOfConnection.currentIndex()
988
989     if idx in [0]:
990         list_panels_true = [self.FR_MSP_prop2_materialElement2, self.FR_MSP_MS_kmod2]
991         list_panels_false = [self.FR_MSP_prop2_embedStr2]
992
993     elif idx in [1]:
994         list_panels_true = [self.FR_MSP_prop2_embedStr2]
995         list_panels_false = [self.FR_MSP_prop2_materialElement2, self.FR_MSP_MS_kmod2]
996
997     # Apply visibility
998     for panel in list_panels_true:
999         panel.setVisible(True)
1000     for panel in list_panels_false:
1001         panel.setVisible(False)
1002
1003     # Resize images
1004     img = ["/multiple shear plane/hoh 2d.png",
1005           "/multiple shear plane/soh 2d.png"][self.DD_MSP_typeOfConnection.currentIndex()]
1006     resize_image(lbl=self.img_MSP_2D, frame=self.FR_MSP_2D, source_img=img,
1007                scale=0.01*self.slider_MSP_2D.value(), lbl_out=self.out_MSP_2D_zoom)
1008
1009     img = ["/multiple shear plane/hoh 3d.png",
1010           "/multiple shear plane/soh 3d.png"][self.DD_MSP_typeOfConnection.currentIndex()]
1011     resize_image(lbl=self.img_MSP_3D, frame=self.FR_MSP_3D, source_img=img,
1012                scale=0.01*self.slider_MSP_3D.value(), lbl_out=self.out_MSP_3D_zoom)
1013
1014     img = "/multiple shear plane/geo conn.png"
1015     resize_image(lbl=self.img_MSP_detailGeoConn, frame=self.FR_MSP_detailGeoConn, source_img=img,
1016                scale=0.01*self.slider_MSP_detailGeoConn.value(), lbl_out=self.out_MSP_detailGeoConn_zoom)
1017
1018     # Connector type selection
1019     if idx in [0, 1]:
1020         self.set_up_tab_msp_fastener()
1021
1022 def set_up_tab_msp_fastener(self):
1023     # Enable/disable
1024     idx_fastener = self.DD_MSP_propF_type.currentIndex()
1025
1026     # Apply visibility
1027     if idx_fastener in [0]:
1028         self.FR_MSP_propF_boltExtra.setVisible(False)
1029     elif idx_fastener in [1]:
1030         self.FR_MSP_propF_boltExtra.setVisible(True)
1031
1032     # Resize images
1033     img = ["/multiple shear plane/dowel.png",
1034           "/multiple shear plane/bolt.png"][self.DD_MSP_propF_type.currentIndex()]
1035     resize_image(lbl=self.img_MSP_detailFastener, frame=self.FR_MSP_detailFastener, source_img=img,
1036                scale=0.01*self.slider_MSP_detailFastener.value(), lbl_out=self.out_MSP_detailFastener_zoom)

```