

Faculteit Industriële
Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

Onderzoek naar het in-het-vlak afschuifgedrag van structurele hybride hout-
glaswandelementen

Jasper van Berlo
Ruben Wagemans

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

BEGELEIDER :

ing. Tine ENGELEN

Gezamenlijke opleiding UHasselt 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



2024
2025

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

***Onderzoek naar het in-het-vlak afschuifgedrag van structurele hybride hout-
glaswandelementen***

Jasper van Berlo
Ruben Wagemans

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

BEGELEIDER :

ing. Tine ENGELÉN



KU LEUVEN

Woord vooraf

Deze masterproef vormt voor ons het sluitstuk van onze opleiding tot industrieel ingenieur. Tijdens dit traject hebben we niet alleen bijgeleerd over het onderwerp zelf, maar ook over het uitvoeren van toegepast onderzoek, het opzetten en analyseren van proeven in labo-omstandigheden, en het omgaan met de diverse uitdagingen die bij dergelijk onderzoek komen kijken.

Graag willen we deze gelegenheid gebruiken om een aantal mensen te bedanken die ons ondersteund hebben bij de totstandkoming van deze thesis.

Allereerst willen wij onze promotor, Prof. dr. ing. Bram Vandoren, bedanken voor de mogelijkheid om aan dit onderwerp te mogen werken. In het bijzonder gaat onze dank uit naar onze begeleider, ing. Tine Engelen, voor haar betrokkenheid, inhoudelijke ondersteuning en waardevolle feedback. Haar begeleiding is van grote betekenis geweest voor het succesvol afronden van dit werk.

Daarnaast willen we onze ouders bedanken voor de kans om deze studie te mogen volgen en voor hun onvoorwaardelijke steun tijdens het werken aan deze masterproef.

Ook zijn we onze vrienden dankbaar voor de momenten van ontspanning en relativering die zij ons boden gedurende dit intensieve traject.

Tot slot willen we iedereen bedanken die, op welke manier dan ook, een positieve bijdrage heeft geleverd aan dit werk.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst met tabellen	7
Lijst met figuren	10
Abstract	11
Abstract in English	13
1 Inleiding	15
1.1 Situering	15
1.2 Probleemstelling	15
1.3 Doelstellingen	16
1.4 Materialen en methode	16
1.4.1 WP1: Voorbereiding proefstukken en testen	16
1.4.2 WP2: Literatuurstudie	17
1.4.3 WP3: Opbouw numeriek model	17
1.4.4 WP4: Analytisch model	18
2 Literatuurstudie	19
2.1 Inleiding	19
2.2 Materialen	21
2.2.1 Glas	21
2.2.2 Hout	21
2.2.3 Lijmen	21
2.3 Meetmethodes	22
2.3.1 Lineair Variabele Differentiaaltransformer (LVDT)	22
2.3.2 Digital Image Correlation (DIC)	22
2.3.3 Rekstrookjes	23
2.3.4 Fiber Bragg Grating (FBG)	24
2.4 Faalmechanismen	26
2.4.1 Falen van lijm	26
2.4.2 Falen van schroefverbinding	26
2.4.3 Falen van hout	28
2.4.4 Falen van glas	29
2.5 Analytische model	30

2.6	Numeriek model	31
2.6.1	Diagonaalmodel	31
2.6.2	Veermodel van Kreuzinger en Niedermaier	33
2.6.3	Verankering	33
2.7	Conclusie	36
3	Schranskweerstandproeven	37
3.1	Inleiding	37
3.2	Materialen en Methode	37
3.2.1	Proefstukken	37
3.2.2	Proefopstelling	39
3.2.3	Plaatsing sensoren	40
3.3	Resultaten	42
3.3.1	Faalmechanismen	42
3.3.2	Meetresultaten	44
3.4	Conclusie	48
4	Analytisch model	49
4.1	Inleiding	49
4.2	Methode	49
4.2.1	Bepaling krachten en reactiekrachten uit vrijlichaamsschema	49
4.2.2	Bepaling uitwijking volgens bruikbaarheidsgrenstoestand	50
4.2.3	Methode bepaling equivalente stijfheid combinatie lijm- en schroefverbinding volgens dr. Hochenhauser	55
4.3	Voorbeeld berekening	58
4.4	Resultaten en discussie	62
4.4.1	Proefstukken met volledige verankering	63
4.4.2	Proefstukken met gedeeltelijke verankering	64
4.4.3	Vergelijking componenten	66
4.5	Conclusie	69
5	Numeriek model	71
5.1	Inleiding	71
5.2	Opbouw modules	71
5.2.1	Geometrie	71
5.2.2	Verbindingen	72
5.3	Resultaten	76
5.3.1	Proefstukken met volledige verankering	76
5.3.2	Proefstukken met gedeeltelijke verankering	77
5.3.3	Vergelijking componenten	79
5.4	Conclusie	82
6	Conclusie	83
	Literatuurlijst	89
A	Bijlage - Bijkomende berekeningen numeriek model	91

Lijst van tabellen

3.1	Lijmtype, bijkomende verankering en regellengte van de geteste proefstukken . . .	38
4.1	Vergelijking tussen experimentele stijfheden en analytische modellen	69
5.1	Vergelijking tussen experimentele stijfheden en numeriek model	82
B.1	Stijfheid Doordruk proeven bouten	97

Lijst van figuren

2.1	Schematische weergaven hybride hout-glas wandelement	19
2.2	Schematische weergave verankeringsmethode wandelementen	20
2.3	Voorbeeld toegepaste houtsoorten	21
2.4	Opbouw LVDT	22
2.5	Verschillende cameraopstellingen voor 2D of 3D metingen met DIC	23
2.6	Voorbeeld van niet-uniform patroon voor DIC	23
2.7	Wheatstone bruggen om nauwkeurigheid te verhogen en temperatuurinvloed te compenseren	24
2.8	Schematische voorstelling FBG	25
2.9	Optische vezel geïntegreerd in het gelamineerd glas	25
2.10	Adhesief en cohesief falen	26
2.11	Faalmechanismen van schroefverbinding onder axiale belasting	27
2.12	Mogelijke faalmechanisme verbindingsmiddelen met één afschuifvlak	27
2.13	Mogelijke faalmechanisme hout met verbindingsmiddelen	28
2.14	Compressie faalmechanisme in LVL	28
2.15	Faalmechanismes LVL onder buiging	29
2.16	Scheurvorming glas	29
2.17	Verschillend breukpatroon gegloeid en gehard glas	30
2.18	Vervormingscomponenten aan de bovenzijde van een wandpaneel	31
2.19	Diagonaal model	32
2.20	Veermodel van Kreuzinger en Niedermaier	33
2.21	Vereenvoudigd model van de verankeringsverbinding van de <i>tie-down</i>	34
2.22	Eindige elementen model van de verankeringsverbinding van de	34
2.23	Numeriek model van de verankeringsverbinding van de <i>tie-down</i>	35
2.24	Afmetingen verankeringsmiddel	36
3.1	Vooraanzicht proefstuk met afmetingen	37
3.2	Dwarsdoorsnede proefstuk met opbouw glasplaat	39
3.3	Schematische voorstelling proefopstelling	40
3.4	Verhinderende verplaatsing uit het vlak	40
3.5	Schematische weergave plaatsing LVDT's voorzijde proefstuk	41
3.6	Schematische weergave plaatsing LVDT's achterzijde proefstuk	41
3.7	Schematische weergave aangepaste plaatsing LVDT's voorzijde proefstuk	42
3.8	Cohesief falen van het proefstuk	43
3.9	Adhesief falen van proefstuk D-FBG-P	43
3.10	Falen van de schroefverbinding door opwaartse verplaatsing proefstuk K-SG-P	43
3.11	Kracht-verplaatsingsdiagram LVDT-sensor 6	44

3.12	Kracht-verplaatsingsdiagram LVDT-sensor 6 tot 5 kN	44
3.13	Afschuifspanning-rek diagram afschuifproeven lijmen	45
3.14	LVDT sensor 3: Rek in het verankeringssysteem	46
3.15	LVDT sensor 4: Starre lichaamstranslatie	47
3.16	LVDT sensor 5: compressie van de onderregel loodrecht op de vezelrichting	48
4.1	Structureel schema voor wanden met randverankering	50
4.2	Vervormingscomponenten aan de bovenzijde van een wandpaneel	51
4.3	Effectieve spreiding lengte van een continu ondersteund element met een hoogte kleiner dan 280 mm	54
4.4	Bepaling van de dikte gelaagd glas	55
4.5	Geometrie houtschroeven	56
4.6	Schuifspanning en rek diagram met aanduiding $G_{80\%}$	57
4.7	Vergelijking analytische modellen met experimentele resultaten Dowsil TM 993 met <i>tie-down</i> verankering	63
4.8	Vergelijking analytische modellen met experimentele resultaten Kömmerling Ködiglaze S met <i>tie-down</i> verankering	64
4.9	Vergelijking analytische modellen met experimentele resultaten Dowsil TM 993 met gedeeltelijke verankering	65
4.10	Vergelijking analytische modellen met experimentele resultaten Kömmerling Ködiglaze S met gedeeltelijke verankering	65
4.11	Vergelijking verticale verplaatsing experimentele resultaten met u_M analytisch model	66
4.12	Vergelijking horizontale verplaatsing experimentele resultaten met u_V analytisch model	67
4.13	Vergelijking experimentele resultaten compressie onderregel met u_C analytisch model	68
5.1	Geometrie structuur BuildSoft Diamonds	72
5.2	Lokale assen schroeven LVL kader	73
5.3	Stijfheden LVL schroeven	73
5.4	Stijfheid adapter schroeven in Diamonds	74
5.5	Stijfheden Lijmen in Diamonds	74
5.6	Stijfheden Bouten	75
5.7	Opbouw <i>tie-down</i>	75
5.8	Vergelijking numeriek model met experimentele resultaten Dowsil TM 993 met <i>tie-down</i> verankering	76
5.9	Vergelijking numeriek model met experimentele resultaten Kömmerling Ködiglaze S met <i>tie-down</i> verankering	77
5.10	Vergelijking numeriek model met experimentele resultaten Dowsil TM 993 met gedeeltelijke verankering	78
5.11	Vergelijking numeriek model met experimentele resultaten Kömmerling Ködiglaze S met gedeeltelijke verankering	78
5.12	Vergelijking verticale verplaatsing U_m experimentele resultaten en numeriek model	79
5.13	Vergelijking horizontale verplaatsing U_v experimentele resultaten en numeriek model	80
5.14	Vergelijking verticale verplaatsing U_c experimentele resultaten en numeriek model	81
B.1	Resultaten doordruk test	97

Abstract

Deze masterproef richt zich op de stijfheid van hybride hout-glaswandelementen, waarbij met behulp van een lijmverbinding de glasplaat wordt geactiveerd als structureel element. In de huidige Eurocode 5 of Eurocode 10 is er geen methode opgenomen om de stijfheid van de lijmverbinding tussen het glas en het hout te bepalen. Daarom is het hoofddoel om een ontwerpmethode te ontwikkelen voor het bepalen van de stijfheid van een hybride hout-glaswandelement.

Op basis van de resultaten van de uitgevoerde schrankweerstandproeven wordt er een analytisch en een numeriek model opgebouwd. Het analytisch model is een lineair model gebaseerd op Eurocode 5 (prEN 1995-1-1:2025) voor het bepalen van de uitwijking van het wandelement. Het numeriek model wordt opgebouwd in de eindige-elementensoftware BuildSoft Diamonds waarbij de verbindingen gesimuleerd wordt met veerelementen waarbij rekening gehouden wordt met de niet-lineariteit van de lijm- en schroefverbinding.

De resultaten tonen aan dat de maximale uitwijking van de experimenten benaderd kan worden met een afwijking van maximaal 15% door het analytisch model en 21% voor het numeriek model. Voor het krachtinterval tussen 1 tot 5 kN is de gemiddelde afwijking 146% voor het analytisch model en 74% voor het numeriek model. De conclusie is dat, hoewel de modellen de initiële stijfheid onderschatten, de combinatie van het analytisch en numeriek model gebruikt kan worden voor het ontwerpen van een hybride hout-glaswandelement.

Abstract in English

This master's thesis focuses on the stiffness of hybrid timber-glass wall elements, in which an adhesive bond is used to activate the glass panel as a structural element. Neither Eurocode 5 nor Eurocode 10 includes a method for determining the stiffness of the adhesive bond between glass and timber. Therefore, the main objective is to develop a design method to determine the stiffness of a hybrid timber-glass wall element.

Based on the results of the shear resistance tests, both an analytical and a numerical model are developed. The analytical model is a linear model based on Eurocode 5 (prEN 1995-1-1:2025) used to determine the deflection of the wall element. The numerical model is constructed in the finite element software BuildSoft Diamonds, where the joints are simulated using spring elements that account for the nonlinearity of the adhesive and screw connections.

The results show that the maximum deflection observed in the experiments can be approximated with a deviation of maximum 15% using the analytical model and 21% using the numerical model. For the load interval between 1 to 5 kN, the average deviation is 146% for the analytical model and 74% for the numerical model. In conclusion, although the models underestimate the initial stiffness, the combination of the analytical and numerical models can be used to design a hybrid timber-glass wall element.

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Situering

Deze masterproef wordt uitgevoerd in samenwerking met Construction Engineering Research Group (CERG), gevestigd in het structureel laboratorium Applicatiecentrum Beton en Bouw ACB². CERG is een onderzoeksgroep verbonden aan UHasselt die zich focust op het uitvoeren van experimentele testen, het analytisch en numeriek modelleren van structuren. Deze masterproef werkt samen met CERG in het onderzoek van hout-glas composietstructuren en de toepasbaarheid van deze structuren in gebouwen. Glas is een veelgebruikt materiaal in de bouw vanwege zijn esthetische en functionele eigenschappen, zoals bij ramen. Hierbij wordt er slechts in beperkte mate gebruikgemaakt van de sterkte-eigenschappen van het materiaal. Volgens [1] is de bouwsector in Europa verantwoordelijk voor 40% van de uitstoot van broeikasgassen. Om de uitstoot van de bouwsector terug te dringen, kan het gebruik van hout een mogelijke oplossing bieden. In tegenstelling tot andere bouwmaterialen heeft hout de capaciteit om CO₂ op te slaan tijdens zijn levensduur [2]. Hierdoor wordt hout gezien als een duurzamer materiaal dan staal of beton. In deze masterproef zal een verbinding worden gemaakt met een siliconenlijm tussen het hout en het glas. Dankzij deze verbinding zal het glas structureel bijdragen aan de horizontale stabiliteit van de wand. De sterkte van deze wand zal voornamelijk bepaald worden door de sterkte van de verbinding tussen de glazen plaat en het houten kader.

1.2 Probleemstelling

De probleemstelling die ontstaat bij het gebruik van hout-glas composietstructuren is dat er momenteel slechts beperkte kennis over beschikbaar is en dat er nog geen ontwerpmethode voor werd opgesteld. Daarnaast is er ook nog maar beperkte kennis over de verschillende faalmodi die kunnen optreden bij deze hout-glas structuren. Hieruit volgt de hoofdvraag van dit onderzoek: Hoe kunnen hybride hout-glas structuren op een betrouwbare manier ontworpen worden? Daarnaast kunnen de volgende deelvragen gesteld worden:

- Wat zijn de verschillende faalmechanisme die optreden bij de proefstukken?
- In welke mate sluiten de bestaande normen en regelgeving aan bij het structureel gebruik van glas in schrankwanden?

- Hoe kunnen de resultaten van de experimentele proeven gebruikt worden voor het valideren van een numeriek model in een eindige-elementenmethode (EEM) software?
- Hoe kan het verankeringsysteem van de wand gesimuleerd worden in het numeriek model?
- Leveren de bestaande analytische methodes vergelijkbare resultaten op als de resultaten van de proeven?

1.3 Doelstellingen

De hoofddoelstelling van deze masterproef is het opstellen van een ontwerpmethode voor hybride hout-glas structuren voor gebruik in studiebureaus. Om deze hoofddoelstelling te bereiken is het vereist om een literatuurstudie uit te voeren om de materiaaleigenschappen en de bestaande normen te onderzoeken. De literatuurstudie wordt als een succes beschouwd wanneer er na de studie een overzichtelijk rapport is over de materiaaleigenschappen, bestaande normen, gebruikte meetmethodes tijdens de testen en inzicht in bestaande berekeningsmethodes. Een tweede deeldoelstelling is het voorbereiden van de proefstukken en het ondersteunen bij de proeven. Deze doelstelling kan als afgerond beschouwd worden wanneer alle proefstukken geassembleerd zijn met de juiste afmetingen, waardoor er een minimale fout op het kader aanwezig is. Daarnaast is het doel dat de proeven zo efficiënt mogelijk worden uitgevoerd zonder grote tijdverliezen of dataverliezen. Een derde deeldoelstelling is het verwerken van de experimentele data. Deze doelstelling kan als een succes beschouwd worden wanneer de faalmechanismen goed gedocumenteerd zijn en data is omgezet naar gedetailleerde kracht-verplaatsingsdiagrammen. Ook moet deze verwerking van de data leiden tot een grondige analyse en rapportage. Een vierde deeldoelstelling is het opbouwen/verder ontwikkelen van een numeriek model in een EEM-software. Het doel van het numeriek model is dat de schrankweerstand van de hybride wanden gesimuleerd kan worden met een minimale afwijking ten opzichte van de experimentele resultaten. Een laatste doelstelling is om de bestaande analytische methode te vergelijken met het numeriek model en de experimentele waarden om de juistheid hiervan te bepalen. Dit doel zal als succesvol beschouwd worden als er een bestaand of nieuw ontwikkeld analytisch model uit voorkomt dat met een minimale afwijking overeenkomt met de experimentele waarde en het numerieke model. Wanneer alle deeldoelen bereikt worden, moeten deze gecombineerd worden tot een duidelijke en bruikbare ontwerpmethode.

1.4 Materialen en methode

1.4.1 WP1: Voorbereiding proefstukken en testen

De voorbereiding van de proefstukken en de experimentele testen zijn uitgevoerd in augustus en september 2024, omdat deze testen ook deel uitmaken van een doctoraatsonderzoek. Zowel de voorbereiding als de testen zijn uitgevoerd in het Applicatiecentrum voor Beton en Bouw van de UHasselt. Ons deel van de voorbereiding was het assembleren van de houten kaders en het bevestigen van de adapterkaders op de houten kaders. Het houten kader bestaat uit vier Dupac LVL S-balken van 60 x 100 mm en het adapterkader bestaat uit vier planken berken multiplex van 18 x 60 mm. Deze twee kaders zijn aan elkaar bevestigd met 50 schroeven van 6,5 x 80 mm. Voor de verbinding tussen het glas en het adapterkader zijn er 2 lijmen van verschillende fabrikanten

gebruikt. Voor drie proefstukken is DowsilTM 993 zonder primer gebruikt en voor de vier andere Kömmerling Ködiglaze S met HG 74 primer. De lijmen werden aangebracht met een dikte van 6 mm en een breedte van 18 mm. Tijdens de testen zijn er 8 verschillende proefstukken getest met de schrankweerstandspoeven. Als eerste is er een leeg kader zonder adapterkader en glas getest om de stijfheid van de hoeken en de randvoorwaarden te bepalen. Drie van deze testen werden uitgevoerd met behulp van het digital image correlation (DIC-) meetsysteem. Met deze techniek wordt de verplaatsing in de proefstukken contactloos opgemeten. Op deze proefstukken zijn ook verschillende lineaire variabele differentiaaltransformatoren (LVDT's) geplaatst. Deze sensoren kunnen in 1 richting een verplaatsing meten en worden bijvoorbeeld gebruikt om de relatieve verplaatsing tussen het glas en het adapterkader te meten. Bij de laatste vier proefstukken zijn er zonnecellen aangebracht tussen de 2 glaslagen. Tijdens deze proeven zijn er 3 meetsystemen toegepast:

- LVDT's
- Fiber Bragg Grating (FBG): meet de rek op de zonnecellen
- Rekstrookjes: meten de rek op het glas

Ook is er gebruikgemaakt van elektroluminescentie om eventuele schade in de zonnecellen te kunnen vaststellen na de proeven. Dit wordt gedaan door voor en na de proeven een stroom door de zonnecellen te sturen en vervolgens met een infraroodcamera een foto te maken. De plaatsing van de sensoren zal verder besproken worden in sectie 3.2.3. Daarnaast zullen de meetresultaten besproken worden in sectie 3.3.2.

1.4.2 WP2: Literatuurstudie

Eerst zal er informatie worden opgedaan over de eigenschappen van de gebruikte materialen. Daarna zal er gezocht worden naar meer info over de werking van de schrankweerstand en de gebruikte meetmethoden om een beter inzicht te krijgen. Vervolgens zal er ook onderzoek gedaan worden naar numerieke modellen en analytische methodes. Als laatste onderdeel van de literatuurstudie zal er informatie opgedaan worden over vergelijkbare studies en proeven. De resultaten van de literatuurstudie worden beschreven in hoofdstuk 2.

1.4.3 WP3: Opbouw numeriek model

Na de verwerking van de resultaten van de proeven en de literatuurstudie gaat het numeriek veermodel dat tijdens de bachelorproef [3] is ontworpen verder uitgebreid worden met de exacte eigenschappen van de proeven. Daarnaast wordt onderzocht op welke wijze de *tie-down* en de schroefverbindingen correct gemodelleerd kunnen worden. Vervolgens zal er een vergelijking gemaakt worden tussen het numeriek model en de experimentele resultaten om de betrouwbaarheid van het model te beoordelen. Daarnaast zal onderzocht worden of het niet-lineair gedrag van de schroeven en de siliconen een hogere betrouwbaarheid geeft aan het numeriek model. Het numeriek model zal opgemaakt worden in de EEM-software BuildSoft Diamonds [4] zoals verder besproken in hoofdstuk 5.

1.4.4 WP4: Analytisch model

Ten slotte zullen de in de voorgaande bachelorproef [5] onderzocht worden op toepasbaarheid voor de huidige masterproef. Dit kan gebeuren door een vergelijking te maken met het numeriek model en de experimenten. Eventueel zal er een nieuwe methode ontwikkeld worden indien er geen bruikbare bestaande methode is. Dit kan met behulp van Eurocode 5 [6], waarin verschillende analytische methodes gegeven worden voor de uiterste- en gebruiksgrenstoestand voor de verbindingen tussen de houten onderdelen. Mogelijks zou de nieuwe Eurocode 10 [7] voor glas gebruikt kunnen worden voor het bepalen van de sterkte van de lijmverbinding tussen de glasplaat en het houten kader. Het analytisch model zal verder besproken worden in hoofdstuk 4.

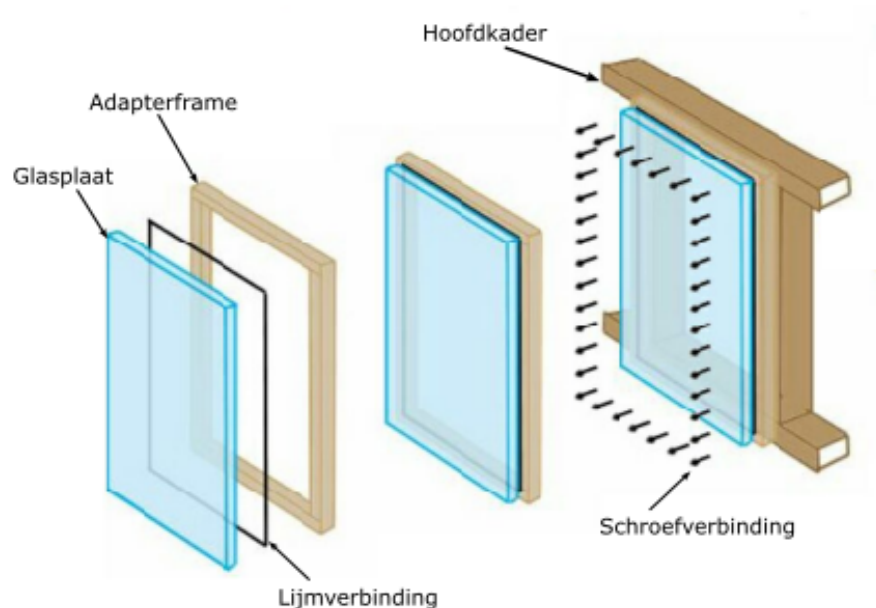
Hoofdstuk 2

Literatuurstudie

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk van de thesis zal de literatuurstudie voor dit onderzoek besproken worden. De eerste fase van de literatuurstudie heeft als doel om kennis te vergaren over eerdere studies die uitgevoerd zijn op hout-glas hybride wanden. Daarnaast is het doel om inzicht te krijgen over de gebruikte materialen en meettechnieken. Vervolgens wordt er dieper ingegaan op de faalmechanismen om meer inzicht te krijgen in de experimentele resultaten. Ten slotte wordt er kennis opgedaan van de reeds bestaande methodes voor analytische en numerieke modellen voor hybride hout-glas wanden.

Voor de eerste fase van de literatuurstudie wordt kennis opgedaan naar de opbouw van het wandelement. Edl [8] bespreekt een mogelijke opbouw van een hybride hout-glas wandelement met als doel het verhogen van de horizontale stabiliteit. Dit wandelement wordt weergegeven in figuur 2.1. Figuur 2.1 toont dat de glasplaat met een lijmverbinding wordt verbonden aan een adapterkader. Waarna het adapterkader met een schroefverbinding wordt verbonden aan het hoofdkader.

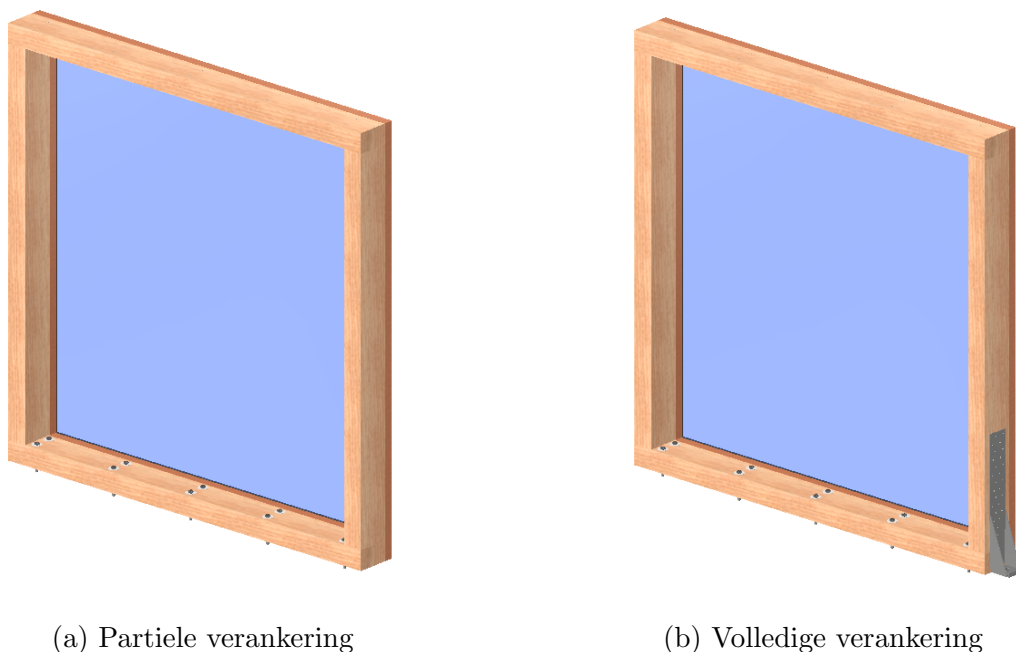


Figuur 2.1: Schematische weergaven hout-glas hybride wandelement [8]

Eerdere studies uitgevoerd door Ber et al. [9, 10] en Štrukelj et al. [11] bespreken dat de sterkte van het kader afhankelijk is van verschillende parameters. Een eerste parameter is het type lijm dat gebruikt wordt voor het wandelement. Verschillende type lijmen hebben verschillende materiaaleigenschappen wat een verschil geeft in de methode van falen [10] en uitwijking van het wandelement [11]. Daarnaast heeft de hoogte en lengte verhouding en de dikte van de lijmverbinding ook een invloed op de schuifsterkte van de structuur. In Ber et al. [9] wordt gegeven dat een grotere dikte van de lijmverbinding een hogere flexibiliteit van het wandelement geeft. Hierdoor zal de bruikbaarheidsgrenstoestand van het wandelement eerder worden bereikt.

Premrov et al. [12] stelt dat er drie verschillende faalmechanisme kunnen optreden. Het eerste faalmechanisme is dat de rek op de lijmverbinding zal zorgen voor scheuren van de verbinding en hierbij het falen van het wandelement. Andere uitgevoerde studies [10, 9] en [13] geven weer dat dit falen van de lijmverbinding zowel adhesief als cohesief kan optreden. Daarnaast kan er volgens Premrov et al. [12] en Štrukelj et al. [11] ductiel falen optreden in de verbinding van de hoekpunten van het houten kader. Ten slotte kan er falen optreden door het bros falen van de glasplaat. Hierbij wordt bijkomend gezegd dat bij het optreden van de eerste scheuren in het glas, het glas bijna geen overig draagvermogen heeft. Hierdoor stelt Premrov et al. [14] dat bij het ontwerp van hybride hout-glas wandelementen wordt voorkomen dat het bros falen van het glas kan optreden. De verschillende faalmechanisme worden verder besproken in sectie 2.4.

Ten slotte zijn er twee mogelijkheden voor het verankeren van het wandelement. De eerste methode is een gedeeltelijke verankering van het proefstuk. Bij een gedeeltelijke verankering van het proefstuk wordt volgens Källsner et al. [15] meestal enkel de onderregel van het wandelement verankerd aan de fundering. Dit wordt weergegeven in figuur 2.2a. Bij een volledig verankerde wand wordt bijkomend de stijl waar de horizontale kracht op aangrijpt verankerd aan de vloer of de fundering. Figuur 2.2b geeft weer hoe deze verankering wordt gerealiseerd met behulp van een *tie-down* verankeringsysteem.



Figuur 2.2: Schematische weergave verankeringsmethode wandelementen

2.2 Materialen

2.2.1 Glas

Voor de glasplaten van de modules is er gebruik gemaakt van gehard glas met een laag ijzergehalte. Het lagere ijzergehalte in het glas zorgt voor de eliminatie van de groene tint die in standaard glas aanwezig is. Hierdoor wordt het glas veel helderder en transparanter. De sterkte van het glas kan ook verbeterd worden door het te verharden. Deze verharding gebeurt door een thermische behandeling waarbij het glas verhit wordt tot ongeveer 600°C en vervolgens snel wordt afgekoeld [16]. Deze behandeling zorgt ervoor dat het glas vijf keer sterker wordt dan gewoon glas. Een nadeel van gehard glas is dat het bij breuk zal fragmenteren. De elasticiteitsmodulus van dit glas bedraagt 70 GPa [17].

2.2.2 Hout

Hout is een natuurlijk product en milieuvriendelijker dan andere bouwmaterialen. Voor het hoofdkader van de modules wordt gebruik gemaakt van LVL hout. LVL staat voor *Laminated Veneer Lumber* of gelamineerd fineerhout weergegeven in figuur 2.3a. Dit soort hout bestaat uit verschillende lagen naaldhout van 3 mm die aan elkaar gelijmd zijn met fenolformaldehydelijm [18]. De gebruikte regels en stijlen vallen binnen de sterkteklasse LVL 48 P. Het adapterkader is opgebouwd uit berkenmultiplex zoals weergegeven in figuur 2.3b. De mechanische eigenschappen van deze twee houtsoorten kunnen afgeleid worden uit [19]-[20].



(a) Gelamineerd fineerhout (LVL) [21]



(b) Berkenmultiplex [22]

Figuur 2.3: Voorbeeld toegepaste houtsoorten

2.2.3 Lijmen

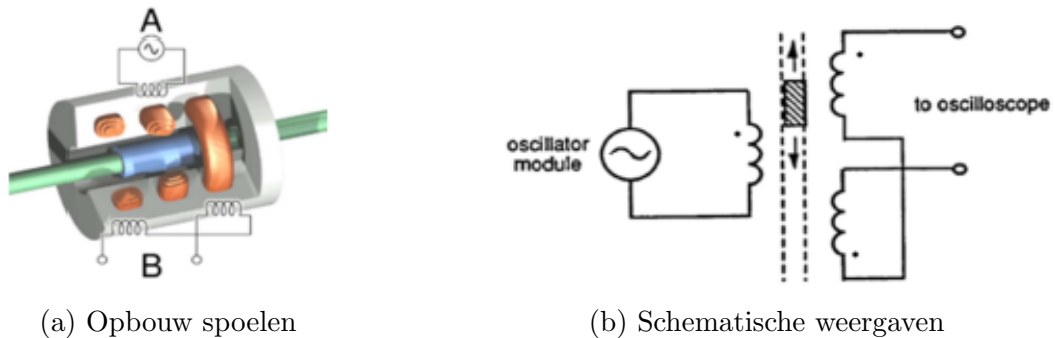
In dit onderzoek worden de glasplaat en het adapterkader verbonden met behulp van een twee componenten siliconen lijm. Deze soort lijm bestaat uit 2 verschillende componenten. Component A is het basiscomponent en bestaat uit een vloeibaar hars, terwijl component B bestaat uit een aanvullende vloeibare verharder. Een belangrijk kenmerk van de twee componenten silicone lijmen is dat de uitharding onafhankelijk is van de omgevingsfactoren, zoals temperatuur en luchtvochtigheid. Hierdoor kunnen deze lijmen toegepast worden in situaties met een beperkte luchttoevoer of bij dikkere lijmlagen waarbij enkel vocht uitharding onvoldoende is. Andere mechanische en fysische eigenschappen omvatten een hoge flexibiliteit, een hoge weerstand tegen temperatuurschommelingen en een duurzame hechting op uitlopende substraten, zoals glas, metalen, hout en kunststoffen.

Tot slot bieden deze lijmen een voorspelbare uithardingstijd op voorwaarde dat de menging op de juiste manier wordt uitgevoerd [23]. Om de sterkte van deze lijmverbinding te onderzoeken wordt er bij de experimenten gebruik gemaakt van twee verschillende lijmen. De verschillen tussen deze lijmen worden verder besproken in hoofdstuk 3.

2.3 Meetmethodes

2.3.1 Lineair Variabele Differentiaaltransformer (LVDT)

De lineair variabele differentiaaltransformer (LVDT) is een elektronisch component waarmee de lineaire verplaatsing gemeten kan worden. Een LVDT is opgebouwd uit drie achter elkaar geplaatste solenoides [24]. Solenoides zijn spoelen waarbij de draden zo zijn gewikkeld zodat het magnetisch veld geconcentreerd is binnen de spoel zoals weergegeven in figuur 2.4a. Van de drie spoelen is de middelste spoel de primaire spoel van de transformator en de buitenste 2 spoelen zijn de secundaire spoelen. De secundaire spoelen zijn tegengesteld aangesloten waardoor de uitgangsspanning gelijk is aan het verschil tussen de secundaire spanningen. Deze aansluiting is schematisch weergegeven in figuur 2.4b.

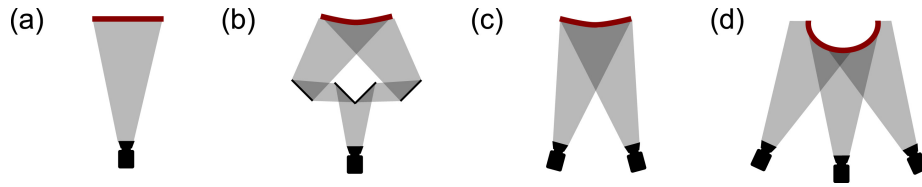


Figuur 2.4: Opbouw LVDT [24]

Een ferrometalen cilindrische kern kan bewegen volgens de as van de buis waarmee de positie kan mee bepaald worden. Wanneer de LVDT in neutrale positie staat, staat de ferrometalen kern centraal tussen de twee secundaire spoelen. Hieruit volgt dat de uitgangsspanning nul gaat zijn. Wanneer de kern uit de centrale positie gehaald wordt, zal er een uitgangsspanning zijn die verschilt van nul. De magnitude van de uitgangsspanning is proportioneel met de uitwijking van de sensor [24]. Met deze sensoren wordt de verplaatsing van verschillende deelcomponenten in de experimentele proefopstelling gemeten. De posities van de sensoren wordt verder toegelicht in sectie 3.2.3.

2.3.2 Digital Image Correlation (DIC)

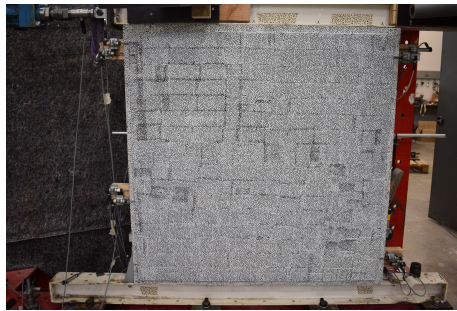
DIC is een optische meetmethode waarmee met behulp van één of meerdere camera's de verplaatsingen en de spanningsvelden van een proefstuk geanalyseerd kunnen worden. In de jaren 80 werd DIC voor het eerst besproken aan de Universiteit van South Carolina door Chu et al. [25] en Sutton et al. [26]. Wanneer er enkel gebruik wordt gemaakt van één camera, is het mogelijk om de verplaatsing in twee dimensies op een vlak oppervlak te meten, zoals weergegeven in figuur 2.5a. Figuur 2.5b geeft een DIC-opstelling weer waarbij er gebruik is gemaakt van spiegels en enkel gebruik wordt gemaakt van één camera. Eerdere studies [27] en [28] geven weer



Figuur 2.5: Verschillende cameraopstellingen voor 2D of 3D metingen met DIC [31]

dat het ook mogelijk is om met deze opstelling driedimensionale optische opmetingen te maken van proefstukken. Uit een andere studie [29] en [30] is gebleken dat bij gebruik van meerdere camera's het ook mogelijk is om driedimensionale oppervlakken op te meten. In figuur 2.5c en 2.5d wordt weergegeven dat door meerdere camera's te gebruiken, onder een hoek gericht op het proefstuk, het mogelijk is om driedimensionale vlakken op te meten. Volgens Holmes et al. [31] is de meest gebruikte DIC-methode de methode met twee camera's, zoals weergegeven in figuur 2.5c.

Voor de methode moet er een niet-uniform patroon aanwezig zijn op het proefstuk. Dit kan een natuurlijk of een geverfd patroon zijn zoals weergegeven in figuur 2.6. Bij de proefstukken van deze masterproef is er gebruikgemaakt van een grondlaag van witte verf op het glas. Hierna is er met een verfroller een willekeurig puntenpatroon aangebracht op de grondlaag. Met behulp van dit willekeurig puntenpatroon kan de verplaatsing van de afzonderlijke punten gevolgd worden door de software.



Figuur 2.6: Voorbeeld van niet-uniform patroon voor DIC

2.3.3 Rekstrookjes

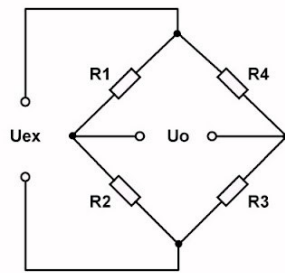
Rekstrookjes (Strain gauges) zijn elektronische componenten waarmee de vervorming van een materiaal gemeten kan worden. Deze meetmethode is gebaseerd op de wet van Pouillet voor elektrische weerstand zoals weergegeven in vergelijking 2.1.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (2.1)$$

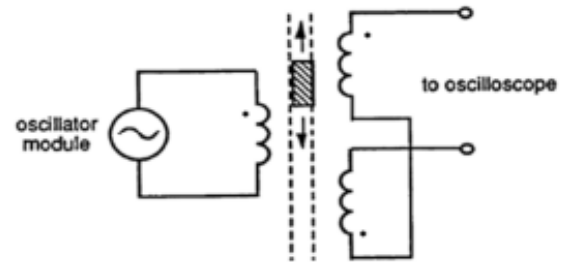
Vergelijking 2.1 geeft weer dat de weerstand van een geleider afhankelijk is van soortelijke weerstand van het materiaal ρ , de lengte l en de oppervlakte A van de geleider. Wanneer er vervorming zal optreden op het rekstrookje zal de lengte en de oppervlakte hiervan wijzigen waardoor ook de weerstand zal wijzigen. De wijziging van de weerstand van het rekstrookje kan weergegeven worden met vergelijking 2.2.

$$\frac{\Delta R}{R} = G \cdot \varepsilon \quad (2.2)$$

In vergelijking 2.2 wordt weergegeven dat de verandering van de weerstand gelijk is aan de gaugefactor G vermenigvuldigd met de rek ε . Volgens Verstraten [32] en Laughton en Warne [33] heeft een typisch rekstrookje een gaugefactor van twee. Ook geeft Verstraten [32] dat de weerstand van rekstrookjes tussen de 30Ω en 3000Ω ligt waarbij 120, 350 en 1000Ω de meest gangbare maten zijn. Bij rekstrookjes zullen er zeer kleine weerstandsveranderingen optreden en om de invloed van de temperatuursveranderingen te compenseren wordt er gebruik gemaakt van een brug van Wheatstone. Figuur 2.7a geeft de standaard brug van Wheatstone weer. Dit kan op drie verschillende manieren toegepast worden bij rekstrookjes. Een eerste mogelijkheid is om een kwart brug te maken. Bij een kwart brug word maar één weerstand van de wheatstone brug vervangen door een rekstrookje. Een tweede mogelijkheid is een halve Wheatstone brug te vervangen met rekstrookjes. Hierbij worden de rekstrookjes in tegengestelde richting geplaatst om de gevoeligheid van het systeem te verhogen. Figuur 2.7b geeft de laatste mogelijkheid weer, een brug van Wheatstone waarbij alle weerstanden door rekstrookjes worden vervangen. Zoals weergegeven in figuur 2.7b worden hierbij de rekstrookjes in 2 verschillende richtingen toegepast zoals bij een halve brug waardoor de gevoeligheid van het systeem nog verhoogd wordt.



(a) Brug van Wheatstone



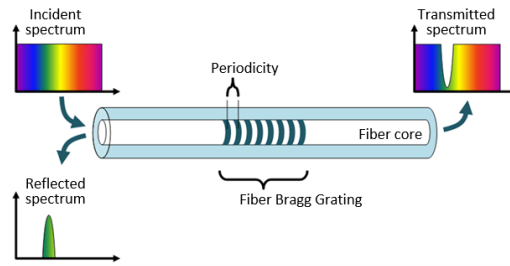
(b) Brug van Wheatstone met rekstrookje

Figuur 2.7: Wheatstone bruggen om nauwkeurigheid te verhogen en temperatuurinvloed te compenseren [32]

2.3.4 Fiber Bragg Grating (FBG)

Fiber bragg grating (FBG) zijn optische filters opgebouwd uit een optische vezel. Volgens Buildwise [34] is de optische vezel een glasdraad met een diameter tussen de 8 en $62,5 \mu\text{m}$ met hierrond een bekleding. De optische vezel kan voor sensor toepassingen versterkt worden met plastic, glasvezel of staal. Het werkingsprincipe van een FBG is dat specifieke golflengtes rondom de Bragg golflengte gereflecteerd worden. Dit wordt weergegeven in figuur 2.8.

Hill et al. [36] en Meltz et al. [37] hebben experimenteel aangetoond dat er Bragg reflectoren kunnen ontstaan in optische vezels. Bragg reflectoren zijn gebaseerd op het principe van constructieve interferentie. Een Bragg reflector is opgebouwd uit wisselende dunne lagen met afwisselend een hoge en een lage brekingsindex [33]. Door deze afwisseling van de hoge en lage brekingsindex zal een bepaalde golflengte (de Bragg golflengte) versterkt en gereflecteerd worden en de andere golflengtes niet. De Bragg golflengte kan bepaalde worden met de Bragg vergelijking weergegeven in vergelijking 2.3. In deze vergelijking staat λ_B voor de Bragg golflengte, n_{eff} voor de effectieve

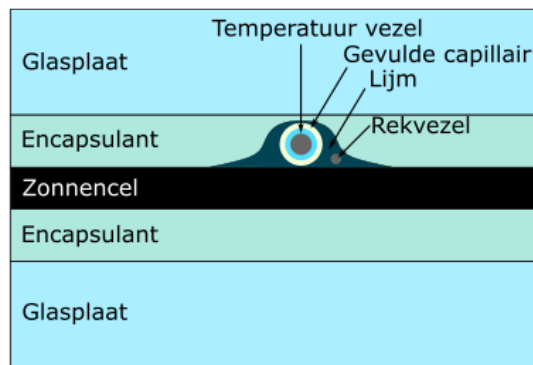


Figuur 2.8: Schematische voorstelling FBG [35]

brekingsindex en Λ de roosterindex van de optische vezel. De roosterindex is de afstand tussen de variatie van op één volgende pieken of dalen.

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (2.3)$$

Uit vergelijking 2.3 kan afgeleid worden dat bij een verandering van n_{eff} of Λ er een verandering van de golflengte gemeten kan worden. Wanneer er een de FBG uitgetrokken wordt, zal dit voor langere golflengtes zorgen en bij een indrukking zullen kortere golflengtes gemeten worden. Daarnaast kan er met FBG ook temperatuurverschillen gemeten worden omdat zowel n_{eff} en Λ temperatuurafhankelijk zijn omdat deze afhankelijk zijn van de glasvezel. In deze studie worden optische vezels toegepast waarbij de optische vezel is geïntegreerd in het gelamineerd glas volgens de gepatenteerde methode [38] besproken in [39]. Figuur 2.9 toont een schematische weergave van de toepassing van deze techniek. Hierbij gaat het over een thermo-mechanisch meetsysteem. In de studie [39] wordt besproken dat omdat FBG's gevoelig zijn voor zowel thermische als mechanische rek er een ontkoppeling noodzakelijk is.



Figuur 2.9: Optische vezel geïntegreerd in het gelamineerd glas

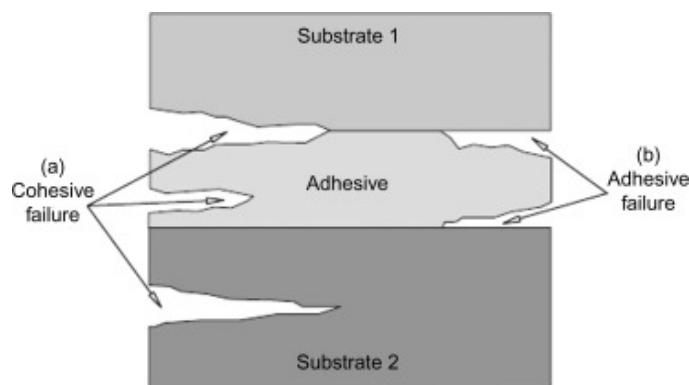
Hierbij is er door Nivelles et al [39] gekozen om de FBG te verpakken in een met transparante vloeistof gevulde capillair, waarbij de vloeistof een smerende werking heeft. Hierbij wordt de optische vezel maar aan één zijde bevestigd aan de UV-uithardende lijm waardoor de temperatuur vezel fysiek gescheiden is van mechanische rek. Naast de thermische vezel zal er ook een rekvezel geplaatst worden op een afstand tot de thermische vezel zodat de temperatuurverschillen verwaarloosd mogen worden. De rekvezel zal zo wel de thermische als mechanische rek opmeten, in combinatie met de temperatuur vezel kunnen beide rekken afzonderlijk gemeten worden.

2.4 Faalmechanismen

Deze constructie valt onder te verdelen in vier hoofdcomponenten waar falen bij kan optreden. Deze componenten zijn: de lijm, de verbindingen, het hout en het glas. Deze worden in dit hoofdstuk afzonderlijk besproken.

2.4.1 Falen van lijm

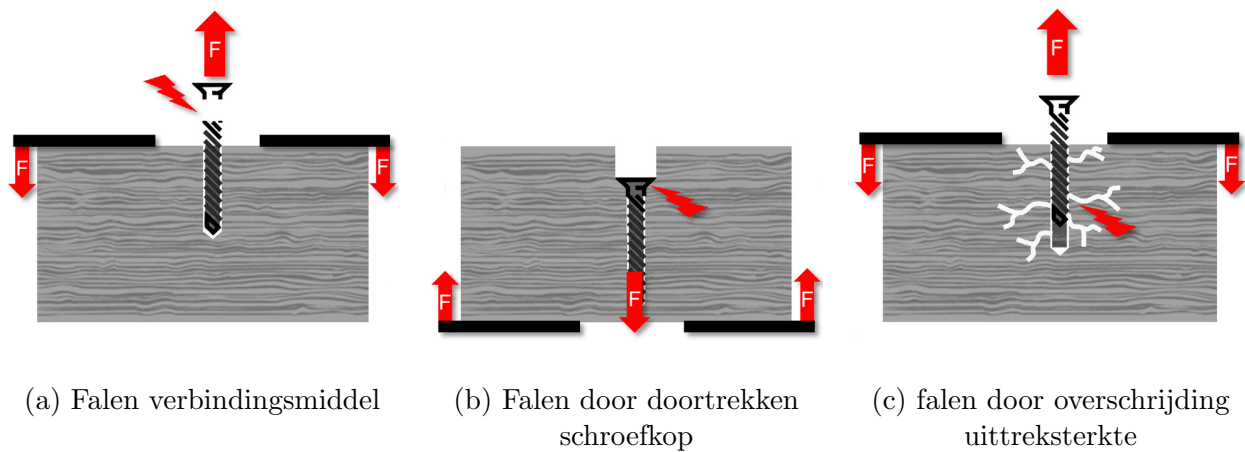
Het eerste faalmechanisme dat besproken wordt is het falen van de lijmverbinding. Hierbij kan een onderscheid gemaakt worden door adhesief en cohesief falen zoals weergegeven in figuur 2.10. Bij adhesief falen zal de lijmverbinding loslaten van het substraat waarop de lijm is aangebracht. Volgens Wang and Duong [40] is dit faalmechanisme meestal het gevolg van slechte oppervlaktevoorbereiding van het substraat. Daarnaast kan het ook veroorzaakt worden door ongeschikte oppervlakte-eigenschappen van het substraat. Bij het cohesief falen zullen er scheuren optreden in de lijm of het substraat zelf. Volgens Ebnesajjad [41] is dit het gevolg van het bereiken van de maximale sterkte van het materiaal. Daarnaast kan dit volgens Dabiri en Madril [42] veroorzaakt worden door degradatie van de lijm door water of overmatige hitte. Ook vervuiling van het grensvlak tijdens het voorbereiden van het substraat en het aanbrengen van de lijm kan een oorzaak zijn van cohesief falen. Een eerder uitgevoerde studie [43] bespreekt dat het falen van de verbinding afhankelijk is van de gebruikte houtsoort. Wanneer het substraat (hout) zwakker is dan de lijm en de verbinding tussen de lijm en het substraat kan er ook falen optreden in het substraat. Ook wordt door [43] geconcludeerd dat het gebruik van een primer op het houten substraat een hogere hechting van de lijm aan het materiaal geeft.



Figuur 2.10: Adhesief en cohesief falen [44]

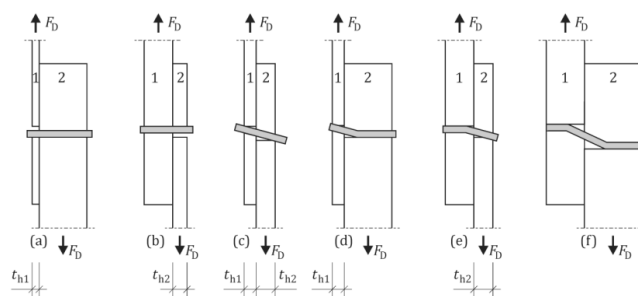
2.4.2 Falen van schroefverbinding

Ten tweede kan er falen optreden in de schroefverbinding. Het falen van verbindingen en welke controles hierop moeten worden uitgevoerd, wordt beschreven in [6]. Figuur 2.11 toont de faalmechanismen die kunnen optreden bij axiaal belasten verbindingsmiddelen. Figuur 2.11a geeft het faalmechanisme weer waarbij er breuk optreedt in de schroef zelf. Daarnaast toont Figuur 2.11b het indrukken van de schroefkop in het hout waarbij de schroef doorheen het hout wordt geduwd. Dit faalmechanisme treedt op als het gevolg van het overschrijden van de compressiesterkte van het hout. Ten slotte geeft Figuur 2.11c het faalmechanisme weer waarbij er falen optreedt doordat de uittreksterkte van de verbinding wordt overschreden.



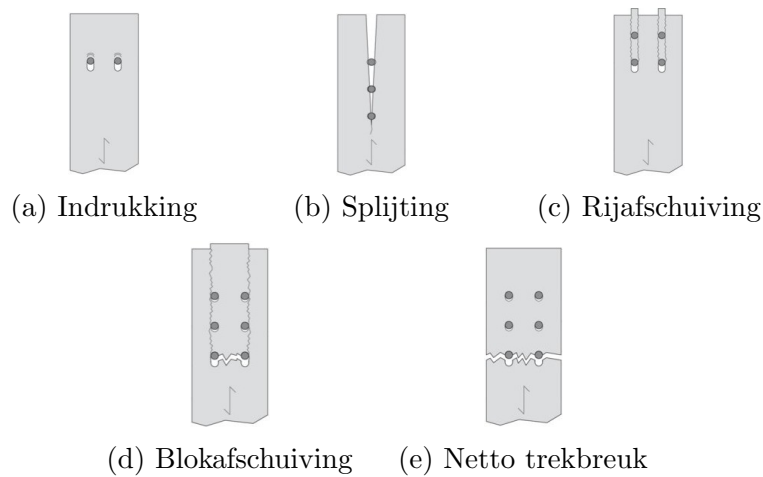
Figuur 2.11: Faalmechanismen van schroefverbinding onder axiale belasting [45] (a) falen verbindingsmiddel (b) falen door doortrekken schroefkop (c) falen door overschrijding uittreksterkte

Naast het falen van schroefverbindingen onder axiale kracht, kan er ook falen optreden door afschuiving van het verbindingsmiddel. Figuur 2.12 geeft de mogelijke faalmechanismen weer voor verbindingsmiddelen met één afschuifvlak.



Figuur 2.12: Mogelijke faalmechanisme verbindingsmiddelen met één afschuifvlak [6]

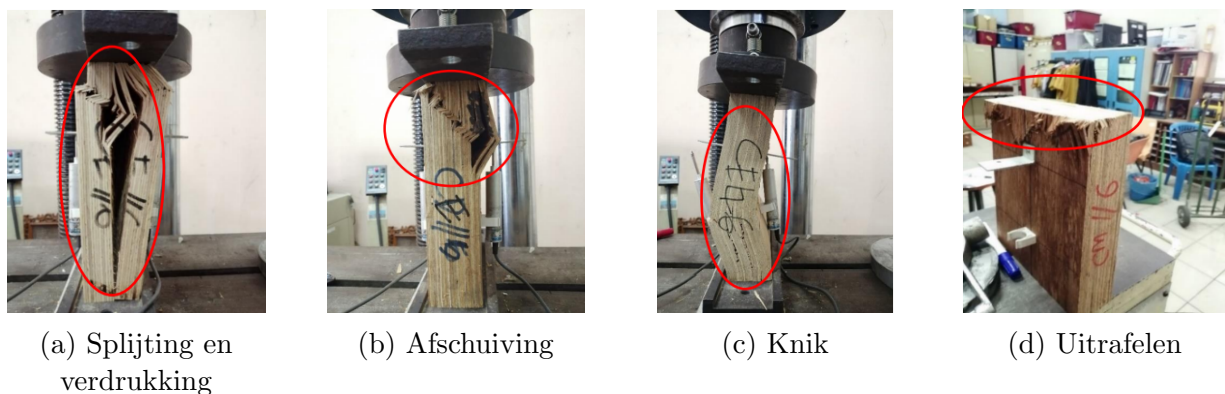
Ten slotte wordt in [46] het ductiele en bros falen van hout met verbindingsmiddelen besproken. Ductiel falen van de verbinding treed op door de combinatie van het indrukken van het verbindingsmiddel in het hout en het bereiken van de vloeispanning van het verbindingsmiddel. Het indrukken van het verbindingsmiddel in het hout wordt weergegeven in figuur 2.13a. Bros falen van de verbinding zal meestal plots optreden en is zichtbaar door het scheuren van het hout. In [46] wordt besproken dat bros falen meestal optreed wanneer het metalen verbindingsmiddel zich nog in het elastisch gebied bevindt. Figuur 2.13b geeft het splijten van het hout weer. Dit faalmechanisme is het gevolg van het overschrijden van de treksterkte loodrecht op de vezelrichting. Daarnaast geven figuur 2.13c het falen van het hout als het gevolg van rijafschuiving. Hierbij zal het falen van de verbinding optreden ten gevolgen van de afschuifspanning in het hout. Het verschil met blokafschuiving, weergegeven in figuur 2.13d, is dat de schuren bij rijafschuiving parallel ten opzichten van elkaar optreden volgens de richting van de rijen van de verbindingsmiddelen. Bij blokafschuiving treed het falen van het hout op langs de buitenste omtrek van de verbindingsmiddelen waarbij het ingesloten gebied zal afschuren. Het laatste brosse faalmechanisme is de netto trekbreuk zoals weergegeven in figuur 2.13e. Bij het falen als gevolg van netto trekbreuk falen door het overschrijden van de treksterkte in de netto doorsnede van het hout [46].



Figuur 2.13: Mogelijke faalmechanisme hout met verbindingsmiddelen [46].

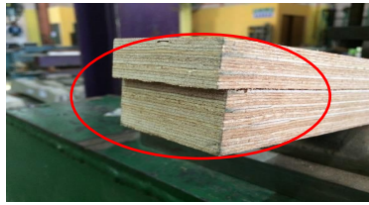
2.4.3 Falen van hout

Ten derde kan het falen van het hout optreden. Dit kan verder onderverdeeld worden in verschillende faalmechanisme. Het eerste falen kan optreden bij drukbelasting zoals weergegeven in figuur 2.14. In figuur 2.14a wordt het faalmechanisme spleijting weergegeven. Hierbij scheurt het proefstuk open en zullen de verschillende lagen verder verdukt worden. Figuur 2.14b toont het afschuiven van LVL. Afschuiving kan zowel bovenaan als onderaan in het hout optreden. De faalmechanisme getoond in figuur 2.14a en 2.14b kunnen zowel optreden bij compressie loodrecht als evenwijdig op de vezelrichting is. Daarentegen kan knik enkel optreden wanneer er een druk ontstaat loodrecht op de vezelrichting zoals weergegeven in figuur 2.14c. Daarnaast kan bij compressie evenwijdig aan de vezelrichting er uitrafeling optreden. Een voorbeeld van uitrafeling wordt weergegeven in figuur 2.14d [47],[48].



Figuur 2.14: Compressie faalmechanisme in LVL [48].

Daarnaast kan er ook falen optreden bij buigbelasting. Figuur 2.15 geeft de mogelijke faalmechanisme onder buiging weer. Een eerste mogelijkheid is horizontaal afschuiven, weergegeven in figuur 2.15a. Daarnaast is het ook mogelijk dat er falen zal optreden in de zone waar trekspanning ontstaat, weergegeven in figuur 2.15b. Hierbij is het zichtbaar dat het hout zal splejten [47],[48].



(a) Horizontale afschuiving

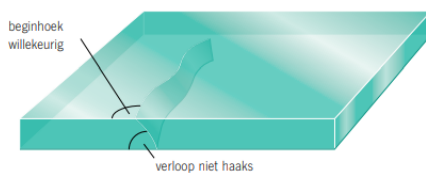


(b) Horizontale afschuiving

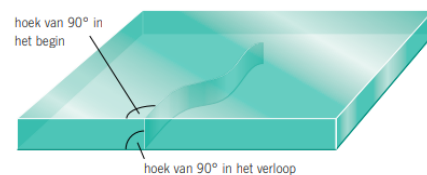
Figuur 2.15: Faalmechanismes onder buiging LVL [48]

2.4.4 Falen van glas

Het laatste faalmechanisme dat kan optreden is falen van het glas. Volgens [49] wordt de sterkte van glas niet uitsluitend bepaald door de chemische opbouw of moleculaire structuur. Ook inwendige spanningen en kleine glasdefecten die ontstaan tijdens het productieproces beïnvloeden de sterkte. De druksterkte van glas is ongeveer tien keer zo groot als de treksterkte van glas. Hierdoor zal de breuk in de meeste gevallen optreden door het overschrijden van de treksterkte. Door defecten, zoals scheuren of krassen, die kunnen opbouwen in het glas is op die plekken de kans het grootste dat er spanningsconcentraties optreden. Door de verwerkingsmethode, het snijden en het breken van het glas, ontstaan microscheuren waardoor daar het glas gevoeliger is voor breuk. Daarnaast is glas ook gevoelig aan thermische verandering. Door temperatuursverschillen kunnen er in verschillende delen ongelijkmatige uitzetting optreden. Hierdoor kunnen er spanningen ontstaan waardoor breuk kan optreden. Figuur 2.16 geeft de kenmerken weer van het scheurpatroon van een mechanische en een thermische breuk [49], [50].



(a) Mechanische breuk

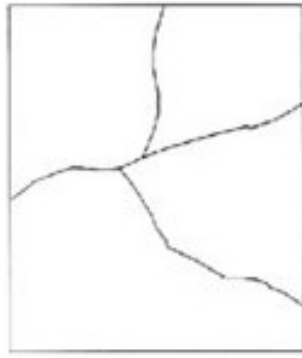


(b) Thermische breuk

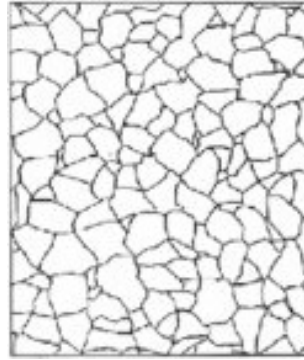
Figuur 2.16: Scheurvorming glas [49]

Figuur 2.16a geeft het scheurpatroon van een mechanische breuk weer. Bij een mechanische breuk zal de scheurvorming niet loodrecht op de rand van het glas ontstaan zoals bij een thermische breuk. Bij een thermische breuk zal de scheur ook het pad van de minste weerstand volgen wat een onregelmatige breuk oplevert. De thermische breuk wordt weergegeven in figuur 2.16b. Bij de proeven die besproken worden in deze thesis is er gebruikt gemaakt van getemperd glas. Volgens [51] is er bij getemperd glas een geringere kans op het optreden van thermische scheuren.

Naast het onderscheid tussen mechanische en thermische breuk kan er ook onderscheid gemaakt worden tussen het breukpatroon van gegloeid glas en gehard glas. Figuur 2.17 toont het breukpatroon van het gegloeid glas en het gehard glas. Figuur 2.17a geeft weer dat standaard gegloeid vlakglas zal breken in grote scherven. Volgens Louter [52] zal dit optreden bij relatief lage spanningen. In tegenstelling tot standaard gegloeid vlakglas zal het gehard glas bij breuk fragmenteren. Door Louter [52] wordt besproken dat door het in elkaar grijpen van de grotere scherven van het gegloeid vlakglas nog steeds een overdracht kan zijn van compressiekrachten. Hierdoor heeft het gegloeid vlakglas een grotere draagvermogen na breuk.



(a) Gegloeid glas



(b) Gehard glas

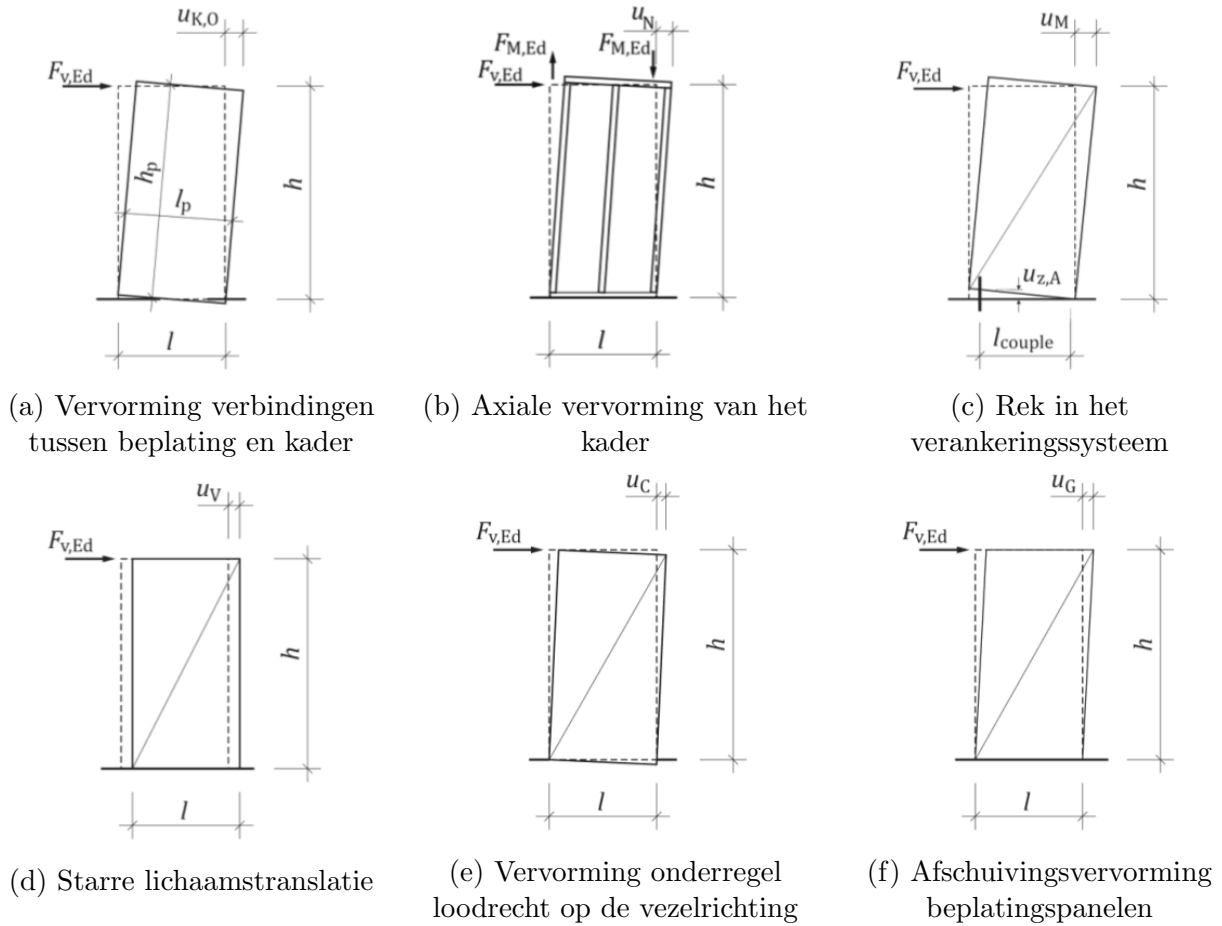
Figuur 2.17: Verschillend breukpatroon gegloeid en gehard glas [53]

2.5 Analytische model

In [54] worden meerdere analytische modellen voor het bepalen van de stijfheid weergegeven. Een eerste model uit deze paper is een model waarbij de sterkte van de lijmverbinding bepaald kan worden. Dit model is afgeleid van het veermodel van Kreuzinger en Niedermaier [55]. Bij deze benadering wordt aangenomen dat er cohesief falen zal optreden in de lijm. In dit model worden er zowel berekeningen gemaakt in uiterste grenstoestand (UGT) en bruikbaarheidsgrenstoestand (GGT) voor zowel een korte als een lange belastingduur. Volgens [5] was dit hierdoor een interessante methode omdat er veel factoren in rekening gebracht kunnen worden. In dit model kan er ook rekening gehouden worden met windbelastingen en temperatuursveranderingen wat in de andere modellen vaak niet is opgenomen.

Een tweede analytisch model dat besproken wordt in [54] is een model ook afgeleid van het veermodel van Kreuzinger en Niedermaier. Hierbij is de aanname gemaakt dat een starre glasplaat door middel van een lijm en schroefverbinding verbonden is aan een star kader. Binnen dit model wordt een equivalente schuifsterkte bepaald voor de combinatie van een lijm en schroefverbinding. Daarnaast is het met de besproken berekening mogelijk om de totale uitwijking afkomstig van de schroefverbinding en de lijmverbinding te bepalen. In sectie 4.2.3 wordt deze methode verder toegelicht.

Ten slotte wordt in prEN 1995-1-1:2025 [6] ook een methode beschreven voor een uiterste grenstoestand UGT en bruikbaarheidsgrenstoestand GGT controle van wandelementen. De UGT controle geeft een methode voor het bepalen van de krachten en reactiekrachten op een wandelement. Daarnaast kan met behulp van de GGT controle de uitwijking van het wandelement bepaald worden. De uitwijking wordt hierbij bepaald door de som van zes componenten die invloed hebben op de uitwijking van het kader zoals weergegeven in figuur 2.18. Deze methode wordt verder besproken in het hoofdstuk 4.



Figuur 2.18: Vervormingscomponenten aan de bovenzijde van een wandpaneel [6]

2.6 Numeriek model

In de bachelor proef [3] worden twee numerieke modellen besproken die gebruikt kunnen worden voor een hybride hout-glas structuur. Hierbij gaat het over het fictieve diagonaal model en het veermodel van Kreuzinger en Niedermaier [55]. Het fictieve diagonaal model werd voor het eerst besproken door [56] en verder uitgewerkt door [57].

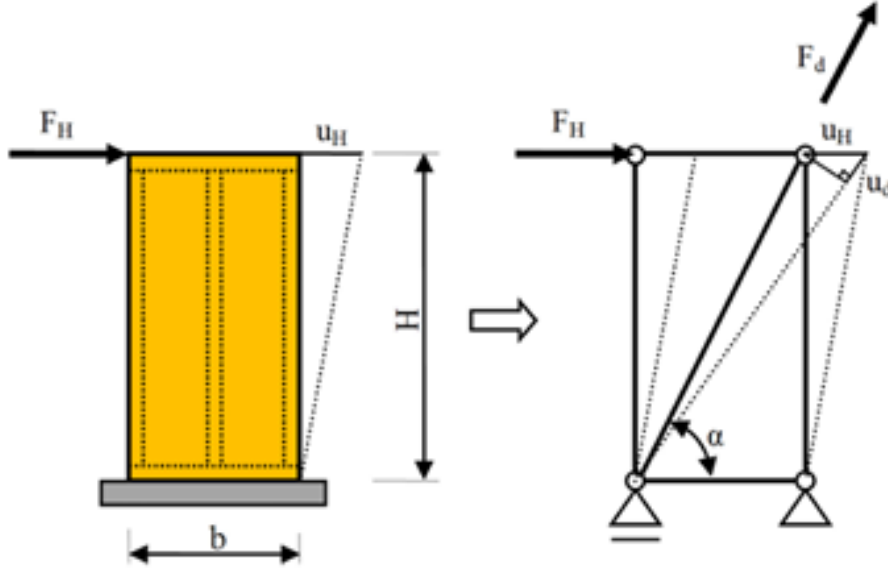
2.6.1 Diagonaalmodel

Een houtskeletbouw wand wordt in de meeste gevallen opgebouwd uit een houten kader waarop er een plaatmateriaal zoals oriented strand board (OSB) of multiplex op verbonden wordt met mechanische verbindingsmiddelen zoals schroeven of nagels. Bij het model met de fictieve diagonaal worden het plaatmateriaal en de verbindingsmiddelen vervangen door deze fictieve diagonaal. Voor dit model moeten een aantal aannames worden gedaan. Een eerste aanname is dat de horizontale uitwijking van de wand veroorzaakt door een horizontale kracht gelijk is aan de verplaatsing van het model bij dezelfde kracht. De tweede aanname is dat het kader van de wand geen effect heeft op de uitwijking van de wand. Uit deze aanname volgt dat in het numerieke model dat opgebouwd wordt in BuildSoft Diamonds [4] het kader oneindig stijf wordt gemodelleerd zodat het kader geen invloed heeft op de horizontale verplaatsing. Dit wordt in BuildSoft Diamonds gedaan door voor het materiaal van het kader de hoogst mogelijke elasticiteitsmodulus te geven. De oppervlakte en diameter van de fictieve diagonaal kunnen bepaald worden met vergelijking (2.4) en (2.5) uit [57].

$$A_{(d, \text{fic})} = \frac{k_p \cdot L_D}{E_D \cdot (\cos(\alpha))^2} \quad (2.4)$$

$$d_{(\text{fic})} = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{(d, \text{fic})}}{\pi}} \quad (2.5)$$

De stijfheid van het wandpaneel k_p uit vergelijking 2.4 kan worden berekend met de formules uit Eurocode 5 [6]. Daarnaast is de oppervlakte van de diagonaal $A_{(d, \text{fic})}$ afhankelijk van de lengte L_D , de elasticiteitsmodulus E_D en de hoek α tussen de horizontale x-as en diagonaal zoals weergegeven in Figuur 2.19.



Figuur 2.19: Diagonaal model [57]

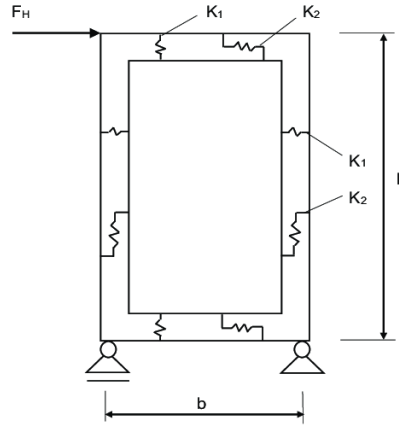
Vergelijking (2.4) en (2.5) zijn uitsluitend geldig voor een wandpaneel waarbij mechanische verbindingen aanwezig zijn tussen de plaat en het kader. Aangezien dit bij een hybride hout-glas structuur niet het geval is heeft [14] formule 2.6 opgesteld voor structuren met een lijmverbinding.

$$A_{(d, \text{fic})} = \frac{f_{cr} \cdot L_d}{w_{cr} \cdot (\cos(\alpha))^2 \cdot E_D} \quad (2.6)$$

In vergelijking 2.6 staan f_{cr} voor de kracht waarbij de eerste scheuren in het glas optreden en w_{cr} voor de uitwijking die gepaard gaat met deze kracht. Volgens Premrov et al. [14] is het mogelijk om f_{cr} en w_{cr} op twee manieren te bepalen. De eerste methode is om deze waarde uit het experimentele testen te halen. Een tweede mogelijkheid is met behulp van het veermodel van Kreuzinger en Niedermayer [55]. In de eerder uitgevoerde bachelorproef [3] wordt voor deze term de lineaire kracht verplaatsingsdiagram gebruikt van het veermodel.

2.6.2 Veermodel van Kreuzinger en Niedermaier

Het tweede model in deze thesis, afgebeeld in figuur 2.20, is het veermodel van Kreuzinger en Niedermaier. Het veermodel werd voor het eerst besproken in 2005. Bij dit model wordt de lijmverbinding tussen het houten kader en het glas vervangen door een veer met equivalente mechanische eigenschappen. De equivalente veersterkte van deze veren kan bepaald worden met de vergelijkingen 2.7 en 2.8. De equivalente veersterkte K_1 staat voor de weerstand tegen vervorming van de lijm loodrecht op het kader. De equivalente K_2 is de weerstand tegen vervorming van de lijm ten gevolge van de zijdelingse afschuiving.



Figuur 2.20: Veermodel van Kreuzinger en Niedermaier [14]

$$K_1 = \frac{E_a \cdot l_a \cdot w_a}{t_a} \quad (2.7)$$

$$K_2 = \frac{G_a \cdot l_a \cdot w_a}{t_a} \quad (2.8)$$

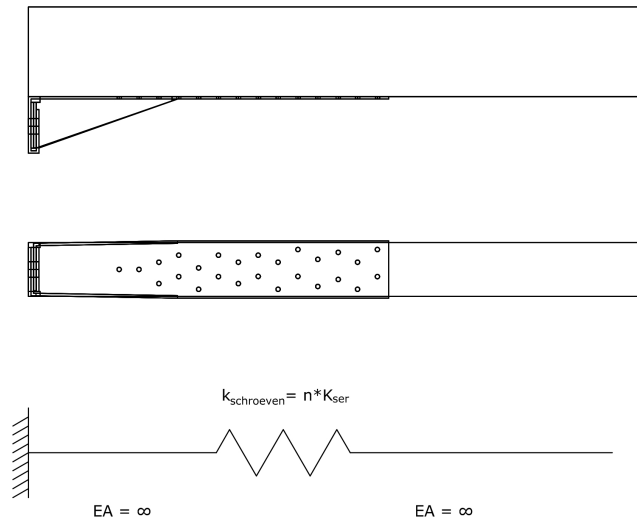
In vergelijkingen 2.7 en 2.8 staat l_a voor de lengte van de lijmzone die vervangen wordt door de veer, t_a en w_a geven respectievelijk de dikte en de breedte van de lijm weer. E_a staat voor de elasticiteitsmodulus van de veer en G_a voor de schuifmodulus van de lijm.

Het proefstuk is opgebouwd uit meerdere lagen. Eerst wordt het glas verlijmd op een houten kader waarna dit kader met schroeven wordt verbonden aan het hoofdkader.

Hochhauser [58, p. 66] bespreekt in zijn doctoraat thesis een methode om de stijfheid van de lijmverbinding en de schroefverbinding om te zetten naar een veersterkte voor het model van Kreuzinger en Niedermaier. Deze methode wordt verder besproken in hoofdstuk 4.2.3.

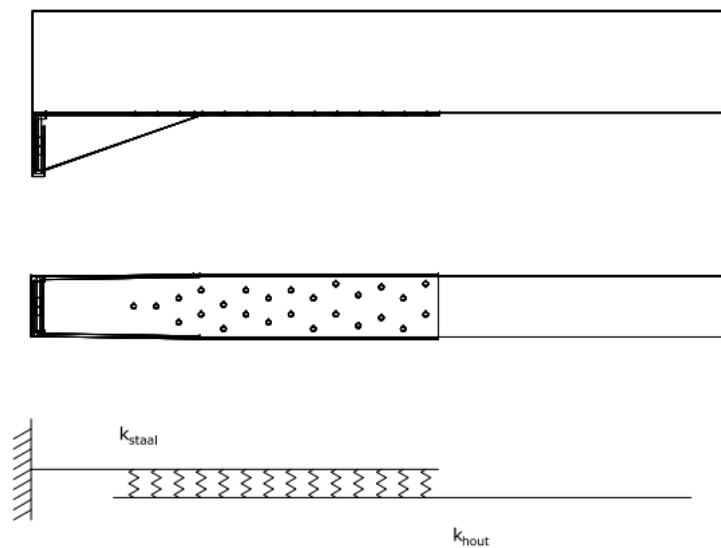
2.6.3 Verankering

Hoekstra [59] bespreekt drie verschillende methodes voor het analytisch bepalen van de verankeringskracht van een *tie-down* verbinding. Het eerste analytische model dat besproken wordt, is een vereenvoudigd model zoals weergegeven in figuur 2.21. Hierbij wordt de aanname gedaan dat de *tie-down* zelf oneindig sterk is en wordt er een veersterkte bepaald voor de schroeven. Deze veersterkte kan bepaald worden volgens Eurocode 5 [6].



Figuur 2.21: Vereenvoudigd model van de verankeringsverbinding van de *tie-down*

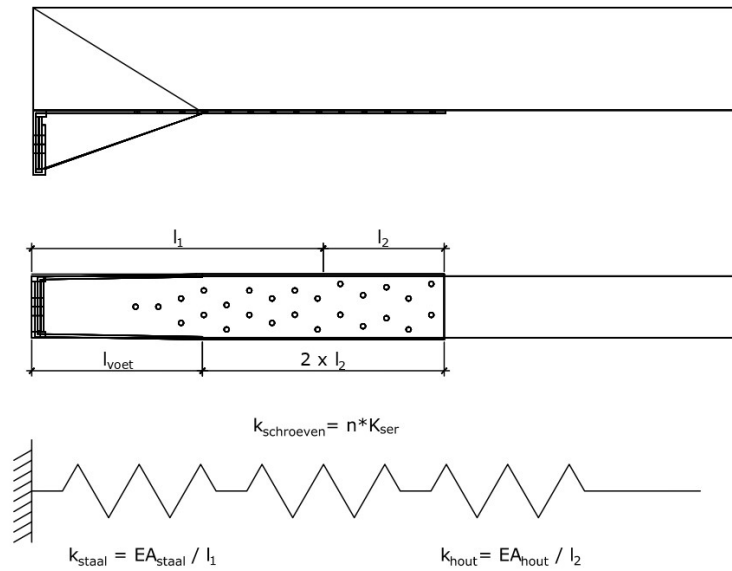
Uit de resultaten van de paper bleek dat de berekende sterkte van de verankeringsverbinding een overschatting is dan de waarde die tijdens testen werd opgemeten. Daarnaast wordt in de paper ook een eindige elementen model besproken. Figuur 2.22 geeft een afbeelding van dit model weer. In dit model wordt er een veersterkte bepaald voor zowel het verbindingsmiddel, het anker en de houten stijl.



Figuur 2.22: Eindige elementen model van de verankeringsverbinding van de

In het eindige elementen model wordt er een vereenvoudiging gemaakt voor de schroeven die in dezelfde rij geplaatst zijn. Deze schroeven zijn parallel geplaatst ten opzichten van elkaar waardoor deze vereenvoudigd kunnen worden door een veer met een veersterkte die gelijk is aan de som van de veersterkte van elke schroef in deze rij.

Het derde model dat besproken wordt in deze paper is een numeriek model. Bij dit numeriek model wordt zowel het stalen verankeringsysteem, de verbindingsmiddelen en het hout vervangen door een equivalente veersterkte. Dit wordt weergegeven in figuur 2.23.



Figuur 2.23: Numeriek model van de verankeringsverbinding van de *tie-down*

In dit model is de bepaling van de stijfheid van de verankerung gebaseerd op het serie plaatsen van de verschillende stijfheden. De equivalente stijfheid wordt gegeven door vergelijking 2.9.

$$k_{equivalent} = \frac{1}{\frac{1}{k_{staal}} + \frac{1}{k_{schroeven}} + \frac{1}{k_{hout}}} \quad (2.9)$$

In vergelijking 2.9 staat k_{staal} voor de stijfheid van het verankeringsysteem zelf bepaald met vergelijking 2.10.

$$k_{staal} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{E_{staal} \cdot A_1}{l_1}} + \frac{1}{\frac{E_{staal} \cdot A_2}{l_m}}} \quad (2.10)$$

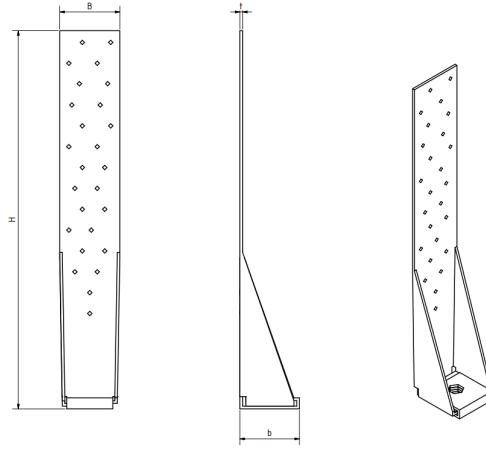
Waarbij in vergelijking 2.10, E_{staal} staat voor de elasticiteitsmodulus van staal. Daarnaast kunnen l_1 en l_2 afgeleid worden uit figuur 2.23. Daarnaast kunnen de oppervlakten A_1 en A_2 bepaald worden met behulp van vergelijking 2.11 en 2.12. Waarbij B de breedte en t de dikte van het plaatmateriaal van het verankeringsysteem is zoals weergegeven in figuur 2.24. Daarnaast geeft b de breedte van de voet van het verankeringsysteem weer.

$$A_1 = B \cdot t \quad (2.11)$$

$$A_2 = (B + b) \cdot t \quad (2.12)$$

Vervolgens kan k_{hout} bepaalt worden met vergelijking 2.13. Waarbij E_{hout} en A staat voor de elasticiteitsmodulus en de oppervlakte van de doorsnede van het kader. Verder wordt l_{hout} bepaald door het verschil van l_1 en l_2 welke afgeleid kunnen worden uit figuur 2.23.

$$k_{hout} = \frac{E_{hout} \cdot A_{hout}}{l_{hout}} \quad (2.13)$$



Figuur 2.24: Afmetingen verankeringsmiddel [60]

Tenslotte wordt $k_{\text{schroeven}}$ bepaald met de vergelijkingen voor $K_{\text{sls,v}}$ beschreven in Eurocode 5 [6].

2.7 Conclusie

Uit de literatuurstudie werden in de eerste plaats de materiaaleigenschappen van de lijmen en van het wandelement besproken. Vervolgens om het gedrag van een wandelement te analyseren, worden verschillende meetmethodes toegepast. Hiervoor worden de volgende technieken gebruikt: LVDT's, DIC, rekstrookjes, loadcellen en fiber bragg grating sensoren. Deze technieken worden tijdens het uitvoeren van de proeven gebruikt om de verplaatsingen, spanningen en vervormingen in kaart te brengen. Verder werden diverse faalmechanisme bestudeerd in de lijm, de verbindingen, het hout en het glas die vergeleken kunnen worden met de faalmechanisme die optreden tijdens de proeven. Daarnaast worden meerdere methodes voor het opstellen van analytische modellen besproken. Twee van deze modellen zijn gebaseerd op het veermodel van Kreuzinger en Niedermaier. Het eerste model bepaalt de sterkte van de lijmverbinding en houdt hierbij rekening met zowel UGT als GGT combinaties. In het tweede model wordt een equivalente stijfheid bepaald voor de combinatie van de schroefverbinding en de lijmverbinding. Tenslotte worden ook de UGT en GGT controles uit Eurocode 5 besproken voor het bepalen van de uitwijking van het kader. Naast de analytische modellen wordt in deze literatuurstudie ook aandacht besteed aan numerieke modellen. Hierbij werden het diagonaal model en veermodel van Kreuzinger en Niedermaier besproken die eerder werden onderzocht door de bachelor proef die vooraf ging aan deze master thesis. Daarnaast werden er ook modellen onderzocht voor het simuleren van een verankeringsysteem in het numeriek model. Met deze studie is een fundament gelegd voor de verdere ontwikkeling van een analytisch model en een numeriek model voor hybride hout-glaswandelementen die vergeleken kunnen worden met de experimentele resultaten.

Hoofdstuk 3

Schrankweerstandproeven

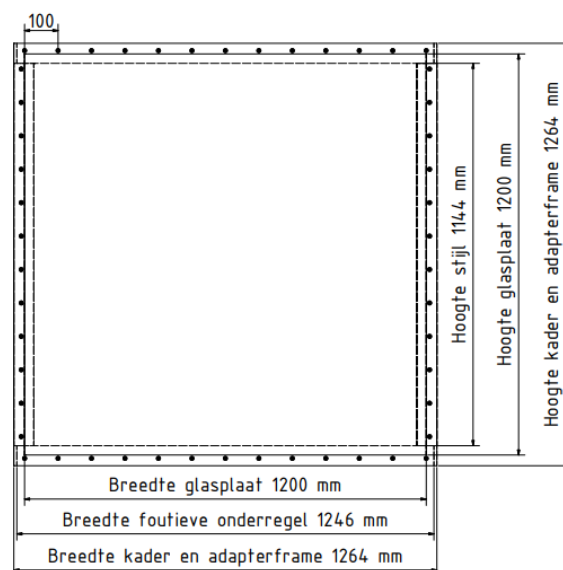
3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen de schrankweerstandproeven besproken worden. Eerst zal een algemene opbouw van het proefstuk besproken waarna ook de proefopstelling toegelicht zal worden. Verder zal de plaatsing van de sensoren toegelicht worden en ten slotte zullen de resultaten besproken worden.

3.2 Materialen en Methode

3.2.1 Proefstukken

Het proefstuk bestaat uit twee onderling verbonden onderdelen. Het eerste onderdeel is het kader van het wandelement. De regels en stijlen van het kader zijn opgebouwd uit Dupac LVL S-beam hout met een sectie van 60×100 mm. Het kader heeft een hoogte van 1264 mm en een breedte van 1264 mm zoals weergegeven in figuur 3.1. De stijlen hebben een hoogte van 1144 mm.



Figuur 3.1: Vooraanzicht proefstuk met afmetingen

De voorziene breedte van de regel is 1264 mm. Bij de levering van het hout zijn er acht regels geleverd met een foutieve breedte van 1246 mm. Dit is gecorrigeerd door de regel aan beide uiteinden 9 mm te laten inspringen. Deze aanpassing wordt weergegeven in figuur 3.1 als foutieve lengte. In tabel 3.1 worden de proefstukken weergegeven waarbij is aangeduid waar de regel met een lengte van 1246 mm is gebruikt. De regel en stijl wordt verbonden met twee SPAX HI force schroeven ($\varnothing 8 \times 140$ mm), waarbij voorgeboord wordt met een diameter van 6 mm. Deze schroeven hebben een totale lengte van 140 mm met een schroefdraad lengte van 80 mm.

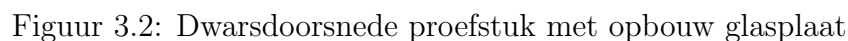
Het tweede onderdeel is het adapterkader, hierop wordt door middel van een lijmverbinding een glasplaat verbonden. Nadien wordt het adapterkader met schroeven verbonden aan het LVL kader. Het materiaal dat voor het adapterkader is gebruikt, is berken multiplex met een sectie van 18×60 mm. Het adapterkader wordt met 50 schroeven ($\varnothing 6,5 \times 80$ mm) met een onderlinge afstand van 100 mm verbonden aan het LVL kader, zoals weergegeven in figuur 3.1. Hierbij zijn de schroeven voorgeboord met een diameter van 4,5 mm.

Voor de verbinding van het adapterkader met de glasplaat zijn twee verschillende lijmen gebruikt, afhankelijk van het proefstuk. Voor drie proefstukken is er gebruik gemaakt van DowsilTM 993-lijm zonder primer. Bij vier andere proefstukken is er gebruik gemaakt van Kömmerling Ködiglaze S waarbij vooraf een HG 74 Primer is aangebracht. De primer zorgt ervoor dat de oppervlakte-energie van het hout gaat verhogen waardoor de hechting tussen het hout en de lijm beter zal zijn. De eigenschappen van de twee lijmen zijn afgeleid uit de experimentele proeven [13]. In tabel 3.1 wordt weergegeven welk type lijm is gebruikt. De naam van de proefstukken bestaat uit drie delen. De eerste letter verwijst naar de gebruikte lijm met D van DowsilTM 993 en K van Kömmerling Ködiglaze S. Het tweede deel staat voor de verschillende meetmethodes die eerder in deel 2.3 zijn besproken. De laatste letter geeft aan welk type verankering is toegepast tijdens de testen. F staat voor fully anchored ofwel volledig verankerd en de P staat voor Partially anchored of gedeeltelijk verankerd. Dit wordt verder toegelicht in deel 3.2.2.

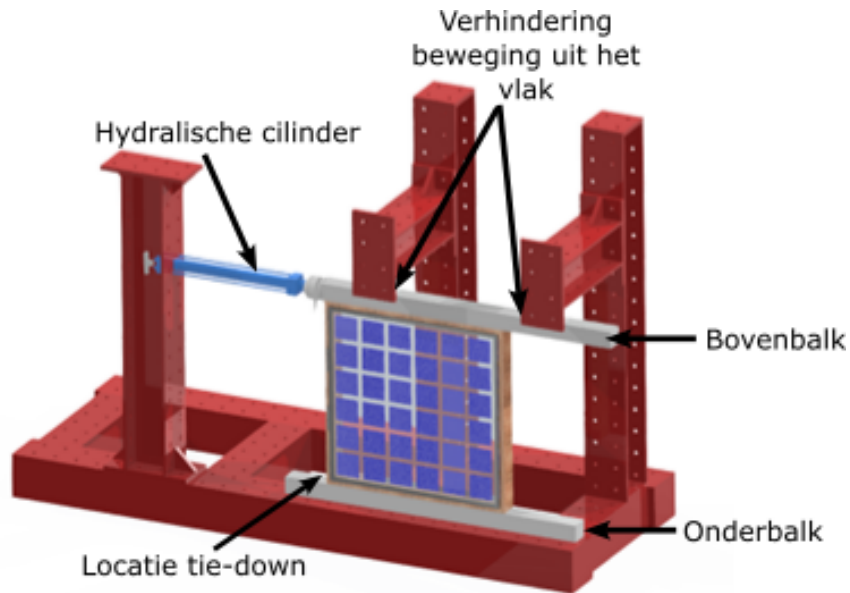
Tabel 3.1: Lijmtype, bijkomende verankering en regellengte van de geteste proefstukken

Naam proefstuk	Lijm	Bijkomende verankeringsmethode	Regel lengte [mm]
D-DIC-F	Dowsil TM 993	<i>Tie-Down</i>	1264
K-DIC-F	Kömmerling Ködiglaze S	<i>Tie-Down</i>	1264
K-DIC-P	Kömmerling Ködiglaze S	-	1264
K-SG-P	Kömmerling Ködiglaze S	-	1264
K-SG-F	Kömmerling Ködiglaze S	<i>Tie-Down</i>	1246
D-SG-P	Dowsil TM 993	-	1246
D-FBG-F	Dowsil TM 993	<i>Tie-Down</i>	1246
Leeg kader	-	<i>Tie-Down</i>	1246

In dit onderzoek worden de zonnencellen niet als hoofdfocus beschouwd. Er wordt niet gefocus op de werking van de zonnencellen, enkel op de structurele eigenschappen van het wandelement. Figuur 3.2 geeft een dwarsdoorsnede van het proefstuk weer met de opbouw van de glasplaat.



Figuur 3.3 geeft de de proefopstelling weer. De hoofdconstructie is opgebouwd uit rode H300 profielen voorzien van gaten om de 150 mm. De hydraulische cilinder wordt met een pijl aangeduid op de figuur 3.3. Deze hydraulische cilinder wordt gebruikt om de horizontale kracht uit te oefenen op het kader. De maximale kracht die uitgeoefend kan worden is 55 kN en is beperkt tot een maximale verplaatsing van 300 mm. De boven- en onderbalk bestaan uit HEA 120 profielen met een eigen gewicht van 20,3 kg/m. Deze profielen dienen voor de verbinding van het proefstuk met de proefopstelling. Het proefstuk wordt verbonden aan de constructie door middel van tien M6 bouten en rondellen aan boven en onderzijde. Om de proef uit te voeren wordt de onderbalk vast verbonden aan de hoofdconstructie. Daarnaast kan de bovenbalk vrij bewegen in het vlak.



Figuur 3.3: Schematische voorstelling proefopstelling

Daarnaast geeft figuur 3.4 het systeem weer waarmee de verplaatsing uit het vlak van de structuur verhinderd werd. Deze structuur wordt aan beide zijden van het proefstuk voorzien en wordt herhaald aan de linker en rechter zijde. Het plaatmateriaal wordt aangebracht om de wrijving afkomstig van deze structuur te beperken.



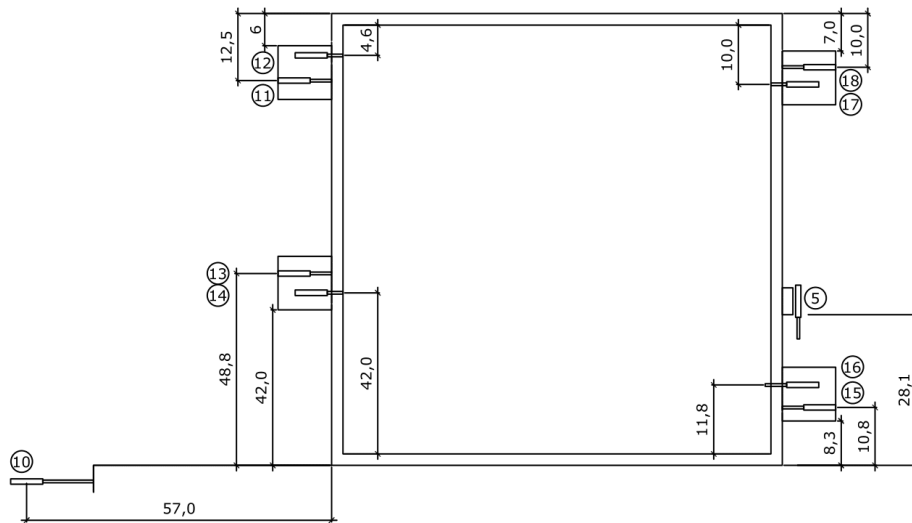
Figuur 3.4: Verhinderend verplaatsing uit het vlak

Ten slotte kon er bij de proefopstelling een variatie worden voorzien op de verankering van het proefstuk. Bij 4 proefstukken word er een *tie-down* verbinding toegevoegd om het kantelen van het kader tegen te gaan. Bij de overige drie proefstukken is het proefstuk enkel verankerd met bouten aan de onderzijde.

3.2.3 Plaatsing sensoren

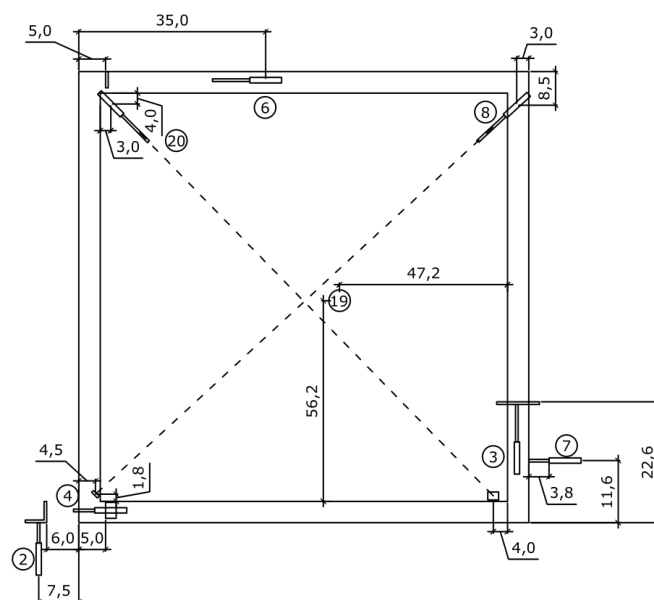
Tijdens de proeven wordt er gebruik gemaakt van verschillende meettechnieken. Een eerste meettechniek die ook besproken wordt in hoofdstuk 2.3.2 is DIC. In deze masterproef worden drie proefstukken gemeten met DIC. Deze proefstukken worden in de naamgeving benoemd met DIC. Daarnaast wordt de uitwijking op verschillende plaatsen opgemeten met LVDT's.

Voor de plaatsing van de LVDT's worden er twee plaatsingen gebruikt. Voor de proefstukken: D-DIC-F, K-DIC-F, K-DIC-P en het kader zonder glasplaat wordt de plaatsing zoals weergegeven in figuur 3.5 en 3.6. De LVDT sensoren met het nummer 11 tot en met 18 op figuur 3.5 worden gebruikt om het verschil van de afwijking te bepalen tussen het glas en het LVL-kader.



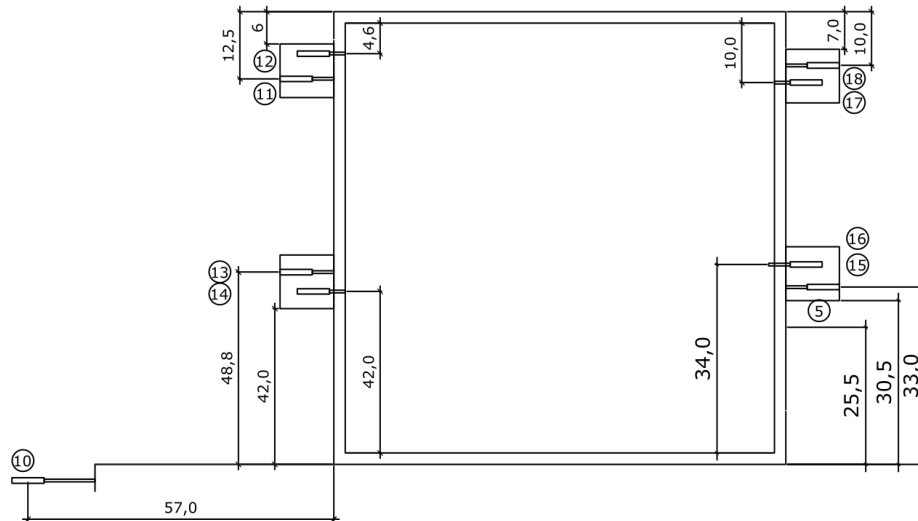
Figuur 3.5: Schematische weergave plaatsing LVDT's voorzijde proefstuk

Daarnaast zijn sensoren 4,6,10 en 21 aangebracht om de slip tussen de proefopstelling en het proefstuk in kaart te brengen. Door het aanbrengen van de kracht in de rechterbovenhoek is het mogelijk dat het kader zal gaan roteren. Hiervoor zijn de sensoren 3 en 5 geplaatst om respectievelijk de verticale uitwijking of de indrukking van het kader op te meten. Sensor 8 en 20 meten de uitwijking van het proefstuk volgens de diagonalen van het kader. Een laatste LVDT sensor die is aangebracht is sensor 19. Deze sensor registreert de uitwijking uit het vlak van de glasplaat.



Figuur 3.6: Schematische weergave plaatsing LVDT's achterzijde proefstuk

Bij proefstukken K-SG-P, K-SG-F, D-SG-P en D-FBG-F worden sensoren 5, 15 en 16 verplaatst. Tussen de verschillende glaslagen werden rekstrookjes aangebracht voor het meten van de rek in het glas. De aansluitingen voor deze rekstrookjes zorgen ervoor dat het niet mogelijk is om de sensoren 15 en 16 te plaatsen. In figuur 3.7 wordt de aangepaste plaatsing van de LVDT sensoren weergegeven. Op figuur 3.7 wordt weergegeven dat sensoren 15 en 16, 22,2 mm omhoog worden geplaatst. Daarnaast wordt sensor 5, 26 mm naar onder geplaatst.



Figuur 3.7: Schematische weergave aangepaste plaatsing LVDT's voorzijde proefstuk

Tijdens het uitvoeren van de proeven wordt de kracht uitgeoefend met de hydraulische cilinder geleidelijk verhoogd. Bij het bereiken van een kracht van 3 kN wordt de kracht een bepaalde tijd constant gehouden, waarna de belasting terug afgebouwd wordt tot 1 kN. Hierna zal de kracht opnieuw geleidelijk verhoogd totdat er een van volgende faalmechanisme wordt bereikt:

- Het bereiken van de maximale uitwijking van 300 mm van de hydraulische cilinder;
- Het falen van de lijmverbinding tussen het hout en het glas;
- Het falen van de schroefverbinding op afschuiving of uittrekking;
- Het falen van de glasplaat.

3.3 Resultaten

3.3.1 Faalmechanismen

Uit de resultaten van de schrankweerstandproeven kunnen drie faalmechanismen opgemerkt worden. Het eerste faalmechanisme dat besproken wordt is het cohesief falen van de lijmverbinding tussen het glas en hout. Dit faalmechanisme is opgetreden bij alle proefstukken met uitzondering van proefstuk D-FBG-P en proefstuk K-SG-P. Figuur 3.8 geeft het cohesief falen van proefstuk D-SG-F en K-SG-F weer. Het cohesief falen van de lijmverbinding ontwikkelde zich altijd in een hoek van de glasplaat. Dit kan verklaard worden door een spanningsconcentratie die optreedt in deze hoekpunten.



(a) Proefstuk D-SG-F



(b) Proefstuk K-SG-F

Figuur 3.8: Cohesief falen van het proefstuk

Een tweede faalmechanisme dat optrad tijdens de proeven is het adhesief falen bij proefstuk D-FBG-P. Figuur 3.9 geeft proefstuk D-FBG-P weer waarbij de lijmverbinding is losgekomen van het hout. Dit zou mogelijks veroorzaakt kunnen worden door een mindere hechting tussen het hout en de lijm omdat er geen primer is toegepast.



Figuur 3.9: Adhesief falen van proefstuk D-FBG-P

Een laatste faalmechanisme dat optrad tijdens de proeven was het falen van de hoekverbinding van het LVL kader door de uplift van het kader. Het falen van de hoekverbinding wordt veroorzaakt door het kantelen van het kader wat een opwaartse verplaatsing veroorzaakt. Figuur 3.10 geeft de gefaalde verbinding weer van proefstuk K-SG-P. Dit zou mogelijk te verklaren zijn door de uittreksterkte van de schroeven en de materiaal variatie die er is bij LVL hout.

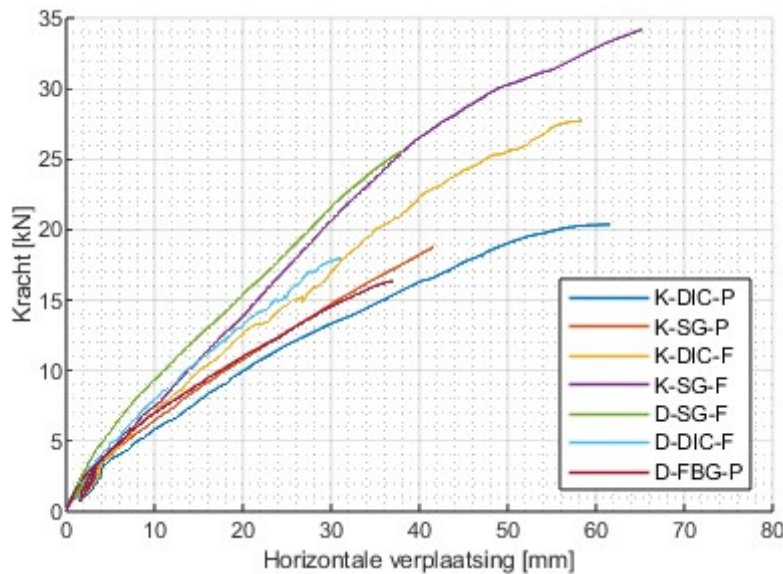


Figuur 3.10: Falen van de schroefverbinding door opwaartse verplaatsing proefstuk K-SG-P

Ten slotte kan opgemerkt worden dat er tijdens het uitvoeren van de testen er geen falen van de glasplaat is opgetreden. Wat betekent dat de maximale trekspanning in het glas niet overschreden werd.

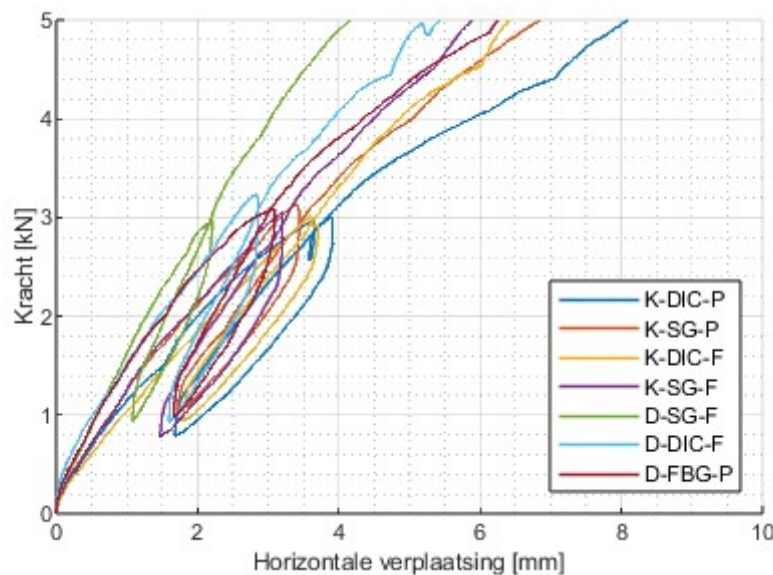
3.3.2 Meetresultaten

Figuur 3.11 geeft de kracht verplaatsingsdiagram weer waarbij de grafiek is opgesplitst per lijmsoort. Uit figuur 3.11 kan ten eerste worden afgeleid dat de proefstukken verankerd met een *tie-down* verbinding een hogere stijfheid hebben dan de partieel verankerde proefstukken. Daarnaast kan er afgeleid worden dat de proefstukken met Kömmerling Ködiglaze S lijm gemiddeld een hogere maximale kracht hebben dan de proefstukken met Dowsil™ 993 lijm.



Figuur 3.11: Kracht-verplaatsingsdiagram LVDT-sensor 6

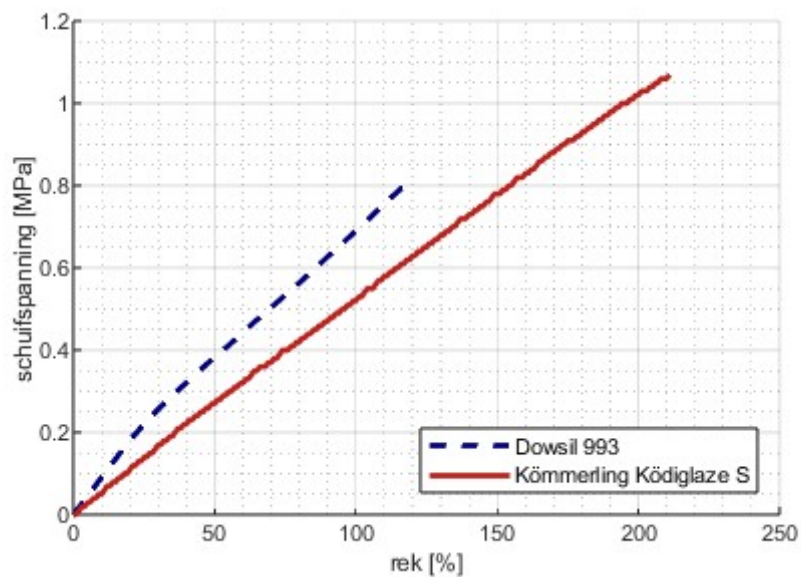
Verder wordt er in figuur 3.12 uitvergroot gekeken naar de kracht en verplaatsing van de proefstukken met een bereik van de kracht afgebakend van 0 tot 5 kN. Op deze figuur wordt ook de herbelastingslus zichtbaar die is toegepast tijdens de testen.



Figuur 3.12: Kracht-verplaatsingsdiagram LVDT-sensor 6 tot 5 kN

Uit figuur 3.12 kan afgeleid worden dat de proefstukken met een Dowsil™ 993 lijmverbinding gemiddeld een hogere initiële stijfheid hebben dan de proefstukken met een Kömmerling Ködiglaze S

lijmverbinding. Een mogelijke verklaring hiervan ligt bij het niet lineair verband van de lijm. Figuur 3.13 geeft het verband tussen de afschuifsterkte en de rek weer voor de DowsilTM 993 en Kömmerling Ködiglaze S lijm. Deze resultaten zijn afkomstig uit een eerder uitgevoerde studie door Engelen et al.[13].

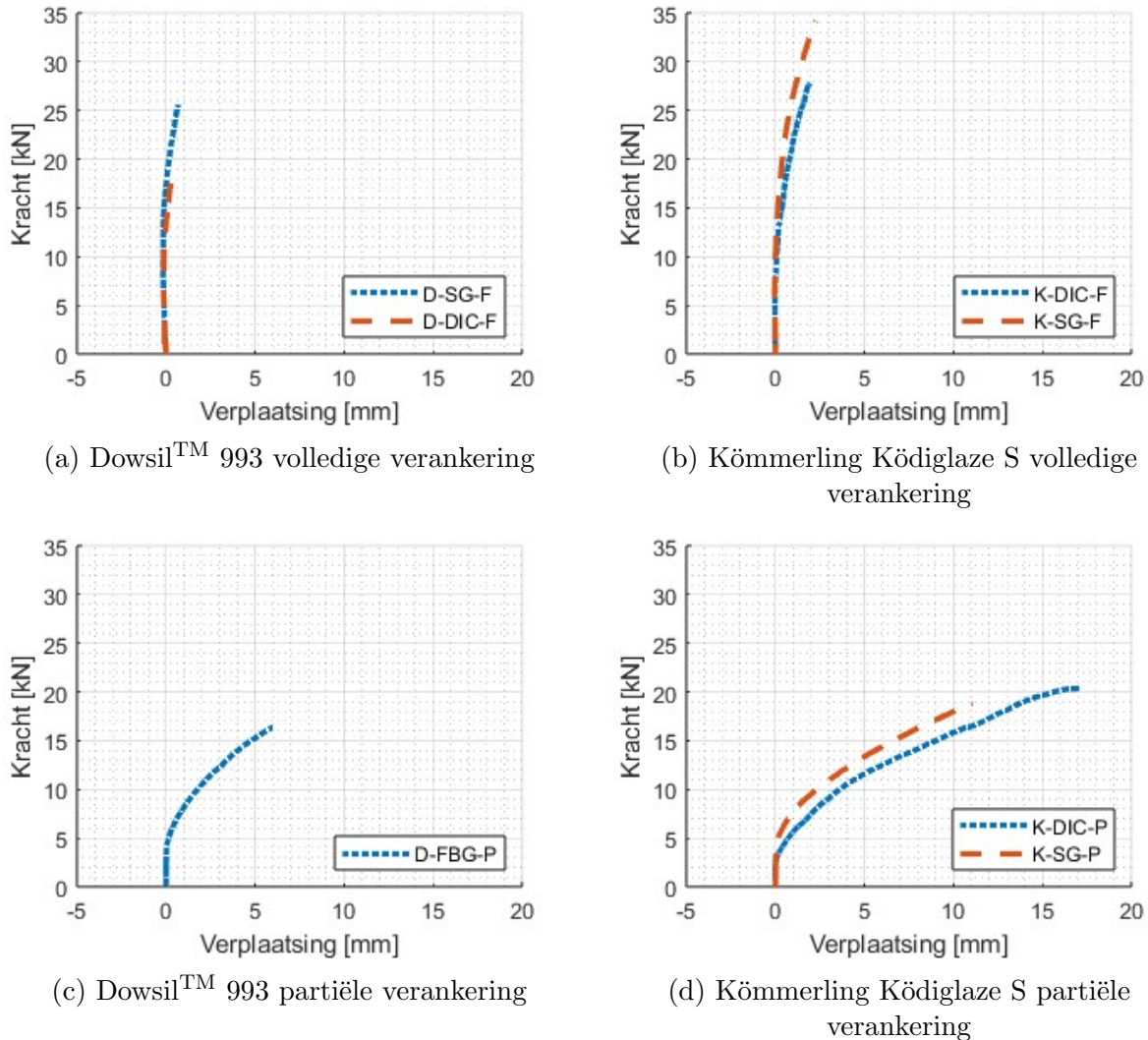


Figuur 3.13: Afschuifspanning-rek diagram afschuifproeven lijmen

Uit figuur 3.13 kan afgeleid worden dat DowsilTM 993 een niet-lineair verband heeft. Hierbij valt dat de lijm zich lineair zal gedragen tot 25% rek waarna de curve zal afbuigen en opnieuw een lineair verband vormt tussen de afschuifspanning en de rek. Ook kan opgemerkt worden dat de afschuifmodulus van het lineair verband tussen 0 en 25% rek een hogere waarde heeft dan de afschuifmodulus van het afgebogen deel. Daarnaast valt op uit de resultaten van Kömmerling Ködiglaze S dat deze een zeer beperkte afbuiging heeft van de curve en benaderd kan worden met een lineair verband tussen de afschuifspanning en de rek.

Vergelijking componenten

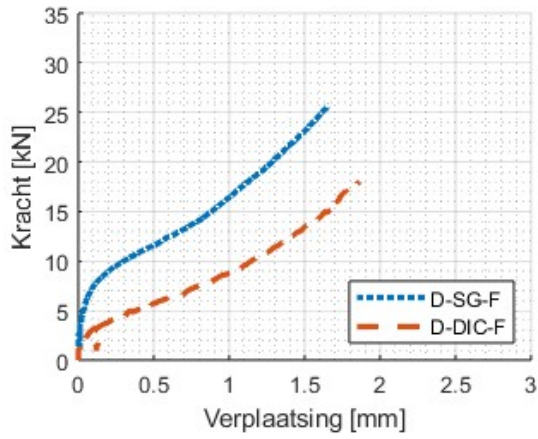
Vervolgens kunnen ook verschillende uitwijkingcomponenten besproken in sectie 2.5 afgeleid worden uit verschillende LVDT sensoren. Een eerste uitwijkingcomponent die afgeleid kan worden is de component u_M afkomstig van de rek in het verankeringsysteem weergegeven in figuur 3.14. Deze uitwijking komt overeen met de verticale verplaatsing van het proefstuk opgemeten met LVDT sensor 3 weergegeven in figuur 3.6.



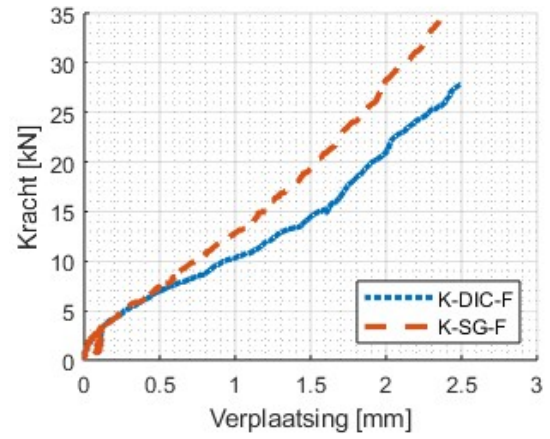
Figuur 3.14: LVDT sensor 3: Rek in het verankeringsysteem

Uit de proefstukken met volledige verankering, weergegeven in figuur 3.14a en 3.14b kan afgeleid worden dat de verplaatsing beperkt is t.o.v. de proefstukken met gedeeltelijke verankering. Voor DowsilTM 993 is dit beperkt tot 1 mm en voor Kömmerling Ködiglaze S bedraagt dit 2 mm. Daarnaast valt op in figuur 3.14a en 3.14b dat de verplaatsing pas optreedt bij een belasting groter dan 10 kN. Figuur 3.14c en 3.14d geven een hogere verticale verplaatsing weer. Dit valt te verklaren doordat bij een partieel verankerd proefstuk een hogere kanteling van het frame zal optreden.

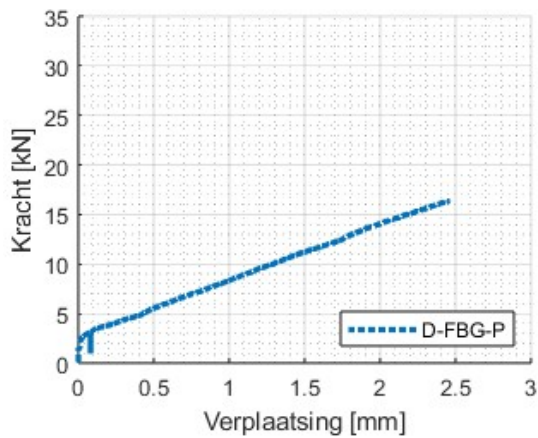
Daarnaast kan uit de experimentele resultaten ook de starre lichaamstranslatie van het proefstuk afgeleid worden. De starre lichaamstranslatie wordt tijdens het uitvoeren van de proeven opgemeten met behulp van sensor 4 weergegeven in figuur 3.5 en 3.7. De resultaten van de starre lichaamstranslatie worden weergegeven in figuur 3.15.



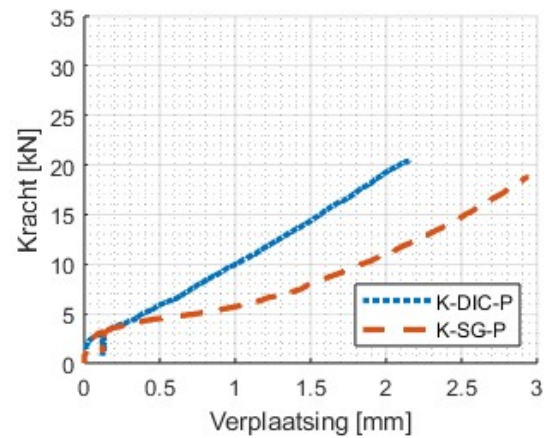
(a) Dowsil™ 993 volledige verankering



(b) Kömmerling Ködiglaze S volledige verankering



(c) Dowsil™ 993 partiële verankering

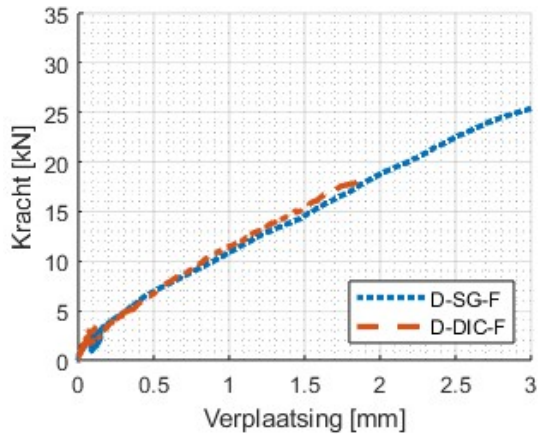


(d) Kömmerling Ködiglaze S partiële verankering

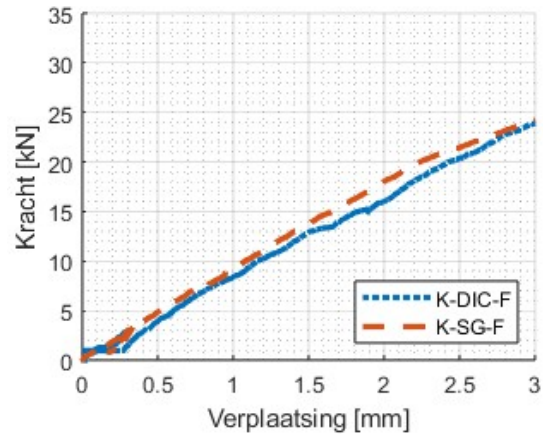
Figuur 3.15: LVDT sensor 4: Starre lichaamstranslatie

Uit figuur 3.15 kan afgeleid worden dat de volledig verankerde proefstukken een kleinere starre lichaamstranslatie hebben. Dit kan verklaard worden door de *tie-down* die ook een minimale horizontale verankering veroorzaakt.

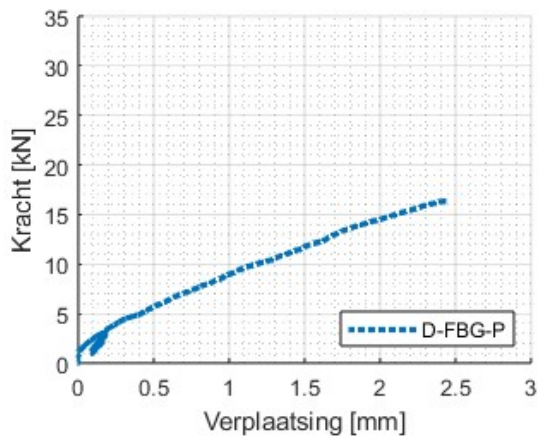
Ten slotte kan de component van de uitwijking voor de compressie van de onderregel loodrecht op de vezelrichting nog afgeleid worden uit de experimentele resultaten. De compressie van de onderregel wordt opgemeten door LVDT sensor 5 weergegeven in figuur 3.6. De resultaten van de compressie van de onderregel wordt weergegeven in figuur 3.16.



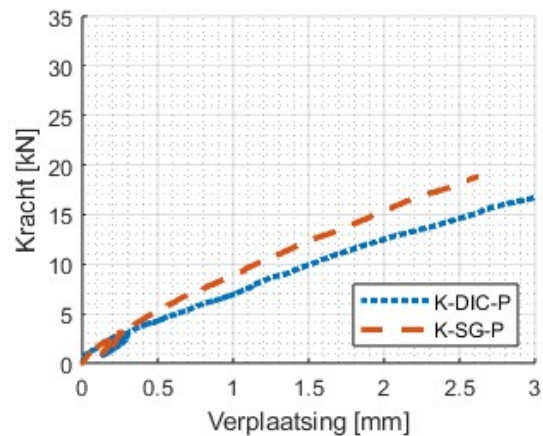
(a) DowsilTM 993 volledige verankering



(b) Kömmerling Ködiglaze S volledige verankering



(c) DowsilTM 993 partiële verankering



(d) Kömmerling Ködiglaze S partiële verankering

Figuur 3.16: LVDT sensor 5: compressie van de onderregel loodrecht op de vezelrichting

Uit figuur 3.16 kan afgeleid worden dat gemiddeld een kleinere indrukking van de onderregel is bij de volledig verankerde proefstukken. Dit wordt weergegeven in figuur 3.16a en 3.16b. De hogere indrukking van de onderregel bij partieel verankerde proefstukken is mogelijks te verklaren door de grotere verticale verplaatsing van het proefstuk.

3.4 Conclusie

Uit dit hoofdstuk kan geconcludeerd worden dat bij deze testopstelling de trekspanning in het glas niet bereikt zal worden. Daarnaast kan geconcludeerd worden dat bij dit type proefstuk met volledige verankering een hogere kans is dat cohesief falen van de lijmverbinding zal optreden. Een laatste conclusie die gemaakt kan worden is dat de proefstukken met Kömmerling Ködiglaze S lijm gemiddeld een hogere kracht kunnen weerstaan dan de proefstukken met DowsilTM 993.

Hoofdstuk 4

Analytisch model

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de analytische methode besproken die wordt toegepast om de uitwijking te bepalen. Hierin worden twee verschillende modellen besproken die beide gebaseerd zijn op de methode voor het bepalen van de uitwijking beschreven in hoofdstuk 12.3.3 van Eurocode 5 [6].

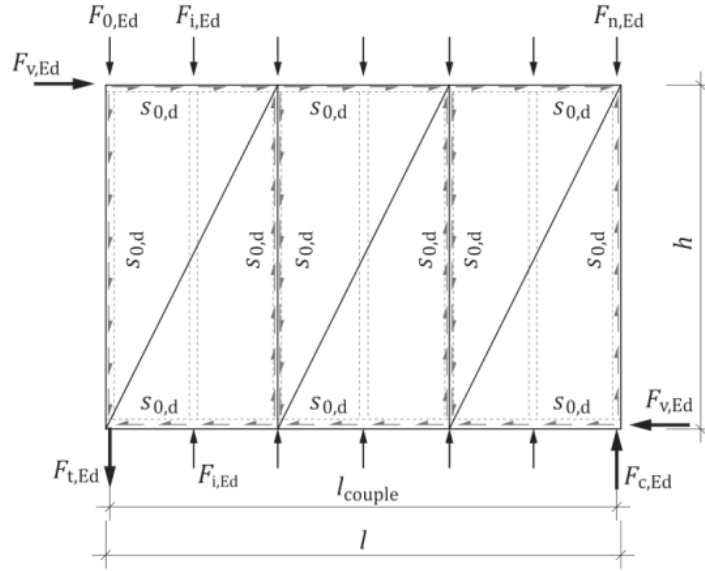
4.2 Methode

4.2.1 Bepaling krachten en reactiekrachten uit vrijlichaamsschema

De eerste fase van het numeriek is het bepalen van de verschillende krachten op het kader van het wandelement. Figuur 4.1 geeft de verschillende krachten weer zoals besproken in [6]. De horizontale kracht $F_{V,Ed}$ is de rekenwaarde van de kracht die aangebracht is op het wandelement. Om de resultaten van de analytische methode te vergelijken met de experimentele resultaten zijn alle veiligheidsfactoren gelijk gesteld aan één. Daarnaast wordt het gewicht van I-profiel op de bovenregel van het kader in rekening gebracht door $F_{0,Ed}$, $F_{i,Ed}$ en $F_{l,Ed}$. Hierbij is $F_{0,Ed}$ de rekenwaarde voor de verticale kracht aan de eerste stijl. Hierbij wordt de eerste stijl bepaald door de kant waar de horizontale kracht $F_{V,Ed}$ aangrijpt. $F_{n,Ed}$ is de rekenwaarde voor de verticale kracht die aangrijpt aan laatste stijl van het kader. De verticale kracht $F_{i,Ed}$ is de verticale kracht op tussenregels van het kader. Het proefstuk van de testen bestaat enkel uit twee stijlen waardoor deze kracht niet van toepassing is in deze thesis. Tenslotte wordt in figuur 4.1 de reactiekrachten ten gevolgen van de horizontale kracht $F_{V,Ed}$ weergegeven. Hierbij is $F_{t,Ed}$ de rekenwaarde van de reactiekracht in trek op de eerste stijl van het kader en kan bepaald worden met vergelijking 4.1. De reactiekracht $F_{c,Ed}$ is de rekenwaarde voor de compressie op de laatste stijl van kader. Deze reactiekracht kan bepaald worden met vergelijking 4.2.

$$F_{t,Ed} = \frac{h}{l_{coupe}} \cdot F_{V,Ed} - F_{0,Ed} \quad (4.1)$$

$$F_{c,Ed} = \frac{h}{l_{coupe}} \cdot F_{V,Ed} + F_{0,Ed} \quad (4.2)$$



Figuur 4.1: Structureel schema voor wanden met randverankering [6]

In vergelijking 4.1 en vergelijking 4.2 staan h voor de hoogte van het wandelement. De term l_{coupe} is de afstand tussen de aangrijppunten van de krachten $F_{c,Ed}$ en $F_{t,Ed}$ zoals weergegeven in figuur 4.1. In deze thesis wordt de aanname gemaakt dat deze krachten in het midden van de stijl aangrijpen waardoor de l_{coupe} gelijk is aan vergelijking 4.3. Waarbij in deze vergelijking l gelijk is aan de lengte van het wandelement en b_{stijl} de breedte van de stijl is.

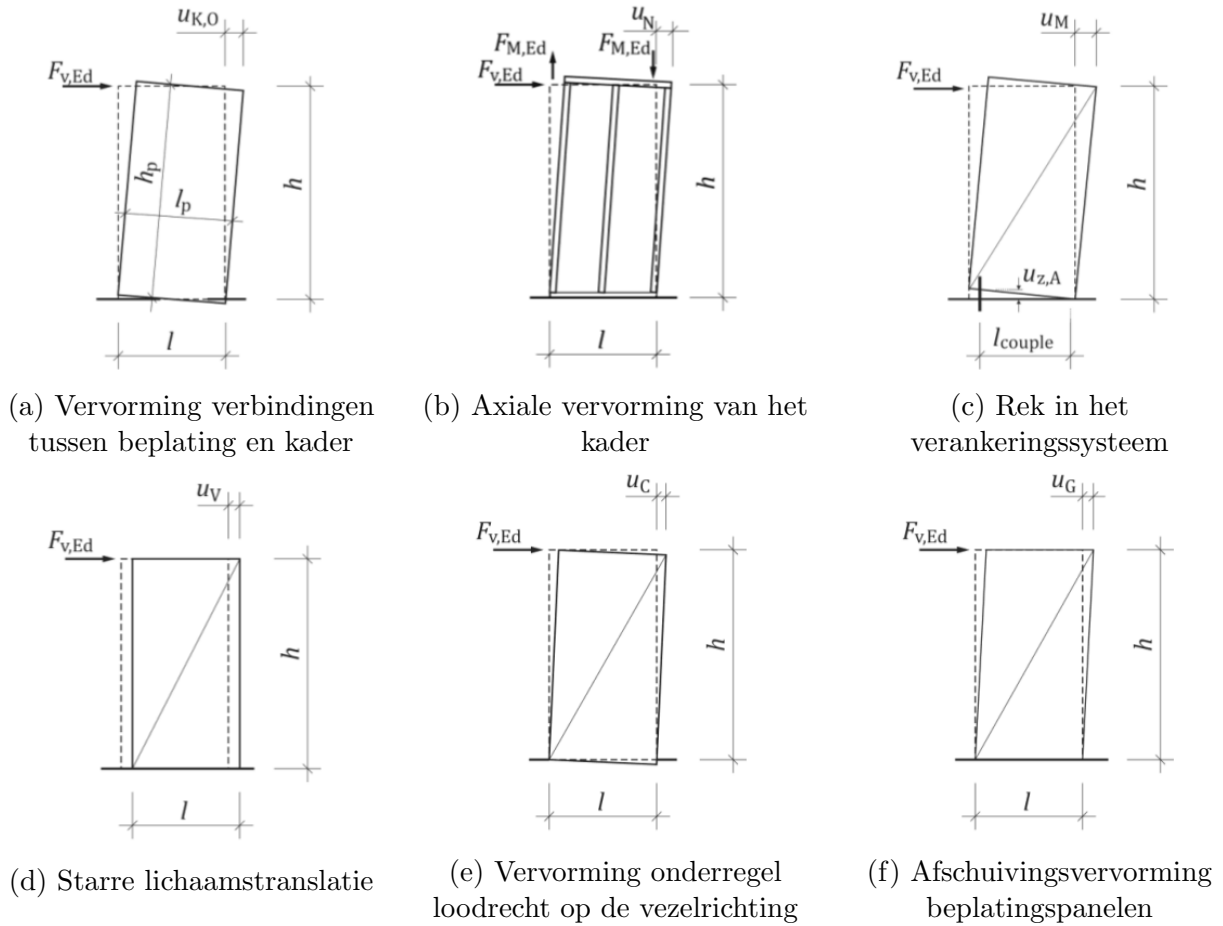
$$l_{coupe} = l - b_{stijl} \quad (4.3)$$

4.2.2 Bepaling uitwijking volgens bruikbaarheidsgrenstoestand

De analytische methode is gebaseerd op de methode die beschreven is in hoofdstuk 12.3.3 van Eurocode 5 [6]. Bij deze methode worden de verschillende uitwijkingen die optreden bij een wandelement zoals weergegeven in figuur 4.2 afzonderlijk bepaald. In figuur 4.2a wordt de vervormingscomponent weergegeven afkomstig van de verbinding tussen de beplating en het kader. Vergelijking 4.4 geeft weer hoe deze component bepaald kan worden.

$$u_{K,0} = \frac{\frac{F_{v,Ed}}{l^2}}{\frac{K_{SLS,1}}{a_{1,1} \cdot l_{per,1}} + \frac{K_{SLS,2}}{a_{1,2} \cdot l_{per,2}}} \quad (4.4)$$

$F_{v,Ed}$ en l in vergelijking 4.4 staan respectievelijk voor de verticale kracht aangebracht op de linkerbovenhoek en de lengte van het kader dat bijdraagt aan de schrankweerstand, zoals weergegeven in figuur 4.2. Daarnaast kunnen K_{SLS} en a_1 afgeleid worden van de verbinding tussen de plaat en het kader. Hierbij staat a_1 voor de tussenaafstand tussen deze verbindingmiddelen en K_{SLS} voor de slipmodulus van het verbindingsmiddel. In deze masterproef word deze stijfheid bepaald als de equivalente stijfheid van de lijmverbinding en de schroefverbinding die is beschreven door [58]. In deze uitwerking wordt de stijfheid per verbindingsmiddel bepaald. Hierdoor kan de stijfheid k bepaald met de methode van Hochenhauser, besproken in hoofdstuk 4.2.3, gelijk gesteld worden aan de verhouding van de slipmodulus en de tussenaafstand van de verbindings-



Figuur 4.2: Vervormingscomponenten aan de bovenzijde van een wandpaneel [6]

middelen ($\frac{K_{SLS,1}}{a_{1,1}}$). De perimeter van de plaat wordt in rekening gebracht door l_{per} en kan bepaald worden door vergelijking 4.5. De index één of twee duidt aan aan welke zijde van het kader de verbinding is geplaatst. In deze studie is er enkel onderzoek gedaan naar wandelementen met een plaatverbinding aan één zijde. Hierdoor zal de term $\frac{K_{SLS,2}}{a_{1,2} \cdot l_{per,2}}$ weggelaten worden uit deze vergelijking.

$$l_{per} = 2 \cdot n_{p,h} \cdot l + 2 \cdot n_{p,l} \cdot h \quad (4.5)$$

In vergelijking 4.5 staat l voor de lengte van het kader dat bijdraagt tot de schrankweerstand. Daarnaast staan h voor de hoogte van de wand. De term $n_{p,l}$ staat voor het aantal opeenvolgende platen langs de lengte van de wand. Daarnaast is de term $n_{p,h}$ een term om het aantal panelen gestapeld in de hoogte richting in rekening te brengen. Hierbij wordt in prEN 1995-1-1 [6] twee mogelijkheden gegeven. De eerste mogelijkheid is een paneel over de totale hoogte van het wand element. In dit geval zal de term $n_{p,h}$ gelijk zijn aan één. De tweede mogelijkheid om de panelen boven elkaar te plaatsen met een horizontale verbinding. In deze paper zijn zowel $n_{p,l}$ en $n_{p,h}$ gelijk aan één omdat voor de beplating van het wandelement gebruik is gemaakt van één paneel, het adapterframe met de glasplaat.

Daarnaast wordt er in deze thesis ook onderzocht of $u_{k,0}$ vervangen kan worden door de vergelijking opgesteld door Kreuzinger en Niedermaier [55] voor het bepalen van de uitwijking van een hout glas composiet verbinding [58].

$$u = \frac{2 \cdot H}{k_u \cdot \ell} \left(\frac{1}{1 + \frac{k_w}{k_u} \cdot \frac{h}{3\ell}} + \frac{\frac{h}{\ell}}{1 + \frac{k_w}{k_u} \cdot \frac{\ell}{3h}} \right) \quad (4.6)$$

In vergelijking 4.6 staat H voor de horizontale kracht welke overeen komt met $F_{V,Ed}$. Daarnaast staan h en l respectievelijk voor de hoogte en de lengte van het element, De stijfheid k_u en k_w staan voor de afschuifstijfheid in de lengte richting en dwarsrichting. In deze thesis wordt de zelfde aanname gebruikt als beschreven in [58], waarbij gesteld wordt dat de afschuifstijfheid in de lengterichting k_u en in de dwarsrichting k_w gelijk zijn aan elkaar en deze gelijk gesteld kunnen worden aan de equivalente stijfheid k bepaald volgens Hochenhauser.

De tweede component van de uitwijking is een term die rekening houdt met de axiale uitwijking van het kader wanneer het wandelement verankerd wordt met een *tie-down*. Deze component wordt weergegeven in figuur 4.2b. Deze uitwijking kan bepaald worden met vergelijking 4.7

$$u_N = \frac{2}{3} \frac{F_{V,Ed}}{E_{m,0,mean}} \left(\frac{l}{A_{rail}} + \frac{h^3}{A_{stud} \cdot l^2} \right) + \frac{F_{M,Ed}}{E_{m,0,mean}} \frac{h^2}{A_{stud} \cdot l} \quad (4.7)$$

In vergelijking 4.7 staat $F_{V,Ed}$ voor de horizontale kracht op het wandelement zoals weergegeven in figuur 4.2. $E_{m,0,mean}$ staat voor de gemiddelde elasticiteitsmodulus evenwijdig aan de vezelrichting van het kader. Daarnaast staan h en l voor de lengte en hoogte van het wandelement. A_{rail} staat voor de gemiddelde dwarsdoorsnede van de boven- en onderregel. Gelijkaardig staat A_{stud} voor de gemiddelde dwarsdoorsnede van de eerste en laatste stijl. Ten slotte staat $F_{M,Ed}$ voor het koppel van verticale krachten als gevolg van het buigmoment dat veroorzaakt wordt door de horizontale kracht op de wand. Dit koppel van krachten kan bepaald worden met vergelijking 4.8.

$$F_{M,Ed} = \frac{F_{V,Ed} \cdot h + q \cdot \frac{l^2}{2}}{l} \quad (4.8)$$

In vergelijking 4.8 wordt er naast het buigmoment afkomstig van de horizontale kracht ($F_{V,Ed}$) ook rekening gehouden met de verdeelde belasting q afkomstig van het HEA-profiel. Daarnaast staat h en l voor de hoogte en lengte van het wandelement.

De derde component voor de uitwijking is de horizontale uitwijking afkomstig van het de verlenging in het wandverankeringsysteem zoals weergegeven in figuur 4.2c. Voor het bepalen van deze horizontale uitwijking wordt een stijve ondersteuning aangenomen aan de drukkant van het kader. Vergelijking 4.9 geeft weer hoe de horizontale uitwijking bepaald kan worden.

$$u_M = \frac{h}{l_{couple}} \cdot u_{z,A} \quad (4.9)$$

In vergelijking 4.9 staat h voor de hoogte van het kader. l_{couple} is een reductie van de hefboomsarm bepaald volgen vergelijking 4.3. Daarnaast kan de verticale verlenging van het ankersysteem $u_{z,A}$ bepaald worden met vergelijking 4.10.

$$u_{z,A} = \frac{F_{t,Ed}}{K_{SLS,A}} \quad (4.10)$$

De verticale verlenging van het ankersysteem $u_{z,A}$ kan bepaald worden door de verhouding van de design reactiekracht in trek $F_{t,Ed}$ zoals weergegeven in figuur 4.1 en de stijfheid van het ankersysteem tegen kantelen $K_{SLS,A}$.

Voor het bepalen van de stijfheid van het verankeringsysteem moeten er twee methodes gebruikt worden. De eerste methode die besproken wordt is de methode voor het bepalen van de stijfheid bij een verankering met een *tie-down* verbinding. Voor deze methode is er gebruik gemaakt van een numeriek model voor het bepalen van de verankeringsverbinding van de *tie-down* besproken in [59]. Deze methode wordt besproken in hoofdstuk 2.6.3. De tweede methode die wordt toegepast is de bepaling van de stijfheid van de verankering zonder de aanwezigheid van een *tie-down* verbinding. Deze werd bepaald aan de hand van bijkomende doordruktesten op één bout zoals weergegeven in Bijlage B.

De vierde component voor het bepalen van de uitwijking is de uitwijking die plaats vindt zonder vervorming van het wandelement. Deze component wordt weergegeven in figuur 4.2d. De uitwijking ten gevolgen van de slip van de verbindingsmiddel kan bepaald worden door vergelijking 4.11. Daarnaast wordt er bijkomend een waarde opgeteld om rekening te houden met de speling tussen het gat en de bout. Het boorgat heeft een diameter van 7 mm en de bout heeft een diameter van 6 mm. Om dit in rekening te brengen wordt er 0,5 mm opgeteld bij het resultaat van vergelijking 4.11.

$$u_V = \frac{F_{v,Ed}}{K_{SLS,v} \cdot n_v} \quad (4.11)$$

De vijfde component van de uitwijking is de uitwijking ten gevolgen van de vervormen van de onderregel loodrecht op de vezelrichting. Dit wordt weergegeven in figuur 4.2e. De vervorming wordt veroorzaakt door compressie van de onderregel ten gevolgen van het kantelen van het kader. Deze term wordt bepaald met vergelijking 4.12.

$$u_C = w_{SLS,z} \cdot \frac{h}{l} \quad (4.12)$$

In vergelijking 4.12 staan l en h voor de hoogte en de lengte van het wandelement. Daarnaast geeft de term $w_{SLS,z}$ de vervorming loodrecht op de vezelrichting weer ten gevolgen van compressie. De vervorming loodrecht op de vezelrichting kan bepaald worden door vergelijking 4.13.

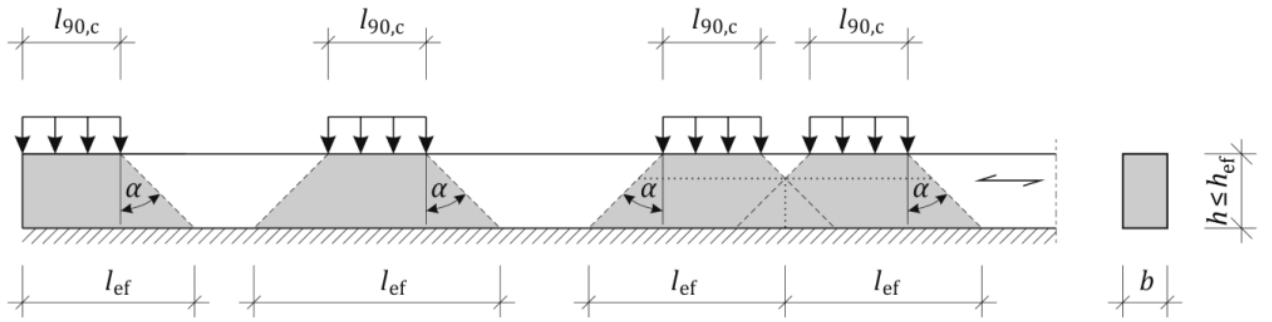
$$w_{SLS,z} = \frac{h_{ef} \cdot F_{c,90,SLS}}{2 \cdot E_{90,mean}} \left(\frac{1}{A} + \frac{1}{A_{ef}} \right) \quad (4.13)$$

In vergelijking 4.13 staan $b_{c,90}$ en $l_{c,90}$ voor de breedte en de lengte van de belaste zone. Deze termen komen overeen met de lengte en de breedte van de doorsnede van de stijl. Daarnaast staat h_{ef} voor de effectieve hoogte van de onderregel. De effectieve hoogte is gelijk aan de hoogte van de regel maar wordt beperkt tot een hoogte van maximaal 280 mm bij LVL hout belast loodrecht op de vezelrichting. Ten slotte staat $E_{90,mean}$ voor de gemiddelde elasticiteitsmodulus loodrecht op de vezelrichting van het materiaal. De oppervlakte A en effectieve oppervlakte A_{ef} kunnen bepaald worden met vergelijking 4.15 en vergelijking 4.14.

$$A_{\text{ef}} = b_{\text{ef}} \cdot l_{\text{ef}} \quad (4.14)$$

$$A = b_{\text{c},90} \cdot l_{\text{c},90} \quad (4.15)$$

In vergelijking 4.15 staan $b_{\text{c},90}$ en $l_{\text{c},90}$ voor de breedte en de lengte van de belaste zone. Deze termen komen overeen met de lengte en de breedte van de doorsnede van de stijl. In vergelijking 4.14 staat l_{ef} effectieve spreidingslengte parallel aan de vezelrichten en b_{ef} de effectieve spreidingsbreedte loodrecht op de vezelrichtign. De effectieve spreidingslengte l_{ef} kan bepaald worden volgen figuur 4.3. Waarbij de spreidingsgradient α voor het materiaal LVL-P gelijk is aan 45° zoals weergegeven in [6]. De effectieve spreidingsbreedte van het hout is in deze masterproef gelijk aan de breedte van het proefstuk omdat de breedte van de regel gelijk is aan de breedte van de stijl.



Figuur 4.3: Effectieve spreiding lengte van een continu ondersteund element met een hoogte kleiner dan 280 mm [6]

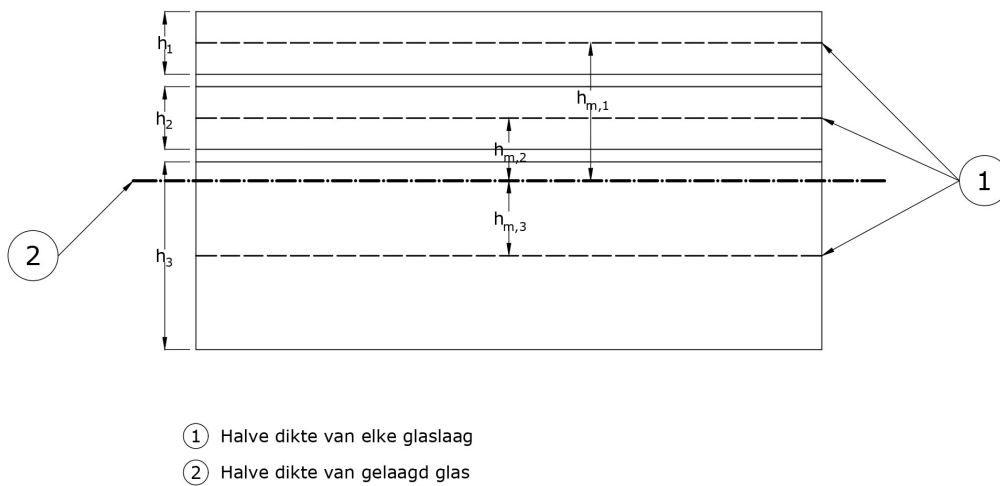
De laatste component voor het bepalen van de uitwijking van het wandelement wordt weergegeven in figuur 4.2f. Deze component houdt rekening met de schuifvervorming van de beplating en kan bepaald worden met vergelijking 4.16.

$$u_G = \frac{F_{V,\text{Ed}} \cdot h}{l \cdot (G_{\text{p},1} \cdot t_{\text{p},1} + G_{\text{p},2} \cdot t_{\text{p},2})} \quad (4.16)$$

Omdat het proefstuk enkel één zijde heeft waar beplating is aangebracht zal er enkel gebruik worden gemaakt van de termen met index 1. Daarnaast is de term $F_{V,\text{Ed}}$ in vergelijking 4.16 de horizontale kracht die aangrijpt op de linkerbovenhoek van het kader. Daarnaast staan l en h voor de lengte en hoogte van het kader. In vergelijking 4.16 staat $G_{\text{p},1}$ voor de schuifmodulus van de beplating. Voor de waarde van de schuifmodulus van glas wordt er gebruik gemaakt van 28 GPa volgens [61]. De dikte van de beplating wordt in rekening gebracht door $t_{\text{p},i}$. Bij de proefstukken is er gebruik gemaakt van gelaagd glas waardoor er voor het bepalen van de effectieve dikte van de beplating met behulp van vergelijking 4.17 [62].

$$h_{\text{ef},\text{w}} = \sqrt{\sum_i h_i^3 + 12 \cdot \omega \cdot \left(\sum h_i \cdot h_{\text{m},i}^2 \right)} \quad (4.17)$$

Waarbij in vergelijking 4.17, h_i staat voor de nominale dikte van een glaslaag. Daarnaast is ω de overdrachtcoëfficiënt voor de overdracht van de afschuifkrachten tussen de verschillende lagen. De waarde van deze coëfficiënt is altijd gelegen tussen nul en één. Wanneer de coëfficiënt gelijk is aan nul, betekent dit dat er geen overdracht is van de afschuifkrachten. Bij een overdrachtcoëfficiënt van één, zal er een volledige overdracht zijn van de afschuifkrachten. Bij de proefstukken was er gebruik gemaakt van een tussen laag van EVA. In [62] zijn er enkel waarden gegeven voor een tussenlaag van polyvinylbutyral. Daarnaast is vermeld dat bij gebrek aan waarden gegeven door de fabrikant er een waarde van nul moet aangenomen worden voor de overdrachtscoëfficiënt. De laatste term in deze vergelijking $h_{m,i}$ is de afstand tussen het midden van de glaslaag en het midden van de hele ruit zoals weergegeven in figuur 4.4. Voor deze afstand $h_{m,1}$ wordt er ook rekening gehouden met de tussenlagen.



Figuur 4.4: Bepaling van de dikte gelaagd glas

4.2.3 Methode bepaling equivalente stijfheid combinatie lijm- en schroefverbinding volgens dr. Hochenhauser

Voor het bepalen van de equivalente stijfheid van de combinatie van de lijm- en schroefverbinding wordt er in deze thesis gebruikt gemaakt van de methode besproken door Hochenhauser [58]. In deze methode wordt er een equivalente stijfheid bepaald door het in serie optellen van de stijfheid van de lijmverbinding en de stijfheid van de schroefverbinding. In [58] wordt besproken dat deze methode gebruikt maakt van de bepaling van de schroefverbinding volgens EN 1995-1-1:2005 [63]. In deze thesis wordt gewerkt met de prEN 1995-1-1:2025 [6], daarom zijn de formules voor het bepalen van de stijfheid schroefverbinding aangepast. De eerste stap in het bepalen van de gemiddelde dichtheid van het multiplex van het adapterkader en het LVL kader zoals weergegeven in vergelijking 4.18.

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{\text{multiplex}} \cdot \rho_{\text{LVL}}} \quad (4.18)$$

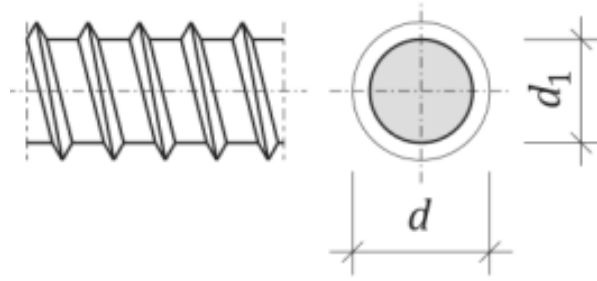
$\rho_{\text{multiplex}}$ staat voor de dichtheid van het eerste materiaal en ρ_{LVL} voor de dichtheid van het tweede materiaal in deze verbinding. Vervolgens wordt met de gemiddelde dichtheid van de materialen de stijfheid van de schroefverbinding bepaald door gebruik te maken van vergelijking 4.19

$$K_{\text{sls,v}} = 60 \cdot d_1^{1,7} \cdot \left(\frac{\rho_m}{420} \right)^{1,1} \quad (4.19)$$

met

$$d_1 = d \cdot \begin{cases} 0,60 & \text{voor } 3,5 \leq d \leq 5,0 \\ 0,65 & \text{voor } 5,0 < d \leq 10 \\ 0,60 & \text{voor } 10 < d \leq 14 \\ 0,75 & \text{voor } 14 < d \leq 22 \end{cases} \quad (4.20)$$

In vergelijking 4.19 staat ρ_m voor de gemiddelde verbindingsdichtheid bepaald met vergelijking 4.18. Daarnaast staat d_1 voor binnendiameter van de schroeven zoals weergegeven in figuur 4.5. De binnendiameter van de schroef kan bepaald worden uit vergelijking 4.20, waarbij in deze vergelijking d staat voor de diameter van het verbindingmiddel.



Figuur 4.5: Geometrie houtschroeven [6]

Vervolgens wordt vergelijking 4.21 toegepast om de lokale uitwijking van de schroeven te bepalen. In deze formule staat H voor de horizontale kracht op het kader en $K_{\text{sls,v}}$ voor de stijfheidsconstanten bepaald door vergelijking 4.19.

$$u_{\text{lok,schroeven}} = \frac{H}{K_{\text{sls,v}}} \quad (4.21)$$

Na het bepalen van de lokale uitwijking van de schroeven zal ook de uitwijking van de lijm bepaald worden voor een oppervlak dat overeen komt met één verbindingmiddel. Vergelijking 4.22 geeft weer hoe de oppervlakte kan bepaald kan worden.

$$A = b \cdot e \quad (4.22)$$

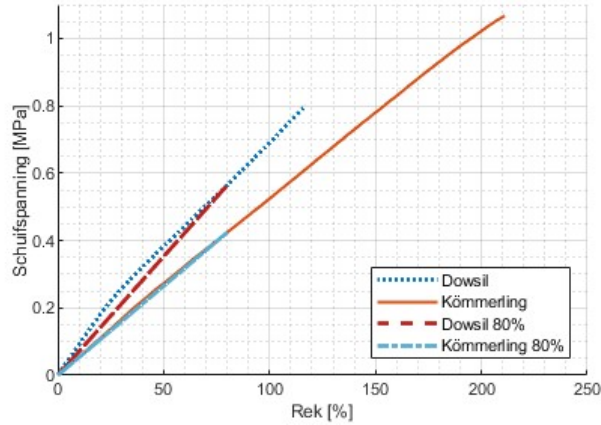
In vergelijking 4.22 staat b voor de breedte van de lijm. De afmetingen van de lijmverbinding worden weergegeven in 3.2. Daarnaast staat e voor de tussenafstand van de verbindingsmiddelen zoals weergegeven in figuur 3.1. Vervolgens wordt met deze oppervlakte A en de horizontale kracht H op het kader, de schuifspanning bepaald zoals weergegeven in vergelijking 4.23

$$\tau = \frac{H}{A} \quad (4.23)$$

Vervolgens wordt de lijmvervorming γ_{lijm} bepaald volgens vergelijking 4.24. In deze vergelijking staat τ voor de schuifspanning in de lijm die bepaald wordt met vergelijking 4.23.

$$\gamma_{\text{lijm}} = \frac{\tau}{G} \quad (4.24)$$

De schuifsterkte van de lijmen wordt bepaald uit de resultaten van de proeven besproken in [13]. De resultaten van deze proeven worden weergegeven in figuur 4.6. De resultaten van deze proeven geven weer dat bij de DowsilTM 993 lijm er een niet lineair verband optreedt. Bij het bereiken van een bepaalde spanning zal de sterkte van de lijm afnemen. In tegenstelling tot de DowsilTM 993 lijm is deze afname van de sterkte niet zichtbaar bij de resultaten van de Kömmerling Ködiglaze S lijm. Figuur 4.6 geeft weer dat het afschuifspanning rek verloop voor de Kömmerling Ködiglaze S lijm een lineair verband weergeeft. Om rekening te houden met de niet-lineariteit van de lijm wordt in [58] de afschuifmodulus bij 80% besproken. Deze afschuifmodulus bij 80% rek wordt bepaald door een lineair verband tussen de oorsprong en de afschuifspanning bij 80% rek. Dit verband wordt ook weergegeven in figuur 4.6. Doordat Kömmerling Ködiglaze S zo goed als benaderd kan worden met een lineair verband is de afwijking tussen de afschuifspanning en de afschuifmodulus bij 80% zeer beperkt.



Figuur 4.6: Schuifspanning en rek diagram met aanduiding $G_{80\%}$

De volgende stap in deze berekening is het bepalen van de lokale uitwijking van de lijm $u_{\text{lok,lijm}}$. Deze kan bepaald worden door de lijmvervorming γ_{lijm} te vermenigvuldigen met de dikte t van de lijmlaag zoals weergegeven in vergelijking 4.26.

$$u_{\text{lok,lijm}} = \gamma_{\text{lijm}} \cdot t \quad (4.25)$$

De volgende stap in het bepalen van de equivalente stijfheid is het bepalen van de lokale uitwijking door de som te maken van de lokale uitwijking van de schroeven bepaald met vergelijking 4.21 en de lokale uitwijking van de lijm bepaald met vergelijking 4.25. Dit wordt weergegeven in vergelijking 4.26.

$$u_{\text{lok}} = u_{\text{lok,schroeven}} + u_{\text{lok,lijm}} \quad (4.26)$$

Daarna wordt de equivalente vervorming bepaald door de verhouding van de lokale uitwijking u_{lok} en de dikte t van de lijmlaag zoals weergegeven in vergelijking 4.27.

$$\gamma_{\text{eq}} = \frac{u_{\text{lok}}}{t} \quad (4.27)$$

Vervolgens wordt met de verhouding van de schuifspanning τ , bepaald met vergelijking 4.23 en de equivalente vervorming γ_{eq} de equivalente schuifmodulus G_{eq} bepaald. Dit wordt weergegeven in vergelijking 4.28.

$$G_{\text{eq}} = \frac{\tau}{\gamma_{\text{eq}}} \quad (4.28)$$

Tenslotte wordt de equivalente veersterkte k bepaald door het vermenigvuldigen van de schuifmodulus, bepaald met vergelijking 4.28, met de verhouding van de breedte b en de dikte t van de lijm zoals weergegeven in vergelijking 4.29.

$$k = G_{\text{eq}} \cdot \frac{b}{t} \quad (4.29)$$

4.3 Voorbeeld berekening

In deze paragraaf wordt een voorbeeld berekening weergegeven voor voor het bepalen van de uitwijking van het proefstuk bij een kracht van 1000 N. Hiervoor worden volgende materiaaleigenschappen en geometrieën gebruikt:

- Kader wandelement LVL 48 P: Doorsnede = 60/100 mm, $\rho_{\text{LVL}} = 510 \text{ kg/m}^3$, $E_{\text{m},0,\text{mean}} = 13800 \text{ N/mm}^2$, $E_{90,\text{mean}} = 130 \text{ N/mm}^2$;
- Adapterkader berken multiplex: Dikte = 18 mm, $\rho_{\text{multiplex}} = 680 \text{ kg/m}^3$;
- Houtschroeven adapterkader: Afmetingen = 6.5 mm x 80 mm, tussenafstand = 100 mm;
- Lijm DowsilTM 993: Voegdikte = 6 mm, voegbreedte = 18 mm, $G_{80\%} = 0,705 \text{ N/mm}^2$;
- Wandelement: Hoogte = 1264 mm, lengte = 1264 mm;
- HEA-profiel bovenzijde: Gewicht = 20,3 kg/m;
- Hydraulische cilinder: Gewicht = 20 kg;
- Bouten onderregel: Diameter = 6 mm, diameter boorgat = 7 mm, aantal = 10;
- Glas: Dikte = 4 mm, aantal = 2, $G_{\text{p},1} = 28 \text{ GPa}$;
- *Tie-down* HTT5 Simpson Strong-Tie: $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$, breedte $B = 64 \text{ mm}$, breedte voet $b = 56 \text{ mm}$, hoogte $H = 403 \text{ mm}$, dikte $t = 2,8 \text{ mm}$, $l_2 = 170 \text{ mm}$ (zie figuur 2.23);
- Schroeven: aantal = 20, diameter 4 mm.

$$F_{0,\text{Ed}} = 200 \text{ N} + 203 \text{ N/m} \cdot \frac{2.0 \text{ m}}{2} = 403 \text{ N}$$

$$F_{\text{n},\text{Ed}} = 203 \text{ N/m} \cdot \frac{2.0 \text{ m}}{2} = 203 \text{ N}$$

$$l_{\text{coupe}} = l - l_{\text{stijl}} = 1264 \text{ mm} - 60 \text{ mm} = 1204 \text{ mm}$$

$$F_{\text{t,Ed}} = \frac{h}{l_{\text{coupe}}} \cdot F_{\text{V,Ed}} - F_{0,\text{Ed}} = \frac{1264 \text{ mm}}{1204 \text{ mm}} \cdot 1000 \text{ N} - 403 \text{ N} = 647 \text{ N}$$

$$F_{\text{c,Ed}} = \frac{h}{l_{\text{coupe}}} \cdot F_{\text{V,Ed}} + F_{\text{n,Ed}} = \frac{1264 \text{ mm}}{1204 \text{ mm}} \cdot 1000 \text{ N} + 203 \text{ N} = 1253 \text{ N}$$

Bepaling stijfheid

$$\rho_{\text{mean}} = \sqrt{\rho_{\text{LVL}} \cdot \rho_{\text{multiplex}}} = \sqrt{510 \text{ kg/m}^3 \cdot 680 \text{ kg/m}^3} = 588,9 \text{ kg/m}^3$$

$$d_1 = 0,65 \cdot d = 0,65 \cdot 6,5 \text{ mm} = 4,225 \text{ mm}$$

$$K_{\text{sls,v}} = 60 \cdot d_1^{1,7} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{mean}}}{420} \right)^{1,1} = 60 \cdot (4,225 \text{ mm})^{1,7} \cdot \left(\frac{588,9 \text{ kg/m}^3}{420} \right)^{1,1} = 1008,15 \text{ N/mm}$$

$$u_{\text{lok,schroeven}} = \frac{F_{\text{v,Ed}}}{K_{\text{sls,v}}} = \frac{1000 \text{ N}}{1008,15 \text{ N/mm}} = 0,99 \text{ mm}$$

$$A = b \cdot e = 18 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm} = 1800 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{F_{\text{v,Ed}}}{A} = \frac{1000 \text{ N}}{1800 \text{ mm}^2} = 0,56 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_{\text{lijm}} = \frac{\tau}{G_{80\%}} = \frac{0,56 \text{ N/mm}^2}{0,705 \text{ N/mm}^2} = 0,79$$

$$u_{\text{lok,lijm}} = \gamma_{\text{lijm}} \cdot t = 0,79 \cdot 6 \text{ mm} = 4,73 \text{ mm}$$

$$u_{\text{lok}} = u_{\text{lok,schroeven}} + u_{\text{lok,lijm}} = 0,99 \text{ mm} + 4,73 \text{ mm} = 5,72 \text{ mm}$$

$$\gamma_{\text{eq}} = \frac{u_{\text{lok}}}{t} = \frac{5,72 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 0,95$$

$$G_{\text{eq}} = \frac{\tau}{\gamma_{\text{eq}}} = \frac{0,56 \text{ N/mm}^2}{0,95} = 0,58 \text{ N/mm}^2$$

$$k = G_{\text{eq}} \cdot \frac{b}{t} = 0,58 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{18 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 1,74 \text{ N/mm}^2$$

$$u = \frac{2 \cdot H}{k \cdot \ell} \left(\frac{1}{1 + \frac{k}{k} \cdot \frac{h}{3\ell}} + \frac{\frac{h}{\ell}}{1 + \frac{k}{k} \cdot \frac{\ell}{3h}} \right)$$

$$= \frac{2 \cdot 1000 \text{ N}}{1,74 \text{ N/mm}^2 \cdot 1264 \text{ mm}} \left(\frac{1}{1 + \frac{1264 \text{ mm}}{3 \cdot 1264 \text{ mm}}} + \frac{\frac{1264 \text{ mm}}{1264 \text{ mm}}}{1 + \frac{1264 \text{ mm}}{3 \cdot 1264 \text{ mm}}} \right) = 1,36 \text{ mm}$$

Bepaling stijfheid verankeringsysteem

$$l_1 = 170 \text{ mm} + \frac{403 \text{ mm} - 170 \text{ mm}}{2} = 286,5 \text{ mm}$$

$$l_{\text{hout}} = h - l_1 = 403 \text{ mm} - 286,5 \text{ mm} = 116,5 \text{ mm}$$

$$A_1 = 64 \text{ mm} \cdot 2,8 \text{ mm} = 179,2 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = (64 \text{ mm} + 56 \text{ mm}) \cdot 2,8 \text{ mm} = 336 \text{ mm}^2$$

$$k_{\text{staal}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{E_{\text{staal}} \cdot A_1}{l_1}} + \frac{1}{\frac{E_{\text{staal}} \cdot A_2}{l_2}}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 179 \text{ mm}^2}{286,5 \text{ mm}}} + \frac{1}{\frac{210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 336 \text{ mm}^2}{170 \text{ mm}}}} = 99775 \text{ N/mm}$$

$$d_1 = 0,60 \cdot d = 0,60 \cdot 4 = 2,4 \text{ mm}$$

$$K_{\text{sls,v}} = 2 \cdot 60 \cdot d_1^{1,7} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{mean}}}{420} \right)^{1,1} = 2 \cdot 60 \cdot 2,4^{1,7} \cdot \left(\frac{510 \text{ kg/m}^3}{420} \right)^{1,1} = 658 \text{ N/mm}$$

$$k_{\text{schroeven}} = n \cdot K_{\text{sls,v}} = 20 \cdot 658 \text{ N/mm} = 13162 \text{ N/mm}$$

$$k_{\text{hout}} = \frac{E_{\text{hout}} \cdot A_{\text{hout}}}{l_{\text{hout}}} = \frac{13800 \text{ N/mm}^2 \cdot 60 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm}}{116,5 \text{ mm}} = 710730 \text{ N/mm}$$

$$k_{\text{equivalent}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{staal}}} + \frac{1}{k_{\text{schroeven}}} + \frac{1}{k_{\text{hout}}}} = \frac{1}{\frac{1}{99775 \text{ N/mm}} + \frac{1}{13162 \text{ N/mm}} + \frac{1}{710730 \text{ N/mm}}} = 11441 \text{ N/mm}$$

Componenten GGT bepaling Eurocode 5

$$l_{\text{per}} = 2 \cdot n_{\text{p,h}} \cdot l + 2 \cdot n_{\text{p,l}} \cdot h = 2 \cdot 1 \cdot 1264 \text{ mm} + 2 \cdot 1 \cdot 1264 \text{ mm} = 5056 \text{ mm}$$

$$u_{\text{K},0} = \frac{\frac{F_{\text{v,Ed}}}{l^2}}{\frac{K_{\text{SLS},1}}{a_{1,1} \cdot l_{\text{per},1}} + \frac{K_{\text{SLS},2}}{a_{1,2} \cdot l_{\text{per},2}}} = \frac{\frac{1000 \text{ N}}{(1264 \text{ mm})^2}}{\frac{1,74 \text{ N/mm}^2}{5056 \text{ mm}}} = 1,82 \text{ mm}$$

$$F_{\text{M,Ed}} = \frac{F_{\text{V,Ed}} \cdot h + q \cdot \frac{l^2}{2}}{l} = \frac{1000 \text{ N} \cdot 1264 \text{ mm} + 106 \text{ N/m} \cdot \frac{(1264 \text{ mm})^2}{2}}{1264 \text{ mm}} = 1067,4 \text{ N}$$

$$u_{\text{N}} = \frac{2}{3} \frac{F_{\text{v,Ed}}}{E_{\text{m},0,\text{mean}}} \left(\frac{l}{A_{\text{rail}}} + \frac{h^3}{A_{\text{stud}} \cdot l^2} \right) + \frac{F_{\text{M,Ed}}}{E_{\text{m},0,\text{mean}}} \frac{h^2}{A_{\text{stud}} \cdot l}$$

$$= \frac{2}{3} \frac{1000 \text{ N}}{13800 \text{ N/mm}^2} \left(\frac{1264 \text{ mm}}{60 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm}} + \frac{(1264 \text{ mm})^3}{60 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm} \cdot (1264 \text{ mm})^2} \right)$$

$$+ \frac{1067,4 \text{ N}}{13800 \text{ N/mm}^2} \frac{(1264 \text{ mm})^2}{60 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm} \cdot 1264 \text{ mm}} = 0,04 \text{ mm}$$

$$u_{\text{z,A}} = \frac{F_{\text{t,Ed}}}{K_{\text{SLS,A}}} = \frac{647 \text{ N}}{11441 \text{ N/mm}} = 0,06 \text{ mm}$$

$$u_{\text{M}} = \frac{h}{l_{\text{couple}}} \cdot u_{\text{z,A}} = \frac{1264 \text{ mm}}{1204 \text{ mm}} \cdot 0,06 \text{ mm} = 0,06 \text{ mm}$$

$$K_{\text{SLS,V,bout}} = 2 \cdot \rho_{\text{mean}}^{1,5} \cdot \frac{d_{\text{bout}}}{23} = (510 \text{ kg/m}^3)^{1,5} \cdot \frac{6 \text{ mm}}{23} = 6009 \text{ N/mm}$$

$$u_{\text{V}} = \frac{F_{\text{V,Ed}}}{K_{\text{SLS,V,bout}} \cdot n_{\text{v}}} + 0,5 \text{ mm} = \frac{1000 \text{ N}}{6009 \text{ N/mm} \cdot 10} = 0,52 \text{ mm}$$

$$w_{\text{SLS,z}} = \frac{h_{\text{ef}} \cdot F_{\text{c},90,\text{SLS}}}{2 \cdot E_{90,\text{mean}}} \left(\frac{1}{A} + \frac{1}{A_{\text{ef}}} \right)$$

$$= \frac{60 \text{ mm} \cdot 1253 \text{ N}}{2 \cdot 130 \text{ N/mm}^2} \left(\frac{1}{60 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm}} + \frac{1}{100 \text{ mm} \cdot 120 \text{ mm}} \right) = 0,07 \text{ mm}$$

$$u_C = W_{\text{SLS},z} \cdot \frac{h}{l} = 0,07 \text{ mm} \cdot \frac{1264 \text{ mm}}{1264 \text{ mm}} = 0,07 \text{ mm}$$

$$h_{\text{ef},w} = \sqrt{\sum_i h_i^3 + 12 \cdot \omega \cdot \left(\sum h_i \cdot h_{m,i}^2 \right)}$$

$$= \sqrt{(4 \text{ mm})^3 + (4 \text{ mm})^3 + 12 \cdot 0 \cdot (4 \text{ mm} \cdot (2 \text{ mm})^2 + 4 \text{ mm} \cdot (2 \text{ mm})^2)} = 5,04 \text{ mm}$$

$$u_{\text{inst},G} = \frac{F_{V,\text{Ed}} \cdot h}{l \cdot (G_{p,1} \cdot t_{p,1})} = \frac{1000 \text{ N} \cdot 1264 \text{ mm}}{1264 \text{ mm} \cdot (28 \text{ GPa} \cdot 5,04 \text{ mm})} = 0,01 \text{ mm}$$

$$u_{\text{model } 1} = u_{K,0} + u_N + u_M + u_V + u_C + u_G$$

$$= 1,82 \text{ mm} + 0,04 \text{ mm} + 0,06 \text{ mm} + 0,52 \text{ mm} + 0,07 \text{ mm} + 0,01 \text{ mm} = 2,52 \text{ mm}$$

$$u_{\text{model } 2} = u + u_N + u_M + u_V + u_C + u_G$$

$$= 1,36 \text{ mm} + 0,04 \text{ mm} + 0,06 \text{ mm} + 0,52 \text{ mm} + 0,07 \text{ mm} + 0,01 \text{ mm} = 2,06 \text{ mm}$$

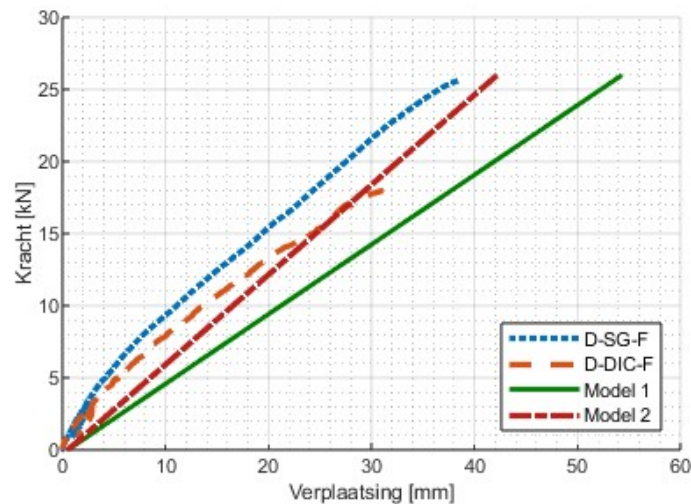
4.4 Resultaten en discussie

In deze paragraaf worden de resultaten van de analytische methode vergeleken met de resultaten van de schrankweerstandproeven besproken in hoofdstuk 3. Hierbij wordt er een onderscheid gemaakt voor de proefstukken met een volledige verankering en gedeeltelijke verankering. De proefstukken met volledige verankeringen zijn bijkomend verankerd met een *tie-down* verbinding. Daarnaast wordt er binnen deze onderverdeling ook een onderscheid gemaakt tussen de gebruikte lijm.

4.4.1 Proefstukken met volledige verankering

Dowsil™ 993

In de eerste plaats worden de proefstukken met een volledige verankering met een Dowsil™ 993 lijm besproken. Figuur 4.7 geeft de resultaten van de schrankweerstandproeven. Daarnaast wordt op deze figuur de resultaten van het analytisch model weergegeven. In figuur 4.7 staat model 1 voor het model waarbij de term $u_{K,0}$ wordt bepaald met vergelijking 4.4. Model 2 staat voor het analytisch model waarbij $u_{K,0}$ wordt vervangen door de uitwijking bepaald volgens vergelijking 4.6. Figuur 4.7 geeft weer dat model 2 een betere benadering is van de experimentele waarden dan model 1.

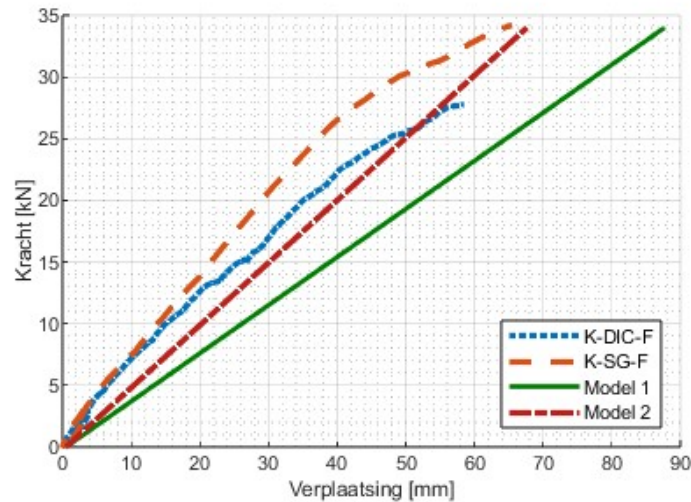


Figuur 4.7: Vergelijking analytische modellen met experimentele resultaten Dowsil™ 993 met *tie-down* verankering

Daarnaast kan worden opgemerkt dat de analytische modellen, lineaire modellen zijn en hierbij geen rekening wordt gehouden met hogere stijfheid in het interval 1 kN tot 5 kN. Binnen dit interval bedraagt de gemiddelde afwijking tussen model 2 en resultaten van de schrankweerstandproeven 155%. Voor het proefstuk D-DIC-F is de gemiddelde afwijking bij het interval 7 kN tot 17 kN gelijk aan 48% voor model 1 en 15% voor model 2. Voor het tweede proefstuk D-SG-F is de gemiddelde afwijking voor het interval 15 kN tot 25 kN gelijk aan 52% bij model 1 en 18% bij model 2.

Kömmerring Ködiglaze S

In de tweede plaats worden de volledig verankerde proefstukken besproken waarbij de glasplaat is verlijmd met Kömmerring Ködiglaze S aan het adapterkader. Figuur 4.8 toont de vergelijking van de totale uitwijking van het proefstuk met de totale uitwijking van de verschillende analytische modellen. Uit figuur 4.8 kan afgeleid worden dat model 2 een betere benadering is van de resultaten bekomen uit de experimenten dan model 1. Daarnaast blijkt, net zoals bij Dowsil™ 993, dat het analytisch model geen rekening houdt met de initiële stijfheid van het proefstuk.



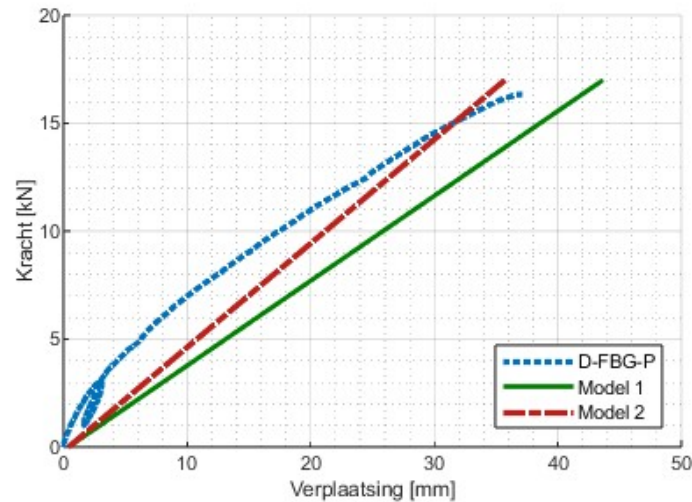
Figuur 4.8: Vergelijking analytische modellen met experimentele resultaten Kömmerling Ködiglaze S met *tie-down* verankering

In het interval 1 tot 5 kN is er een afwijking van 148% tussen de resultaten van proefstuk K-DIC-F en Model 1. Binnen dit zelfde interval is de afwijking tussen K-DIC-F en model 2 gelijk aan 96%. Wanneer dit vergeleken wordt met K-SG-F is de afwijking 186% voor model 1 en 126% voor model 2. Voor proefstuk K-DIC-F binnen het interval 17 tot 27 kN is de afwijking gelijk aan 41% voor model 1 en 9% voor model 2. Daarnaast wordt voor het interval 24 kN tot 34 kN de resultaten van K-SG-F vergeleken met het analytisch model. Hieruit volgt een afwijking van 59% voor model 1 en 22% voor model 2.

4.4.2 Proefstukken met gedeeltelijke verankering

DowsilTM 993

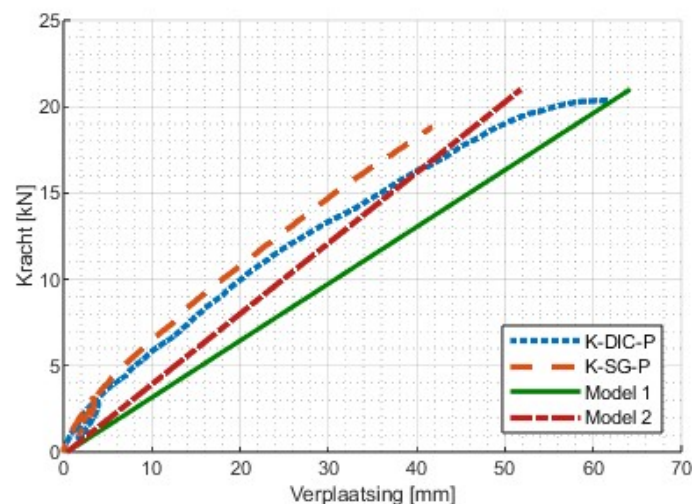
In de derde plaats wordt het gedeeltelijk verankerde proefstuk met DowsilTM 993 lijm besproken. Figuur 4.9 illustreert de totale uitwijking van de verschillende analytische modellen en het proefstuk D-FBG-P. Vergelijkbaar met eerdere proefstukken geeft model 2 een betere benadering van de werkelijkheid dan model 1 maar wordt de initiële stijfheid van het kader onderschat. Binnen het interval 1 tot 5 kN is het verschil tussen de experimentele resultaten en model 2 gelijk aan 168% waarbij dit bij model 1 gelijk is aan 223%. Wanneer deze resultaten vergeleken worden met hetzelfde verschil bij de volledig verankerde proefstukken kan opgemerkt worden dat deze uitwijking in dezelfde groot orde zit. Daarnaast wordt het verschil in uitwijking bekeken voor het interval 10 tot 16 kN. Hierbij is het verschil tussen de experimentele resultaten en de analytische modellen gelijk aan 31% voor model 1 en 8% voor model 2.



Figuur 4.9: Vergelijking analytische modellen met experimentele resultaten DowsilTM 993 met gedeeltelijke verankering

Kömmerling Ködiglaze S

In de vierde plaats worden de gedeeltelijk verankerde proefstukken met de Kömmerling Ködiglaze S lijm vergeleken met de resultaten van de analytisch modellen. Figuur 4.10 geeft de experimentele resultaten en de resultaten van de analytische modellen weer. Hierbij toont figuur 4.10 dat de resultaten van model 2 een betere benadering zijn van de werkelijkheid. Daarnaast kunnen de resultaten vergeleken worden tussen verschillende intervallen. Het eerste interval is 1 tot 5 kN. Hierbij is de afwijking tussen het proefstuk K-DIC-P en de analytische modellen gelijk aan 127% voor model 2 en 177% voor model 1. Daarnaast kan deze vergelijking ook gemaakt worden voor het proefstuk K-SG-P. Hierbij is de afwijking 159% voor model 2 en 216% voor model 1. Uit deze waarde kan afgeleid worden dat ook in dit geval de initiële stijfheid van het wandelement wordt onderschat.

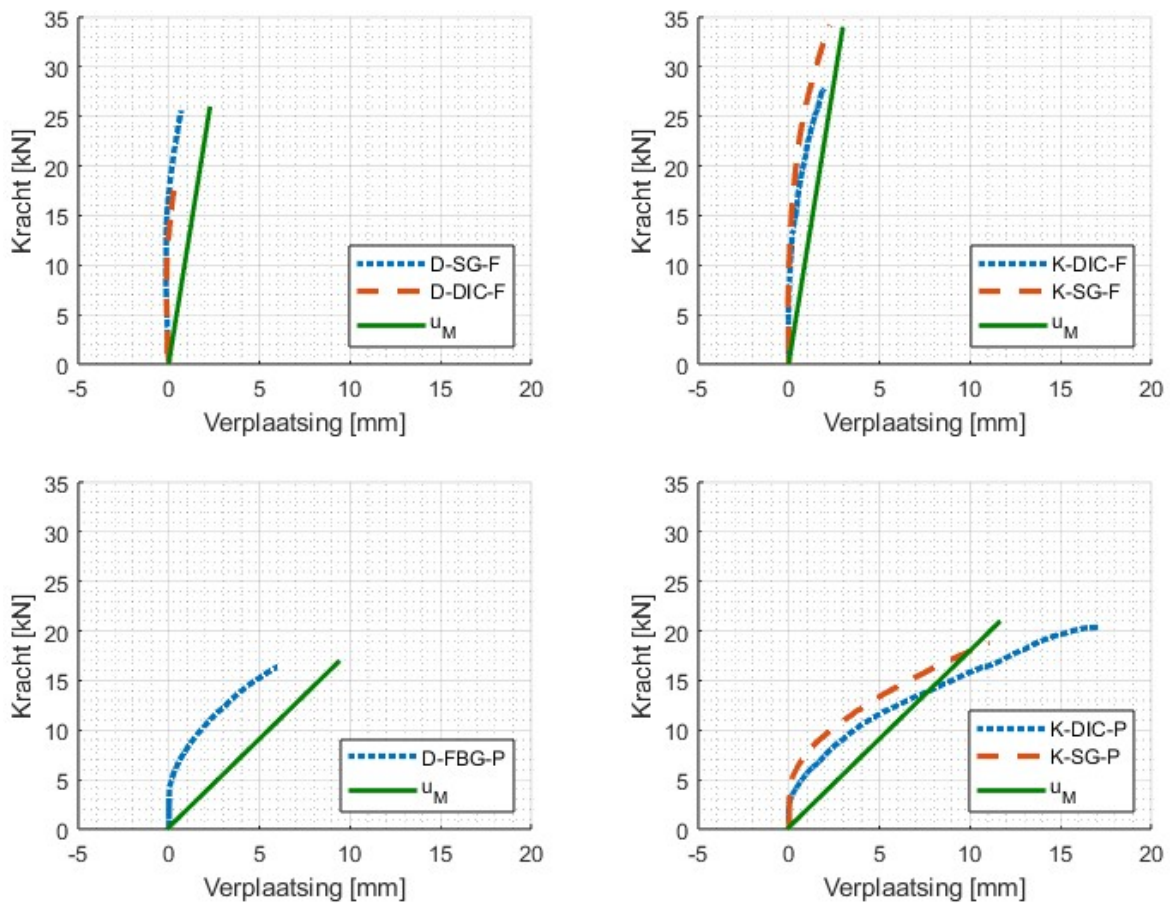


Figuur 4.10: Vergelijking analytische modellen met experimentele resultaten Kömmerling Ködiglaze S met gedeeltelijke verankering

Verder kan de afwijking tussen het analytisch model en de resultaten van de proefstuk K-DIC-P voor het interval 10 tot 20 kN. Hierbij is de afwijking tussen de experimentele waarde en model 2 gelijk aan 5%. Voor het zelfde interval in vergelijking met model 2 is deze afwijking gelijk aan 30%. Vervolgens wordt de afwijking ook bepaald voor de afwijking tussen de resultaten van proefstuk K-SG-P en de analytische modellen voor het interval 10 en 18 kN. Dit verschil bedraagt 24% voor model 2 en 53% voor model 1. Uit deze percentages kan afgeleid worden dat model 2 een betere benadering is voor de totale uitwijking van het element dan model 1.

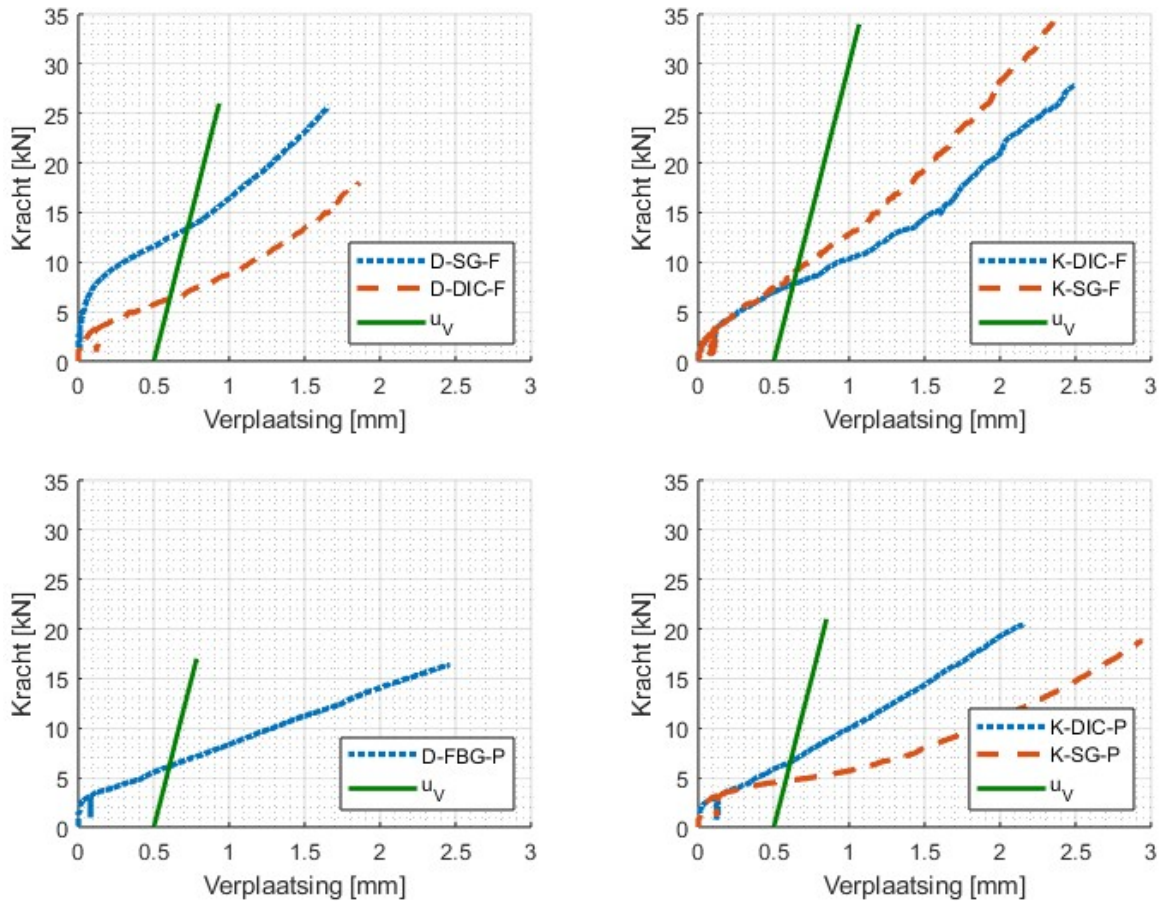
4.4.3 Vergelijking componenten

Naast de volledige uitwijking kunnen ook de afzonderlijke componenten van het analytisch model vergeleken worden met de resultaten van de experimenten. Figuur 4.11 toont de resultaten van de opwaartse verplaatsing van het kader (gemeten met sensor 3 weergegeven in figuur 3.6) en de waarde voor de verplaatsing door het kantelen van het kader u_M bepaald met het analytisch model.



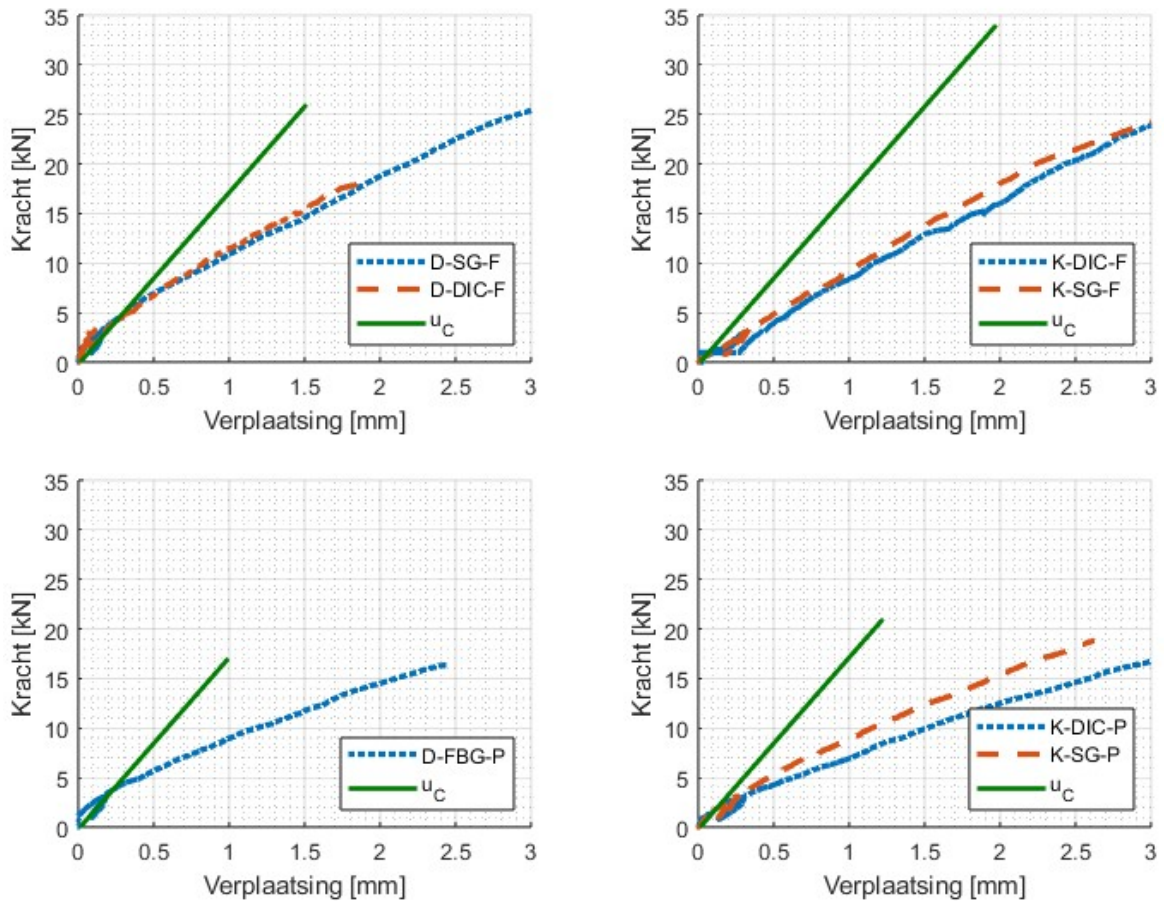
Figuur 4.11: Vergelijking verticale verplaatsing experimentele resultaten met u_M analytisch model

Uit figuur 4.11 kan worden afgeleid dat het analytisch model een benadering geeft van de werkelijke stijfheid van het verankeringssysteem. Daarentegen wordt in het analytisch model geen rekening gehouden met mogelijke slip die kan optreden bij het verankeringssysteem. Een andere beperking is dat het model een lineair verband weergeeft. In werkelijkheid zal de vervorming niet lineair optreden. Vervolgens toont figuur 4.12 de vergelijking tussen de horizontale verplaatsing van de experimenten (gemeten met sensor 4 weergegeven in figuur 3.6) en de horizontale verplaatsing u_V afkomstig van het analytisch model.



Figuur 4.12: Vergelijking horizontale verplaatsing experimentele resultaten met u_V analytisch model

Figuur 4.12 illustreert beperkingen van het analytisch model, zo wordt in het analytisch model een overschatting gemaakt van de stijfheid van de verbinding. Daarnaast wordt er een vaste waarde van 0,5 mm aangenomen voor de speling tussen het boorgat en de bout. Daarnaast houdt het analytisch model geen rekening met de niet-lineariteit van de sterkte van de boutverbinding zoals besproken in [64]. Ten slotte vergelijkt figuur 4.13 de meetwaarden van de compressie van de onderregel (sensor 5 weergegeven in figuur 3.5 en 3.7) met de term u_C uit het analytisch model.



Figuur 4.13: Vergelijking experimentele resultaten compressie onderregel met u_C analytisch model

Figuur 4.13 toont het analytisch model een overschatting maakt van de stijfheid van het hout. In werkelijkheid zal er een grotere compressie van de onderregel optreden. In opmerking bij de vergelijking van de componenten u_V en u_C is dat de invloed van deze componenten relatief beperkt is dus dat de fout die gemaakt wordt door het analytisch model eerder verwaarloosd mag worden ten opzichten van de totale uitwijking.

Ten slotte kan de stijfheid van de verschillende modellen vergeleken worden met de stijfheid van de verschillende proefstukken. Hierbij wordt de stijfheid bepaald van de proefstukken tussen 10% en 40% van de maximale kracht. Tabel 4.1 geeft de vergelijking tussen de stijfheden bepaald uit de experimentele resultaten en de stijfheden van de modellen weer.

Tabel 4.1: Vergelijking tussen experimentele stijfheden en analytische modellen

	Proefstuk [-]	Exp. [N/mm]	Model 1 [N/mm]	Model 2 [N/mm]
Volledige verankering	K-DIC-F	591.0	354.9 (-40%)	461.9 (-22%)
	K-SG-F	638.6	354.9 (-44%)	461.9 (-28%)
	D-DIC-F	737.5	483.0 (-35%)	623.5 (-15%)
	D-SG-F	800.4	483.0 (-40%)	623.5 (-22%)
Partiële verankering	K-DIC-P	451.1	329.3 (-27%)	408.6 (-9%)
	K-SG-P	520.8	329.3 (-37%)	408.6 (-22%)
	D-FBG-P	628.9	393.2 (-37%)	481.5 (-23%)

Tabel 4.1 Toont dat zoals ook eerder al opgemerkt is dat model 2 een betere benadering geeft van de stijfheden in vergelijking met model 1. Daarnaast wordt ook een onderschatting van de stijfheid weergegeven voor zowel model 1 als model 2.

4.5 Conclusie

Samenvattend kan worden gesteld dat model 2 een betere benadering is van de experimentele resultaten. Daarnaast kan geconcludeerd worden dat door het lineair verband van de modellen de grootste fout wordt gemaakt in het interval tussen 1 en 5 kN van de opgelegde horizontale kracht. Tenslotte kan geconcludeerd worden dat de verticale verplaatsing van het proefstuk relatief goed benaderd kan worden door het analytisch model. Voor de compressie van de onderregel en de horizontale verplaatsing wordt een ander verloop gevonden. Omdat deze componenten maar een beperkte invloed hebben (< 3 mm) kan deze afwijking verwaarloosd worden. In het volgende hoofdstuk zal onderzocht worden of de niet-lineaire eigenschappen wel in het numeriek model opgenomen kunnen worden.

Hoofdstuk 5

Numeriek model

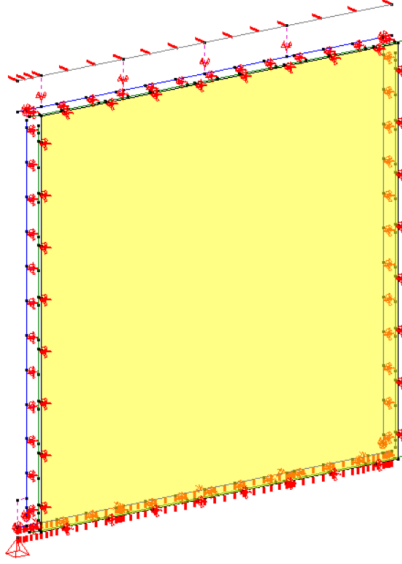
5.1 Inleiding

In dit deel wordt de numerieke methode toegelicht die gebruikt is om de horizontale uitwijking van het wandelement te bepalen. Voor deze methode wordt er gebruik gemaakt van de commerciële software BuildSoft Diamonds [4], waarbij de experimentele proefstukken gesimuleerd worden in verschillende simulaties.

5.2 Opbouw modules

5.2.1 Geometrie

Op basis van de materiaal eigenschappen in deel 3.2.1 zijn de proefstukken stapsgewijs opgebouwd in de simulaties. Eerst zijn het LVL- en adapter kader los van elkaar getekend. Daarna is er voor de glasplaat een plaat toegevoegd met een glijmodulus van 28 GPa volgens [61] en een effectieve dikte van 5.04 mm die bepaald is met vergelijking 4.17. Op de bovenste regel van het LVL kader is er vervolgens een HEA 120 profiel bevestigd met vier verbindingen die elk de verbinding van twee bouten simuleren. Op de onderste regel van het LVL kader wordt een lijnondersteuning geplaatst die over de volledige lengte enkel druk kan opnemen. Op deze regel zijn er ook vijf ondersteuning geplaatst die zorgen voor de trek opname. Elke ondersteuning simuleert een verbinding van twee bouten. Tussen het LVL- en adapterkader zijn er in totaal 50 verbindingen geplaatst die de schroefverbindingen uit de experimentele proeven simuleren. Voor de bevestiging van de glasplaat zijn er 32 verbindingen geplaatst die het gedrag van de lijm gaan simuleren. Om de verplaatsing uit het vlak te verhinderen is er een lijnondersteuning geplaatst op het HEA profiel. Als laatste is er aan de linker zijde van het HEA profiel een constante verticale belasting van 0.2 kN aangebracht om het gewicht van de cilinder in de schrankweerstandproeven in rekening te brengen. Ook de horizontale opgelegde belasting grijpt aan op de linker zijde van het HEA profiel. Deze algemene opbouw is weergegeven in figuur 5.1 en is hetzelfde voor de verschillende simulaties.



Figuur 5.1: Geometrie structuur BuildSoft Diamonds

5.2.2 Verbindingen

Voor de schroef-, bout- en lijmverbindingen te simuleren in de software is er gewerkt met veerelementen. Deze zijn opgebouwd uit stijve linkers waar vervolgens een bepaalde stijfheid aangegeven is, gebaseerd op de eerder uitgevoerde bachelorproef [3].

Schroeven LVL kader

Volgens Kuai et al. [64] kunnen we stellen dat er voor de schroeven van het LVL kader een bilineair kracht-verplaatsing en moment-rotatie verband is. De stijfheden van de translatie veren zijn weergegeven in figuur 5.3 en staan voor de slip modulus k_1 , axiale slipmodulus k_2 en de samendrukking van het hout k_3 . Deze kunnen berekend worden met:

$$k_1 = 2 \cdot \left(60 \cdot d_1^{1.7} \cdot \left(\frac{\rho_m}{420} \right)^{1.1} \right) \quad (5.1)$$

$$k_2 = 2 \cdot \left(2 \cdot d^{0.6} \cdot l_w^{0.6} \cdot \rho_m^{0.9} \right) \quad (5.2)$$

$$k_3 = \frac{E_{90,m} \cdot A_s}{t_r} \quad (5.3)$$

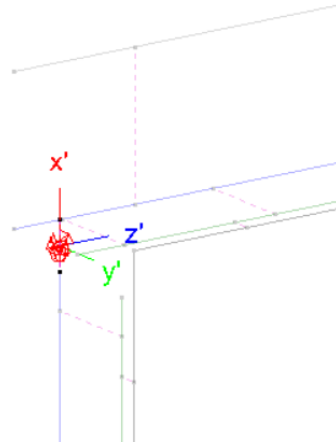
In vergelijking 5.1 en 5.2 is te zien dat de formules vermenigvuldigd zijn met 2. Dit is omdat in de simulaties de 2 schroeven in elke hoek van het kader samen zijn gesimuleerd in één verbinding. Verder staat d en d_1 voor de diameter en binnendiameter van de schroef die bepaald kan worden met vergelijking 4.20. ρ_m staat voor de gemiddelde dichtheid van de materialen die met elkaar verbonden zijn, l_w is de uittreklenkte van de schroef, $E_{90,m}$ is de gemiddelde elasticiteitsmodulus van het hout loodrecht op de vezelrichting, A_s is de doorsnede van de stijl en t_r is de hoogte van de onderregel.

De rotatiestijfheden rond de lokale x- en z-as van de schroeven zoals weergegeven in figuur 5.2 worden als vrij beschouwd omdat deze een verwaarloosbare invloed hebben op de uitwijking van de structuur. De rotatiestijfheid en moment capaciteit rond de lokale y-as zijn weergegeven in figuur 5.3. Deze zijn afhankelijk van de axiale slipmodulus en worden volgens [64] bepaald met:

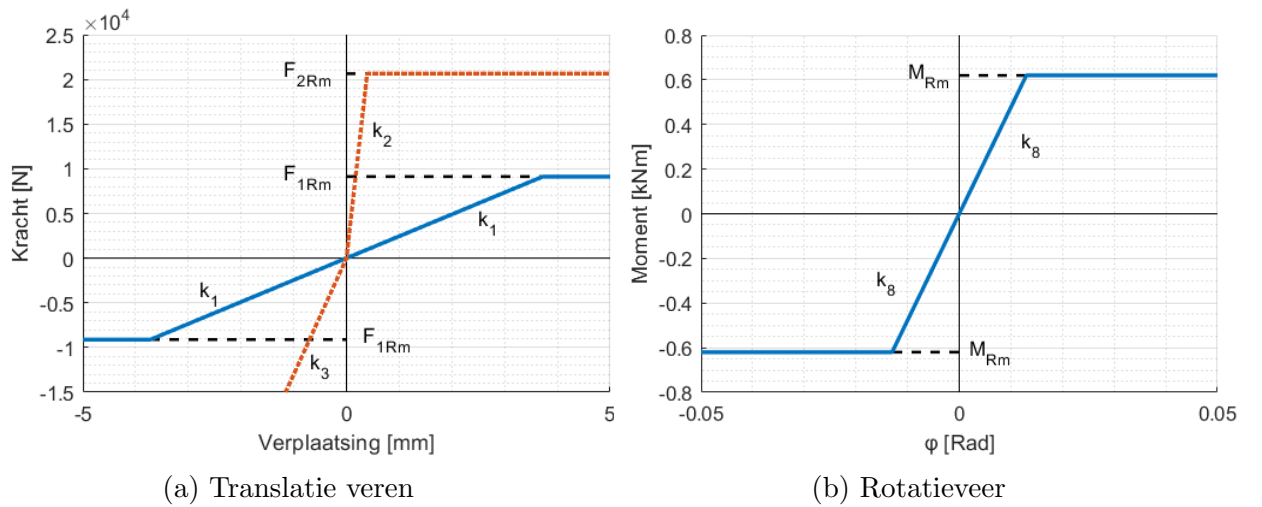
$$k_8 = \frac{k_2}{n} \cdot \sum x_i^2 \quad (5.4)$$

$$M_{Rm} = F_{2,Rm} \cdot x_n \quad (5.5)$$

In vergelijking 5.4 staat n voor het aantal schroeven in de verbinding en x_i is de afstand tussen de meest linkse kant van de stijl en de schroeven. $F_{2,Rm}$ in vergelijking 5.5 staat voor de maximale trekbelasting van de schroefverbinding. De maximale schuif-, trekbelasting en maximale moment capaciteit van de schroeven zijn bepaald met de methode uit [6]. De uitgewerkte berekening van de besproken stijfheden en maximale capaciteiten zijn terug te vinden in Bijlage A.



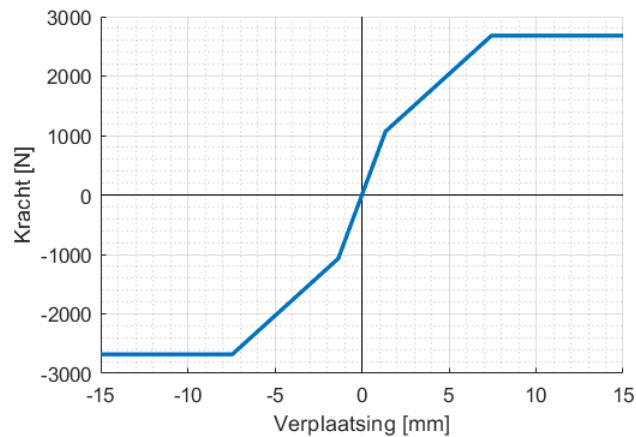
Figuur 5.2: Lokale assen schroeven LVL kader



Figuur 5.3: Stijfheden schroeven LVL kader in Diamonds

Schroeven adapter kader

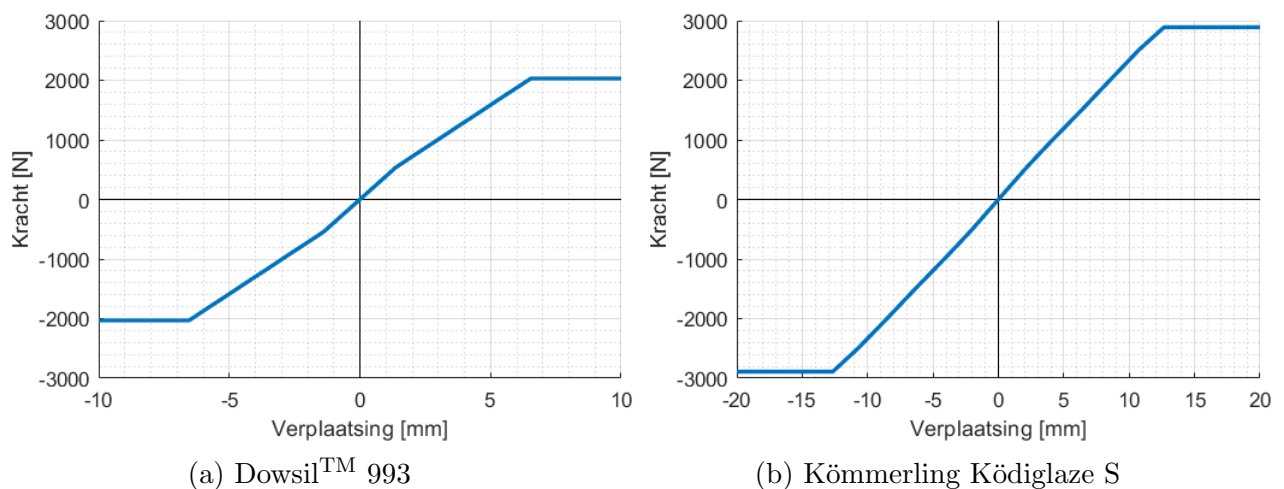
Voor de schroeven die het adapter kader met het LVL kader verbinden wordt er enkel een stijfheid ingegeven voor de richtingen van de slipmodulus. Deze stijfheden zijn bepaald aan de hand van de experimentele proeven die eerder zijn uitgevoerd in functie van dit onderzoek [65]. In figuur 5.4 wordt de kracht verplaatsingsgrafiek weergegeven die is toegepast in de simulaties.



Figuur 5.4: Stijfheid adapter schroeven in Diamonds

Lijmverbindingen

De stijfheden van de twee gebruikte lijmen zijn afgeleid aan de hand van eerder uitgevoerde experimenten op de afschuifstrektestrekte van de lijmen [13]. De kracht verplaatsingsgrafieken van de twee lijmen worden getoond in figuur 5.5.

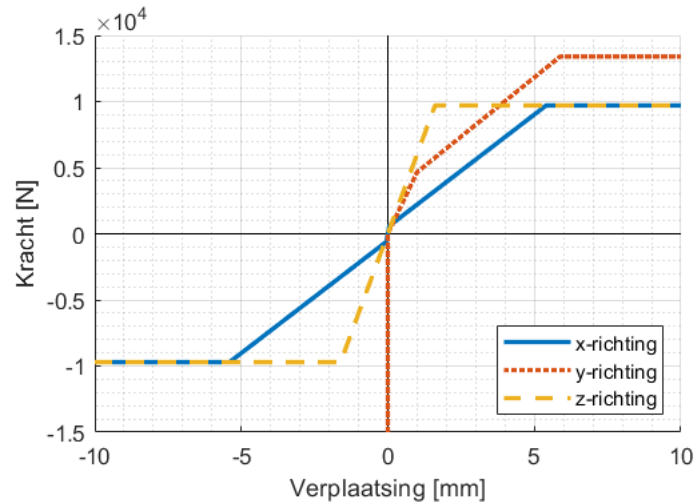


Figuur 5.5: Stijfheden lijmen in Diamonds

Boutverbindingen

De boutverbindingen tussen de onderregel en het onderste HEA-profiel worden gesimuleerd met drie translatie veren die elk een andere stijfheid hebben. Voor de veer in de x-richting is de stijfheid bepaald met behulp van [6] en de experimentele resultaten van de horizontale verplaatsing van de onderregel. Voor de trekveer in de y-richting is de stijfheid bepaald aan de hand van

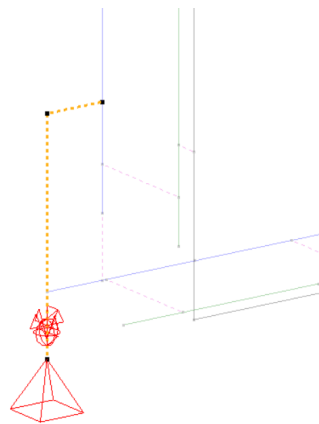
een bijkomend uitgevoerd doordruktest op één bout. De resultaten van dit experiment worden weergegeven in bijlage B. Als laatste is de stijfheid in de z-richting bepaald met [6]. Voor de boutverbindingen tussen de bovenregel en het bovenliggende HEA-profiel worden dezelfde verbindingen gesimuleerd omdat de invloed van de stijfheid verwaarloosbaar is ten opzichte van de verplaatsing van het kader. De kracht-verplaatsingsgrafieken voor deze veren zijn weergegeven in figuur 5.6.



Figuur 5.6: Stijfheden Bouten

Tie-down

Om de modules volledig te verankeren is er gebruik gemaakt van een *tie-down* die is weergegeven in figuur 5.7. Deze zorgt er voor dat de linkeronderhoek van de modules zowel trek als druk kunnen opnemen. De *tie-down* is gemodelleerd met behulp van twee stijve linkers. Deze zijn bevestigd tussen de linkse stijl en een scharnierpunt dat de verbinding tussen de *tie-down* en de omgeving voorstelt. De verticale trekstijfheid van het verankeringsysteem is gelijk aan de stijfheid gebruikt voor het analytisch model en bedraagt 11441 N/mm. De bepaling van deze waarde is weergegeven in sectie 4.3.



Figuur 5.7: Opbouw *tie-down*

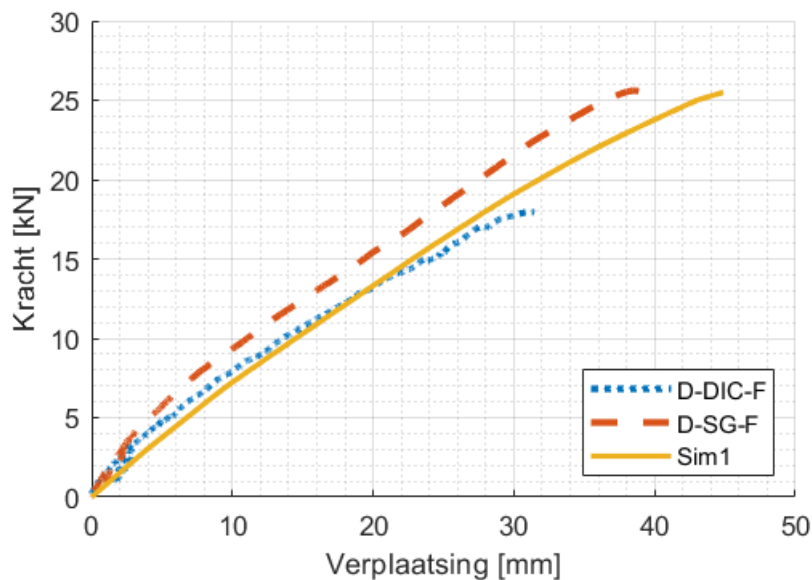
5.3 Resultaten

In dit deel worden de resultaten van het numeriek model vergeleken met de resultaten van de schrankweerstandproeven uit hoofdstuk 3. Hierbij wordt er een onderscheid gemaakt tussen de volledig verankerde en gedeeltelijke verankerde proefstukken. Ook wordt er een onderscheid gemaakt tussen de toegepaste lijmen.

5.3.1 Proefstukken met volledige verankering

Dowsil™ 993

Eerst worden de resultaten van de proefstukken met volledige verankering en de Dowsil™ 993 lijm besproken. Figuur 5.8 toont de resultaten van de totale uitwijking van de schrankweerstandproeven D-DIC-F en D-SG-F en het numeriek model. In figuur 5.8 staat Sim1 voor de simulatie die gebaseerd is op de proefstukken D-DIC-F en D-SG-F. Hierin is te zien dat de simulatie een goede benadering is voor het proefstuk D-DIC-F en een grotere afwijking heeft ten opzichte van het proefstuk D-SG-F.

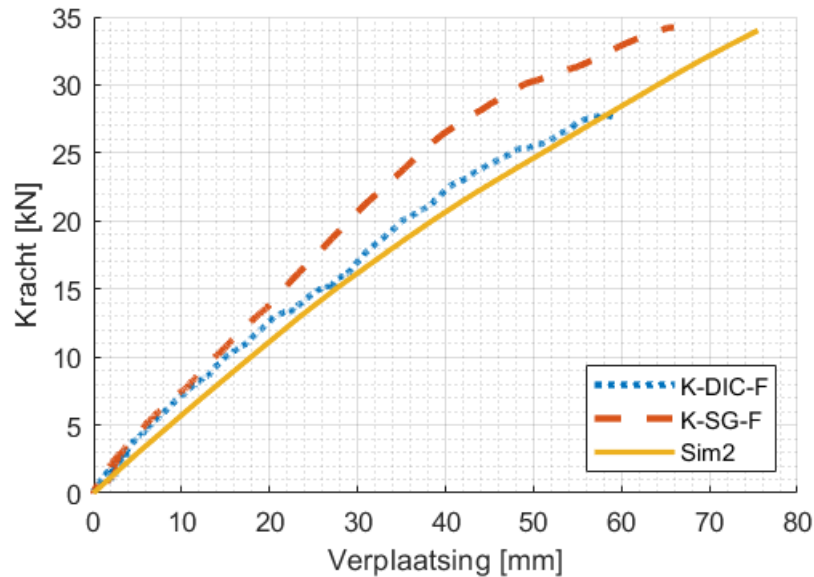


Figuur 5.8: Vergelijking numeriek model met experimentele resultaten Dowsil™ 993 met *tie-down* verankering

Bij het verder bestuderen van de resultaten kan vastgesteld worden dat de initiële stijfheid van de proefstukken in werkelijkheid groter is dan die van het numeriek model. In het interval 1 tot 5 kN bedraagt de gemiddelde afwijking tussen Sim1 en het proefstuk D-DIC-F 71%. Bij het proefstuk D-SG-F is dit 91%. Voor het proefstuk D-DIC-F is de gemiddelde afwijking in het interval 5 kN tot 17 kN gelijk aan 6% en voor het proefstuk D-SG-F binnen het interval 5 kN tot 25 kN bedraagt deze afwijking 26%.

Kömmerling Ködiglaze S

In de tweede vergelijking worden de volledige verankerde proefstukken met Kömmerling Ködiglaze S lijm besproken. Figuur 5.9 toont de resultaten van de totale uitwijking van de proefstukken K-DIC-F en K-SG-F en het numeriek model. Hierin is Sim2 de simulatie van het numeriek model gebaseerd op de proefstukken K-DIC-F en K-SG-F. Ook kan er vastgesteld worden dat Sim2 een betere benadering is voor het proefstuk K-DIC-F dan voor K-SG-F.



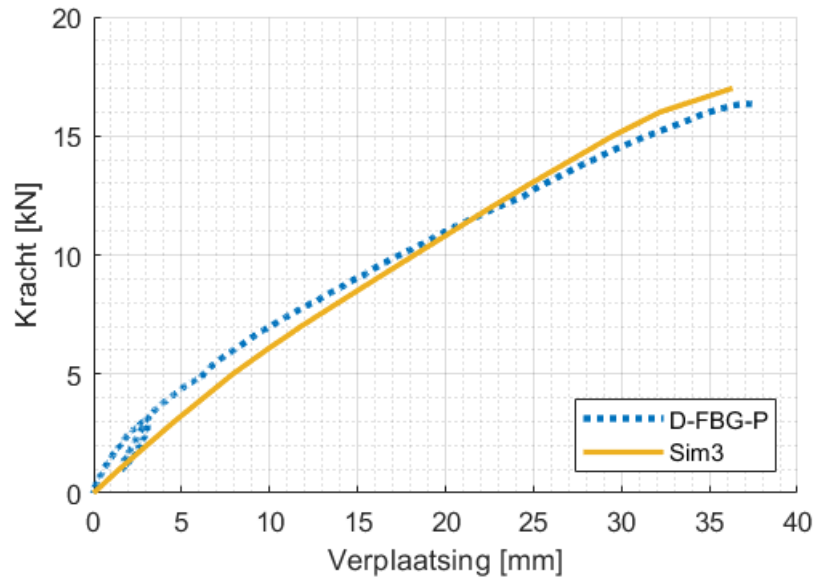
Figuur 5.9: Vergelijking numeriek model met experimentele resultaten Kömmerling Ködiglaze S met *tie-down* verankering

Tussen de resultaten van Sim2 en het proefstuk K-DIC-F is er in het interval 1 tot 5 kN een gemiddelde afwijking van 51%. Voor het interval 5 tot 27 kN bedraagt deze afwijking 13%. Bij het proefstuk K-SG-F is de gemiddelde afwijking binnen het interval 1 tot 5 kN gelijk aan 74% en voor 5 tot 27 kN bedraagt deze afwijking 31%.

5.3.2 Proefstukken met gedeeltelijke verankering

Dowsil™ 993

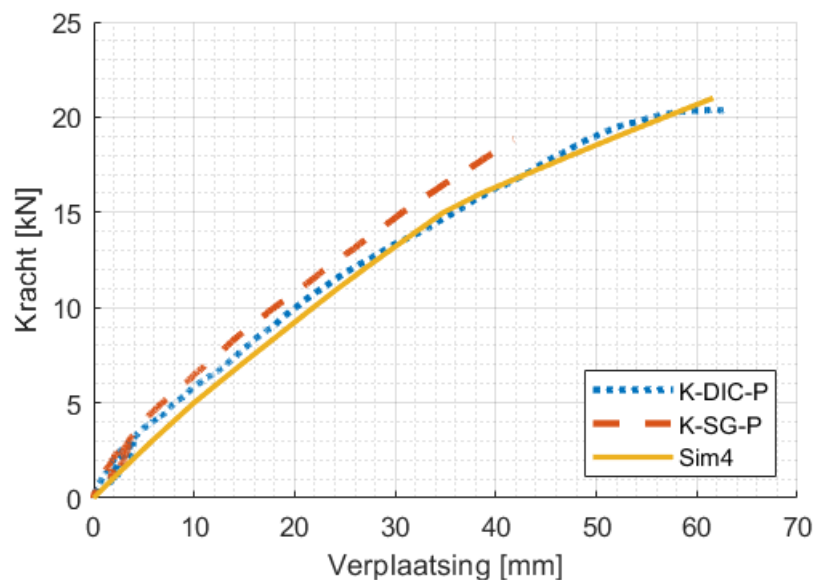
Voor de derde vergelijking wordt het gedeeltelijk verankerde proefstuk met Dowsil™ 993 lijm besproken. Figuur 5.10 illustreert de totale uitwijking van het proefstuk D-FBG-P en de simulatie van het numeriek model. Hierin is Sim3 gebaseerd op het proefstuk D-FBG-P. Deze vergelijking toont dat ook hier de initiële stijfheid in werkelijkheid groter is dan die in de simulatie. Voor het interval 1 tot 5 kN is er een gemiddelde afwijking van 78% en binnen 5 tot 16 kN bedraagt deze afwijking 6%.



Figuur 5.10: Vergelijking numeriek model met experimentele resultaten DowsilTM 993 met gedeeltelijke verankering

Kömmerling Ködiglaze S

Tot slot worden de gedeeltelijke verankerde proefstukken met de Kömmerling Ködiglaze S lijm vergeleken met de simulatie van het numeriek model. Figuur 5.11 toont de resultaten van de totale uitwijking van het numeriek model en van de proefstukken K-DIC-P en K-SG-P. Ook toont de figuur dat bij deze simulatie de initiële stijfheid van het numeriek model lager ligt dan in werkelijkheid is bij de schrankweerstandproeven.



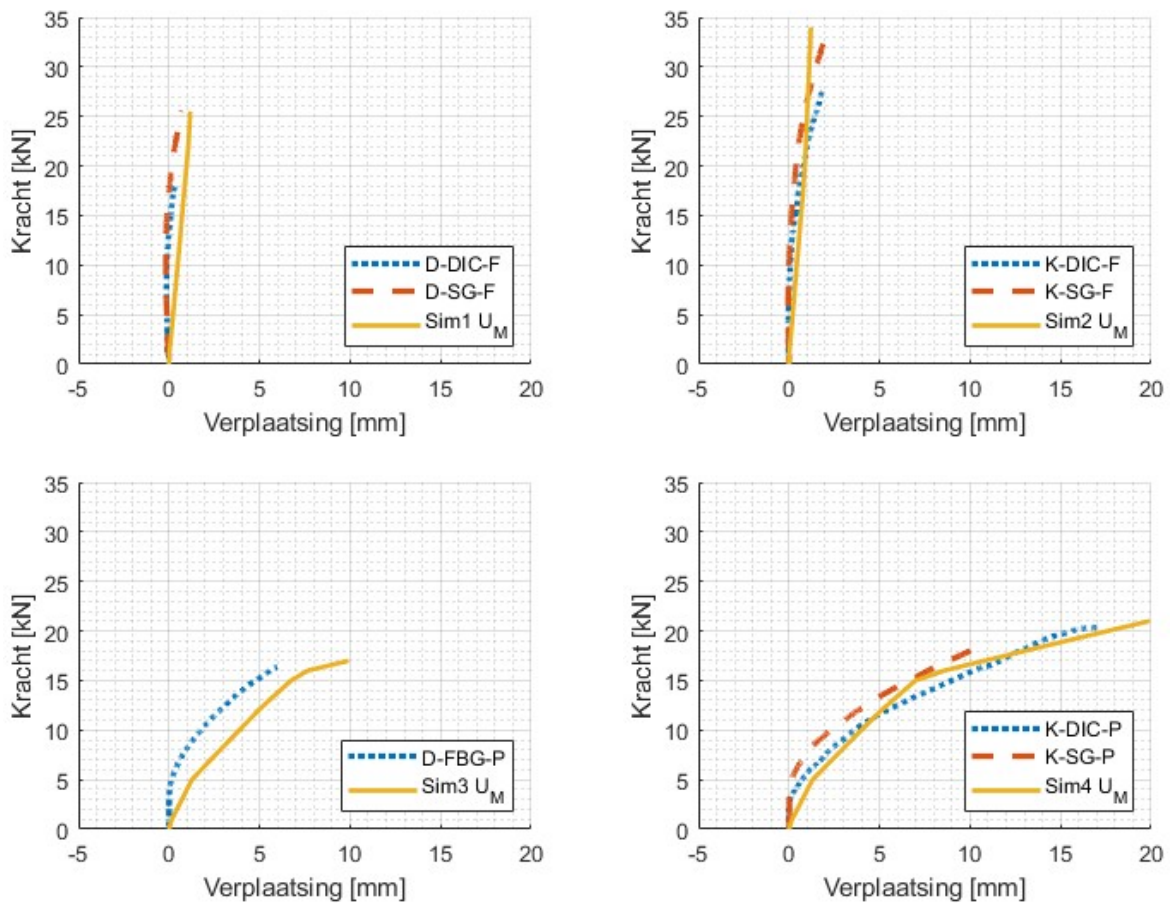
Figuur 5.11: Vergelijking numeriek model met experimentele resultaten Kömmerling Ködiglaze S met gedeeltelijke verankering

Voor het interval 1 tot 5 kN is er een gemiddelde afwijking van 65% tussen het proefstuk K-DIC-P en Sim4. Voor het proefstuk K-SG-P bedraagt deze afwijking 88%. Vervolgens is de gemiddelde afwijking van 7% bepaald voor het proefstuk K-DIC-P binnen het interval 5 tot 20 kN. Ten slotte

is er binnen het interval van 5 tot 18 kN een gemiddelde afwijking van 23% bepaald tussen het proefstuk K-SG-P en de simulatie van het numeriek model. Wanneer deze afwijkingen vergeleken worden met de afwijkingen van de volledig verankerde proefstukken kan er vastgesteld worden dat deze ongeveer hetzelfde zijn. Hieruit kan afgeleid worden dat de *tie-down* verbinding in de simulatie een goede benadering geeft van de gebruikte *tie-down* in de schrankweerstandproeven.

5.3.3 Vergelijking componenten

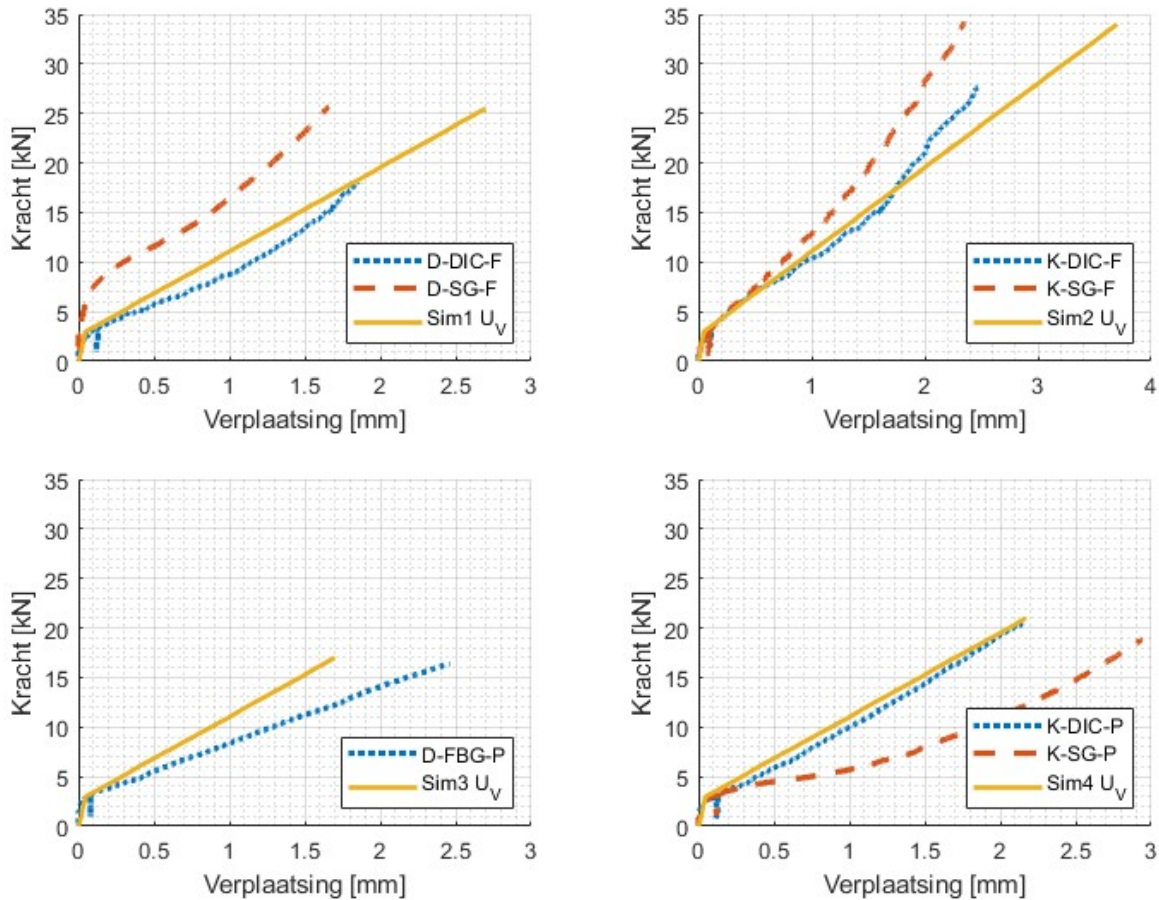
In de simulaties kunnen er ook uitwijkingen van afzonderlijke componenten bepaald worden die vergeleken kunnen worden met de experimentele resultaten van de schrankweerstandproeven. Hierbij wordt een vergelijking gemaakt met de uitwijkingscomponenten eerder besproken in sectie 3.3.2. Figuur 5.12 toont de resultaten van de opwaartse verplaatsing van het kader gemeten met sensor 3 in figuur 3.6 en van het numerieke model. Deze verplaatsing is gelijk aan de horizontale verplaatsing u_M die veroorzaakt wordt door het kantelen van het kader.



Figuur 5.12: Vergelijking verticale verplaatsing U_M experimentele resultaten en numeriek model

Aan de hand van figuur 5.12 kan er afgeleid worden dat het numeriek model een goede benadering geeft van de werkelijke stijfheid van het verankeringsysteem. Dit omdat er rekening wordt gehouden met het niet lineair gedrag van de stijfheid van het verankeringsysteem. Daarnaast is ook te zien dat de proefstukken die volledig verankerd zijn een veel lagere verticale verplaatsing hebben dan de proefstukken die gedeeltelijk verankerd zijn.

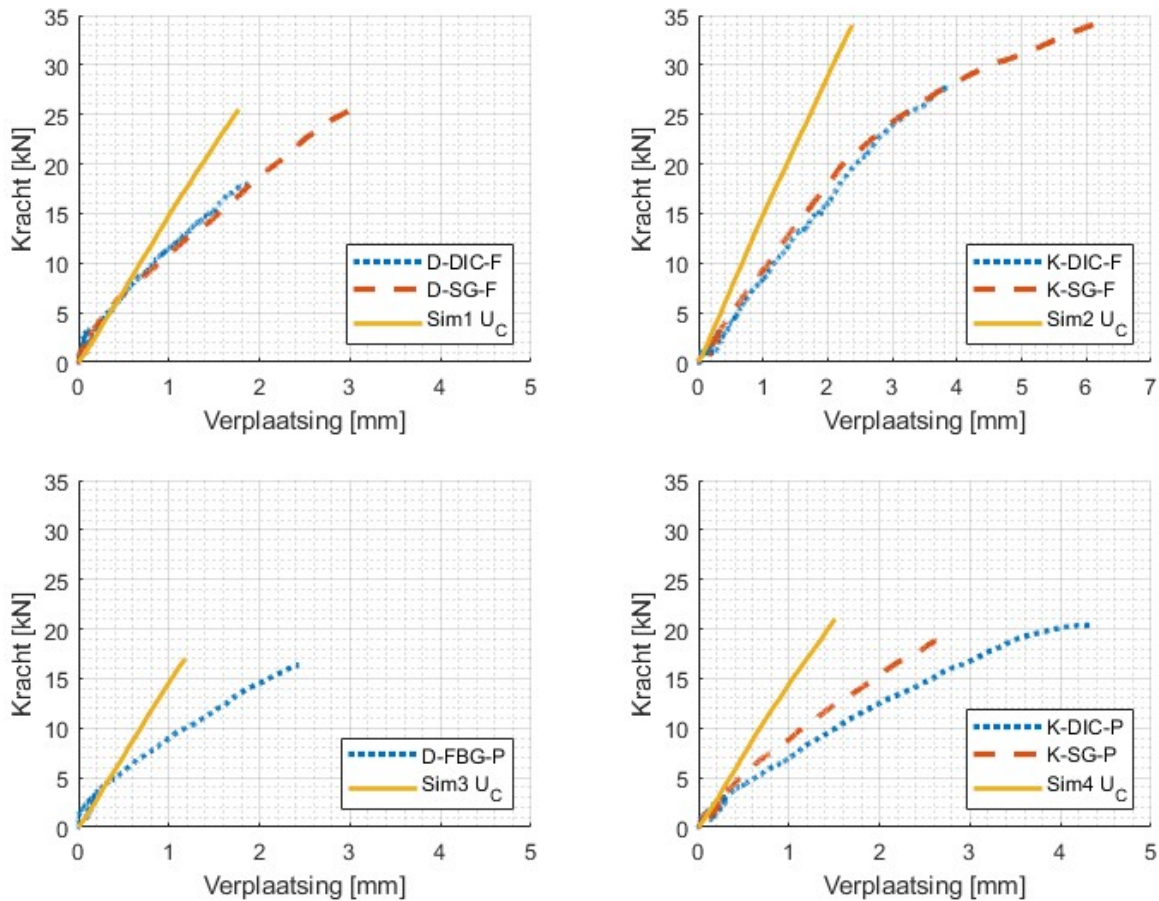
Vervolgens wordt de horizontale verplaatsing van de onderste regel van het LVL kader vergeleken. Figuur 5.13 toont de verplaatsingen van de experimenten gemeten met sensor 4 zoals weergegeven in 3.6 met bijhorende resultaten van het numerieke model.



Figuur 5.13: Vergelijking horizontale verplaatsing U_v experimentele resultaten en numeriek model

Figuur 5.13 geeft een gelijkaardig verband weer voor de kracht verplaatsing voor het numeriek model t.o.v. de experimentele waarde. Een verklaring hiervoor is dat de stijfheid van de bouten in de simulaties gebaseerd is op de stijfheid bepaald met de experimentele waarde van de schrankweerstandproeven. Hierdoor is er bij het numeriek model ook rekening gehouden met de aanwezige speling tussen de bouten en het onderliggende HEA profiel.

Als laatste worden in figuur 5.14 de resultaten van de compressie van de onderregel u_c (sensor 5 in figuur 3.5 en figuur 3.7) vergeleken met het numeriek model.



Figuur 5.14: Vergelijking verticale verplaatsing U_C experimentele resultaten en numeriek model

Figuur 5.14 toont dat het numeriek model net zoals bij het analytische model een overschatting maakt van de stijfheid van het hout. Dit betekent dat de onderregel in werkelijkheid een grotere samendrukking gaat ondervinden.

Ten slotte wordt ook voor het numeriek model de stijfheid vergeleken met de experimentele waarde. Dit wordt weergegeven in tabel 5.1. Hierbij wordt de stijfheid opnieuw bepaald voor het interval van 10% en 40% van de maximale kracht. Bijkomend worden ook de resultaten voor de stijfheid van het analytisch model 2 weergegeven.

Uit tabel 5.1 kan afgeleid worden dat het numeriek model een onderschatting maakt van de stijfheid bekomen uit de experimentele resultaten, met uitzondering van K-DIC-P. Daarnaast kan opgemerkt worden dat de maximale afwijking tussen de stijfheid uit het numeriek model en de stijfheid uit de experimenten 17% bedraagt. Wanneer de afwijkingen van de stijfheden worden vergeleken tussen het numeriek model en het analytisch model, valt op dat de afwijking bij het numeriek model kleiner zijn dan deze van het analytisch model.

Tabel 5.1: Vergelijking tussen experimentele stijfheden en numeriek model

	Proefstuk [-]	Exp. [N/mm]	Numeriek model [N/mm]	Model 2
Volledige verankering	K-DIC-F	591.0	547.4 (-7%)	461.9 (-22%)
	K-SG-F	638.6	539.9 (-15%)	461.9 (-28%)
	D-DIC-F	737.5	716.9 (-3%)	623.5 (-15%)
	D-SG-F	800.4	667.6 (-17%)	623.5 (-22%)
Partiële verankering	K-DIC-P	451.1	454.5 (1%)	408.6 (-9%)
	K-SG-P	520.8	500.3 (-4%)	408.6 (-22%)
	D-FBG-P	628.9	584.9 (-7%)	481.5 (-23%)

5.4 Conclusie

Uit dit hoofdstuk kan geconcludeerd worden dat met behulp van BuildSoft Diamonds het mogelijk is om een model te simuleren dat een goede benadering geeft tegenover de experimentele resultaten van de totale horizontale verplaatsing en de verplaatsing van de deelcomponenten, mits de translatiestijfheid van de bouten in de x richting gekalibreerd zijn aan de hand van de horizontale verplaatsing van de onderregel. Daarnaast kan geconcludeerd worden dat het numeriek model een betere benadering geeft van de stijfheid dan het analytisch model.

Hoofdstuk 6

Conclusie

In dit onderzoek werd onderzocht of het mogelijk was een ontwerpmethode op te stellen voor hybride hout-glas wandelement. Voor het bereiken van deze doelstelling werd als eerste stap een literatuurstudie uitgevoerd. Daarnaast werden ook experimenten uitgevoerd om kennis te vergaren over het wandelement. De volgende stap was het opstellen van een analytisch model met behulp van de Eurocode 5 methode voor het bepalen van de uitwijking van een wandelement. Ten slotte is een numeriek model opgesteld in de commerciële software Buildsoft Diamonds. Uit deze fases zijn de belangrijkste resultaten verzameld en geanalyseerd.

De resultaten tonen aan dat bij dit proefstuk de trekspanning van het glas niet overschreden zal worden. Daarnaast kan worden vastgesteld dat bij een volledige verankering een hogere kans is op het cohesief falen van de lijmverbinding. Daarnaast kan geconcludeerd worden dat het analytische model 2 een betere benadering van de werkelijkheid is dan model 1. Ook kan geconcludeerd worden dat de grootste afwijking van zowel het analytisch als het numeriek model ligt binnen het interval van 1 tot 5 kN voor een aangebrachte horizontale kracht. Wat betekent dat de modellen een onderschatting maken van de initiële stijfheid. Ten slotte kan geconcludeerd worden dat het numeriek model een betere benadering is van de stijfheid dan het analytisch model.

Een eerste beperking van dit onderzoek is dat enkel onderzoek werd uitgevoerd naar een specifiek proefstuk met vaste afmetingen. Daarnaast werd enkel onderzoek gedaan naar DowsilTM 993 en Kömmerling Ködiglaze S lijmen. Een andere beperking van het onderzoek is dat voor het opstellen van het analytisch model resultaten van een afschuifspanning-rek diagram nodig waren voor het bepalen van de sterkte van de lijm. Daarnaast waren voor het numeriek model ook bijkomende proeven nodig om de stijfheden van de verbindingsmiddelen te bepalen. Een bijkomende beperking van het analytisch model is dat het een lineair model is en geen rekening houdt met de niet-lineaire eigenschappen van de lijm en de schroeven. Toekomstig onderzoek zou zich kunnen focussen op deze niet-lineaire eigenschappen op te nemen in het analytisch model. Een laatste beperking van het onderzoek is dat er enkel onderzoek is gedaan naar de stijfheid. Verder onderzoek zou zich kunnen focussen op de UGT controle van een hybride hout-glas wandelement.

Samengevat kan worden gesteld dat ondanks de onderschatting van de experimentele resultaten, het analytisch model en het numeriek model gebruikt kunnen worden voor het ontwerpen van de stijfheid van een hybride hout-glas wandelement mits bijkomende proeven worden uitgevoerd op de sterkte van de lijm en schroefverbindingen.

Literatuurlijst

- [1] Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij, “Wat is het? vlaanderen circulair bouwen.” Geraadpleegd: 6 oktober 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://bouwen.vlaanderen-circulair.be/nl/wat-is-het>.
- [2] G. Churkina, A. Organschi, C. P. O. Reyer, A. Ruff, K. Vinke, Z. Liu, B. K. Reck, T. E. Graedel, and H. J. Schellnhuber, “Buildings as a global carbon sink,” *Nature Sustainability*, vol. 3, no. 4, pp. 269–276, 2020.
- [3] I. Della Pelle, J. van Berlo, and R. Wagemans, “Calculation model of timber-glass composite structures [bachelor proef],” *Diepenbeek: Gezamenlijke opleiding Industriële Ingenieurswetenschappen UHasselt & KU Leuven*, 2024.
- [4] Buildsoft, “Diamonds,” software, Buildsoft, 2023 r.01.
- [5] L. Deferm, K. Pauwels, and D. Yildiz, “Comparison of analytical calculation models for adhesive bonds in timber-glass composite structures [bachelor proef],” *Diepenbeek: Gezamenlijke opleiding Industriële Ingenieurswetenschappen UHasselt & KU Leuven*, 2023.
- [6] prEN 1995-1-1, “Eurocode 5: Design of timber structures - general rules and rules for buildings,” tech. rep., European Committee for Standardization (CEN), 2024.
- [7] EN 1990-10, “Eurocode 10: Design of glass structures – general rules, requirements, and guidelines,” standard, European Committee for Standardization, 2023.
- [8] T. Edl, *Entwicklung von wandartigen verklebten Holz-Glas-Verbundelementen und Beurteilung des Tragverhaltens als Aussteifungsscheibe*. PhD thesis, Technische Universität Wien, 2008.
- [9] B. Ber, G. Finžgar, M. Premrov, and A. Štrukelj, “On parameters affecting the racking stiffness of timber-glass walls,” *Glass Structures & Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 69–82, 2019.
- [10] B. Ber, M. Premrov, A. Štrukelj, and M. Kuhta, “Experimental investigations of timber-glass composite wall panels,” *Construction and Building Materials*, vol. 66, pp. 235–246, 09 2014.
- [11] A. Štrukelj, B. Ber, and M. Premrov, “Racking resistance of timber-glass wall elements using different types of adhesives,” *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 130–143, 2015.
- [12] M. Premrov, A. Štrukelj, and B. Ber, “Experimental study on racking resistance of timber double-skin façade elements,” *Engineering Structures*, vol. 293, 2023.

- [13] T. Engelen, J. Henriques, and B. Vandoren, “Experimental characterisation and calibration of hyperelastic material models for finite element modelling of timber-glass adhesive connections under shear and tensile loading,” *Glass Structures & Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 551–568, 2024.
- [14] M. Premrov and E. Šilih, “Numerical analysis of the racking behaviour of multi-storey timber-framed buildings considering load-bearing function of double-skin façade elements,” *Sustainability*, vol. 15, 2023.
- [15] B. Källsner and U. A. Girhammar, “Plastic models for analysis of fully anchored light-frame timber shear walls,” *Engineering Structures*, vol. 31, no. 9, pp. 2171–2181, 2009.
- [16] Glasopmaat, “Gehard helder veiligheidsglas.” Geraadpleegd: 2 mei 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.glasopmaat.be/veiligheidsglas-op-maat/gehard-glas/gehard-helder-glas/>.
- [17] EN 572-1:2012, “Glas voor gebouwen — deel 1: Definitie en algemene eigenschappen,” tech. rep., European Committee for Standardization, 2016.
- [18] Kerto® LVL, “Laminated veneer lumber.” Geraadpleegd: 2 mei 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.metsagroup.com/metsawood/products-and-services/products/kerto-lvl/>.
- [19] Metsä Wood, “Kerto lvl manual – mechanical properties,” tech. rep., Metsä Group, 2024.
- [20] Metsä Wood, “Declaration of performance: Metsä wood birch plywood,” tech. rep., Metsä Group, 2019.
- [21] “Stevens hout.” Geraadpleegd: 4 mei 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.stevenshout.be/product/lvl-r-s-45-x-200-per-pak/>.
- [22] Martens hout, “Triplex berk.” Geraadpleegd: 4 mei 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.martenshout.be/nl/ons-gamma/constructieplaten/multiplex/triplex-berk-cpcp-18mm-250x125m-wbp>.
- [23] Polyestershoppen, “Epoxyverwerking voor de starter.” Geraadpleegd: 4 mei 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://polyestershoppen.be/info/epoxyverwerking-voor-de-starter:.text=Epoxy>
- [24] Electrical and Computer Engineering Department, Michigan State University, *Transducers Laboratory Manual*, September 2015. Course: ECE 410 – Fall 2015.
- [25] T. Chu, W. Ranson, and M. Sutton, “Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics,” *Experimental Mechanics*, vol. 25, pp. 232–244, 1985.
- [26] M. Sutton, W. Wolters, W. Peters, W. Ranson, and S. McNeill, “Determination of displacements using an improved digital correlation method,” *Image and Vision Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 132–139, 1983.
- [27] L. Yu and B. Pan, “Experimental study of tensile properties and deformation evolutions of 2d and 2.5d woven SiO₂f/SiO₂ composites using single-camera stereo-digital image correlation,” *Composite Structures*, vol. 200, pp. 589–598, 2018.

- [28] L. Yu and B. Pan, “Full-frame, high-speed 3d shape and deformation measurements using stereo-digital image correlation and a single color high-speed camera,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 95, pp. 17–25, 2017.
- [29] D. Solav, K. M. Moerman, A. M. Jaeger, K. Genovese, and H. M. Herr, “MultiDIC: An open-source toolbox for multi-view 3d digital image correlation,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30520–30535, 2018.
- [30] F. Chen, X. Chen, X. Xie, X. Feng, and L. Yang, “Full-field 3d measurement using multi-camera digital image correlation system,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 51, no. 9, pp. 1044–1052, 2013.
- [31] J. Holmes, S. Sommacal, R. Das, Z. Stachurski, and P. Compston, “Digital image and volume correlation for deformation and damage characterisation of fibre-reinforced composites: A review,” *Composite Structures*, vol. 315, p. 116994, 2023.
- [32] J. Verstraten, “Rekstroomjes,” *elektuur*, 2023.
- [33] M. Laughton and D. Warne, *Electrical Engineer’s Reference Book (Sixteenth Edition)*. Oxford: Newnes, 2003.
- [34] Buildwise, “Optische vezels.” Geraadpleegd: 1 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.buildwise.be/nl/digitale-technologieen-in-de-bouw/optische-vezels/>.
- [35] Hittech, “NORIA – the fiber bragg grating manufacturing solution.” Geraadpleegd: 1 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://hittech.com/nl/portfolio-posts/noria-the-fiber-bragg-grating-manufacturing-solution/>.
- [36] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert, “Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask,” *Applied Physics Letters*, vol. 62, no. 10, pp. 1035–1037, 1993.
- [37] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, “Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method,” *Optics Letters*, vol. 14, no. 15, pp. 823–825, 1989.
- [38] P. Nivelles and M. Daenen, “Thermal monitoring in laminate structures.” European Patent EP3913798, Jun. 28, 2023.
- [39] P. Nivelles, L. Maes, J. Poortmans, and M. Daenen, “In situ quantification of temperature and strain within photovoltaic modules through optical sensing,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 31, no. 2, pp. 173–179, 2023.
- [40] C. H. Wang and C. N. Duong, *Bonded Joints and Repairs to Composite Airframe Structures*. Academic Press, 2016.
- [41] S. Ebnesajjad, “1 - introduction and adhesion theories,” in *Handbook of Adhesives and Surface Preparation* (S. Ebnesajjad, ed.), Plastics Design Library, pp. 3–13, Oxford: William Andrew Publishing, 2011.
- [42] A. Dabiri and E. Madril, “Isothermal creep behavior of 3m TM scotch-weld TM EC-2216 b\ a in single lap joints,” in *the ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences Computers and Information in Engineering Conference*, 08 2016.

- [43] A. Pantaleo, D. Roma, and A. Pellerano, “Influence of wood substrate on bonding joint with structural silicone sealants for wood frames applications,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 37, pp. 121–128, 2012. Special Issue on Joint Design 3.
- [44] A. Abu-Sinna, Y.-K. Park, D.-I. Kang, and M.-S. Kim, “The influence of loading frame stiffness on loadcell–deadweight force machine interaction,” *Measurement*, vol. 42, no. 6, pp. 830–835, 2009.
- [45] K. Hoelz, P. Grauberger, and S. Matthiesen, “Investigation of failure behavior in the thread contact of wood screws during the pull-out process,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 146, no. 10, p. 04020211, 2020.
- [46] M. Yurrita and J. Cabrero, “On the need of distinguishing ductile and brittle failure modes in timber connections with dowel-type fasteners,” *Engineering Structures*, vol. 242, p. 112496, 2021.
- [47] M. Chybiński and Ł. Polus, “Experimental and numerical investigations of laminated veneer lumber panels,” *Archives of Civil Engineering*, vol. 67, pp. 351–372, 2021.
- [48] N. Mohamad Bhkari, W. C. Lum, M. S. Nordin, N. Zainal, N. I. Za’ba, and Z. Ahmad, “Mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) fabricated from three malaysian hardwood species,” *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 15, 2023.
- [49] SANCO GmbH, “Glasbreuk door thermische spanningen: Technische informatie,” tech. rep., SANCO GmbH, Apr. 2020.
- [50] Centre for Window and Cladding Technology (CWCT), “Technical note no. 65: Thermal fracture of glass,” tech. rep., CWCT, University of Bath, 2010. Available as part of CWCT Technical Notes.
- [51] R. Hill, “Thermal fracture of glass - risks.” Geraadpleegd: 7 december 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.contravision.com/print-substrates/thermal-fracture-of-glass-risks/>.
- [52] C. Louter, “Adhesively bonded reinforced glass beams,” *HERON*, vol. 52, 2007.
- [53] C. Schittich, *Glass Construction Manual*. Basel: Birkhäuser, 2007.
- [54] N. Georg, *Entwicklung und Bemessung von statisch wirksamen Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zum Einsatz im Fassadenbereich*. PhD thesis, TU Wien Institut für Architekturwissenschaften, 2011.
- [55] H. Kreuzinger and P. Niedermaier, “Glas als schubfeld,” in *Tagungsband Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage*, (Karlsruhe, Germany), KIT Scientific Publishing, 2005.
- [56] T. Kammer, *Zum räumlichen Tragverhalten mehrgeschossiger Gebäude in Holztafelbauart*. PhD thesis, Braunschweig: Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, 2006.
- [57] K. Pintarič and M. Premrov, “Mathematical modelling of timber-framed walls using fictive diagonal elements,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, pp. 8051–8059, 09 2013.
- [58] W. Hochhauser, *Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundscheiben*. PhD thesis, Technische Universität Wien, 2011.

- [59] T. Hoekstra, “Multi-storey timber-frame building- modelling the racking stiffness of timber-frame shear-walls,” Master’s thesis, Technische Universiteit Delft, 2012.
- [60] Simpson Strong-Tie, “Htt - anker voor houtskeletstijl,” technische fiche, Simpson Strong-Tie, 2022. Referentie: ETA-07/0285, NL-DoP-e07/0285.
- [61] R. Hess, “Material glass,” *Structural Engineering International*, vol. 14, pp. 76–79, 05 2004.
- [62] NBN S 23-002-2:2020, “Glaswerk - deel 2: Berekening van de glasdikte,” tech. rep., Bureau voor Normalisatie, 2020.
- [63] E. 1995-1-1, “Eurocode 5: Design of timber structures - general rules and rules for buildings,” standard, European Committee for Standardization, 2004.
- [64] L. Kuai, S. Ormarsson, J. Vessby, and R. Maharjan, “A numerical and experimental investigation of non-linear deformation behaviours in light-frame timber walls,” *Engineering Structures*, vol. 252, p. 113599, 2022.
- [65] T. Engelen, D. Byloos, J. Henriques, M. Daenen, M. Kozłowski, and B. Vandoren, “Experimental and analytical characterisation of hybrid timber-glass diaphragms with integrated photovoltaics,” *SSRN*, 2025.

Bijlage A

Bijlage - Bijkomende berekeningen numeriek model

Verbinding LVL kader volgens prEN 1995-1-1:2025

Gegevens:	
Diameter d:	8 mm
d1/d:	0.65
Effectieve diameter d1:	5.2 mm
Diameter schroefkop dhead:	20 mm
Diameter schacht dschacht:	5.7 mm
Lengte schroefdraad lw:	80 mm
Treksterkte fu,k:	540 N/mm ²
LVL hout:	
Karakteristieke dichtheid pk:	480 kg/m ³
Gemiddelde dichtheid pm:	510 kg/m ³
Dikte regel th,1	60 mm
Lengte schroef in stijl th,2	80 mm
β1	90 °
ε1	90 °
β2	0 °
ε2	0 °
lw	72 mm
k _{mod}	1
γ _R	1
γ _{M2}	1

Uittreksterkte			
$F_{pull,k} = d_{head}^2 \begin{cases} 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \\ 70 - 0,8 \cdot d_{head} \text{ voor } \rho_k \geq 730 \end{cases}$	=	6451 N	
k _{screw}	=	8.2	
k _w	=	1.0	
k _{mat}	=	1.0	
k _p	=	1.1	
$f_{w,k} = k_{screw} \cdot k_w \cdot k_{mat} \cdot d^{-0,33} \left(\frac{\rho_k}{350}\right)^{k_p}$	=	5.84 N/mm ²	
$F_{w,k} = \pi \cdot d \cdot l_w \cdot f_{w,k}$	=	10574 N	
As	=	21.24 mm ²	
$F_{t,k} = 0,9 \cdot As \cdot f_{u,k}$	=	10321 N	
$F_{ax,t,d} = \min \begin{cases} \frac{k_{mod}}{\gamma_r} \max\{F_{pul,k}; F_{w,k}\} \\ \frac{F_{t,k}}{\gamma_{M2}} \end{cases}$	=	10574 N	
	=	10321 N	
$F_{ax,t,d}$	=	10321 N	
Uittreksterkte voor 2 schroeven:			
$F_{ax,t,d,2 \text{ schroeven}} = 2 \cdot F_{ax,t,d}$	=	20643 N	

Afschuifsterkte			
$f_{h,1,k} = \frac{0,082(1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k}{k_{mat}}$	=	37.12 N/mm ²	
$f_{h,2,k} = \frac{0,082(1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k}{(\sin^2 \beta + k_2 \cos^2 \beta) (\sin^2 \epsilon + 2,5 \cos^2 \epsilon)}$	=	14.48 N/mm ²	
k ₂ (Materiaal: LVL-P)	=	1.00	
$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$	=	11779 Nmm	
$F_{D,k} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \frac{t_{h1}}{d} & (a) \\ f_{h,2,k} \frac{t_{h2}}{d} & (b) \\ \frac{f_{h,1,k} \frac{t_{h1}}{d}}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_{h2}}{t_{h1}} + \left(\frac{t_{h2}}{t_{h1}}\right)^2 \right]} + \beta^3 \left(\frac{t_{h2}}{t_{h1}}\right)^2 - \beta \left(1 + \frac{t_{h2}}{t_{h1}}\right) \right] & (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \frac{t_{h1}}{d}}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,k}}{f_{h,1,k} d t_{h1}^2}} - \beta \right] & (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \frac{t_{h2}}{d}}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,k}}{f_{h,1,k} d t_{h2}^2}} - \beta \right] & (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{h,1,k} d} & (f) \end{cases}$			
β	=	0.3902439	

	$F_{D,k}$	$F_{rp,k}$	$F_{v,k}$				
a	17816	/	17816	N	$k_{rp,1}$	=	0.25
b	9270	/	9270	N	$k_{rp,2}$	=	1
c	5274	2580.3	7855	N			
d	5251	2580.3	7832	N			
e	3833	2580.3	6413	N			
f	2279	2279	4558	N			
$F_{v,k}$	=	4558 N	1schroef				
$F_{v,rd}$	=	4558 N	1 schroef				
$F_{v,rd,verb}$	=	9116 N	2 schroeven				

Verbinding LVL kader met adapter kader volgens prEN 1995-1-1:2025

Gegevens	
Verbindingsmiddel:	
Diameter d:	6.5 mm
d1/d:	0.65
Effectieve diameter d1:	4.225 mm
Diameter schroefkop dhead:	10 mm
Lengte schroefdraad lw:	80 mm
Lengte schroefpunt lp:	6.5 mm
treksterkte $f_{u,k}$:	920 N/mm ²
Terugtrek lengte L_{w2} :	55.5 mm
Multiplex:	
Dichtheid ρ_k :	680 kg/m ³
$t_{h,1} = l_{w1}$	18 mm
β_1	90 °
ϵ_1	90 °
LVL hout:	
karakteristieke dichtheid ρ_k :	480 kg/m ³
lengte schroef in stijl $t_{h,2}$	55.5 mm
β_1	0 °
ϵ_2	0 °
k_{mod}	1
γ_R	1
γ_{M2}	1

Uittreksterkte			
Multiplex:			
$F_{pull,k} = t_1 * d_{head} * 14$	=	2520 N	
$f_{w,k}$	=	4 N/mm ²	
$F_{w,k} = \pi * d * l_w * f_{w,k}$	=	1470 N/mm ²	
LVL:			
k _{screw}	=	8.2	
k _w	=	0.3	
k _{mat}	=	1.0	
k _p	=	0.7	
$f_{w,k} = k_{screw} * k_w * k_{mat} * d^{-0,33} \left(\frac{\rho_k}{350}\right)^{k_p}$	=	1.65 N/mm ²	
$F_{w,k} = \pi * d * l_w * f_{w,k}$	=	1875 N	
As	=	14.02 mm ²	
$F_{t,k} = 0,9 * As * f_{u,k}$	=	11608 N	
$F_{ax,t,d} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{k_{mod}}{\gamma_r} \max\{F_{pul,k}; F_{w,k}\} \\ \frac{F_{t,k}}{\gamma_{M2}} \end{array} \right.$	=	1875 N	

Afschuifsterkte			
$f_{h,1,k} = 0,11(1 - 0,01 * d) * \rho_k$	=	69.94 N/mm ²	
$f_{h,2,k} = \frac{0,082(1 - 0,01 * d) * \rho_k}{(\sin^2 \beta + k_2 \cos^2 \beta) (\sin^2 \epsilon + 2,5 \cos^2 \epsilon)}$	=	14.72 N/mm ²	
k ₂ (Materiaal: LVL-P)	=	1.00	
$M_{y,k} = 0,3 * f_{u,k} * d^{2,6}$	=	11697 Nmm	
$F_{D,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_{h1} d \quad (a) \\ f_{h,2,k} t_{h2} d \quad (b) \\ \frac{f_{h,1,k} t_{h1} d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_{h2}}{t_{h1}} + \left(\frac{t_{h2}}{t_{h1}}\right)^2 \right]} + \beta^3 \left(\frac{t_{h2}}{t_{h1}}\right)^2 - \beta \left(1 + \frac{t_{h2}}{t_{h1}}\right) \right] \quad (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_{h1} d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,k}}{f_{h,1,k} d t_{h1}^2}} - \beta \right] \quad (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_{h2} d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,k}}{f_{h,1,k} d t_{h2}^2}} - \beta \right] \quad (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{h,1,k} d} \quad (f) \end{array} \right.$			
β	=	0.2104813	

	$F_{D,k}$	$F_{rp,k}$	$F_{v,k}$				
a	8183	/	8183	N	$k_{rp,1}$	=	0.25
b	5310	/	5310	N	$k_{rp,2}$	=	1
c	2478	469	2947	N			
d	2333	469	2802	N			
e	2460	469	2928	N			
f	2212	469	2680	N			
$F_{v,k}$	=	2680	N				
k_{mod}	=	1.00					
γ_m	=	1.00					
$F_{v,rd}$	=	2680	N				

Verbinding LVL kader met HEA profiel volgens prEN 1995-1-1:2025

Gegevens:

Diameter d:	6 mm
d1/d:	0.86
Effectieve diameter d1:	5.16 mm
Diameter boutkop dhead:	20.4 mm
ε	90 °
Treksterkte $f_{u,k}$:	600 N/mm ²
LVL hout:	
Karakteristieke dichtheid ρ_k :	480 kg/m ³
Dikte regel $t_{h,1}$	60 mm
k_{mod}	1
γ_R	1
γ_{M2}	1

Uittreksterkte

$F_{pull,k} = d_{head}^2 \begin{cases} 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \\ 70 - 0,8 \cdot d_{head} \text{ voor } \rho_k \geq 730 \end{cases}$	=	6712 N
$F_{w,k}$	=	0 N
As	=	20.91 mm ²
$F_{t,k} = 0,9 \cdot As \cdot f_{u,k}$	=	11292 N
$F_{ax,t,d} = \min \left\{ \frac{k_{mod}}{\gamma_r} \max\{F_{pul,k}; F_{w,k}\} \right.$	=	6712 N
$\left. \frac{F_{t,k}}{\gamma_{M2}} \right\}$	=	11292 N
$F_{ax,t,d}$	=	6712 N
Uittreksterkte voor 2 bouten:		
$F_{ax,t,d,bouten} = 2 \cdot F_{ax,t,d}$	=	13424 N

Afschuifsterkte

$$f_{h,1,k} = \frac{0,082(1 - 0,01 * d) * \rho_k}{k_{mat}} = 37.00 \text{ N/mm}^2$$

$$k_{mat} \text{ (Materiaal: LVL-P)} = 1.00$$

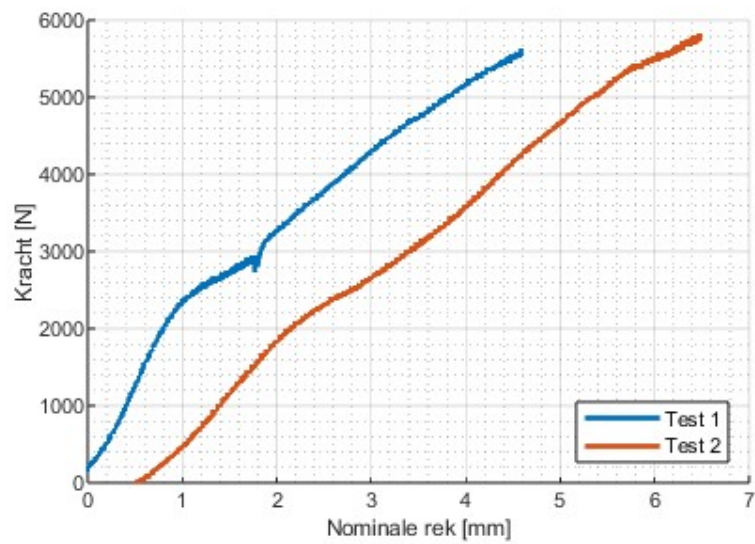
$$M_{y,k} = 0,3 * f_{u,k} * d^{2,6} = 12828 \text{ Nmm}$$

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k} t_1 d \quad (c) \\ f_{h,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4 M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \end{array} \right.$$

	$F_{D,k}$	$F_{rp,k}$	$F_{v,k}$				
c	13319		13319	N	$k_{rp,1}$	=	0.25
d	5817	1454.3	7271	N	$k_{rp,2}$	=	0.25
e	3881	970.32	4852	N			
$F_{v,k}$	=	4852 N	1 bout				
$F_{v,rd}$	=	4852 N	1 bout				
$F_{v,rd,verb}$	=	9703 N	2 bouten				

Bijlage B

Bijlage - Resultaten doordruk test bouten



Figuur B.1: Resultaten doordruk test

Tabel B.1: Stijfheid Doordruk proeven bouten

Test nummer	Stijfheid [N/mm]
1	934
2	937
gemiddelde	935.5

