

Constructieve verbindingen van glas en metaal met ionomeerfolies

Koen De Visscher

Promotoren: prof. dr. ir. Rudy Van Impe, dr. ir.-arch. Jan Belis
Begeleider: dr. ir.-arch. Dieter Callewaert

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Bouwkundige Constructies
Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Academiejaar 2007-2008



Constructieve verbindingen van glas en metaal met ionomeerfolies

Koen De Visscher

Promotoren: prof. dr. ir. Rudy Van Impe, dr. ir.-arch. Jan Belis
Begeleider: dr. ir.-arch. Dieter Callewaert

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Bouwkundige Constructies
Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Academiejaar 2007-2008



Voorwoord

Een experimenteel werk als dit kon niet tot stand komen zonder de hulp en steun van vele mensen. Graag had ik dan ook al deze personen oprecht bedankt.

Vooreerst betuig ik mijn dank aan mijn promotor prof. dr. ir. Rudy Van Impe die mij de mogelijkheid gaf deze scriptie te realiseren. Mijn tweede promotor dr. ir.-arch. Jan Belis en begeleider ir.-arch. Dieter Callewaert wil ik bedanken voor de zeer aangename samenwerking. Zij zullen ongetwijfeld nog prachtige dingen verwezenlijken. Ir. Didier Delincé wil ik dank zeggen voor de hulp tijdens mijn proeven en de gezonde interesse in mijn scriptie. Ook prof. ir. Guy Lagae en dr. ir. Wesley Van Laere verdienen een woord van dank.

Ir. Johanna Louwagie en ir. Thomas Janssens van de vakgroep Textielkunde hielpen mij met de bediening van de trek- en drukdank waarvoor ik hen bedank.

De firma DuPont de Nemours en meer bepaald Jan Scheers ben ik zeer erkentelijk. Ze gaven me de mogelijkheid de proefstukken en prototypen in hun laboratorium te lamineren. Bovendien bleek de hulp van laboranten Jan De Loose en Joris Bohets van onschatbare waarde waarvoor nogmaals dank.

Dennis Elias en Eric Vonck, technische staf van het Laboratorium voor Modelonderzoek, wens ik te danken voor het realiseren van al de metaalelementen. Met technische vragen of problemen kon ik steeds bij hen terecht.

Voor het lassen van de aluminiumstukken betuig ik mijn dank aan Daniël Lauwers van de vakgroep Toegepaste Fysica.

Frank Verwimp, glasblazer in de Facultaire Werkplaats Wetenschappen, wil ik bedanken voor het ter beschikking stellen van de machines waarmee ik de glaselementen kon bewerken

Mijn medestudenten Jonathan Depaepe, Kenneth De Vogel, Delphine Sonck en Eva Verhoeven bedank ik voor de aangename 'glassfeer'.

Ook gaat mijn dankbaarheid naar al mijn vrienden en in het bijzonder mijn familieleden. Bedankt mama, papa, Anneleen en Katelijn voor alles wat jullie de afgelopen vijf jaar voor mij deden. Jullie betekenen heel veel voor mij. Katelijn bedank ik bijzonder voor de hulp bij de montage van de verbindingen en Anneleen, mijn studiemaatje, voor het nalezen, het adviseren en de morele steun. Ook toekomstige schoonbroer Ben verdient een eervolle vermelding.

Last but not least wil ik mijn vriendin Lies bedanken voor haar geduld, begrip, steun en liefde de voorbije jaren.

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

2 juni 2008

Handtekening

Overzicht

Constructieve verbindingen van glas en metaal met ionomeerfolies

door **Koen De Visscher**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Promotoren: prof. dr. ir. Rudy Van Impe, dr. ir.-arch. Jan Belis

Begeleider: ir.-arch. Dieter Callewaert

Universiteit Gent

Vakgroep Bouwkundige Constructies

Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2007-2008

Samenvatting

In deze scriptie wordt een loodrechte verbinding tussen glazen liggers ontworpen waarbij enkel metaal/SGP verbindingen toegepast worden. Door de ontwerpen te realiseren kan eveneens op een gestructureerde en doeltreffende manier de technologie van deze laminaatverbinding onderzocht worden.

In het *eerste hoofdstuk* is een algemene inleiding gegeven over de materialen en het laminatieproces. Het bevat ook een overzicht van de bestaande verbindingen in glas en enkele recente realisaties die relevant zijn voor deze scriptie. Tot slot worden de doelstellingen van deze scriptie geformuleerd.

Het *tweede hoofdstuk* licht het uitgangspunt van de ontwerpen toe: het „All Transparent Pavilion“ (ATP). Tevens wordt in dit hoofdstuk grondig onderzocht wat de mogelijke oorzaken zijn van relatieve verplaatsingen en rotaties tussen de hoofdliggers en de gordingen van het ATP. De slotconclusie van deze analyse luidt dat montagetoleranties met betrekking tot de vrijheidsgraden v (verplaatsing in de lengterichting van de gording) en w (verticale verplaatsing van de gording)

absoluut vereist zijn. Daarnaast is het aangewezen dat de verbinding tijdens de montage een rotatie om de langsas van de hoofdligger toelaat.

Het *derde hoofdstuk* vangt aan met het uitwerken van een basisontwerp. Bij deze verbinding wordt een balkvormig element uit roestvast staal met SGP tegen de hoofdligger gelamineerd. De vraag dringt zich op of deze laminaatverbinding voldoende sterk is. Daarom worden 22 metaalblokjes, identiek als bij het basisontwerp, tegen gehard glas gelamineerd. Er wordt bij al deze proefstukken hevige vloeï van de SGP tussenlaag vastgesteld, ondanks de voorziene mallen. Enkele vacuüm bags scheurden tijdens de autoclaafcyclus. Deze proefstukken worden vervolgens belast met een excentrische drukkracht en hieruit blijkt dat de oppervlakte van de tussenlaag te klein is om aan de belastingen te weerstaan.

In het *vierde hoofdstuk* worden verschillende nieuwe ontwerpen, gebaseerd op het basisontwerp, voorgesteld en de realisatie van twee verbindingen wordt beschreven. Bij beiden is een L-vormig metaalelement tegen de hoofdligger gelamineerd en zijn de gordingen voorzien van ingelamineerde aluminiumelementen. Het blijkt zeer moeilijk nauwkeurige uitsparingen in de middelste glasplaat van de gording te maken. Geen van de insteekelementen is volledig in contact met deze glasplaat, wat glasbreuk veroorzaakt bij één van de prototypen van de gordingen. Het enige geslaagde prototype van de hoofdligger kent hevige vloeï van de tussenlaag. Het hoofdstuk wordt beëindigd met een evaluatie van ondermeer de montage van de gerealiseerde verbindingen.

Het *vijfde hoofdstuk* beschrijft de verfijning van de ontwerpen en de realisatie van vier verbindingen. Een driehoekige vorm van de insteekelementen blijkt veel optimaler. Bij drie van de vier prototypen van de gordingen treedt glasbreuk op in de buitenste glasplaat omdat de uitsparing onderaan in de middelste glasplaat onvoldoende is opgevuld tijdens de autoclaafcyclus. Het verlijmen van de mallen op het glas blijkt zeer efficiënt vloeï te verhinderen bij de prototypen van de hoofdliggers. Tot slot worden opnieuw de gemonteerde verbindingen geëvalueerd.

In een *zesde en laatste hoofdstuk* wordt een samenvatting en besluit gegeven en zijn tevens enkele suggesties voor verder onderzoek geformuleerd.

Trefwoorden: Glas, SGP, Metaal, Lamineren, Verbinding

Metal/ionomer connections in structural glass

Koen De Visscher

Supervisors: Prof. dr. ir. Rudy Van Impe, dr. ir.-arch. Jan Belis, ir.-arch. Dieter Callewaert

Abstract- This article describes the design and realization of a perpendicular joint between glass beams in which glass and metal are connected by ionomer foils (SGP)

Keywords- Glass, SGP, Metal, Lamination, Connection

I. INTRODUCTION

During the past few years, some innovative constructions - like The Apple All Glass Staircases [1] and the Seele Staircase in Gerstofen, Germany [2] - were built, using SGP to connect glass and metal. The metal inserts and laminated-on metal pieces led to strong, transparent connections which seemed to be integrated in the glass itself. Inspired by these constructions, a perpendicular joint between glass beams has been developed. By realizing some prototypes, the technology of metal/ionomer connections has been investigated.

II. STARTING POINTS

The basic assumption has been the „All Transparent Pavilion“ (ATP), designed and realized in 2004 during the Zappi research project at the Faculty of Architecture of the TU Delft [3][4]. The roof of this construction consisted of three main beams and 2 x 7 purlins. These dimensions, including the configuration and loads, have been the starting point of the design. While mounting the purlins at the ATP, some tolerance problems had been met with the joints.

Before starting the design, the author investigated all the possible causes of relative displacements and rotations between main beams and purlins. A difference was made between glass and metal imperfections, mounting faults and lamination faults.

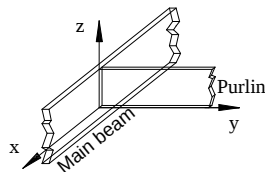


Fig. 1: right hand coordinate system.

This study indicated that during the mounting, tolerances with respect to displacements along the y- and z-axis (Fig. 1) are required. Furthermore, a relative rotation around the x-axis seemed to appear frequently.

III. FIRST STAGE

A. Basic Design

First, a basic design was made (Fig. 2). The purlin, made out of three glass beams laminated together, had a cut-away in the middle glass plate (thickness 12 mm) in which an aluminium insert was laminated. The outer glass plates had a

thickness of 6 mm. The cut-away was larger than the size of the insert to provide for the placement of the purlin on a stainless steel element, which in turn was laminated on the main beam. The beams were connected by an Allen screw, and the tolerances in y- and z-direction were provided by respectively a slot and a mounting screw. The mounting screw guaranteed a constant eccentricity of the load on the stainless steel element. The purlin was also connected on top of the main beam, using the reinforcement of both beams, which resulted in a clamp connection.

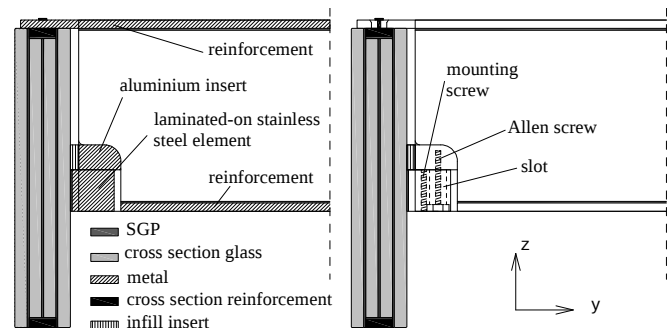


Fig. 2: first stage, basic design.

B. Technology test specimens

Parallel to the basic design, 22 stainless steel/aluminium pieces of 50 x 12 x 50 mm were laminated on a toughened glass plate. A Teflon mould prevented the flow of the liquid SGP-interlayer during the (standard) autoclave process.

Each specimen was packed vacuum, and sharp edges were protected to prevent cracks in the bag (Fig. 3).



Fig. 3: Teflon mould (left), protected specimen (middle) and vacuum packed specimen (right).

All the specimens experienced a lot of flow because of a lack of contact between Teflon and glass. The resulting thickness of the SGP-interlayer was almost nil. The vacuum bag of 3 specimens ripped during the autoclave process, causing air bubbles in the SGP. In this case, the interlayer got a uniform pressure, which is the reason why it didn't flow away.

C. Test results

The specimens were loaded with an eccentric point load (18 mm from the metal edge at the laminated side), which

represented the load situation from the basic design (Fig. 4). The specimens failed by different failure mechanisms: glass failure, adhesive failure between glass and SGP or adhesive failure between metal and SGP.

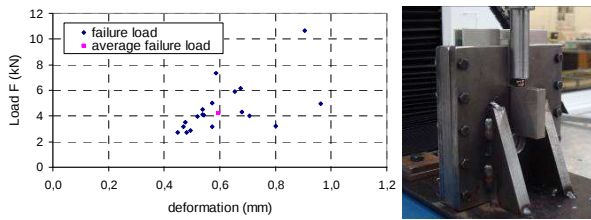


Fig. 4: failure loads and test arrangement

Only 25 % of the specimens seemed strong enough to resist the loads according to the basic design. A larger contact surface between the metal and the glass was thus necessary.

IV. SECOND STAGE

Several new designs, all based on the basic design, have been worked out. Two joints (two purlins and two main beams) have been realised. In these designs an aluminium element with an L-form was laminated on the main beam. The reinforcements were left out and a second aluminium insert was introduced at the top side of the purlin. The first joint worked as a simple support connection. A bond with the top insert prevented tilting. The second joint worked as a clamp connection by connecting the top insert with the top insert of the purlin along the other side of the main beam. This connection happened with a high nut.

The vacuum bag of one prototype of the main beam ripped, and air bubbles in the interlayers occurred. The other prototype of the main beam succeeded but the Teflon bars, taped on the glass, didn't prevent flow. The resulting interlayer thickness was almost nil.

The vacuum bag of one purlin prototype ripped as well, and many air bubbles occurred in the interlayers at the glass edges and near the inserts. The other prototype unfortunately had several glass fractures near the top insert. This was probably caused by the bad fitting insert, which only had two small contact points with the inner glass plate (Fig. 5). As a result, local contact pressure in the autoclave became too high.

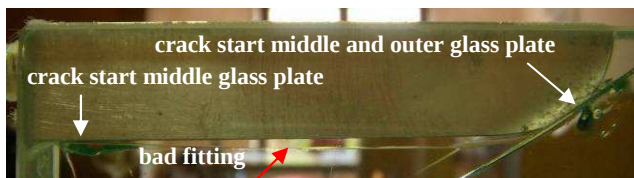


Fig. 5: glass cracked near the bad fitting aluminium insert.

V. THIRD STAGE

During a last stage, the two designs were optimized by making the aluminium inserts and the cut-aways in the inner glass plate triangular. Fig. 6 shows the final design of the clamp connection. The two new designs were realized together with a second version of the designs in the previous stage.

The four prototypes of the main beams got a Teflon/metal mould, glued on the glass. After the autoclave process, the mould could easily be removed. This seemed very efficient,

because quasi no flow occurred. Four almost perfect laminations had been realized.

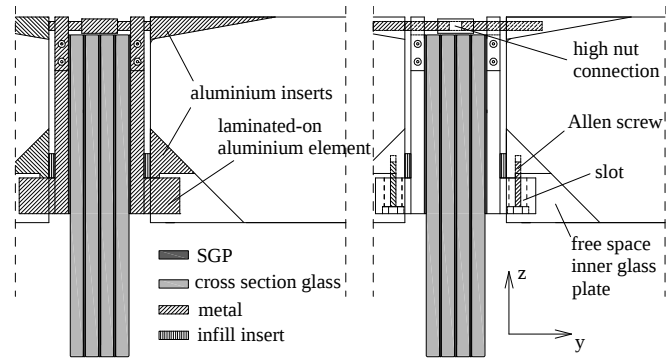


Fig. 6: the final design of the clamp connection.

The triangular cut-aways were much easier to realize and led to perfectly fitting inserts. The lamination of the four prototypes of the purlins succeeded very well. Unfortunately, for three prototypes, glass cracks occurred in the outer glass plate near the cut-away, probably because these were not enough filled during the autoclave process (Fig. 7).



Fig. 7: cracks in the outer glass plate near the cut-away in the inner glass plate (left) and mounted prototypes of the clamp connection design from the second stage (right).

All the realized prototypes were mounted and seemed to fulfil the requirements (Fig. 7).

VI. CONCLUSIONS

Several perpendicular connections between glass beams have been developed during this experimental study. At the same time, a lot of experience with regard to the technology of metal/ionomer connections has been gained. It's clear these connections have great potential.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author gratefully acknowledges the support of DuPont de Nemours represented by Jan Scheers, Joris Bohets and Jan De Loose. Furthermore, gratitude is expressed to my supervisors dr. ir. Rudy Van Impe, dr. ir.-arch. Jan Belis and ir.-arch. Dieter Callewaert.

REFERENCES

- [1] J. O'Callaghan, Apple Computer Inc Retail Store - All Glass Staircase and Bridge, *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 191-194, 2003.
- [2] DuPont, Innovation award for the staircase in laminated safety glass with DuPont™ SentryGlas® Plus interlayers, Internetreference: http://www.dupont.com/safetyglass/ign/35/pdfs/seele_pr.pdf, 2006.
- [3] F. Bos, F. Veer, G. Hobbelman, T. Romein, R. Nijse, J. Belis, C. Louter & E. van Nieuwenhuijzen, Designing and Planning the World's Biggest Experimental Glass Structure, *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 401 – 405, 2005.
- [4] F. A. Veer, 10 Years of Zappi Research, *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 424 – 428, 2005.

Tabel van afkortingen en symbolen

alu	aluminium
A_g	adhesieve breuk tussen SGP en glas
A_m	adhesieve breuk tussen SGP en metaal
A_s	spanningsdoorsnede bout
ATP	All Transparent Pavilion
$f_{0,2}$	strekgrens
F	drukkracht
G_b	glasbreuk
G_k	karakteristiek waarde van het eigengewicht
GO	gording
G_s	loskomen van een glasschil
H	hoogte van een ligger
HL	hoofdligger
I	traagheidsmoment
L	lengte van een ligger
M_d	rekenwaarde van het moment
M_g	bezwijkmoment
M_k	karakteristieke waarde van het moment
ME	metaalelement
n	verticale verplaatsing van de drukstang tijdens de proeven
N	loodrechte kracht tussen metaaldelen
p	uniform gespreide belasting
P	voorspankracht
PVB	polyvinylbutyral
Q_{k1}	karakteristiek waarde van gespreide onderhoudsbelasting
Q_{k2}	karakteristiek waarde van winddruk
RVS	roestvast staal
SG	SentryGlas®
SGP	SentryGlas Plus®
t	dikte t van de SGP tussenlaag na de laminatie
t_{nom}	nominale dikte van een monolithisch of gelamineerd glaselement
T	wrijvingskracht tussen metaaldelen
u	verplaatsing in de x-richting

UGT	uiterste grenstoestand, bezwijktoestand
v	verplaatsing in de y-richting
V	verticale kracht
V_d	rekenwaarde van de dwarskracht
w	verplaatsing in de z-richting
W	horizontale kracht
y_i	hefboomsarm
Z	kantelen om de zwakke as van het metaalelement bij de proefstukken
α	kleine proefstukken: de hoek tussen het bovenvlak van het glasplaatje en het grote zijvlak van het metaalblokje.
β	kleine proefstukken: de hoek tussen het bovenvlak van het glasplaatje en het kleine zijvlak van het metaalblokje
γ	belastingscoëfficiënt
γ_G	veiligheidsfactor vaste belastingen
γ_Q	veiligheidsfactor variabele belastingen
θ	hellingshoek tanden van een vertand oppervlak
μ	wrijvingscoëfficiënt
ρ_{glas}	massadichtheid van glas
ρ_{alu}	massadichtheid van aluminium
φ_x	rotatie om de x-as
φ_y	rotatie om de y-as
φ_z	rotatie om de z-as
χ_1	kleine proefstukken: scheefstand van het glas
χ_2	kleine proefstukken: scheefstand van het metaalelement
ψ_{02}	combinatiecoëfficiënt

Inhoudstabel

HOOFDSTUK 1: INLEIDING	1-1
1.1 HET MATERIAAL.....	1-1
1.1.1 Glas	1-1
1.1.2 Ionomeer tussenlaag (SGP).....	1-2
1.2 HET LAMINATIEPROCES	1-4
1.2.1 Voorbereiding.....	1-4
1.2.2 Vacuüm bag.....	1-4
1.2.3 Autoclaaf.....	1-5
1.3 VERBINDINGEN IN GLAS	1-7
1.3.1 Boutverbindingen.....	1-7
1.3.2 Klemverbindingen	1-13
1.3.3 Contactverbindingen	1-14
1.3.4 Adhesieve verbindingen.....	1-15
1.4 SGP ALS ADHESIEVE VERBINDING.....	1-20
1.4.1 Blauwe voetgangersbrug, Seattle (2002).....	1-20
1.4.2 Apple glazen trap, New York (2003).....	1-21
1.4.3 Seele Glazen trap, Gersthofen (2006).....	1-23
1.4.4 Seele glasbalustrade, Gersthofen (2006).....	1-24
1.4.5 Gecko syteem, Cesena (2006).....	1-24
1.5 DOELSTELLINGEN	1-25
HOOFDSTUK 2: UITGANGSPUNTEN	2-1
2.1 INLEIDING.....	2-1
2.2 HET „ALL TRANSPARENT PAVILION“	2-1
2.2.1 Algemeen	2-1
2.2.2 Dimensies	2-2
2.2.3 Belastingen.....	2-3
2.2.4 Verbinding hoofdliggers - gordingen.....	2-5
2.3 TOLERANTIES.....	2-7
2.3.1 Inleiding.....	2-7
2.3.2 Verplaatsing u.....	2-7
2.3.3 Verplaatsing v.....	2-9
2.3.4 Verplaatsing w.....	2-12

2.3.5	Rotatie φ_x	2-14
2.3.6	Rotatie φ_y	2-17
2.3.7	Rotatie φ_z	2-18
2.3.8	Besluit.....	2-20
HOOFDSTUK 3: FASE I		3-1
3.1	INLEIDING	3-1
3.2	BASISONTWERP	3-1
3.2.1	Algemeen	3-2
3.2.2	Toleranties	3-5
3.2.3	Belastingen.....	3-7
3.3	TECHNOLOGIE PROEFSTUKKEN FASE I	3-8
3.3.1	Dimensionering	3-9
3.3.2	Vorbereidingen.....	3-10
3.3.3	Cyclus I.....	3-12
3.3.4	Cyclus II.....	3-14
3.3.5	Cyclus III.....	3-18
3.3.6	Cyclus IV.....	3-21
3.3.7	Besluit.....	3-23
3.4	EXCENTRISCHE DRUKPROEVEN.....	3-25
3.4.1	Proefopstelling.....	3-25
3.4.2	Proefresultaten.....	3-27
3.4.3	Besluit.....	3-32
3.5	EVALUATIE FASE I.....	3-33
HOOFDSTUK 4: FASE II		4-1
4.1	INLEIDING	4-1
4.2	ONTWERPEN	4-1
4.2.1	Ontwerp T1_02	4-1
4.2.2	Ontwerp T2_01	4-4
4.2.3	Ontwerp T3_01	4-7
4.2.4	Ontwerp T3_02 versie 1	4-11
4.2.5	Ontwerp T3_02 versie 2	4-13
4.2.6	Ontwerp T3_03	4-14
4.3	TECHNOLOGIE PROTOTYPEN FASE II	4-17
4.3.1	Samenstellende onderdelen.....	4-18
4.3.2	Laminatieproces.....	4-23
4.3.3	Analyse van de resultaten	4-26
4.3.4	Besluit.....	4-30
4.4	EVALUATIE FASE II	4-31
4.4.1	Technologie	4-31
4.4.2	Laminatiefouten	4-31
4.4.3	Ontwerp T2_01	4-32
4.4.4	Ontwerp T3_03	4-33

HOOFDSTUK 5: FASE III	5-1
5.1 INLEIDING.....	5-1
5.2 ONTWERPEN	5-1
5.2.1 <i>Ontwerp T2_04</i>	5-1
5.2.2 <i>Ontwerp T3_04</i>	5-3
5.3 TECHNOLOGIE PROTOTYPEN FASE III	5-5
5.3.1 <i>Samenstellende onderdelen</i>	5-5
5.3.2 <i>Laminatieproces</i>	5-7
5.3.3 <i>Analyse van de resultaten</i>	5-11
5.3.4 <i>Besluit</i>	5-16
5.4 EVALUATIE FASE III.....	5-17
5.4.1 <i>Technologie</i>	5-17
5.4.2 <i>Laminatiefouten</i>	5-17
5.4.3 <i>Ontwerp T2_01</i>	5-18
5.4.4 <i>Ontwerp T2_04</i>	5-19
5.4.5 <i>Ontwerp T3_03</i>	5-20
5.4.6 <i>Ontwerp T3_04</i>	5-22
HOOFDSTUK 6: CONCLUSIES	6-1
6.1 SAMENVATTING EN BESLUIT	6-1
6.2 SUGGESTIES VOOR VERDER ONDERZOEK	6-4
BIJLAGE A: PROEFSTUKKEN FASE I	I
CYCLUS I.....	I
CYCLUS II.....	II
CYCLUS III.....	III
CYCLUS IV.....	IV
BIJLAGE B: PROEFOPSTELLING	VII
VERSIE 1.....	VII
VERSIE 2:.....	VIII
BIJLAGE C: PROEFRESULTATEN FASE I	IX
BIJLAGE D: BEPROEFDE PROEFSTUKKEN FASE I.....	X
BIJLAGE E: EVOLUTIE ONTWERP T2_01	XIII
BIJLAGE F: DIMENSIES T2_01 EN T3_03.....	XV
BIJLAGE G: PROTOTYPEN FASE II	XVIII
BIJLAGE H: DIMENSIES T2_04 EN T3_04	XX
BIJLAGE I: PROTOTYPEN FASE III	XXIII
BIBLIOGRAFIE.....	XXVII

HOOFDSTUK 1: Inleiding

Dit inleidende hoofdstuk omvat verschillende zaken. Eerst wordt kort ingegaan op het materiaal glas en de eigenschappen van de tussenlaag SentryGlas® Plus (SGP). Vervolgens wordt een algemene beschrijving gegeven van het laminatieproces. Daarna volgt een overzicht van de tot op heden bestaande verbindingen in glas en een vierde paragraaf licht chronologisch enkele constructies toe waarbij gebruik gemaakt werd van een metaal/SGP verbinding. Tot slot van dit hoofdstuk worden de doelstellingen van dit werk aangehaald.

1.1 Het materiaal

1.1.1 Glas

De meest zuivere glassoort bevat enkel de basismolecule siliciumoxide (SiO_2 , zand) en wordt *kwartsglas* genoemd. Dit type glas is echter zeer moeilijk bewerkbaar en daarom erg duur. Voor het merendeel van de bouwkundige toepassingen wordt *natronkalkglas*¹ gebruikt, een glassoort die veel beter (en goedkoper) verwerkt kan worden. De samenstelling bestaat uit kiezelzand, soda (Na_2O) en kalk (CaO). Vaak worden metaaloxiden toegevoegd om de kleur en mechanische eigenschappen te beïnvloeden.

Vlak glas wordt meestal vervaardigd volgens het *floatprocédé*². Hierbij worden de basisproducten gemengd en bij zeer hoge temperatuur gesmolten. Vervolgens wordt het vloeibaar mengsel in een tinbad geloodst. De bovendrijvende glassmelt wordt op gecontroleerde wijze afgekoeld (uitgegloeid) en versneden tot standaard glasplaten.

Floatglas bezit onvermijdelijk microscheurtjes aan de oppervlakte die ontstaan tijdens het productieproces en toenemen tijdens bewerking en gebruik. Dit is de reden waarom de treksterkte van glas beduidend lager is dan de druksterkte. Rond deze microscheurtjes ontstaan namelijk spanningsconcentraties en wordt de trekspanning enkele grootteordes groter dan de globale trekspanning op het

¹ Engels: *soda-lime glass*, massadichtheid $\pm 2500 \text{ kg/m}^3$.

² 'To float' is engels voor 'drijven'.

glaselement. Om toch een verhoogde treksterkte te realiseren, kan het glas thermisch behandeld worden. Bij *thermisch gehard glas* wordt het glaselement opgewarmd tot een taaivloeibare toestand in een voorspanoven. Vervolgens wordt het met aangeblazen lucht bruusk afgekoeld aan beide plaatzijden. De binnenzone van het glas zal trager afkoelen en krimpen waardoor de buitenoppervlakken samengedrukt en dus ‘voorgespannen’ worden. De dikte van de drukzone is $\pm 0,2$ keer de plaatdikte¹. *Thermisch versterkt glas* wordt op dezelfde manier gemaakt, maar het afkoelen gebeurt langzamer. De mechanische eigenschappen van thermisch versterkt glas zijn beter dan floatglas, maar inferieur aan die van thermisch gehard glas. Het is belangrijk dat de glaselementen vooraf reeds hun definitieve vormgeving kregen, want na het thermisch proces veroorzaakt elke bewerking een verstoring van de spanningstoestand in het glas. In dat geval breekt het volledige glasoppervlak in kleine stukken.

1.1.2 Ionomeer tussenlaag (SGP)

Gelamineerd glas bestaat uit minstens twee platen, waarvan minimaal één uit glas, die over hun gehele oppervlakte aan elkaar bevestigd zijn door middel van een adhesieve tussenlaag. Bij structurele toepassingen biedt gelamineerd glas vooral voordelen op het vlak van veiligheid. Brosse breuken kunnen worden gestopt door de tussenlaag waardoor het element zijn rol zelfs in gescheurde toestand kan blijven vervullen. Sommige tussenlagen leveren ook een bijdrage op vlak van sterkte en stijfheid. Voor een beschrijving van het laminatieproces wordt naar § 1.2 verwezen.

De tussenlagen zijn meestal transparante folies hoewel gietharsen ook gebruikt worden. De meest gebruikte tussenlaag is PVB², een amorfe thermoplast. Het betreft een soepele, lichtdoorlatende, maar niet transparante folie die geproduceerd wordt in een standaarddikte van (veelvouden van) 0,38 mm. Dit materiaal wordt op rollen verhandeld en heeft een maximale breedte van 3,21 m³. Meerdere folies op elkaar kunnen gelijktijdig gelamineerd worden. PVB heeft een visco-elastisch gedrag: de materiaaleigenschappen zijn afhankelijk van de temperatuur en de duur van de belasting.

Begin jaren '90 werd in de VS een nieuwe tussenlaag ontwikkeld door DuPont⁴ onder de naam SentryGlas® (SG). Dit werd toegepast in veiligheidsglas tegen orkanen en vandalisme. Sinds 2002 is in Europa de verbeterde versie op de

¹ Belis J. (2005). *Kipsterkte van monolitische en gelamineerde glazen liggers*. Doctoraatsthesis Faculteit Ingenieurswetenschappen, Gent, p. 2-7.

² Polyvinylbutyral.

³ Bucak O. et al. (2006). Verbund im Glasbau - Neues und Bewährtes. *Stahlbau* 75, p. 531.

⁴ DuPont Glass Laminating Products (World Headquarters), Route 141 & Lancaster Ave., BMP26-2321, Wilmington, DE 19805, USA.

markt, gepromoot onder de naam *SentryGlas® Plus (SGP)*. Dit materiaal is een *ionomeer* en behoort tot de semi-kristalijne termoplasten. SGP heeft een veel grotere sterkte en stijfheid dan de traditionele tussenlagen, vandaar dat het meer en meer voor structurele toepassingen gebruikt wordt. De fabrikant claimt een vijfvoudige treksterkte en een honderdvoudige stijfheid in vergelijking met PVB. In Tabel 1.1 worden richtwaarden voor de nieuwste versie, SGP 5000, weergegeven. Ondanks de verhoogde mechanische eigenschappen blijft het ionomeer een visco-elastisch materiaal.

eigenschap	waarde	eenheid
massadichtheid	950	kg/m ³
elasticiteitsmodulus	300	N/mm ²
treksterkte	34,5	N/mm ²
verlenging bij breuk	400	%
smeltpunt	94	°C
gemiddelde uitzettingscoëfficiënt tussen -20 ° C en 32 °C	(10 à 15) x 10 ⁻⁵	K ⁻¹

Tabel 1.1: Richtwaarden voor materiaaleigenschappen van SGP 5000¹.

SGP wordt in plaatvorm verhandeld met standaarddiktes van 1,52 en 2,28 mm. Wanneer het materiaal in contact komt met lucht, absorbeert het omgevingsvocht. In tegenstelling tot bij PVB is dit proces onomkeerbaar bij SGP: éénmaal het vocht geabsorbeerd werd, blijft het aanwezig in het materiaal en dit kan hechtingsproblemen veroorzaken. Daarom wordt SGP bij de fabricage lucht- en lichtdicht verpakt (Figuur 1.1). Geopende verpakkingen die niet direct gebruikt worden, dienen terug dichtgekleefd te worden bij een relatieve luchtvochtigheid < 35%².



Figuur 1.1: lucht- en lichtdichte verpakking van SGP.

¹ DuPont (2008). DuPont™ SentryGlas® Plus ionoplast interlayer, *Specifying and technical data*, DuPont, p. 1.

² Bucak O. et al., o.c., p. 532.

SGP hecht ook goed met metaal, wat blijkt uit enkele recente toepassingen die in § 1.3 aan bod komen. Dit is het tevens het onderwerp van deze scriptie: constructieve verbindingen tussen glas en metaal met ionomeerfolies (SGP).

1.2 Het laminatieproces

In deze paragraaf wordt beschreven hoe met behulp van SGP een adhesieve verbinding tussen glas en metaal gerealiseerd kan worden. Veel zaken omtrent dit productieprocedé zullen pas in de loop van deze scriptie aan het licht komen, hier gaat het dus om de elementaire zaken die reeds gekend zijn.

1.2.1 Voorbereiding

Het is belangrijk steeds de tinzijde van het glas te gebruiken voor de hechting met SGP. De tinzijde van het glas bezit namelijk meer ionen wat volgens de producent van SGP betere hechtingseigenschappen met zich meebrengt¹. Uiteraard is dit niet mogelijk indien beide zijden van het glas in de verbinding betrokken worden.

Er dient vooraf rekening gehouden te worden met het *vloei-verschijnsel*². In de autoclaaf stijgt de temperatuur namelijk tot 145 °C, waardoor de SGP tussenlaag vloeibaar wordt³. Zonder maatregelen zal het SGP-materiaal wegvloeien door toedoen van de hoge druk in de autoclaaf (cfr. infra). Naast het feit dat dit onesthetisch is, kan het ook nefast zijn voor de sterkte en/of stijfheid. Vloei wordt dus best zo veel mogelijk vermeden door een soort ‘bekisting’ te voorzien rond het SGP⁴.

1.2.2 Vacuüm bag

Wanneer glas gelamineerd wordt met een kunststoffolie wordt het eerst aan een walsprocedé onderworpen (Figuur 1.2). Dit verloopt gewoonlijk in twee stappen met temperaturen van respectievelijk ± 35 °C en ± 70 °C⁵. Het doel van deze ‘voorlaminatie’ is het verwijderen van luchtinsluitingen tussen het glas en de tussenlaag. Tijdens het walsen ontstaat een eerste (lichte, lucht vrije) hechting.

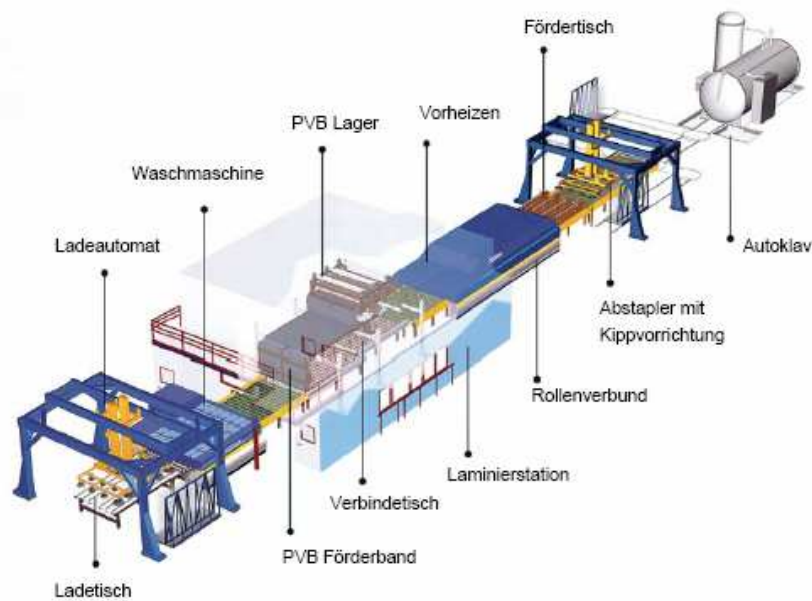
¹ Bij de recentste tussenlaag, SGP 5000 (die gebruikt werd bij alle realisaties in het kader van deze scriptie), is dit probleem volgens de producent van de baan.

² Engels: *flow*

³ O’Callaghan J. (2003). Apple Computer Inc Retail Store - All Glass Staircase and Bridge. *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 192.

⁴ Mihaylov J. (2007). Niet gepubliceerd. ILEK, Universiteit Stuttgart.

⁵ Bucak O. et al., o.c., p. 530.



Figuur 1.2: productieproces gelamineerd (veiligheids)glas¹.

In de automobiellndustrie werd een alternatief ontwikkeld om complexe gekromde vormen (zoals autoruiten) te kunnen lamineren: de *vacuüm bag*. De luchtsluitingen worden verwijderd door het element in een luchtdichte zak vacuüm te verpakken.

Bij het lamineren van metaal ‘op’ glas kan geen gebruik gemaakt worden van het walsprocédé omwille van te grote diktes en oneffenheden. In dat geval wordt de toevlucht genomen tot vacuüm bags. Het walsproces kan wel toegepast worden bij het lamineren van metaal ‘tussen’ glas op voorwaarde dat de dikte overal constant is. Bij uitkragende glasdelen zou door de grote walsdrukken glasbreuk optreden.

1.2.3 Autoclaaf

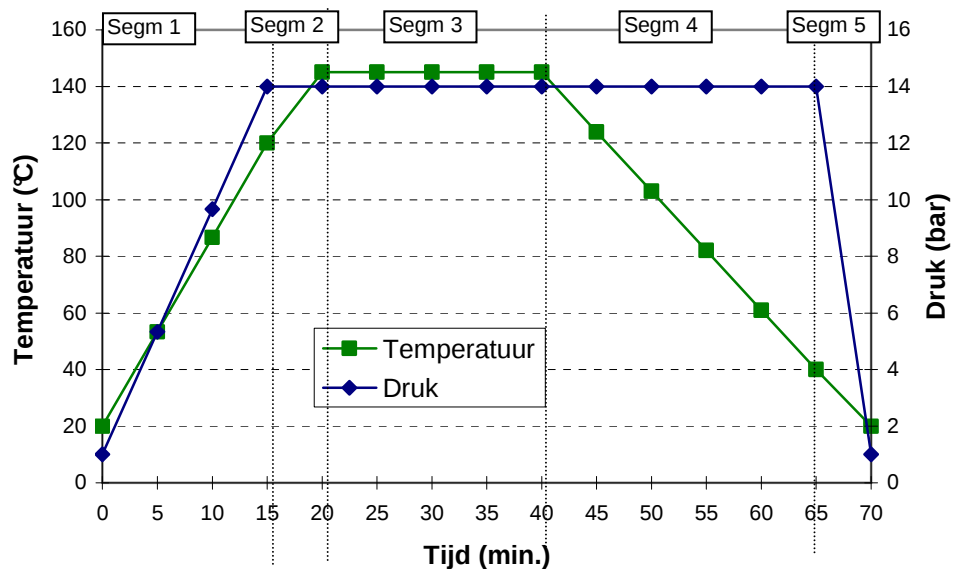
De laatste - en voornaamste - stap in het proces is die waarbij het samenstel in de autoclaaf een druk- en temperatuurcyclus ondergaat. Een autoclaaf is een drukvat waarin druk en temperatuur sterk opgevoerd kunnen worden (Figuur 1.3). Deze toestellen kennen allerhande toepassingen, zo ook het realiseren van laminaatverbindingen tussen monolitische glaselementen. Het lamineren van metaal op en tussen glas gebeurt op dezelfde manier.

¹ Bucak O., Meissner, o.c., p. 26.



Figuur 1.3: autoclaaf.

Figuur 1.4 en Tabel 1.2 bevatten de gegevens van een standaard autoclaafcyclus die 70 minuten duurt. Dit procédé wordt gekenmerkt door vijf segmenten waarbij een segment wordt afgebakend door een wijziging van druk of temperatuur.



Figuur 1.4: druk- en temperatuurschema tijdens een standaard autoclaafcyclus.

In het eerste segment wordt in 15 min. tijd de *druk* lineair opgedreven van de atmosferedruk (1 bar) tot de maximale waarde van 14 bar. Tijdens segmenten 2 (5 min.), 3 (20 min.) en 4 (25 min.) blijft de druk constant op 14 bar. De druk wordt in het laatste segment lineair teruggebracht tot 1 bar. Dit duurt 5 min.

De temperatuur stijgt in het eerste segment lineair van 20 °C (kamertemperatuur) tot 120 °C. In het tweede segment loopt de temperatuur lineair op tot de maximale temperatuur van 145 °C. Segment 3 verloopt bij constante temperatuur. In het vierde segment daalt de temperatuur lineair tot 40 °C en in het laatste segment daalt de temperatuur lineair verder tot 20 °C.

tijd (min)	temperatuur (°C)	druk (bar)
0	20	1
5	53	5
10	87	10
15	120	14
20	145	14
25	145	14
30	145	14
35	145	14
40	145	14
45	124	14
50	103	14
55	82	14
60	61	14
65	40	14
70	20	1

Tabel 1.2: druk en temperatuur tijdens de autoclaafcyclus.

1.3 Verbindingen in glas

Om individuele glaselementen met elkaar te verbinden is steeds een overgangsmateriaal nodig dat verschillende rollen vervult (Bos et al., 2005c):

- Contact vermijden tussen de glaselementen
- Een manier voorzien om het te verbinden met de rest van de structuur of met een andere overgangscomponent
- De nodige toleranties toelaten om te kunnen inspelen op vorm- en opstelfouten
- Verzekeren dat de verbinding zich naargelang de situatie gedraagt als een roloplegging, scharnier of inklemming
- Het kunnen absorberen van schokken om beschadigingen te beperken

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van alle bestaande verbindingstechnieken in glasconstructies. Het onderstaande is voornamelijk gebaseerd op (Nijssse, 2003) en (Wurm, 2007).

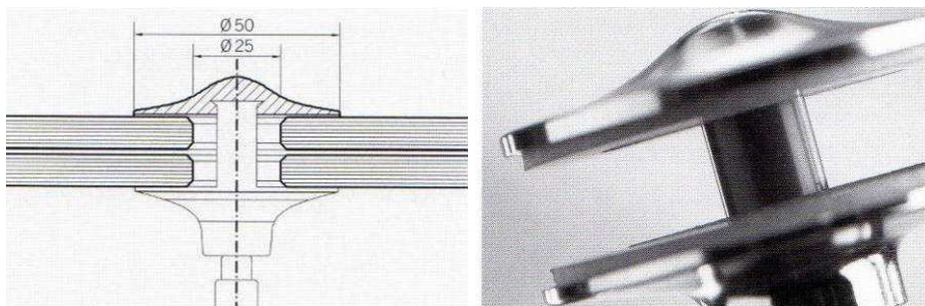
1.3.1 Boutverbindingen

Een boutverbinding vereist steeds één of meerdere gaten in het glaspaneel. De spanningsconcentraties aan de gatranden blijken bij floatglas steeds te groot, vandaar dat deze verbindingstechniek enkel bij thermisch voorgespannen glas wordt toegepast. Er werd recent echter aangetoond dat boutverbindingen bij floatglas niet ondenkbaar zijn (Callewaert, 2006). In wat volgt wordt onderscheid

gemaakt tussen boutverbindingen bij glaspanelen, passende boutverbindingen en voorspanverbindingen.

Boutverbindingen bij glaspanelen

De term 'glaspaneel' wordt aangewend wanneer het glas betreft dat voornamelijk loodrecht op het vlak belast wordt (façades, dakpanelen of vloeren). Uiteraard ondervindt bijvoorbeeld een gevelpaneel ook belastingen in het vlak t.g.v. het eigengewicht. Een eerste mogelijke boutverbinding bij glaspanelen is de knoopverbinding. Deze bestaat uit twee schijfjes die op het glas geklemd worden door een bout (Figuur 1.5). De diameter van de schijfjes kan tot 70 mm zijn. De belastingen loodrecht op het vlak worden overgedragen door contact tussen het glas en de schijfjes. Belastingen in het vlak worden opgevangen door contact tussen de bout en het boorgat.

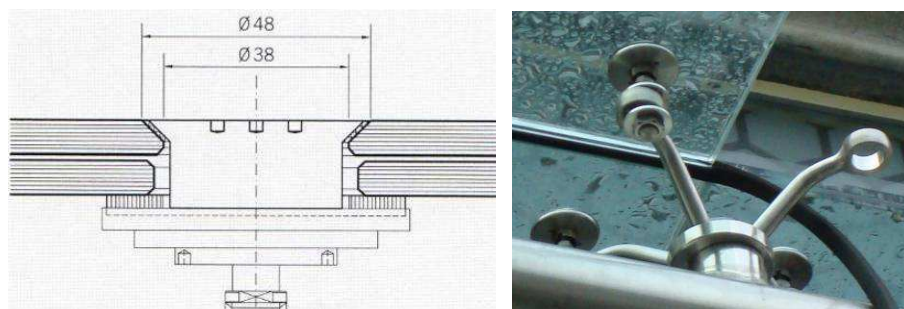


Figuur 1.5: principe knoopverbinding¹.

De assen van de boorgaten in de verschillende monolitische glasplaten van een gelamineerd glaspaneel vallen vrijwel nooit samen. Om een gemiddelde afwijking van ongeveer 2 mm op te kunnen vangen worden de boorgaten groter gemaakt dan nodig. Tijdens de montage wordt dan een snel drogende specie of hars in de holte tussen bout en glas aangebracht. In het geval van gelamineerde glaspanelen kan dit verbindingstype een aanzienlijk restdraagvermogen leveren na breuk. Hoe groter de afmetingen van het glaspaneel en dus ook van de schijfjes, hoe groter het restdraagvermogen.

Een tweede boutverbinding bij glaspanelen is de verzonken boutverbinding. Dit type is opgebouwd uit een soort bout, verzonken in het glaspaneel en een schijfje dat aan de binnenzijde geklemd wordt tegen het glas (Figuur 1.6). Langs de buitenzijde wordt dus een glad oppervlak verkregen.

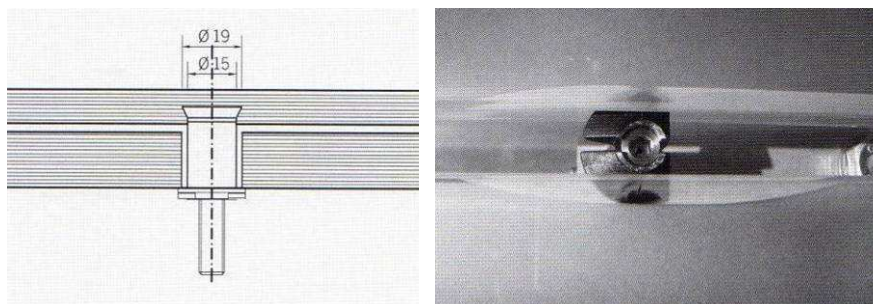
¹ Wurm J. (2007). *Glass Structures - Design and construction of self-supporting skins*. Birkhäuser, Basel, Zwitserland, p. 100.



Figuur 1.6: princepte verzonken boutverbinding¹ (links) en 'Dorma-spider' verbinding aan de luifel van het station Gent-Sint-Pieters in Gent, België (2007) (rechts) (let op de grote ringen die toleranties toelaten tijdens de montage).

Al de belastingen worden overgedragen door een kunststof of aluminium huls tussen het boorgat en de bout. Een nadeel van deze verbinding is het zwakke restdraagvermogen. De kans dat de verbinding uit het glas getrokken wordt is veel groter dan bij een knoopverbinding.

Een laatste mogelijke boutverbinding bij glaspanelen is de ingefreesde ankerverbinding (Figuur 1.7). Dit type verbinding vergt geen volledige doorboring van het glaspaneel en zorgt dus eveneens voor een effen buitenoppervlak.



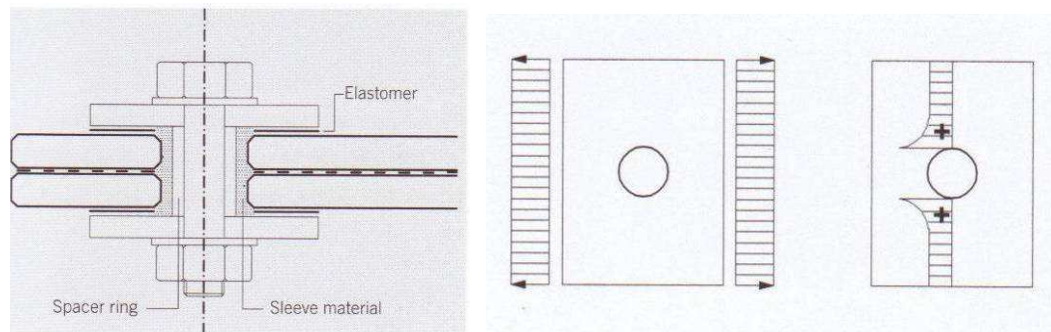
Figuur 1.7: princepte ingefreesde ankerverbinding.

De verbinding heeft gemiddeld een diameter van 20 mm en wordt meestal gebruikt voor enkelvoudige glaspanelen. In het geval van gelamineerde glaspanelen is het restdraagvermogen nog kleiner dan bij een verzonken boutverbinding.

Passende boutverbinding

Passende boutverbindingen worden aangewend bij glaselementen die in het vlak belast worden (wanden, kolommen of liggers). Bij deze verbinding worden alle belastingen als dwarskracht in de bout opgenomen en uitgewisseld met de boorgatrand.

¹ Wurm J., o.c., p. 100.



Figuur 1.8: principe passende boutverbinding (links) en spanningsconcentraties rond het boorgat¹ (rechts).

Rond de bout wordt een geprefabriceerde plastic huls (Figuur 1.8) aangebracht die zich onder belasting aanpast aan de vorm van de boorgatranden. De huls kan zowel van stijve materialen (aluminium of nylon²) als van zachtere materialen (POM³) gemaakt zijn. Het spreekt vanzelf dat een glad en egaal boorgatoppervlak de krachtswerking bevordert en spanningsconcentraties beperkt (Figuur 1.8 rechts). Een uniforme krachtsoverdracht wordt verkregen indien de boorgatdiameter minstens zo groot is als de dikte van de glasplaat. In het geval van gelamineerde glasplaten dient de afwijking tussen de assen van de boorgaten van de monolitische platen zo klein mogelijk te zijn. Figuur 1.9 toont hoe passende bouten aangewend wordt om een verbinding tussen twee glazen vinnen te realiseren. De verbinding vindt plaats in het midden van de overspanning zodat enkel een buigend moment moet opgenomen worden (en geen dwarskracht). Vandaar dat geen diagonale trekkabels aangebracht werden.



Figuur 1.9: glazen dak van het Judenbad in Speyer (1997)⁴ (links) en detail van een passende boutverbinding tussen de glazen liggers (rechts)⁵.

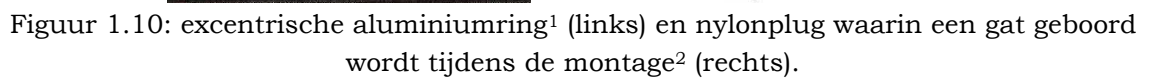
¹ Wurm J., o.c., p. 115.

² Polyacetaat.

³ Polyoxymethylaat.

⁴ http://www.alemannia-judaica.de/speyer_judenbad_synagoge.htm.

⁵ Wurm J., o.c., p. 85.



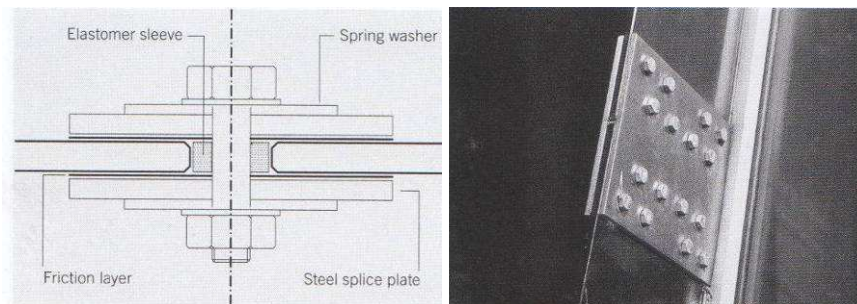
Voorgespannen boutverbinding

Diagram illustrating the failure modes of a bolted joint under different loading conditions:

- Left Joint (Tension):** The joint is subjected to tension, causing the bolts to pull apart. The failure mode is labeled as **Tension**.
- Right Joint (Shear):** The joint is subjected to shear, causing the bolts to shear across their middle. The failure mode is labeled as **Shear**.

³ Wurm J., o.c., p. 109.

Bij een voorgespannen boutverbinding (Figuur 1.12) worden twee platen tegen het glas gedrukt doormiddel van voorgespannen bouten. Een tussenlaag voorkomt rechtstreeks contact tussen glas en metaal. De krachtsoverdracht gebeurt volledig door wrijving tussen plaat, tussenlaag en glas. De sterkte van de verbinding is gerelateerd aan de contactdruk en de wrijvingscoëfficiënten van de contactoppervlakken.



Figuur 1.12: principe voorgespannen boutverbinding¹ (links) en toepassing bij een glasvin van het Educatorium in Utrecht, Nederland (1997)².

Aangezien de krachten niet via de bouten worden doorgegeven, kan men gemakkelijk toleranties toelaten door de boutgaten te overdimensioneren. Bij zeer stijve voorspanplaten ondergaan de bouten geen verplaatsingen en doen zich geen spanningsconcentraties voor rond de boorgaten. Door de vorm aan te passen, kan men spanningsconcentraties aan de rand van de voorspanplaten beperken (Figuur 1.13).



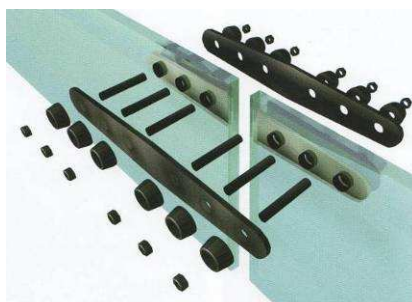
Figuur 1.13: afgeronde voorspanplaten bij de glazen liggers van Wolfson Ziekenhuis van de universiteit van Glasgow, Groot-Brittanië (2002)³.

De oppervlakken van platen en glas dienen volkomen vlak te zijn. De kleinste onvolkomenheid kan door de hoge voorspankrachten een spanningsconcentratie in het glas veroorzaken en tot breuk leiden.

¹ Wurm J., o.c., p. 115.

² Nijssse R., o.c., p. 85.

³ Wurm J., o.c., p. 168.



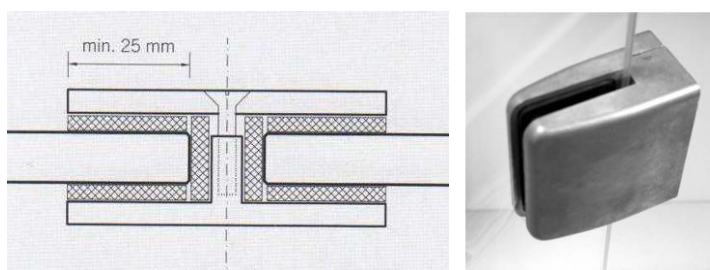
Figuur 1.14: plaatselijke stijvere tussenlaag bij toepassing van een voorgespannen boutverbinding tussen gelamineerde glazen liggers¹.

Een voorgespannen boutverbinding wordt normaal enkel gebruikt voor monolitische geharde glasplaten. Het kruipgedrag van harsen, PVB- en zelfs SGP-tussenlagen verhindert een goede werking van de voorspanverbinding bij gelamineerd glas. De enige mogelijkheid om toch een voorspanverbinding bij gelamineerde liggers te gebruiken, eist dat ter hoogte van de voorspanplaten de tussenlaag vervangen wordt door een stijvere tussenlaag zoals aluminium (Figuur 1.13 en Figuur 1.14).

1.3.2 Klemverbindingen

Dit type verbinding wordt voornamelijk toegepast bij glaspanelen. Het glas worden vastgeklemd aan de randen en/of hoekpunten. Tussen het metaal en het glas bevindt zich steeds een afstandhouder (vb. elastomeer) om rechtstreeks contact te vermijden. Hierdoor zijn steeds toleranties voorhanden. De belastingen loodrecht op het vlak, worden overgedragen door de mechanische koppeling. De belastingen in het vlak worden opgevangen door steunpunten of consoles.

Puntvormige klemverbindingen beperken zich tot monolitische toepassingen. In dat geval wordt het glaspaneel vastgeklemd tussen twee cirkelvormige of rechthoekige metalen schijfjes/plaatjes (Figuur 1.15). De overlappende en -oppervlakte tussen metaal en glas moet minstens respectievelijk 25 mm en 10 cm² bedragen.

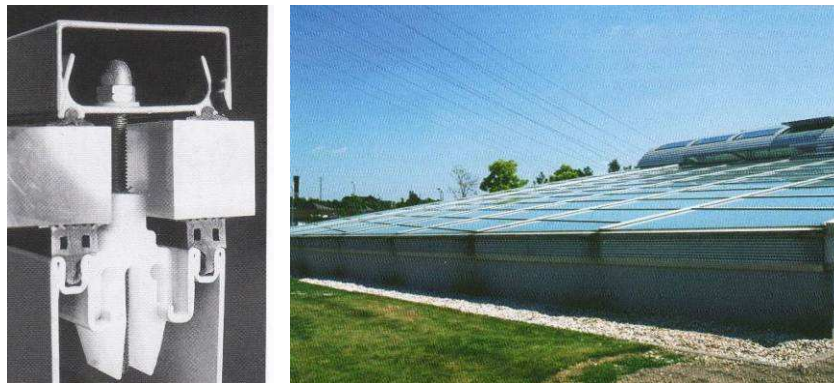


Figuur 1.15: principe puntvormige klemverbinding².

¹ Wurm J., o.c., p. 114.

² Wurm J., o.c., p. 101.

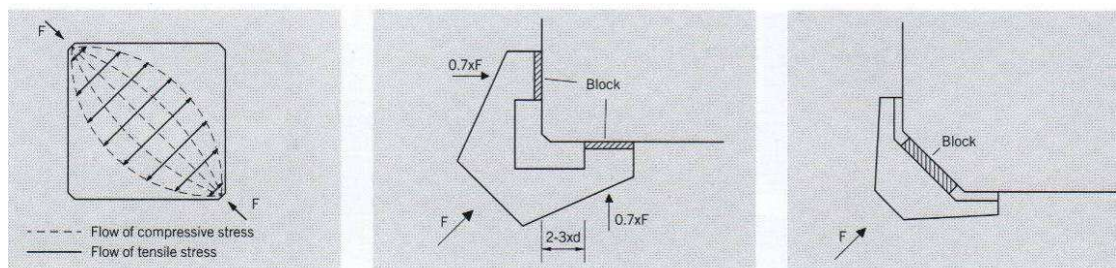
Bij een lijnvormige klemverbinding worden één of meerdere randen van het glaspaneel volledig ingeklemd (Figuur 1.16). Men kan op die manier meteen een waterdichte verbinding creëren.



Figuur 1.16: lineaire klemverbindingen¹.

1.3.3 Contactverbindingen

Een contactverbinding dient drukkrachten over te brengen in het vlak van de glasplaat. Puntvormige contactblokjes moeten minstens tweemaal de dikte van de glasplaat verwijderd van het hoekpunt geplaatst worden om plotse breuk te vermijden (Figuur 1.17). Het afschuinen van de hoekpunten is een andere mogelijkheid.

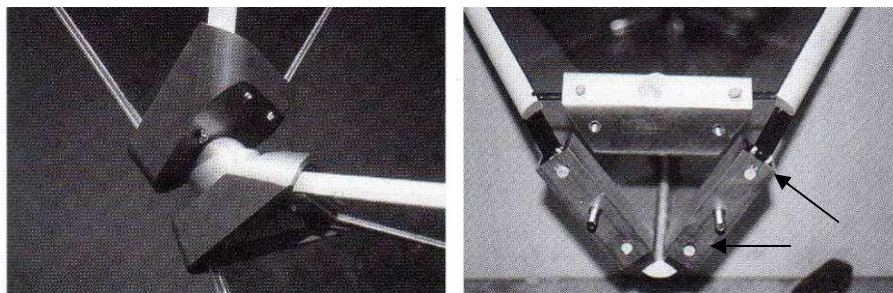


Figuur 1.17: puntvormige contactblokjes om diagonale drukkracht over te dragen².

Als tussenmateriaal worden harde elastische kunststoffen (vb. POM) en hybride injectiespecies gebruikt. Door de hoeveelheden organisch en anorganische bestanddelen te wijzigen, kan de sterkte en elasticiteit gewijzigd worden. De dikte van deze tussenlagen kan oplopen tot 4 mm, wat vormfouten en montageteranties toestaat.

¹ Wurm J., o.c., p. 101.

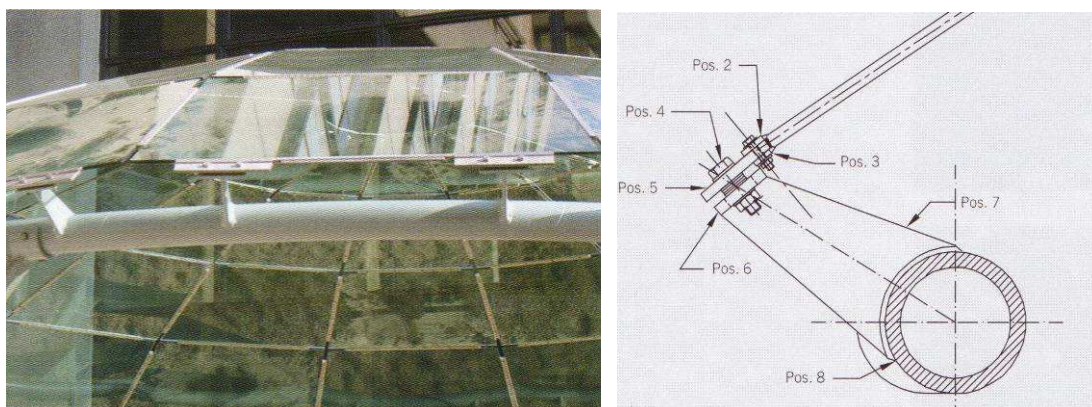
² Wurm J., o.c., p. 107.



Figuur 1.18: puntvormige contactverbindingen met injectiespecie als tussenmateriaal¹.

Wanneer een specie in halfvloeibare toestand wordt aangewend, dienen de verbindingen zodanig geconstrueerd te zijn dat de ruimte tussen de glasrand en de verbinding langs alle kanten afgesloten is. Tevens moeten injectieopeningen en luchtgaatjes voorzien zijn. Op Figuur 1.18 zijn de sporen van het injecteren zichtbaar.

Hoe groter de contactlengte/-oppervlakte, hoe meer de belastingen uitgesmeerd worden en hoe kleiner de spanningspieken. Anderzijds zal bij een grotere contactlengte het risico op een slecht contact toenemen wat alsnog spanningspieken kan veroorzaken. Figuur 1.19 illustreert een lineaire contactverbinding.



Figuur 1.19: lineaire contactverbinding bij de Glaskoepel in Delft, Nederland (2004)².

1.3.4 Adhesieve verbindingen

Een verbindingstechniek met een ruim toepassingsgebied is die waarbij een adhesieve tussenlaag (lijm, hars of folie) wordt aangewend. Bij een *hybride adhesieve verbinding* wordt een connectie tussen glas en metaal gemaakt. Een *adhesieve glasverbinding* bestaat tussen twee of meerdere glaselementen. De sterkte van deze verbindingen wordt bepaald door de overgang tussen de te verbinden onderdelen en de tussenlaag (adhesie) en door de cohesie van de

¹ Wurm J., o.c., p. 113.

² Wurm J., o.c., p. 229.

tussenlaag zelf. Voorts kan de sterkte beïnvloed worden door verschillende factoren: de mechanische eigenschappen van het systeem, het type en de duur van belasting, de vorm en dikte van de tussenlaag, de nauwkeurigheid van uitvoering, de kwaliteit van de te verbinden oppervlakken, omgevingsinvloeden zoals UV-stralen, vochtigheid en temperatuur. De sterkte van een adhesieve tussenlaag kan in de loop van de tijd sterk afnemen ten gevolge van omgevingsinvloeden, ouderdom, krimp, kruip, vermoeiing, enz. De adhesieve verbinding garandeert niet alleen waterdichtheid, ook de krachtsafdracht geschiedt volledig door deze tussenlaag. Figuur 1.20 geeft een overzicht van al de belastingstypes waar een adhesieve verbinding aan onderhevig kan zijn.

Algemeen geldt: hoe groter de dikte van de adhesieve verbinding, hoe groter de elasticiteit, maar hoe kleiner de sterkte¹. Er kan onderscheid gemaakt te worden tussen elastische en brosse tussenlagen.

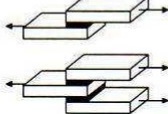
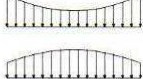
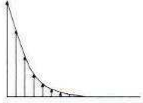
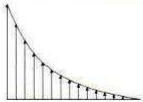
Siliconen en Polyuretanen (PUR) zijn voorbeelden van elastische (soepele) systemen. Hun sterkte bedraagt maximaal 1 N/mm² en de breukrek kan oplopen tot 150 %. Deze flexibiliteit laat de nodige toleranties in de verbinding toe. De tussenlagen zijn gemiddeld 5 mm dik, wat een uniforme spanningsverdeling in de hand werkt (Figuur 1.21 links). Bij elastische verbindingen worden dynamische belastingen meer gedempt dan in het geval van harde tussenlagen. Bovendien wordt ook geluidsoverdracht tussen de componenten gedempt².

Epoxyharsen en acrylaten zijn voorbeelden van harde tussenlagen. In tegenstelling tot de soepele verbindingen bezitten zij een grote sterkte, maar is de breukrek zeer klein wat resulteert in een brosse breuk zonder waarschuwing. De spanningsverdeling is niet uniform wat het risico op nadelige spanningsconcentraties vergroot (Figuur 1.21 rechts). De diktes van deze tussenlagen zijn gemiddeld 0,1 à 0,5 mm, hoewel ook groter diktes voorkomen zoals het geval is bij de glazen schaal die in 2003 gebouwd werd aan de Universiteit van Stuttgart³. Daar werden epoxyvoegen van 10 mm gebruikt.

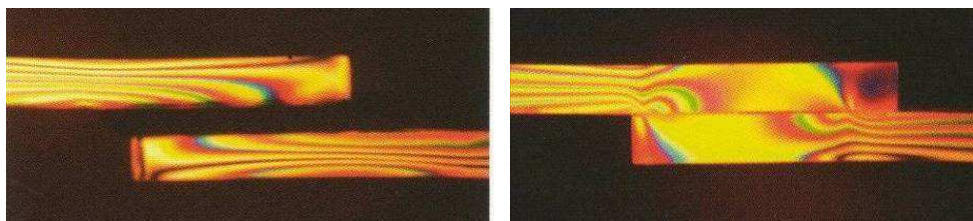
¹ Weller B. & Tasche S. (2005). Adhesive Fixing in Glass Construction. *Proceedings of Glass Processing Days*, p.267.

² Wurm J., o.c., p. 88.

³ Wurm J., o.c., p. 228.

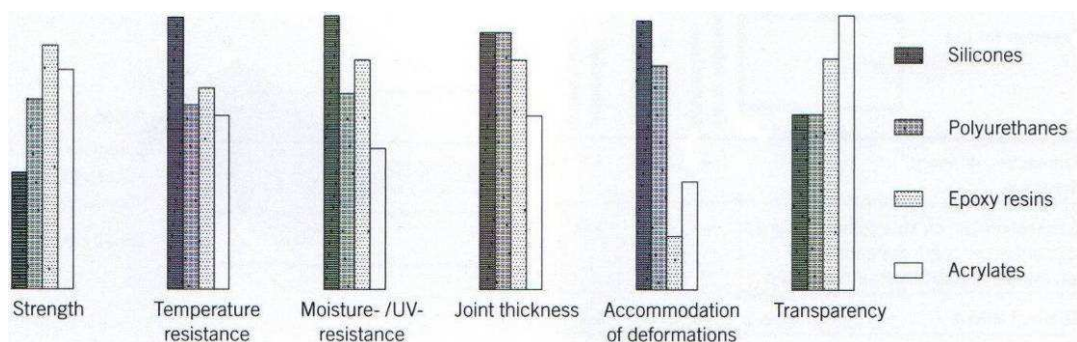
Belastingstype	Kleine krachten	Grote krachten	Vorm spanningsverdeling
Schuifkracht			
Trekkracht			
Drukkracht			
Pelkracht			
Scheurkracht			

Figuur 1.20: belastingstypes bij adhesieve verbindingen¹.



Figuur 1.21: spanningsverdeling in een elastische (links) en harde (rechts) tussenlaag².

In Figuur 1.22 wordt een kwalitatieve vergelijking gemaakt tussen soepele (siliconen en polyuretanen) en harde (epoxyharsen en acrylaten) tussenlagen.



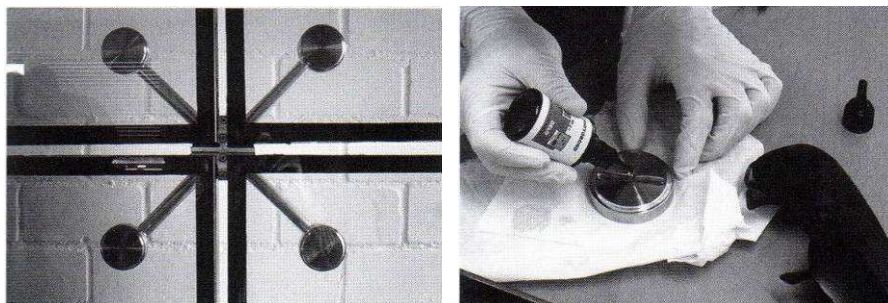
Figuur 1.22: kwalitatieve vergelijking adhesieve systemen¹.

¹ Wurm J., o.c., p. 89.

² Wurm J., o.c., p. 87.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen puntvormige en lineaire adhesieve verbindingen.

Een puntvormige adhesieve verbinding vermijdt boorgaten en de bijhorende spanningspieken (Figuur 1.23). Het nadeel is dat voor verticale glaspanelen bijkomende voorzieningen nodig zijn om het eigengewicht op te vangen en een zeker restdraagvermogen te garanderen. Deze verbinding is doorgaans minder geschikt voor glaspanelen die als dakbedekking fungeren omwille van het minieme restdraagvermogen. De sterkte van de verbinding hangt ondermeer af van de dikte en grootte van het verbindingsplaatje.



Figuur 1.23: puntvormige adhesieve verbinding².

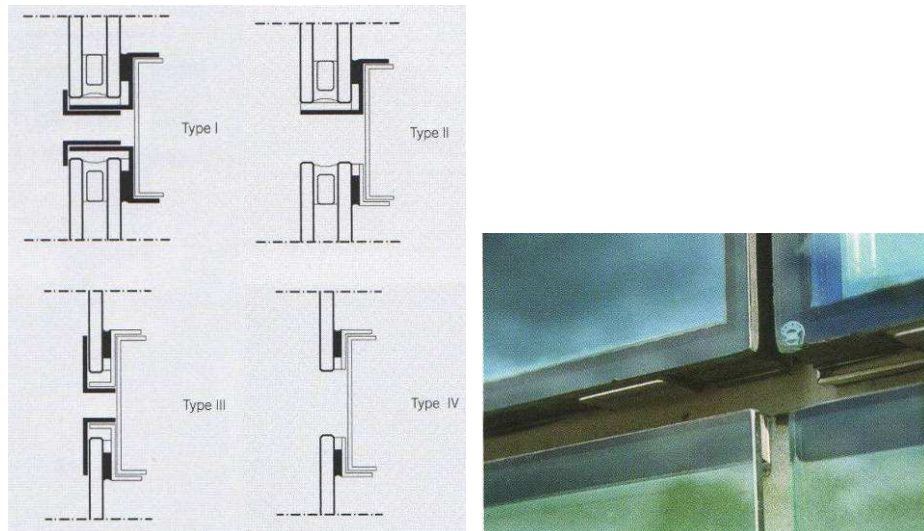
Lineaire adhesieve verbindingen worden o.a. gebruikt in waterdichte glasfaçades, ook wel *structural sealant glazing (SSG)* genoemd. In Europa wordt SSG gereguleerd (ETAG 002). Deze richtlijnen beperken de levensduur van de constructie tot 25 jaar en zijn gebaseerd op siliconen als adhesieve tussenlaag³. In deel 1 van de ETAG worden 4 verbindingstypes voorgesteld, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen de manier van krachtsoverdracht⁴ (Figuur 1.24).

¹ Wurm J., o.c., p. 88.

² Wurm J., o.c., p. 103.

³ ETAG 002 (1999). Guideline for European technical approval for Structural Sealant Glazing Systems (SSGS) - Part 1: Supported and unsupported systems. EOTA, p. 15.

⁴ ETAG 002, o.c., p. 6.



Figuur 1.24: types glasfaçades volgens (ETAG 002) (links) en toepassing type II (rechts) ¹.

Types I en III zijn voorzien van een extra verticaal plaatje om de veiligheid te verzekeren in geval van breuk. De adhesieve verbinding in types I en II neemt enkel de belasting loodrecht op het vlak op, het eigengewicht wordt overgedragen door een console. Figuur 1.24 illustreert type II. Bij types III en IV wordt eveneens het eigengewicht opgevangen door de tussenlaag. Deze laatste types worden slechts toegepast in het geval van één monolitische glasplaat.

In Figuur 1.25 wordt een andere toepassing afgebeeld waarbij een glazen vloerpaneel op een glazen ligger gekleefd wordt, gebruik makend van een adhesieve siliconenstrip.



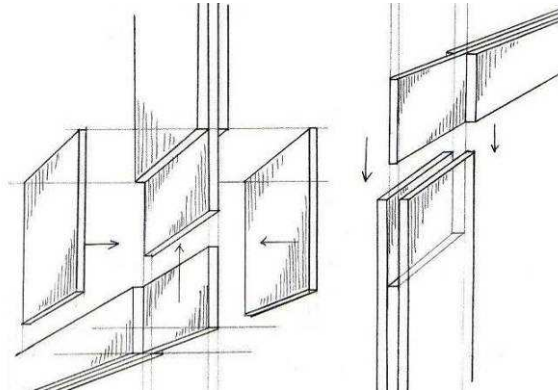
Figuur 1.25: lineaire adhesieve verbinding tussen liggers en vloerplaat bij de glazen voetbrug in Rotterdam, Nederland (1994)².

Tenslotte kunnen ook oppervlakken doormiddel van een adhesieve verbinding met elkaar verbonden worden. Meestal betreffen dit adhesieve glasverbindingen,

¹ Wurm J., o.c., p. 102.

² Nijssse R., o.c., p. 28.

zoals in Figuur 1.26 geïllustreerd wordt. De grote transparantie die op die manier verkregen wordt, is één van de grote troeven.



Figuur 1.26: adhesieve verbinding met acrylaat tussen glazen kolom en ligger¹.

Een recente ontwikkeling is het gebruik van SGP als adhesieve tussenlaag. In de volgende paragraaf worden enkele van deze toepassingen beschreven.

1.4 SGP als adhesieve verbinding

1.4.1 Blauwe voetgangersbrug, Seattle (2002)²

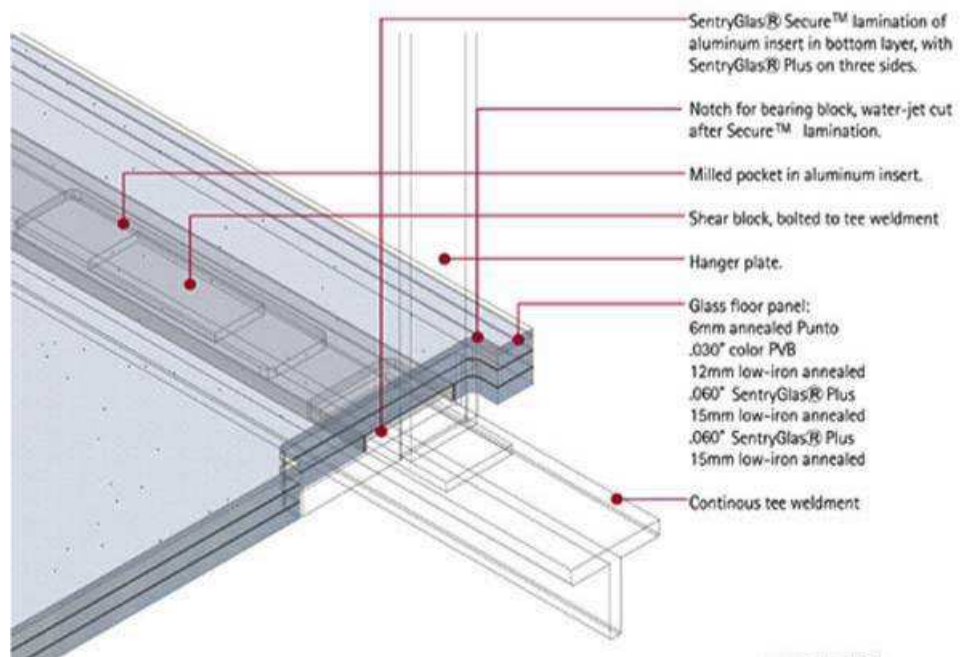
In Seattle werd een 20 m lange voetgangersbrug geconstrueerd in de inkomhal van het gemeentehuis (Figuur 1.27). Het brugdek (2,5 m breed) bestaat uit blauwe gelamineerde glaspanelen (SGP) die steunen op twee stalen rails, die op hun beurt werden opgehangen aan de dakconstructie.



Figuur 1.27: Blauwe voetgangersbrug in het gemeentehuis van Seattle, VS, ontwerp: James Carpenter Design Associates (2002) en detail van een ingelamineerd aluminium U-profiel.

¹ Nijssse R., o.c., p. 80.

² DuPont (2003). Carpenter Blue Glass Passage resembles “a transposed slice of water” thanks to new SentryGlas Secure™ technology. Internetreferentie: <http://www.dupont.com/safetyglass/lgn/stories/2601.html>.



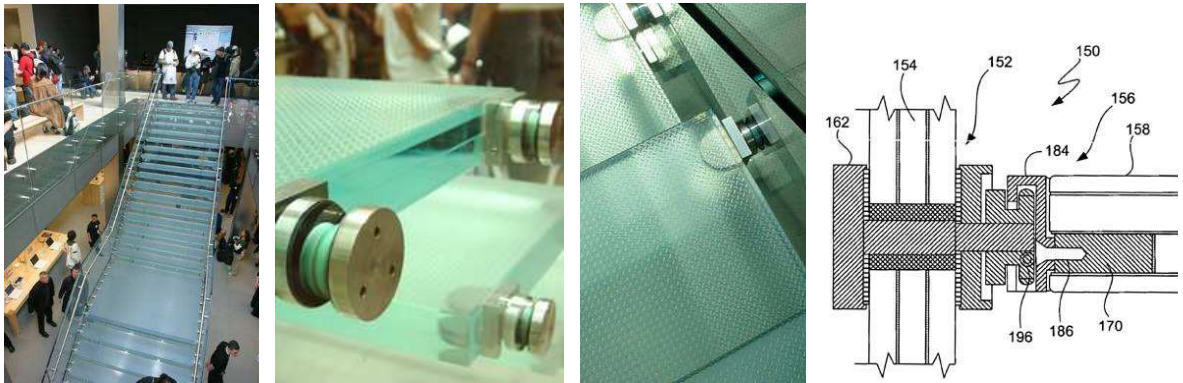
Figuur 1.28: principeschets van een ingelamineerd aluminiumprofiel bij de Blue Glass Passage in Seattle.

Aan de onderzijde van de glaspanelen werd aan weerszijden een aluminium U-profiel ingelamineerd met behulp van een SGP tussenlaag en het geheel werd dan over de rails bevestigd (Figuur 1.28). Op die manier werkten al de individuele glaspanelen samen als één stijve laterale balk. Deze samenwerking was essentieel om aan laterale, gravitaire en seismische belastingen te weerstaan.

Door de aluminiumprofielen meteen in de glaspanelen te lamineren werd zowel de complexiteit, de uitvoeringstijd als de totale kost van het project gereduceerd. Gedetailleerde testreeksen wezen uit dat de verbinding in alle opzichten voldoet. Ondermeer het afpellen, ten gevolge van het krommen van de glaspanelen onder belasting van voetgangers, werd uitvoerig getest.

1.4.2 Apple glazen trap, New York (2003)

Tussen 2001 en 2005 werden door Apple een reeks glazen trappen gebouwd in de winkelpanden in New York, Chicago, San Francisco, Los Angeles, Tokyo, Osaka, Nagoya en Londen (O' Callaghan, 2005). Figuur 1.29 beeldt de trap in New York af. Deze trap is 10 m lang, 4,6 m hoog en 2,45 m breed (O' Callaghan, 2003). Glazen wanden die meteen als balustrade fungeren, vangen de belastingen van de traptreden op. Figuur 1.29 bevat eveneens enkele details van de verbinding tussen glaswand en traptreden.



Figuur 1.29: glazen trap in de het Apple winkelpand te New York, VS, ontwerp James O' Callaghan (2003)¹ en details van de verbindingen aan de traptreden².

De traptreden zijn gelamineerde glaspanelen (SGP) die bestaan uit 4 monolitische glasplaten. Aan de vier hoekpunten van de trede werd ter hoogte van de 3^e monolitische glasplaat een metalen puck ingelamineerd (n° 170 op Figuur 1.29). Deze puck heeft een halfronde vorm, voornamelijk om een geleidelijke krachtsoverdracht te bewerkstelligen en zo spanningspieken te vermijden. Er werd onderzocht welke metaalsoorten het meest geschikt waren om in te lamineren: staal, roestvrij staal, aluminium of titanium. Tests wezen uit dat materialen met thermische eigenschappen dicht tegen die van glas het best aangewend worden voor deze toepassing. Bij te grote verschillen in thermische eigenschappen brak het glas ten gevolge van een ongelijkmatige afkoeling (en dus krimp) na het laminatieproces in de autoclaaf. Titanium bleek uiteindelijk het meest geschikt.

Tegen de ingelamineerde schijfjes werd een metalen zadelstuk bevestigd (n° 184 en 186 op Figuur 1.29), dat op zijn beurt bevestigd werd aan een boutsysteem door de glaswand (n° 162 op Figuur 1.29). Alle andere metaalelementen werden uit roestvrij staal vervaardigd.

Het inlamineren van metaalonderdelen kende heel wat voordelen. Vooreerst diende geen staalframe rond de glastreden aangebracht te worden om ze tegen de glaswand te bevestigen. Tevens moet men geen gaten boren in de treden en bovendien wordt een volkomen glad bovenvlak verkregen. Bij breuk bezitten de treden een restdraagvermogen omdat de SGP tussenlagen, die bevestigd zijn aan de 'pucken', het geheel samenhouden.

¹ http://www.ifoapplestore.com/stores/glass_staircase.html.

² O'Callaghan J. (2003). Apple Computer Inc Retail Store - All Glass Staircase and Bridge. *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 193.

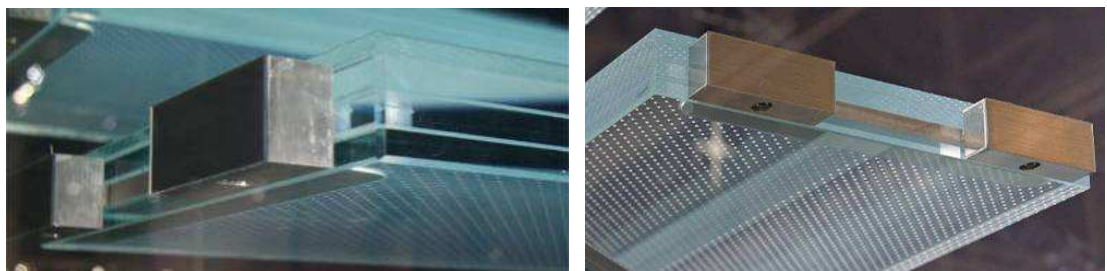
1.4.3 Seele Glazen trap, Gersthofen (2006)¹

Tijdens Glasstec 2006 in Düsseldorf pakte glasfabrikant Seele GmbH & Co.KG (Gersthofen) uit met een glazen trap waarbij voor het eerst geen boorgaten gebruikt werden (Figuur 1.30). De trap heeft een lengte van 8,5 m, de treden meten 1,4 bij 0,3 m.



Figuur 1.30: glazen trap van Seele GmbH & Co.KG in Gersthofen, Duitsland (2006).

Twee glazen liggers vangen de belastingen van de treden op en dienen tevens als balustrade (Figuur 1.30). Per trede werden aan elke zijde tegen de glaswand twee metaalblokjes gelamineerd met behulp van SGP (Figuur 1.31). Eén metaalblokjes meet slechts 40 mm bij 100 mm en bestaat uit roestvrij staal. De blokjes werden met elkaar verbonden doormiddel van een soort uitkragende lip. Op deze lip plaatste men de glastreden, die op hun beurt aan de onderzijde voorzien zijn van een ingelamineerd metaalstuk. Een bout langs de onderzijde van de trede, verbond de twee metaalonderdelen. Al het metaal bestaat uit roestvrij staal.



Figuur 1.31: verbindingdetails bij de glazen trap van Seele.

¹ DuPont (2006). Innovation award for the staircase in laminated safety glass with DuPont™ SentryGlas® Plus interlayers. Internetreferentie: http://www.dupont.com/safetyglass/lgn/35/pdfs/seele_pr.pdf.

Elke traptrede werd ontworpen om een totale belasting van 300 kg te dragen. Tests wezen uit dat de verbindingen voldoende sterktereserve bezitten. De sterkteafname ten gevolge van ouderdom, vocht, temperatuurswisselingen en UV-straling bleek zeer klein te zijn.

De uiterst kleine verbindingen creëren een maximale transparantie en lichtimpressie. Bovendien kon men alle glaselementen inclusief op- of ingelamineerde metaalstukken in één laminatiecyclus lamineren.

1.4.4 Seele glasbalustrade, Gersthofen (2006)¹

In het hoofdkantoor van Seele GmbH & Co.KG in Duitsland vinden we nog een toepassing van een laminaatverbinding tussen metaal en glas met behulp van SGP. Het betreft een 40 m lange glasbalustrade opgebouwd uit individuele glaspanelen van 2 m breed en 1,2 m hoog (Figuur 1.32). De onderste 30 cm werd telkens gelamineerd tegen een staalplaat. Op die manier wordt een combinatie van schuif- en trekspanningen rechtstreeks door de adhesieve verbinding opgevangen. Extra aandacht werd gegeven aan de ruwheid van het staaloppervlak om een betere hechting te bewerkstelligen. Ook de veiligheid van de balustrade tegen schokbelastingen werd grondig getest en goed bevonden.



Figuur 1.32: glasbalustrade in het hoofdkantoor van Seele te Gersthofen, Duitsland (2006).

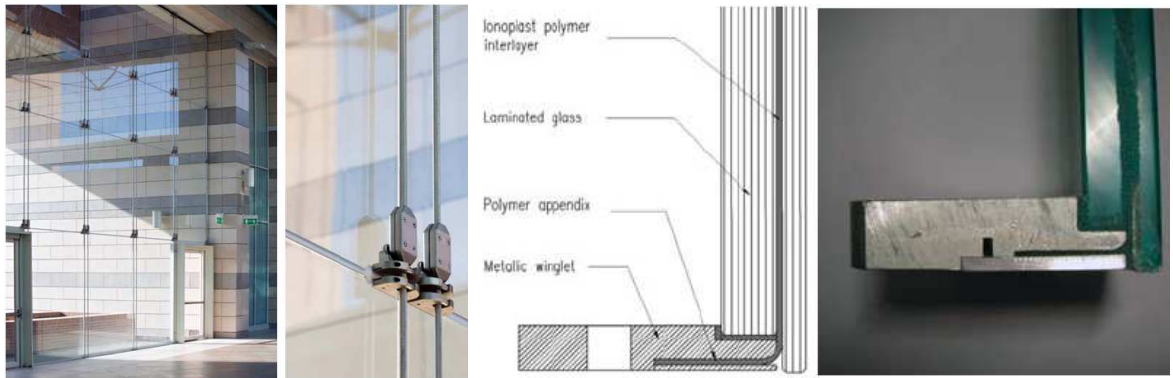
1.4.5 Gecko systeem, Cesena (2006)²

Tot slot een toepassing uit Italië waar recent een glasfaçade geconstrueerd werd, gebruik makend van het Gecko systeem (Figuur 1.33). Op de vier

¹ Dupont (2007). SentryGlas® Plus permits non-positive connections in balustrade design. *Laminated Glass News* 36, p.1

² Royer-Carfagni G. & Silvestri M. (2007). New prospects in frameless glazing technology: the Gecko system. *Proceedings of Glass Performance Days*, p. 145-150

hoekpunten van een gelamineerd glaspaneel werd een metaalelement bevestigd (dit is de link met de gekko, een soort hagedis).



Figuur 1.33: Gecko-systeem in een glasfaçade te Cesena, Italië, ontwerp: Teleya (2006).

Bijzonder aan deze verbinding was het feit dat de SGP tussenlaag aan de uiteinden van de glasplaat uitkraagde, in een hoek van 90° gebogen werd en gelamineerd werd aan het metaal. Tussen het metaalelement en de zijkant van de binnenste monolitische glasplaat werd eveneens SGP geplaatst wat een extra verbinding opleverde. Men verkreeg met deze verbinding een maximale transparantie en lichtinval, een glad buitenoppervlak en minimale afmetingen van de verbindingen. Ook bezitten de glaspanelen een zeker restdraagvermogen aangezien bij breuk het glas kan samengehouden worden door de tussenlaag, die op haar beurt rechtstreeks bevestigd is aan de nevenconstructie.

1.5 Doelstellingen

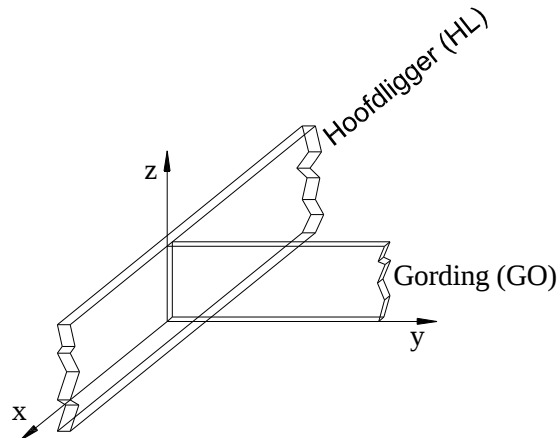
Deze scriptie beoogt meerdere doelstellingen. De hoofddoelstelling bestaat erin kennis en ervaring op te doen over de technologie van laminaatverbindingen tussen metaal en glas met behulp van SGP. Met 'technologie' wordt algemeen 'het tot stand komen' bedoeld. Een verbinding tussen metaal en glas met behulp van SGP werd tot op heden zelden gerealiseerd en er is quasi geen informatie voorhanden. Er dient dus experimenteel onderzocht te worden hoe deze laminaten gemaakt kunnen worden. Daarom worden in het kader van dit werk verschillende proefstukken/prototypen gelamineerd. Meerdere problemen zullen zich opdringen en stelselmatig zullen oplossingen gezocht en uitgetoet worden.

Om de technologie van laminaatverbindingen tussen metaal en glas gestructureerd en doeltreffend te kunnen onderzoeken, wordt geopteerd om dit te doen aan de hand van een specifieke verbinding. Er zal een loodrechte verbinding tussen glazen liggers¹ ontworpen worden waarbij gebruik gemaakt wordt van het

¹ Voortaan wordt dit een 'T-verbinding' genoemd, refererend naar de T-vorm in planzicht.

lamineren van metaal op en tussen glaselementen met behulp van SGP. Belangrijke aandachtspunten bij dit ontwerp zullen zijn: de sterkte, de transparantie en mogelijkheden om bepaalde toleranties op te vangen. Het ontwerp en de optimalisatie van deze T-verbinding is meteen de tweede doelstelling van deze scriptie. Door de ontwerpen te realiseren, wordt de eerste doelstelling van dit eindwerk nagestreefd. Het ontwerpen en realiseren van de T-verbinding zal in verschillende fasen verlopen.

In wat volgt wordt volgend rechtshandig assenkruis gebruikt met betrekking tot de T-verbinding:



Figuur 1.34: rechtshandig assenstelsel T-verbinding.

HOOFDSTUK 2: Uitgangspunten

2.1 Inleiding

De inspiratie voor het ontwerp van de T-verbinding wordt gevonden bij de eerder gerealiseerde constructies met SGP als adhesieve verbinding tussen metaal en glas (cfr. supra).

Om deze verbinding echter gefundeerd te kunnen ontwerpen en dimensioneren is het aangewezen te beschikken over realistische belastingen. Daarom wordt uitgegaan van een concrete situatie waarbij afmetingen van hoofdliggers en gordingen bepaald zijn evenals tussenafstanden en dakbelastingen. Het „All Transparent Pavilion“ (ATP) dat in 2004 in het kader van het Zappi onderzoeksproject werd gerealiseerd aan de Technische Universiteit Delft, zal als uitgangspunt dienen tijdens het ontwerp van de verbinding (Bos et al., 2005a; Bos et al., 2005b; Veer, 2005).

2.2 Het „All Transparent Pavilion“

2.2.1 Algemeen

In 1995 werd het Zappi onderzoeksproject opgestart aan de Faculteit Architectuur van de Technische Universiteit Delft. De hoofddoelstellingen waren (Bos et al., 2005b):

- Methoden ontwikkelen voor het ontwerp van transparante constructie-elementen met veilig bezwijkgedrag
- De ontwerpmogelijkheden vergroten van transparante structuren

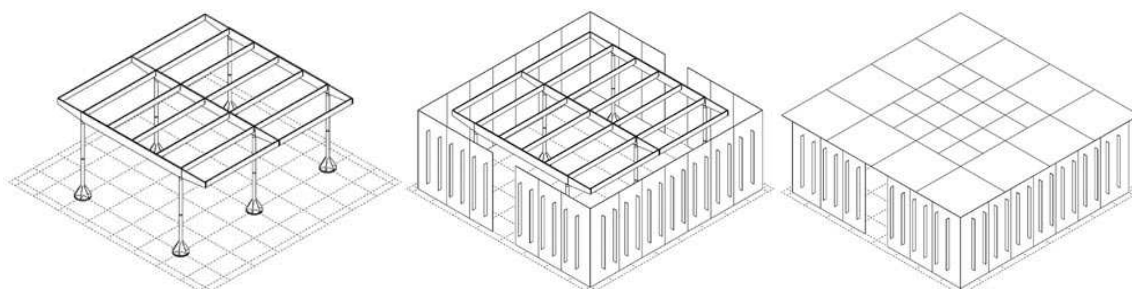
Tijdens dit tienjarig project lag de nadruk op het ontwikkelen van structurele componenten en het materiaalonderzoek naar de eigenschappen van glas. In 2004 werden de ontwikkelde componenten toegepast in een complete structuur: het „All Transparent Pavilion“ (Figuur 2.1). Dit liet toe te onderzoeken welke de specifieke problemen waren tijdens de toepassing in een constructie.



Figuur 2.1: het „All Transparent Pavilion“¹.

2.2.2 Dimensies

Het ATP is opgebouwd uit drie π -vormige portalen die zorgen voor de verticale krachtafdracht (Figuur 2.2 links). Een portaal bestaat uit twee glazen kolommen van 1,5 m hoog die ondersteund worden door een metalen voet ($\pm 1,7$ m hoog). De kolommen zijn verbonden door een 7,2 m lange hoofdligger die aan beide zijden 1,2 m uitkraagt. De hoofdligger kent in de middenoverspanning een hoogte van 385 mm en bestaat er uit vier verlijmde monolithische glasplaten van 15 mm dik (Louter et al., 2005). De uitkragende delen zijn opgebouwd uit twee verlijmde monolithische glasplaten van 15 mm en de hoogte neemt af van 385 mm tot 230 mm aan de uiteinden. Aan de boven- en onderzijde van de hoofdligger wordt een roestvrij stalen kokerprofieltje ingelijmd. Deze fungeren als onder- en bovenwapening en zijn verzonken in de middelste twee glasplaten (Figuur 2.3).

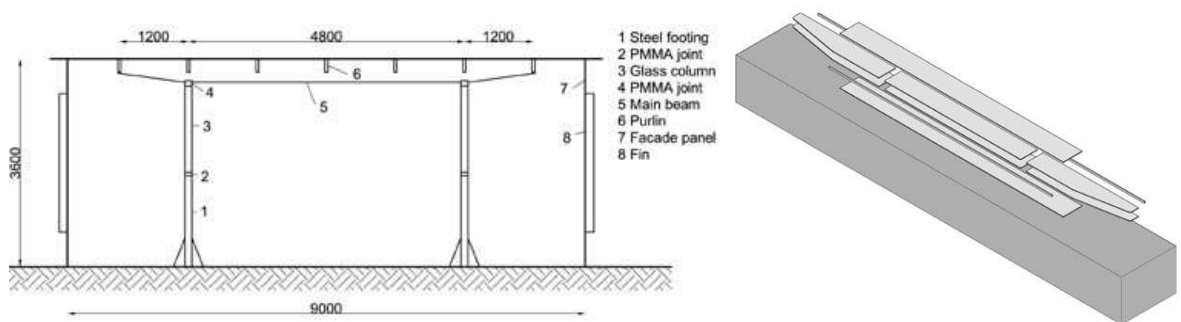


Figuur 2.2: portalen verbonden door gordingen (links), glasfaçades met vinnen (midden) en dakpanelen² (rechts) .

De hoofdliggers hebben een hart-op-hart afstand van 3600 mm en worden verbonden door gordingen. Hoofdliggers en gordingen worden momentvast met elkaar verbonden en de bovenzijden van de liggers bevinden zich in één vlak. De hart-op-hart afstand tussen twee gordingen bedraagt 1200 mm. De veertien gordingen zijn 3506 mm lang (rekening gehouden met de diktes van hoofdligger en verbinding), 230 mm hoog en opgebouwd uit een paar van glazen liggers die elk een dikte van 2 x 8 mm (SGP tussenlaag) hebben (cfr. § 2.2.4).

¹ <http://www.bk.tudelft.nl>.

² Bos F. et al. (2005b). Designing and Planning the World's Biggest Experimental Glass Structure. *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 401.



Figuur 2.3: opbouw portaal¹ (links) en hoofdligger² (rechts) ATP.

Vier zijwanden van 9 m lang en 3,6 m hoog zorgen voor de algemene stabiliteit van het paviljoen (Figuur 2.2 midden). Deze algemene stabiliteit wordt gerealiseerd door de glazen dakpanelen te verbinden met de glasfaçades. De façades bestaan uit glaspanelen van 1,2 en 1,5 m breed en 3,6 m hoog. Door verstijvende vinnen aan te brengen volstaat een dikte van 2 x 8 mm. De dakbedekking bestaat aan de zijkanten uit twaalf panelen van 2,4 x 2,4 m² en centraal uit zestien panelen van 1,2 x 1,2 m² (Figuur 2.2 rechts). De dikte van alle dakpanelen is 2 x 6 mm. De glaspanelen kragen aan de vier zijden 300 mm uit over de bovenzijde van de glasfaçades. Behalve de glaskolommen, die uit borosilicaatglas bestaan, wordt alles met uitgegloeid natronkalkglas gemaakt. Er werd geen thermisch voorgespannen glas gebruikt, omdat het restdraagvermogen na breuk bij floatglas groter is.

2.2.3 Belastingen

De volgende karakteristieke waarden van de vaste en variabele belastingen werden in rekening gebracht:

- eigengewicht glas ($\rho_{glas} = 2500 \text{ kg/m}^3$)
- eigengewicht verbindingen ($\rho_{alu} = 2700 \text{ kg/m}^3$)
- onderhoudsbelasting (0,75 kN/m² en 1 kN)
- sneeuw (0,5 kN/m²)
- winddruk (0,3 kN/m²)

Elke gording wordt verondersteld het geheel van belastingen te kunnen dragen dat op een oppervlak van 3600 x 1200 mm kan komen. De beschouwde belastingscombinaties met de betreffende veiligheidsfactoren en

¹ Bos F et al. (2005b), o.c., p. 402.

² Louter C. et al. (2005). Reinforced Glass Cantilever Beams. *Proceedings of Glass Performance Days*, p. 431.

combinatiecoëfficiënten (bezwijktoestand) werden bepaald conform EC1¹. De combinatie sneeuw + wind + onderhoud werd als onrealistisch beschouwd. De gevaarlijkste belastingscombinatie is dan eigengewicht + gespreide onderhoudsbelasting (Q_{k1}) + winddruk (Q_{k2}):

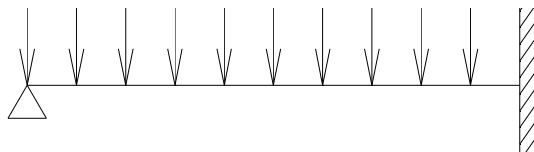
$$\gamma_G \cdot G_k \oplus \gamma_Q \cdot Q_{k1} \oplus \gamma_Q \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} \quad (2.1)$$

met: $\gamma_G = 1,35$

$\gamma_Q = 1,5$

$\psi_{02} = 0,3$

In functie van de ontwerpen wordt onderzocht wat de maximale dwarskracht en het maximale moment ter plaatste van een verbinding kan zijn. De gordingen worden opgevat als een doorlopende ligger op drie steunpunten. Gezien de geringe wringstijfheid van de randhoofdliggers worden de uiterste ondersteuning niet als inklemmingen beschouwd. Het meest nadelige belastingsgeval is dat waarbij beide velden belast worden met dezelfde maximale belasting. Dit levert het grootste moment en de grootste dwarskracht ter hoogte van het middelste steunpunt. Deze configuratie stemt overeen met één overspanning met ingeklemd uiteinde (Figuur 2.4).



Figuur 2.4: model gording.

De rekenwaarden van het moment en de dwarskracht ter hoogte van de inklemming zijn:

$$M_d = \frac{pL^2}{8} \quad (2.2)$$

$$V_d = \frac{5pL}{8} \quad (2.3)$$

Op die manier blijkt het maximale moment 3,64 kNm te zijn, de maximale dwarskracht is 5,05 kN. Indien bij een nieuw ontwerp de verbindingen als opleggingen opgevat worden, speelt enkel de dwarskracht een rol:

¹ Van Impe R. (2004). Berekening van bouwkundige constructies I. Cursus, Laboratorium voor Modelonderzoek, Universiteit Gent, p. 2.13.

$$V_d = \frac{pL}{2} \quad (2.4)$$

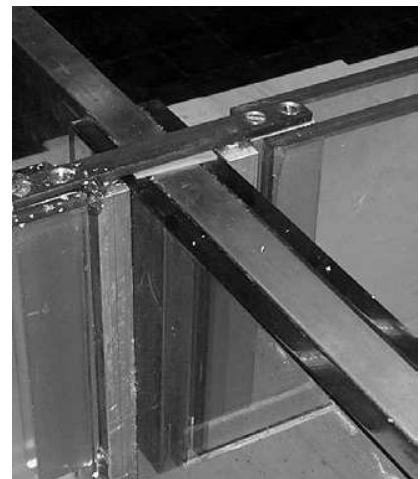
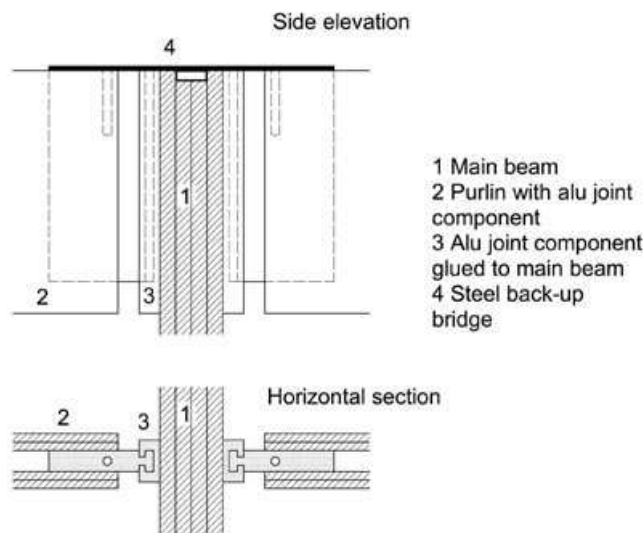
De maximale dwarskracht bedraagt in dit geval 4,04 kN.

2.2.4 Verbinding hoofdliggers - gordingen

De verbinding tussen hoofdliggers en gordingen wordt stijf uitgevoerd. Dit speelt een belangrijke rol in de algemene stabiliteit van het paviljoen. Het kippen van de hoofdliggers wordt verhinderd en ook het ontstaan van een scharnier tussen de bovenzijde van de hoofdligger en de dakpanelen wordt vermeden (Bos et al., 2005a).

Eén van de hoofdbetrachtingen van dit project was het nastreven van transparantie en het ontwikkelen van methoden om floatglas componenten te verbinden. Vandaar de keuze voor adhesieve verbindingen.

Zoals eerder vermeld, bestaat een gording uit een paar van met PVB gelamineerde glazen liggers die elk een dikte van 2 x 8 mm hebben. Deze gelamineerde liggers worden vooraf tegen een aluminium plaat gelijmd¹ (Figuur 2.5). Tegen de hoofdligger wordt een aluminium staaf met U-vormige doorsnede verlijmd. De twee metaalelementen glijden bij de montage precies in elkaar, zoals op de figuur te zien is. De maximaal toegelaten onnauwkeurigheid in dit ontwerp is ±1 mm. Een grotere opening van de U-doorsnede zou leiden tot een onvoldoende stijve verbinding.



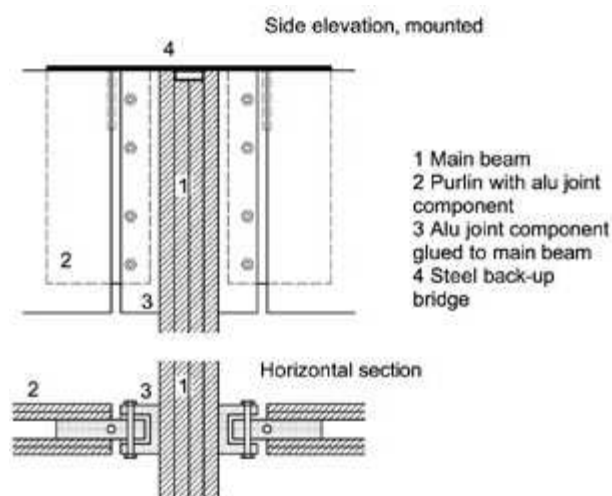
Figuur 2.5: verbinding tussen hoofdliggers en gordingen².

¹ Lijmtype: Delo GB 368.

² Bos F et al. (2005b), o.c., p. 403.

In realiteit bleek het echter onmogelijk het paviljoen met zulke grote nauwkeurigheid te bouwen. Dit had tot gevolg dat deze - quasi perfect passende - verbindingen moeilijk tot stand konden gebracht worden. Een kleine hoekrotatie van gording of hoofdligger, een klein niveauverschil of afstandsverschil, vormfouten, ... het is duidelijk dat de kleinste fout leidt tot het 'niet passen' van de verbinding. (In § 2.3 wordt ingegaan op de mogelijke oorzaken die bepaalde toleranties vereisen.) Constructeurs hebben getracht met behulp van een hamer de onderdelen in elkaar te passen. Deze schokbelastingen deden in 50% van de gevallen de adhesieve verbinding ter hoogte van de hoofdligger bezwijken. Bij de andere gevallen was vaak visuele schade aan de adhesieve verbinding merkbaar.

Er werd een nieuw ontwerp voorgesteld waarbij de metaalelementen niet meer passend waren, maar door middel van bouten aan elkaar bevestigd werden (Bos et al., 2005a). Het aluminium element dat tegen de hoofdligger gelijmd werd, bezat gaten met diameter 6 mm. De diameter van de gaten in het metaalelement van de gording was 4 mm. Tijdens de montage werden, nadat de gording geplaatst was, de gaten met een handboormachine uitgeboord tot een diameter van 6 mm (Figuur 2.6). Dit procédé stond meer toleranties toe dan bij het eerste ontwerp. Uiteindelijk werd dit ontwerp niet gerealiseerd, maar werd uit voorzorg elke verbinding voorzien van een stalen 'brug' die de metaalelementen van twee tegenovergestelde gordingen verbond (Figuur 2.5). Deze staaf was echter hinderlijk bij de montage van de glazen dakpanelen.



Figuur 2.6: nieuw voorstel verbinding tussen hoofdliggers en gordingen¹.

Het is duidelijk dat de verbinding tussen hoofdliggers en gordingen een knelpunt vormde tijdens de realisatie van het ATP. In deze scriptie zal een nieuw ontwerp gemaakt worden dat gebaseerd is op de afmetingen en belastingen van

¹ Bos F. et al. (2005a). The Joints for the All Transparent Pavilion. *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 386.

het ATP en dat rekening houdt met de vereiste montagetoleranties. In plaats van verlijmde verbindingen zal echter gebruik gemaakt worden van SGP laminaatverbindingen.

2.3 Toleranties

2.3.1 Inleiding

Zoals bleek in voorgaande paragraaf dient een T-verbinding tijdens de montage bepaalde toleranties toe te laten. Om verschillende redenen bestaat de kans dat gording en hoofdligger een relatieve verplaatsing of rotatie ondergaan volgens zes vrijheidsgraden: u , v , w , φ_x , φ_y en φ_z . In deze paragraaf wordt geprobeerd de mogelijke oorzaken van verplaatsingen en rotaties op te sommen en in de mate van het mogelijke zal een grootteorde van de vereiste toleranties bepaald worden.

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen vormfouten, opstelfouten en laminatiefouten. *Vormfouten* omvatten onnauwkeurigheden van afmetingen of vlakheidimperfecties van de (individuele) glas- of metaalelementen. Om tegemoet te komen aan mogelijke *opstelfouten* die zich tijdens de montage op de bouwplaats voordoen, dient men zekere plaatsingstoleranties te voorzien. Tot slot wordt de term *laminatiefouten* gegeven aan opstelfouten van gelamineerde metaalelementen op het niveau van het laminatieproces.

In wat volgt wordt vaak over een *insteek(element)* gesproken. Dit doelt op een metaalelement (ME) dat gelamineerd wordt tussen twee glasplaten of -liggers (van de gording), met uitsparingen in een eventuele derde centrale glasplaat of -ligger.

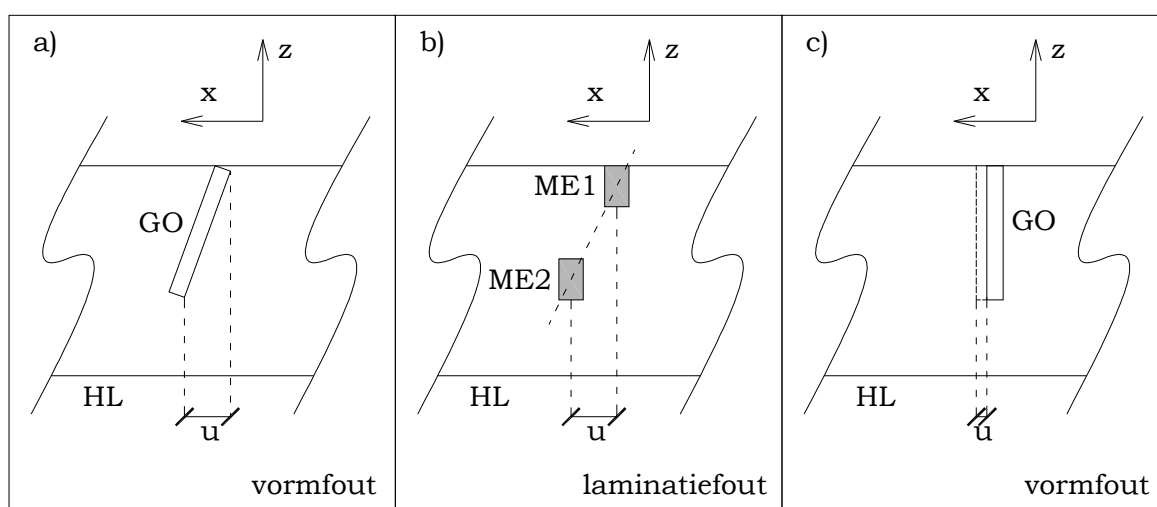
2.3.2 Verplaatsing u

In Figuur 2.7 worden de mogelijke oorzaken van een verplaatsing u schematisch weergegeven.

Oorzaken

- a) De gording staat niet perfect verticaal. Dit kan bijvoorbeeld te wijten zijn aan vormfouten (wanneer de gording een zeker wringing bezit). Als de gording dan bijvoorbeeld boven- en onderaan bevestigd wordt aan de hoofdligger, moet op één van deze hoogten een speling in de x-richting mogelijk zijn.
- c) Wanneer twee metaalelementen tegen de hoofdligger gelamineerd worden, kan het zijn dat deze niet perfect op één verticale as liggen. Indien slechts één metaalstuk tegen de hoofdligger gelamineerd wordt, bestaat eveneens de kans dat dit niet verticaal gebeurde (laminatiefouten).

d) De dikte van de gordingen vertoont afwijkingen (vormfouten).



Figuur 2.7: oorzaken van een verplaatsing u .

Grootteorde tolerantie

- Wanneer de gording een zekere wringing bezit, zal dit slechts om enkele millimeters gaan en lijkt het aangewezen de gording recht te wringen.
- Ervaring zal moeten uitwijzen wat de grootteorde van laminatiefouten is, voorlopig wordt verondersteld dat het in dit geval om een te vermijden fout gaat. Mocht dit toch een probleem zijn, kan eventueel geopteerd worden om de gording als het ware scheef te wringen (cfr. § 4.4.2 en § 5.4.2).
- De internationale norm voor gelamineerd glas¹ stelt dat afwijkingen op de tussenfolie niet in rekening gebracht worden als de totale tussenlaagdikte kleiner is dan 2 mm. In de overige gevallen bedraagt de tolerantie ± 2 mm. Tabel 2.1 bevat de toleranties op de nominale glasdiktes van floatglas, voorgeschreven door de Europese norm².

nominale dikte (mm)	2	3	4	5	6	8	10	12	15	19	25
tolerantie (mm)	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	± 1	± 1

Tabel 2.1: toleranties op de nominale glasdiktes van floatglas.

¹ ISO 12543-5. Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass - Part 5: dimensions and edge finishing. ISO, 1998, p. 2.

² NBN EN 572-2. Glas voor gebouwen - Basisproducten voor natronkalkglas - Deel 2: Floatglas. IBN, 2004, p. 5.

Voor gelamineerd glas is de totale tolerantie van de dikte gelijk aan de som van de afwijkingen van de diktes van de individuele elementen (glasplaten en tussenlagen). De totale dikte van de gordingen van het ATP kan dus 1,2 mm afwijken ($2 \times (2 \times 8 \text{ mm})$).

De grootteorde van de vereiste tolerantie in de x-richting is $\pm 1 \text{ mm}$ wat in de meeste gevallen ondergeschikt zal zijn aan de tolerantie van de andere vrijheidsgraden. Het mag echter niet zonder meer verwaarloosd worden.

2.3.3 Verplaatsing v

Figuur 2.7 geeft de mogelijke oorzaken van een verplaatsing v schematisch weer.

Oorzaken

- a) De langsafmeting van de gording is onnauwkeurig (vormfouten).
- b) De insteek is niet correct gepositioneerd tijdens het lamineren (laminatiefouten).
- c) De uitsparingen voor de insteekelementen in de centrale glasplaat van de gordingen zijn onnauwkeurig (vormfouten).
- d) De afstand tussen de hoofdliggers is onnauwkeurig (opstelfouten).
- e) De hoofdliggers zijn onderhevig aan vlakheidimperfecties (vormfouten) (Figuur 2.8).
- e) De dikte van de hoofdliggers kan eveneens afwijkingen vertonen (vormfouten).

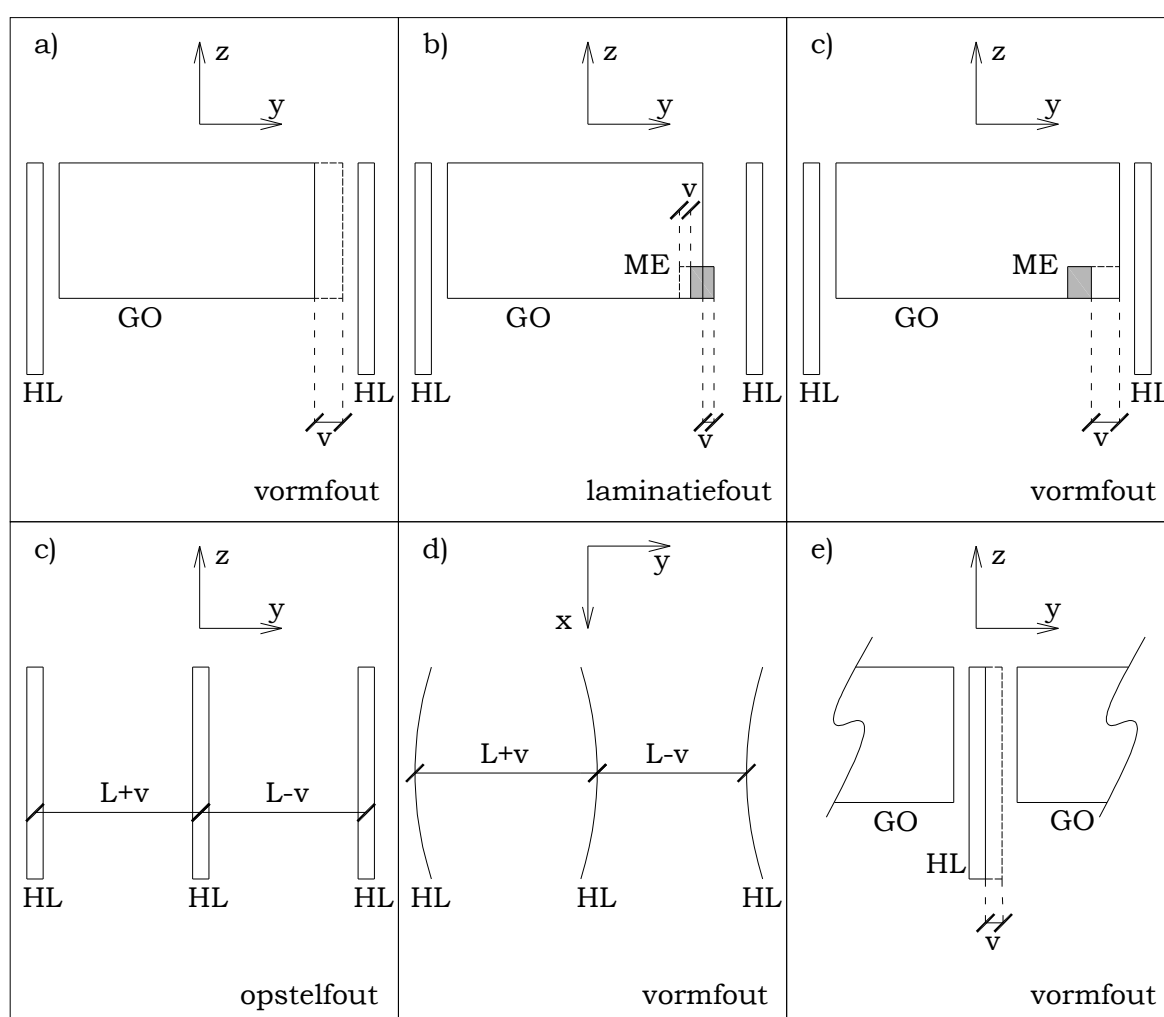
Grootteorde tolerantie

- a) In de internationale norm voor gelamineerd glas¹ wordt volgend toegestaan domein geformuleerd voor gelamineerde rechthoekige glaselementen waarvan $L > 2500 \text{ mm}$, $t_{\text{nom}} > 8 \text{ mm}$ en $t_{\text{nom}} > 10 \text{ mm}$ bij ten minste één glasplaat: $[L - 4,5 \text{ mm} < L < L + 6,5 \text{ mm}]$. Dit betekent dat voor deze onnauwkeurigheid ter hoogte van de verbinding maximaal 5,5 mm moet kunnen gecompenseerd worden in y-richting. Wanneer $L > 2500 \text{ mm}$

¹ ISO 12543-5. o.c., p. 5.

en $8 \text{ mm} < t_{\text{nom}} < 10 \text{ mm}$, is het domein: $[L-3,5 \text{ mm} < L < L+5,5 \text{ mm}]$. In dit geval dient 4,5 mm tolerantie voorzien te worden ter hoogte van de verbinding.

- b) Deze onnauwkeurigheid wordt in eerste instantie verondersteld verwaarloosbaar klein te zijn, ondervinding zal dit bevestigen of tegenspreken (cfr. § 4.4.2 en § 5.4.2).
- c) Idem als b).
- d) Deze fout hangt af van de nauwkeurigheid van de montage. De auteur oordeelt dat dit in het slechtste geval enkele millimeters kan bedragen.



Figuur 2.8: oorzaken van een verplaatsing v .

- e) De normen schrijven niets voor wat betreft vlakheid van monolithisch of gelamineerd uitgloeid glas. Dit betekent echter niet dat uitgloeid glas

perfect vlak is¹. Voor thermisch voorgespannen glas zijn er wel voorschriften voorhanden. Er is namelijk een verhoogd risico op vlakheidimperfecties t.g.v. de eigenspanningen in het glas². Om toch een idee te krijgen van de grootteorde van dit type onnauwkeurigheid, werd in de literatuur gezocht naar onderzoeken omtrent vormfouten.

- i. Een eerste reeks vlakheidmetingen³ op een 50-tal gelamineerde liggers van 3 m lang (verschillende leveranciers) bracht aan het licht dat de grootte van de vormfout omgekeerd evenredig is met de dikte van het glas. Voor de beproefde glasdiktes van 2 x 6 mm, 2 x 8 mm en 2 x 10 mm lag de maximale vormfout rond respectievelijk 7, 4 en 2 mm. Noch de gebruikte tussenlaag, noch het type glas (uitgegloeid, thermisch versterkt of gehard) speelde hierbij een rol.
- ii. Bij een tweede reeks vlakheidmetingen⁴ op 60 gelamineerde liggers met een lengte van 3 m werd vastgesteld dat de spreiding op de vormfout toeneemt met de glasdikte. De maximale vormfout voor 2 x 8 mm bleek hier 7,5 mm. Ook werd vastgesteld dat, op enkele uitzonderingen na, alle vormfouten kleiner dan 1 mm voorkwamen bij uitgegloeid glas. De vormfouten bleken ook te variëren naargelang de leverancier van de gelamineerde liggers.

Voorgaande zaken zijn weinig relevant voor dit probleem. De hoofdliggers van het ATP werden namelijk niet gelamineerd maar verlijmd (Figuur 2.3). Bovendien zijn zowel dikte als lengte (van de middenoverspanning) groter. Toch wordt in deze onderzoeken bevestigd dat de vormfouten bij floatglas over het algemeen klein(er) zijn.

Steunend op voorgaande zaken, oordeelt de auteur dat de grootte van de tolerantie om deze onnauwkeurigheden te compenseren in de orde van enkele millimeters is. De fout kan gedeeltelijk gecompenseerd worden door te zorgen dat het krommingsmiddelpunt van alle hoofdliggers langs dezelfde zijde ligt.

- f) In het geval van de hoofdliggers van het ATP is de maximale afwijking van de dikte 2 mm (4 x 15 mm, gelijmd).

¹ Belis J. (2005). *Kipsterkte van monolithische en gelamineerde glazen liggers*. Doctoraatsthesis, Laboratorium voor Modelonderzoek, Universiteit Gent, p. 2-16.

² Belis J. (2005). o.c., p. 2-8.

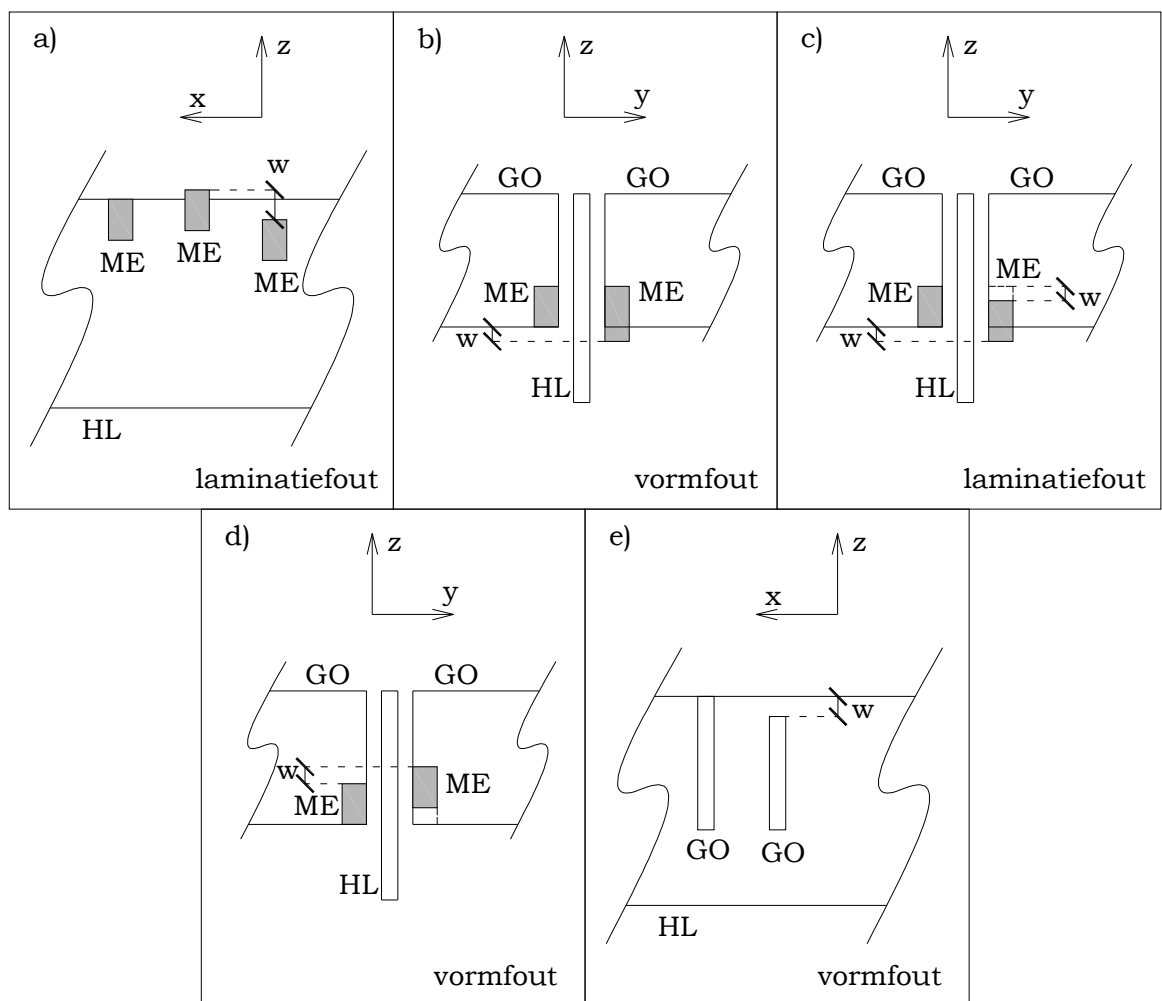
³ Belis J. (2005). o.c., p. 6-19.

⁴ Praet W. (2006). *Kip van gelamineerde glazen liggers met ionoplast tussenlaag*. Scriptie, Laboratorium voor Modelonderzoek, Universiteit Gent, p. 20.

De tolerantie in de y-richting is vermoedelijk één van de belangrijkste aangezien er verschillende oorzaken zijn die een verplaatsing v in de hand werken. Het voorgaande in acht genomen, kan besloten worden dat elke verbinding veiligheidshalve een tolerantie in de y-richting van 10 à 15 mm moet kunnen toestaan.

2.3.4 Verplaatsing w

Toleranties in de z-richting kunnen belangrijk zijn om de bovenranden van gordingen en hoofdliggers in hetzelfde vlak te krijgen, opdat dakpanelen door beide types liggers ondersteund worden. Figuur 2.9 geeft de mogelijke oorzaken van een verplaatsing w schematisch weer.



Figuur 2.9: oorzaken van een verplaatsing w .

Oorzaken

- a) De positie van het (de) metaalelement(en) dat (die) tegen de hoofdligger gelamineerd word(t)(en) varieert in de z-richting (laminatiefouten).

- b) De hoogte (z-richting) van de insteekelementen is onnauwkeurig (vormfouten).
- c) De insteekelementen in de gordingen zijn onnauwkeurig gelamineerd (laminatiefouten).
- d) De uitsparingen voor de insteekelementen in de centrale glasplaat van de gordingen zijn onnauwkeurig gepositioneerd (vormfouten).
- e) De hoogte van de gording of de samenstellende glasplaten is onnauwkeurig (vormfouten).

Grootteorde tolerantie

- a) Deze onnauwkeurigheid wordt in eerste instantie verondersteld verwaarloosbaar klein te zijn, ondervinding zal dit uitwijzen (cfr. § 4.4.2 en § 5.4.2).
- b) Dit is een denkbare fout, maar met de hedendaagse technieken moet het mogelijk zijn de metaalelementen zeer nauwkeurig te maken. Deze fout is dan ook verwaarloosbaar.
- c) Idem als a).
- d) Vermoedelijk zal dit afhankelijk zijn van de wijze waarop de uitsparingen in het glas gemaakt worden (al dan niet computergestuurd), wat door ondervinding zal blijken (cfr. § 4.4.2 en § 5.4.2). In eerste instantie wordt veiligheidshalve aangenomen dat deze fout enkele millimeters kan bedragen.
- e) In de internationale norm voor gelaagd glas¹ wordt volgende range geformuleerd voor gelamineerde rechthoekige glaselementen waarvan $H < 1100$ mm, $t_{nom} > 8$ mm en $t_{nom} > 10$ mm bij ten minste één glasplaat: $[H - 2,5 \text{ mm} < H < H + 3,5 \text{ mm}]$. Een totale speling in de z-richting van 6 mm moet dus mogelijk zijn. Wanneer geldt dat $8 \text{ mm} < t_{nom} < 10 \text{ mm}$, zijn de grenzen: $[H - 2 \text{ mm} < H < H + 2,5 \text{ mm}]$. In dat geval is de totale afwijking beperkt tot 4,5 mm.

Rekening houdend met voorgaande zaken, blijkt dat in de z-richting een tolerantie van 5 à 10 mm gewenst is.

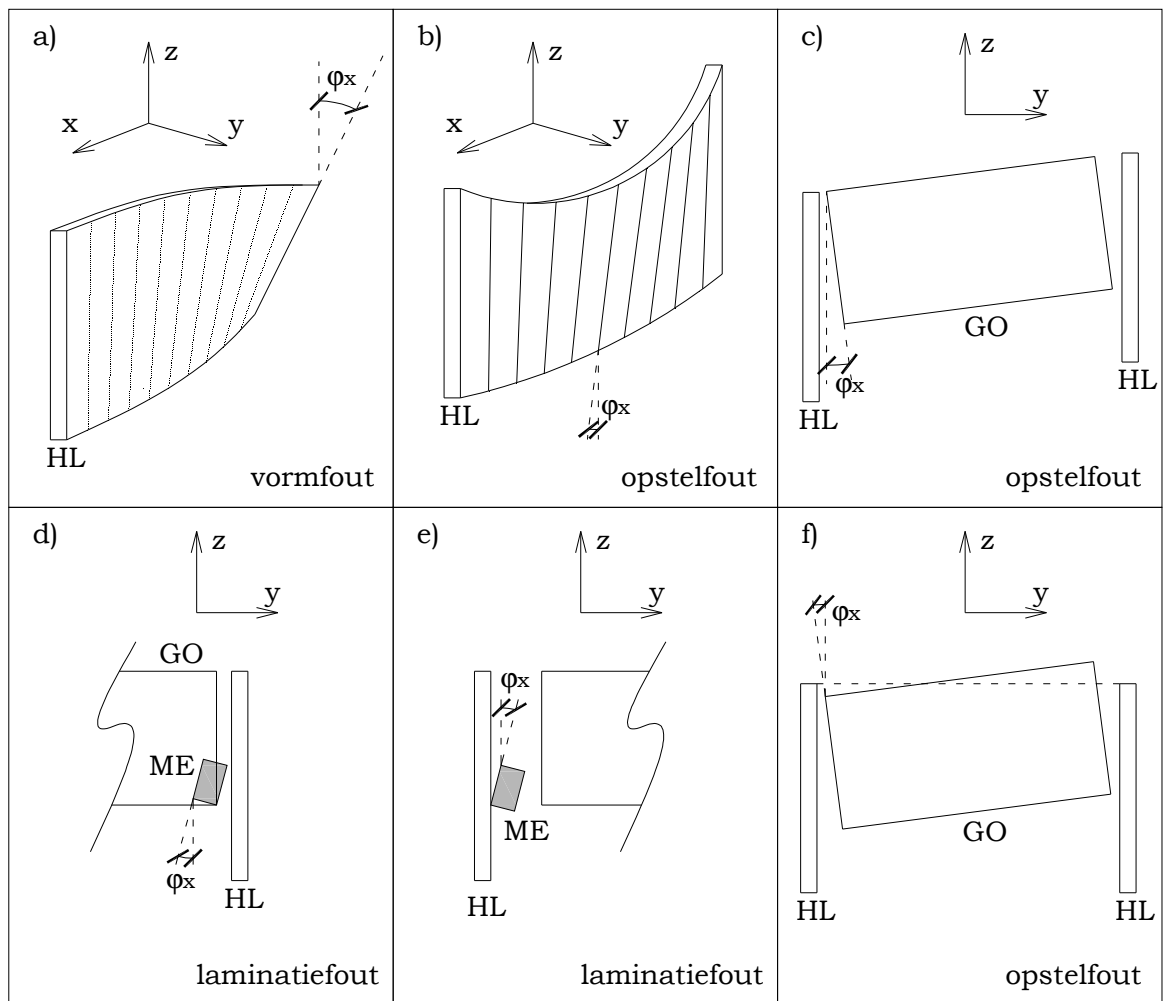
¹ ISO 12543-5. o.c., p. 5.

2.3.5 Rotatie φ_x

In Figuur 2.10 zijn de mogelijke oorzaken van een rotatie φ_x schematisch weergegeven.

Oorzaken

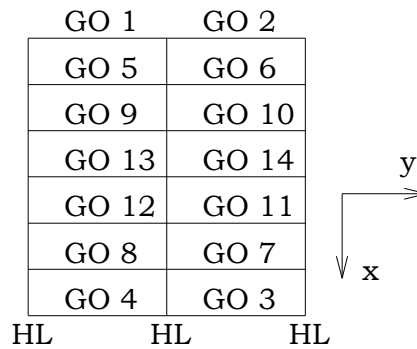
- a) De hoofdligger bezit een zekere wringing waardoor hij niet verticaal staat (vormfouten).
- b) De hoofdligger staat bol of hol. Dit doet zich voor wanneer slechts langs één zijde een gording gemonteerd is (opstelfouten). Anderzijds kan het ook een vormfout zijn.
- c) De bovenkanten van twee opeenvolgende hoofdliggers liggen niet in één vlak (opstelfouten).
- d) De insteek is (tijdens het lamineren) geroteerd rond de x-as (laminatiefouten).
- e) Het (de) metaalstuk(ken) dat (die) tegen de hoofdligger gelamineerd word(t)(en) is (zijn) niet evenwijdig met de hoofdligger (yz-vlak) en/of staat niet verticaal (laminatiefouten).
- f) De gording neemt tijdens de montage geen horizontale stand in (opstelfouten).



Figuur 2.10: oorzaken van een rotatie φ_x .

Grootteorde tolerantie

- a) Dit wordt vermoedelijk opgemerkt tijdens de montage en in de mate van het mogelijke zal de ligger recht gewrongen worden. De resulterende fout zal minimaal zijn en is dan ook verwaarloosbaar.
- b) Kippen van de hoofdligger lijkt onvermijdelijk. Dit fenomeen kan wel beperkt worden door eerst de gordingen te monteren ter hoogte van de steunpunten van de hoofdligger en stelselmatig toe te werken naar het midden van de hoofdligger (zie schema Figuur 2.11).



Figuur 2.11: montageschema van de gordingen om kip van de hoofdliggers te beperken (gording 1 wordt eerste gemonteerd, gording 14 laatst).

Toch zal het wenselijk zijn dat de verbinding tijdens de montage een rotatie om de x-as niet verhindert.

- c) Deze opstelfouten moeten kunnen vermeden worden door een nauwkeurige montage. Wanneer bewust een niveauverschil tussen de bovenzijde van de hoofdliggers voorzien wordt (om bijvoorbeeld een vlotte afwatering te realiseren), zullen de gordingen onder een helling staan (rotatie om de x-as) en dient dit in rekening gebracht te worden in de verbinding.
- d) Er wordt in eerste instantie verondersteld dat deze onnauwkeurigheid kan vermeden worden tijdens het laminatieproces, ondervinding zal dit bevestigen of tegenspreken (cfr. § 4.4.2 en § 5.4.2).
- e) Idem als d).
- f) Het is vrij waarschijnlijk dat de gording bij een manuele of machinale montage onder een helling op zijn plaats gebracht wordt, hoe zeer ook getracht wordt dit te vermijden (Figuur 2.12).

Er werden verschillende redenen aangehaald om tijdens de montage ter hoogte van de verbinding een rotatie om de x-as toe te staan. Dit lijkt dan ook zeer aangewezen.



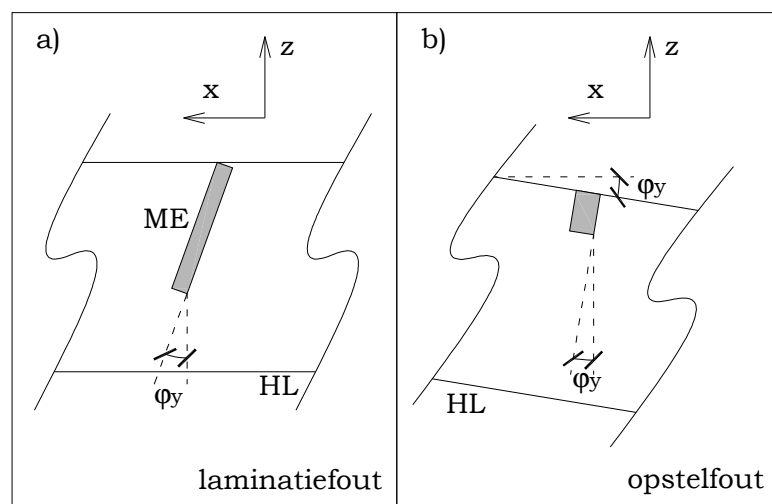
Figuur 2.12: niet-horizontale montage van de gording (dak mensa TU Dresden¹, 2006).

2.3.6 Rotatie φ_y

In Figuur 2.13 worden de mogelijke oorzaken van een rotatie φ_y schematisch weergegeven.

Oorzaken

- Het (de) metaalstuk(ken) dat (die) tegen de hoofdligger gelamineerd word(en) staa(t)(n) niet verticaal (laminatiefouten).
- De hoofdligger is geroteerd om de y-as waardoor de verticale stand van de metaalelementen die tegen de hoofdligger gelamineerd werden, verloren gaat (vormfouten).



Figuur 2.13: oorzaken van een rotatie φ_y .

¹ Wurm J. (2007). *Glass Structures - Design and construction of self-supporting skins*. Birkhäuser, Basel, Zwitserland, p. 175.

Grootteorde tolerantie

- a) Er wordt in eerste instantie verondersteld dat deze onnauwkeurigheid kan vermeden worden tijdens het laminatieproces, ondervinding zal dit bevestigen of tegenspreken (cfr. § 4.4.2 en § 5.4.2).
- b) Nauwkeurige montage dient deze fout te vermijden. Indien de hoofdliggers bewust onder een helling gemonteerd worden (om bijvoorbeeld een vlotte afwatering te realiseren), dient hiermee rekening gehouden te worden in het ontwerp (zodat bijvoorbeeld de metaalelementen die tegen de hoofdligger gelamineerd worden een verticale stand innemen na de montage).

Een tolerantie met betrekking tot deze vrijheidsgraad blijkt niet noodzakelijk. Er zal tijdens het ontwerp van de T-verbinding voorkeur gegeven worden aan andere vrijheidsgraden.

2.3.7 Rotatie φ_z

In Figuur 2.14 worden de mogelijke oorzaken van een rotatie φ_z schematisch weergegeven.

Oorzaken

- a) De hoofdliggers werden niet evenwijdig (x-richting) gemonteerd (opstelfouten).
- b) Vlakheidimperfecties van de gording (vormfouten).
- c) Een metaalelement dat tegen de hoofdligger gelamineerd wordt, onderging tijdens de laminatie een verplaatsing in de x-richting (laminatiefouten).
- d) Vlakheidimperfecties van de hoofdligger(s) waardoor de verbinding hoofdligger-gording niet loodrecht is (vormfouten).

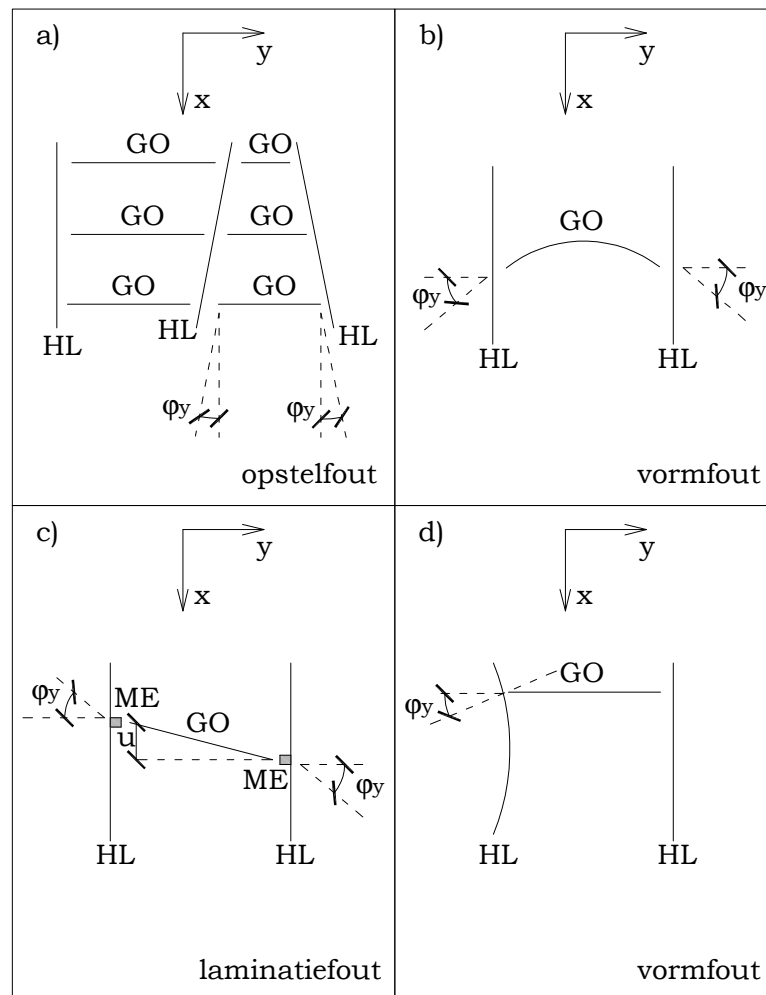
Grootteorde tolerantie

- a) Nauwkeurige montage kan dit vermijden. Deze fout wordt verwaarloosd.
- b) De eerste reeks vlakheidmetingen¹, waarvan sprake was in § 2.3.3, gaven aan de uiteinden een maximale hoekverdraaiing (om de z-as) van

¹ Belis J., o.c., p. 6-19.

$\arctan\left(\frac{4,5}{500}\right) = 0,009 \text{ rad} = 0,52^\circ$. Elders zal de hoekverdraaiing kleiner zijn indien ondersteld wordt dat de hoofdligger een halve sinusvorm aanneemt¹. De tweede testreeks² kende quasi dezelfde maximale hoekverdraaiing.

- c) Er wordt in eerste instantie verondersteld dat deze onnauwkeurigheid verwaarloosbaar, ondervinding zal dit bevestigen of tegenspreken (cfr. § 4.4.2 en § 5.4.2).
- d) Rekening houdend met hetgeen in § 2.3.3 gezegd werd, wordt aangenomen dat de maximale hoekverdraaiing van de hoofdligger (om de z-as) de waarde in punt b) niet zal overtreffen.



Figuur 2.14: oorzaken van een rotatie φ_z .

¹ Belis J., o.c., p. 6-18.

² Praet W., o.c., p. 18.

De vereiste tolerantie met betrekking tot deze vrijheidsgraad is zeer klein en zal andermaal ondergeschikt zijn aan de toleranties van andere vrijheidsgraden.

2.3.8 Besluit

In dit hoofdstuk werd grondig onderzocht wat de mogelijke oorzaken zijn van relatieve verplaatsingen en rotaties tussen hoofdliggers en gordingen (met betrekking tot de dimensies van het ATP). Daarbij werd onderscheid gemaakt tussen vormfouten, opstelfouten en laminatiefouten.

Vormfouten komen tot stand tijdens het productieproces van glas- of metaalonderdelen. Ze hangen af van toevallige factoren en zijn dus moeilijk beheersbaar. Deze fouten zijn vaak de voornaamste reden om toleranties toe te laten.

Opstelfouten zijn te wijten aan onnauwkeurigheden tijdens de montage op de werf. Dit type fouten kan meestal, mits de nodige precisie, binnen de perken gehouden worden.

Tot slot kunnen laminatiefouten de nodige toleranties vereisen. Er kan echter niet teruggevallen worden op ervaring of normatieve regels hieromtrent, dit zal dus door ondervinding vastgesteld moeten worden. In het kader van deze scriptie zal op dit vlak hopelijk enige vooruitgang geboekt worden. In eerste instantie werd in het merendeel van de gevallen verondersteld dat de laminatiefouten te vermijden zijn.

Samenvattend kan gesteld worden dat tijdens de montage toleranties met betrekking tot de vrijheidsgraden v en w absoluut vereist zijn. Het is eveneens wenselijk dat de verbinding voorzien is om een rotatie φ_x toe te laten. Toleranties met betrekking tot de overige vrijheidsgraden zijn minder belangrijk. Tabel 2.2 vat § 2.3 samen.

vrijheidsgraad	toleranties?	grootteorde
u	nee	$\pm 1 \text{ mm}$
v	ja	$\pm 10 \text{ à } 15 \text{ mm}$
w	ja	$\pm 5 \text{ à } 10 \text{ mm}$
φ_x	ja	?
φ_y	nee	/
φ_z	nee	$0,52^\circ$

Tabel 2.2: Vereiste toleranties per vrijheidsgraad.

HOOFDSTUK 3: Fase I

3.1 Inleiding

Zoals eerder vermeld werd, verloopt het ontwerp van de T-verbinding in verschillende fasen. Eén fase omvat telkens een ontwerpgedeelte en een praktisch gedeelte. In het ontwerpgedeelte wordt de T-verbinding uitgewerkt en/of verfijnd. Het praktisch gedeelte omvat de realisatie van een reeks proefstukken of prototypes. Het ontwerp wordt dus stelselmatig aangepast, rekening houdend met bevindingen of problemen die tijdens het praktisch gedeelte van een vorige fase vastgesteld werden.

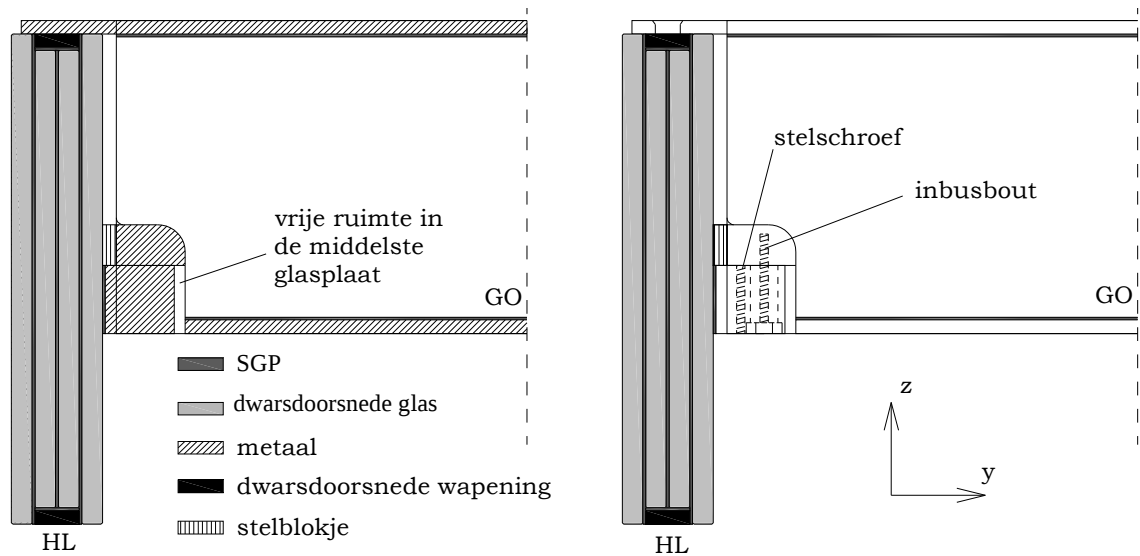
Fase I omvat allereerst de uitwerking van een basisontwerp van de T-verbinding. Vervolgens wordt het ontwerp, de realisatie en het beproeven van een eerste reeks proefstukken uitvoerig beschreven worden. Tot slot van dit hoofdstuk wordt een evaluatie gehouden van de ontworpen verbinding en de gerealiseerde proefstukken. Er wordt aandacht geschonken worden aan problemen, moeilijkheden, vereiste aanpassingen, enz om het ontwerp te optimaliseren.

De ontwerpen zullen als volgt benoemd worden: T[*typenummer*][*ontwerpnummer*]. Er zullen in de loop van dit eindwerk drie verbindingstypes ontworpen worden. Wanneer de T-verbinding als inklemming opgevat wordt en waarbij de bovenzijden van hoofdliggers en gordingen in één vlak liggen, wordt typenummer 1 toegekend. Indien de verbinding als oplegging (scharnier) werkt (en dus een relatieve rotatie om de x-as mogelijk is) en andermaal de bovenzijden van hoofdliggers en gordingen in één vlak liggen, gaat het om type 2. Een 3^e type heeft betrekking op een inklemming, zonder dat de bovenzijden van hoofdliggers en gordingen in één vlak liggen. Het ontwerpnummer zal variëren naargelang het ontwerp van een bepaald type een belangrijke verandering ondergaat.

3.2 Basisontwerp

Het aanvangsontwerp T1_01 is geïnspireerd op eerder gerealiseerde constructies met SGP als adhesieve verbinding tussen metaal en glas (cfr. § 1.4). Figuur 3.1 toont (links) een zijaanzicht en (rechts) een snede van de verbinding. Hierbij wordt

de gording boven- en onderaan bevestigd aan de hoofdligger. In wat volgt wordt de verbinding uitvoerig besproken.



Figuur 3.1: ontwerp T1_01, T-verbinding.

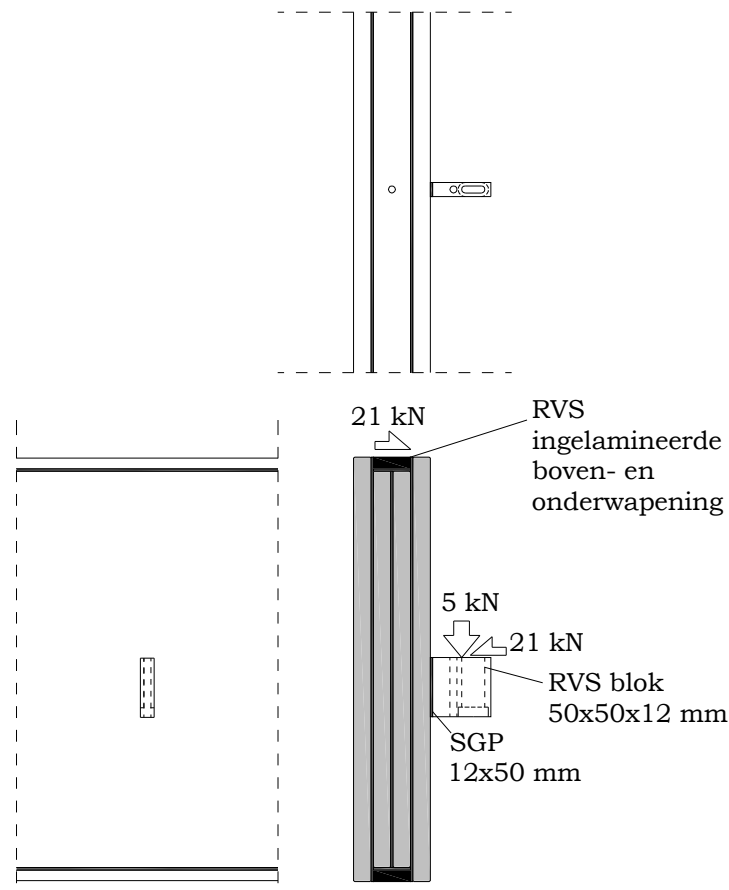
3.2.1 Algemeen

Tegen de hoofdligger wordt een balkvormig element uit roestvast staal (RVS) gelamineerd met dimensies 50 x 50 x 12 mm (Figuur 3.2). Op dit element steunt de gording, de dwarskracht zal dus volledig via de SGP tussenlaag overgedragen worden op de hoofdligger. Het metaalblokje is voorzien van een gat met schroefdraad (dichtst tegen de hoofdligger) waarin een *stelschroef* (Ø 6 mm) aangebracht wordt. Deze schroef laat toe de positie van de gording in de z-richting te wijzigen (zie § 3.2.2). De stelschroef beperkt eveneens de excentriciteit van de aangrijpende dwarskracht tot een constante waarde van $1,52 \text{ (SGP)} + 15 + \frac{6}{2}$ (schroef) = 19,52 mm.

Het metaalelement bezit ook een sleufgat (verst van de hoofdligger). Deze sleuf biedt plaats aan een inbusbout waarmee de gording bevestigd wordt (x- en z-richting) aan het metaalblokje. Onderaan wordt het sleufgat groter gemaakt voor de kop van de inbusbout. Het sleufgat laat toleranties in de y-richting toe en is onderaan breder zodat de inbusbout verzonken is in het metaalelement. De hoofdligger werd in dit ontwerp als gelamineerde ligger opgevat, met SGP als tussenlaag, bij het ATP was de hoofdligger gelijmd (cfr. § 2.2.2).

De gording bestaat uit een laminaat van drie monolithische glasplaten (dit is eveneens verschillend t.o.v. het ATP) (Figuur 3.3). De centrale glasplaat is 12 mm dik en voorzien van een uitsparing waarin een aluminium element geplaatst wordt. Omdat er rechtstreeks contact is tussen glas en de randen van het metaal,

wordt voor het ‘zachte’ materiaal aluminium gekozen in plaats van ‘hard’ staal of RVS¹. De insteek heeft een afronding (straal 20 mm) om piekspanningen in het glas te vermijden. Het insteekelement wordt gelamineerd tussen de buitenste glasplaten van 6 mm dik en is tevens voorzien van een gat met schroefdraad (voor de inbusbout). De uitsparing in de middelste glasplaat loopt verder tot de onderzijde van de gording. Op die manier kan de gording tijdens de montage over het metaalelement van de hoofdligger geschoven worden (de montage is dus een verplaatsing in de z-richting).



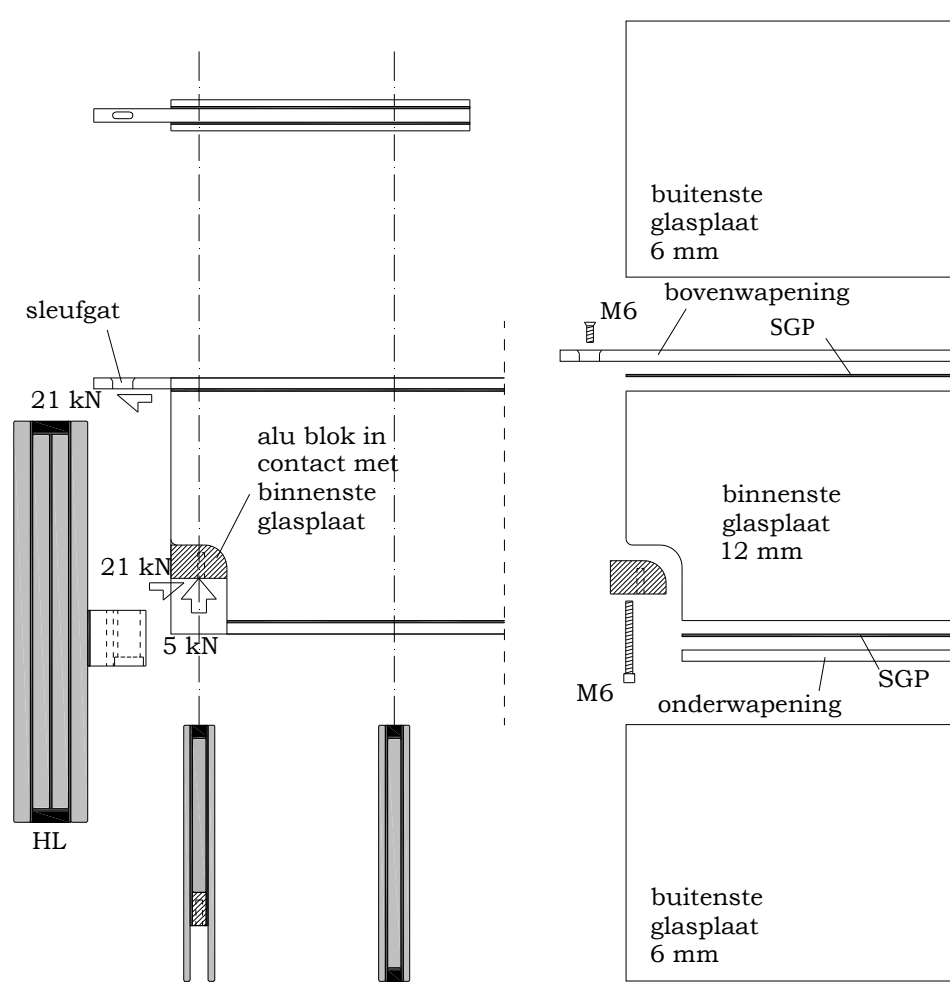
Figuur 3.2: ontwerp T1_01, hoofdligger.

De gordingen zijn, net als de hoofdligger, voorzien van een boven- en onderwapening die verzonken in de middelste glasplaat gelamineerd worden. De bovenwapening van de gording is langer gemaakt en komt tot boven de hoofdligger. Op die manier kan deze uitstekende wapening van de gording bevestigd worden aan de bovenwapening van de hoofdligger. Hiertoe is in de bovenwapening van de hoofdligger een gat met schroefdraad voorzien (Figuur 3.2). In de bovenwapening van de gording is een sleufgat gemaakt dat toleranties in de

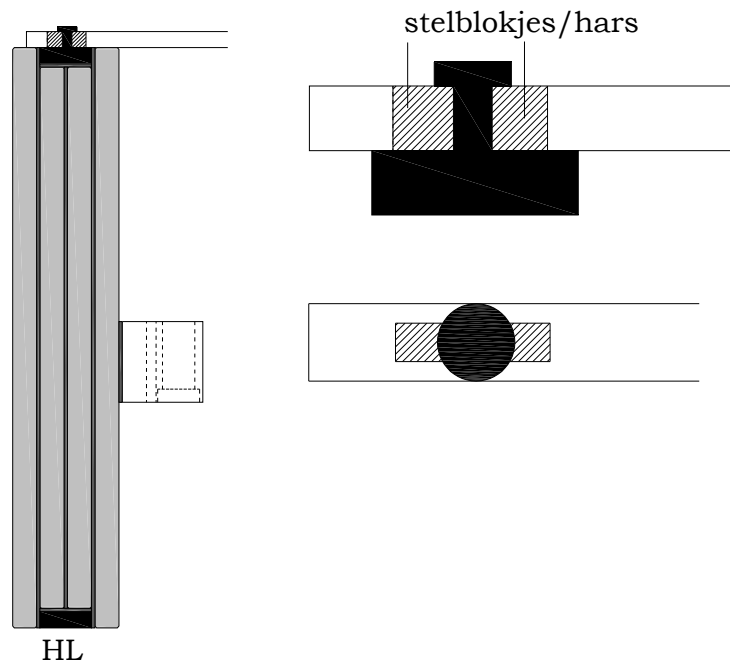
¹ De contactspanningen bij harde metalen zijn te groot voor het glas (wat breuk tot gevolg heeft). Zachte metaalsoorten kunnen lokaal vloeien bij hoge contactspanningen.

y-richting moet toelaten. Met behulp van passende *stelblokjes* kan het sleufgat tijdens de montage opgevuld worden, naargelang de positie van de gording (Figuur 3.4). De stelblokjes kunnen eventueel vastgelijmd worden aan de bovenwapening van de gording. In plaats van stelblokjes kan ook met een vloeibaar hars gewerkt worden dat tijdens de montage opgegoten wordt. Een derde mogelijkheid bestaat erin pas tijdens de montage een gat te boren in de bovenwapening van de gording, afhankelijk van de positie die de gording inneemt t.o.v. de hoofdligger.

Het nadeel van deze configuratie is het feit dat de bovenzijden van de hoofdliggers en de gordingen niet in één zelfde vlak liggen. Het hoogteverschil is echter gering (10 mm van de wapening + boutkop) en er wordt verondersteld dat dit verschil kan opgevangen worden (door bv. Neopreen of silicone). Vandaar dat dit ontwerp toch als 'type 1' beschouwd wordt. Een ander nadeel is het feit dat de gordingen die aan weerszijden van de centrale hoofdligger bevestigd zijn, niet in elkaars verlengde liggen (in planzicht). De bevestiging van de gordingen bovenaan laat dit niet toe.



Figuur 3.3: ontwerp T1_01, gording.

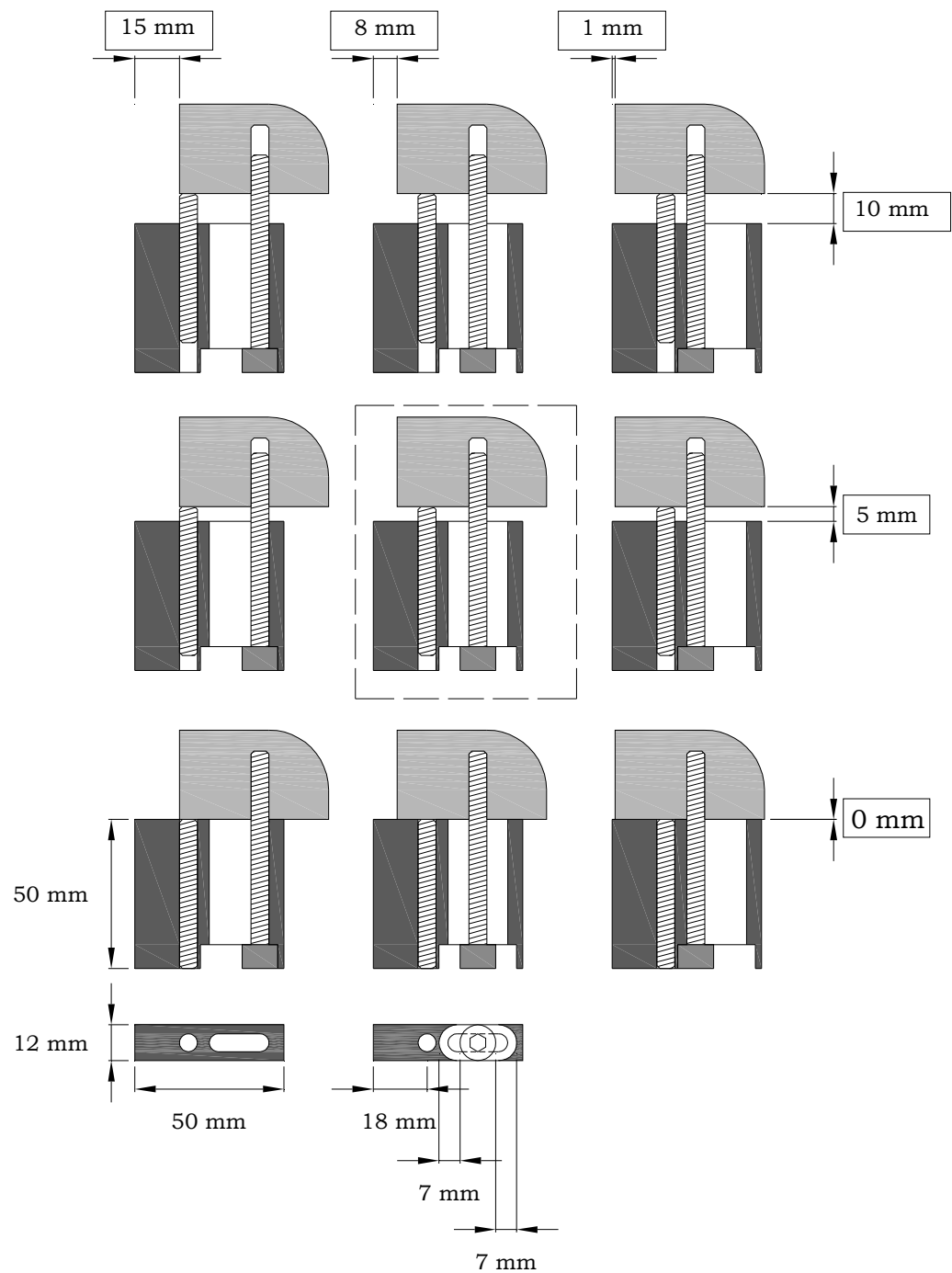


Figuur 3.4: ontwerp T1_01, bevestiging bovenzijde.

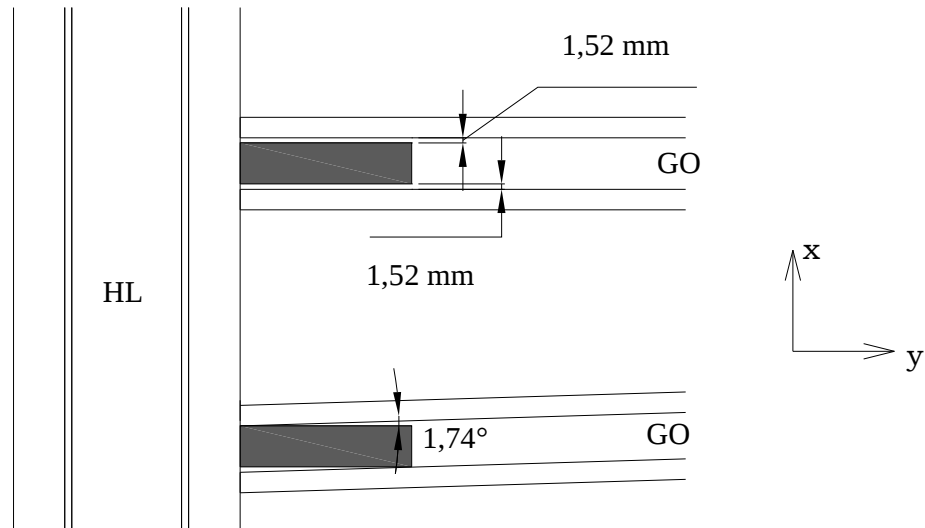
3.2.2 Toleranties

Dit ontwerp laat toleranties toe met betrekking tot de vrijheidsgraden x , y , z en ϕ_z waarbij de toleranties in y - en z -richting de belangrijkste zijn. In de y -richting is ± 7 mm speling mogelijk, in de z -richting kan een afwijking van ± 5 mm opgevangen worden (Figuur 3.5).

Het metaalstuk dat tegen de hoofdligger gelamineerd werd, zit ‘verscholen’ tussen de buitenste glasplaten van de gording. Langs weersijden van dit metaalblokje is een speling van 1,52 mm (dikte SGP tussenlaag). Daarom is een relatieve rotatie om de z -as mogelijk van $1,74^\circ$ (Figuur 3.6). Dit is enkel mogelijk indien de bevestiging bovenaan gebeurt d.m.v. een gat in de bovenwapening van de gording, dat tijdens de montage geboord wordt. In dat laatste geval is ook een afwijking in de x -richting mogelijk (van bijvoorbeeld het sleufgat in het metaalelement dat tegen de hoofdligger gelamineerd wordt).



Figuur 3.5: ontwerp T1_01, toleranties in y- en z-richting.



Figuur 3.6: ontwerp T1_01, tolerantie ϕ_z .

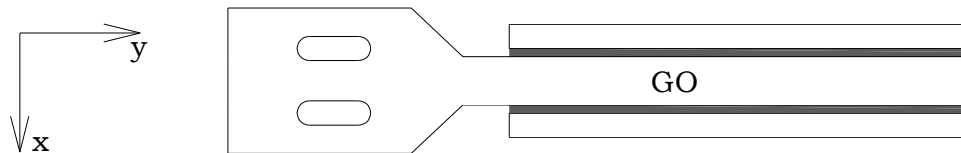
3.2.3 Belastingen

Moment

In UGT wordt ter plaatse van de verbinding een moment van 3,6 kNm ontwikkeld (cfr. § 2.2.3.). De hefboomsarm in dit ontwerp bedraagt 175 ± 5 mm. De kracht die hierdoor ter hoogte van de bevestigingspunten (boven- en onderaan) heerst, is $\frac{3,64}{0,175} \approx 21$ kN (Figuur 3.2).

Bovenaan de verbinding is dit een trekkracht en zal de bout op zuivere afschuiving belast worden. Indien een bout met diameter 6 mm wordt gebruikt, bedraagt de schuifspanning $\frac{21000}{3^2 \cdot \pi} = 743$ MPa, wat ruimschoots de vloeigrens van (klassiek) staal overschreid. Eventueel kan de bovenwapening lokaal breder gemaakt worden om met meerdere bouten te kunnen werken, wat echter complexer is om te realiseren (Figuur 3.7). Dit detail vormt duidelijk een knelpunt in de verbinding. Ook het gebruik van de stelblokjes, hars of ter plaatse geboorde gaten lijkt niet ideaal.

Onderaan de verbinding wordt een drukkracht van 21 kN uitgeoefend. In het slechtste geval biedt enkel de stelschroef hier weestand aan (zie Figuur 3.5) door wrijving tussen de bovenzijde van de stelschroef en de onderzijde van het aluminium insteekelement. Dit zal nooit voldoende weerstand bieden aangezien de verticale belasting 'maar' 5 kN bedraagt (dwarskracht, cfr. § 2.3.3). Om hieraan te verhelpen wordt voorgesteld om met passende aluminium stelblokjes te werken die tussen de hoofdligger en het insteekelement geplaatst worden tijdens de montage (zie Figuur 3.1). De stelblokjes kunnen eventueel vastgelijmd worden aan het insteekelement.



Figuur 3.7: plaatselijke verbreding van de bovenwapening.

Dwarskracht

Wat de SGP-verbinding tussen metaal en glas betreft, werd uitgegaan van een schuifspanning van 12 MPa en een trekspanning van 4 MPa. Dit zijn gemiddelde waarden die door Mihaylov¹ bekomen werden bij respectievelijk afschuifproeven en axiale trekproeven met RVS schijven (diameter 50 mm en dikte 25 mm) die tegen glas gelamineerd waren met SGP als tussenlaag. Deze waarden gelden enkel als grootteordes, want de belasting bij ontwerp T1_01 veroorzaakt in de tussenlaag noch een zuivere afschuifkracht, noch een zuivere trekkracht. In de uiterste grenstoestand (UGT) veroorzaakt de dwarskracht (5 kN) in de tussenlaag een schuifkracht van $\frac{5000}{50 \cdot 12} = 8,33$ MPa en een moment (t.g.v. de excentriciteit) van $19,52 \cdot 5000 = 90000$ Nmm. Indien een lineair spanningsverloop ondersteld wordt, betekent dit dat bovenaan in de SGP tussenlaag een trekspanning van $\frac{90000 \cdot \frac{50}{2}}{125000} = 18$ MPa ontwikkeld wordt (traagheidsmoment $I = \frac{12 \cdot 50^3}{12} = 125000$ mm⁴). In het beste geval zal de bovenwapening van de gording, die als het ware steunt op de hoofdligger, een deel van de dwarskracht opnemen, maar hier wordt veiligheidshalve niet op gerekend. De vraag dringt zich op of de SGP tussenlaag deze belastingen inderdaad kan weerstaan. Dit wordt onderzocht aan de hand van een eerste proefreeks. In § 3.3 wordt ingegaan op de realisatie van de proefstukken en § 3.4 behandelt de beproeving van de proefstukken.

3.3 Technologie proefstukken fase I

In deze paragraaf wordt de realisatie van de proefstukken beschreven. Er wordt tevens een gedetailleerde beschrijving gegeven van de bekomen adhesieve verbindingen. Aan het eind van de paragraaf wordt een besluit gegeven en een samenvattende tabel met gegevens van de proefstukken.

¹ Mihaylov J. (2007). Niet gepubliceerd. ILEK, Universiteit Stuttgart.

3.3.1 Dimensionering

Er werden 22 identieke proefstukken gemaakt, gebaseerd op het basisontwerp uit voorgaande paragraaf. Op een glasplaatje (gehard glas) van 100 x 150 x 10 (l x h x b) mm werd telkens centraal een metaalblokje van 50 x 12 x 50 mm gelamineerd met behulp van SGP¹. Deze proefstukjes werden in een later stadium belast met een puntkracht F die aangreep op 18 mm van het glas, zoals dit bij ontwerp T1_01 het geval is (Figuur 3.8 rechts). Er werden zowel proefstukken met roestvast staal² als met aluminium³ gemaakt. Op de principeschets (Figuur 3.8) zijn de volgende zaken aangeduid:

- De hoek α tussen het bovenvlak van het glasplaatje en het grote zijvlak van het metaalblokje.
- De hoek β tussen het bovenvlak van het glasplaatje en het kleine zijvlak van het metaalblokje.
- De dikte t van de SGP tussenlaag na de laminatie.
- De hoogte h van het metaalelement
- De breedte b van het metaalelement
- De belasting F tijdens het beproeven

Voortaan wordt met de ‘voorzijde’ van het proefstuk de kant van het glas met het metaalelement bedoeld. De ‘bovenzijde’ van het metaalelement is daar waar de belasting zal aangrijpen. Bij enkele proefstukken werd met behulp van een vijl of schuurpapier de oppervlakteruwheid aan de te lamineren zijde van het metaalelement vergroot. De vijlrichting was loodrecht op de richting van de puntkracht tijdens het beproeven (Figuur 3.9).

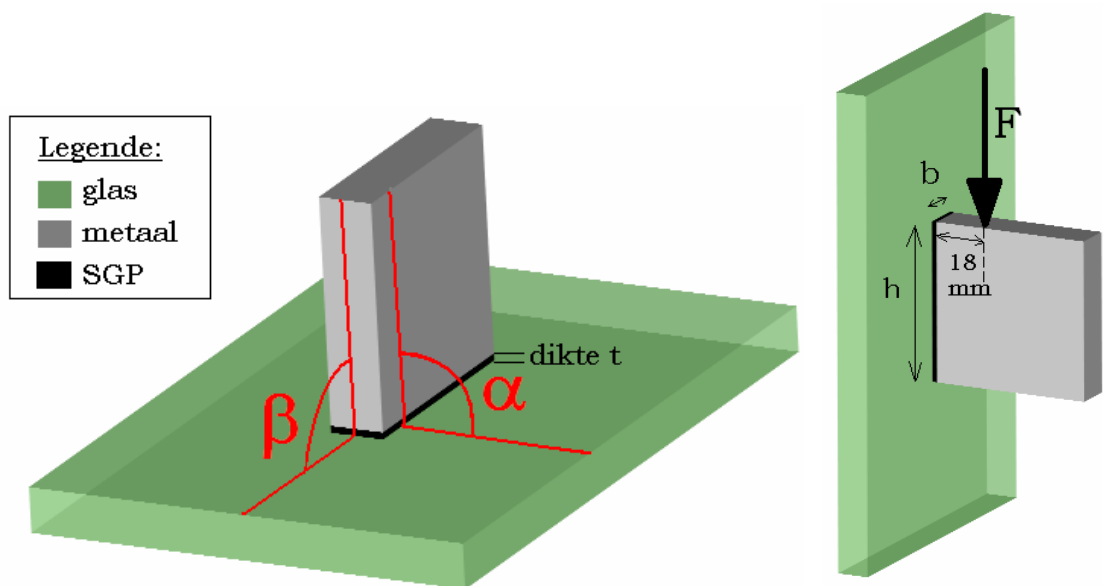
In wat volgt, wordt bij elk proefstuk aandacht gegeven aan de volgende zaken:

- Het type mal dat gebruikt werd bij de laminatie
- Het al dan niet opgeruwde oppervlak
- De vloei van de tussenlaag en de resulterende dikte t
- Mogelijke luchtinsluitingen in de SGP tussenlaag
- De grootte van de hoeken α en β

¹ SGP5000 NC 60 (dikte 0,060 inch of 1,52 mm).

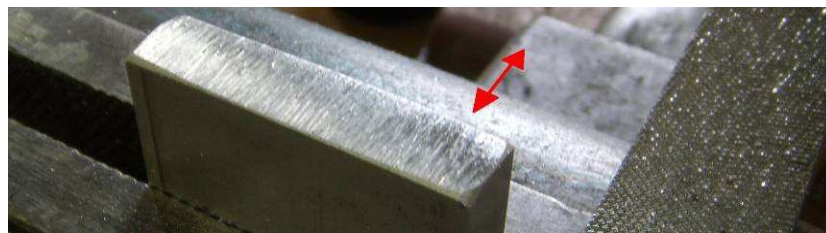
² Type RVS: DIN 1.4301.

³ Type aluminium: EN 6060 T6-ALMGSiO,5 F22.



Figuur 3.8: principeschets proefstuk.

De proefstukken kregen de volgende benamingen: [type metaal]_[vijl of glad]_[T (teflon mal) of M (metalen mal)]_[nummer proefstuk]. De benaming 'vijl' geeft aan dat de ruwheid van het desbetreffende metaalblokje met een vijl of schuurpapier vergroot werd. De term 'glad' geeft aan dat de oppervlakteruwheid ongewijzigd bleef (oppervlak van getrokken/gewalst staal).



Figuur 3.9: vijlrichting.

De realisatie van de proefstukken gebeurde in de autoclaaf¹ van het laboratorium van DuPont de Nemours² onder professionele begeleiding van enkele laboranten.

3.3.2 Voorbereidingen

Om een optimale hechting te verkrijgen, is het noodzakelijk de samenstellende delen voldoende zuiver te maken. De metaalelementen worden ontdaan van

¹ De autoclaaf heeft een binnendiameter van 1,2 m en een nuttige lengte van 2,1 m.

² DuPont de Nemours (Belgium) BVBA, Antoon Spinoystraat 6, B-2800 Mechelen. Europees centrum van DuPont voor opleiding, marketing, verkoop, onderzoek en ontwikkeling.

bramen en andere oppervlakteoneffenheden. Voorts dient het metaal met behulp van aceton grondig ontvet te worden. De glaselementen moeten grondig gereinigd worden met een ontvettingsproduct. Tenslotte is het aangewezen de SGP tussenlaag stofvrij te verwerken. Bij deze proefreeks werd de tussenlaag stofvrij gemaakt met een Dust Cleaning Roller¹ (Figuur 3.10).

Vervolgens is noodzakelijk te beschikken over een manier om het SGP en metaal correct te positioneren en te fixeren tijdens het proces. Dit kan met een mal uit metaal, teflon, hout, enz. De vloe van de tussenlaag (cfr. § 1.2.1) wordt best zo veel mogelijk vermeden door een soort ‘bekisting’ te voorzien rond de SGP tussenlaag. Het ligt voor de hand om, indien mogelijk, een mal te gebruiken die beide functies (positioneren en fixeren van het metaalstuk en verhinderen vloe) combineert. In de volgende paragrafen wordt per autoclaafcyclus dieper ingegaan op de gebruikte mallen.



Figuur 3.10: reiniging van de verschillende onderdelen, rechts de Dust Cleaning Roller.

Een andere voorbereiding die getroffen moet worden, heeft betrekking op de vacuüm bag (zie paragraaf 1.4). Scherpe randen, oneffenheden of niveauverschillen aan het element kunnen scheuren in de vacuüm bag veroorzaken. Daarom dienen de proefstukken voldoende beschermd te worden. Dit kan door een soort isolatiedeken² met behulp van kleefband³ aan te brengen rond de verbinding (Figuur 3.11 midden en rechts). Omdat het isolatiedeken zou blijven kleven in de SGP tussenlaag en dit nadien moeilijk verwijderbaar is, is het aan te raden om eerst een dunne, geweven, zijdeachtige stof aan te brengen. De zijde hecht niet aan SGP waardoor deze naderhand makkelijk verwijderd worden (Figuur 3.11 links). Boven de zijde wordt dan het isolatiedeken aangebracht (Figuur 3.11 rechts).

¹ Verwijdert droge, loszittende (stof)deeltjes of contaminanten, een product van Teknek.

² Wol, dikte ± 4 mm. Engels: *weave*.

³ Er werd gebruik gemaakt van High Temperature Fine Line Tape 4737S Blue Plastic Core, een product van Scotch®. Dit type kleefband weerstaat gedurende 60 minuten een temperatuur van 163° zonder sporen na te laten op het glas.



Figuur 3.11: zijde (links), isolatiedeken (midden) en ingepakt proefstuk (rechts).

Tot slot dient het proefstuk vacuüm verpakt te worden. Hiertoe wordt het in een vacuüm bag¹ gestopt die slechts aan één zijde open is (Figuur 3.12 links). Het geheel wordt in een vacuümtoestel geplaatst dat luchtdicht wordt afgesloten. Vervolgens wordt de ruimte in het toestel (en dus in de open zak) vacuüm gezogen. Daarna wordt de zak dichtgesmolten. Wanneer het toestel geopend wordt, zorgt de atmosferedruk voor het samendrukken van de vacuüm zak (Figuur 3.12).



Figuur 3.12: open vacuüm bag (links), vacuümtoestel (midden) en vacuüm verpakt proefstuk (rechts).

De 22 proefstukken werden gemaakt tijdens vier autoclaafcycli waarbij telkens het druk- en temperatuurschema beschreven in § 1.2.3 werd toegepast. In wat volgt worden de verschillende cycli chronologisch beschreven. Bijlage A bevat gedetailleerde afbeeldingen van alle proefstukken.

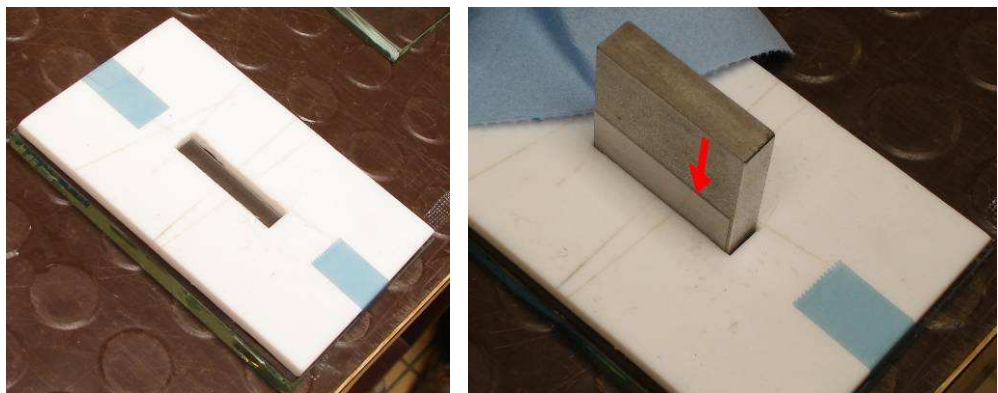
3.3.3 Cyclus I

De eerste autoclaafcyclus bevatte twee proefstukken die met een teflon mal gelamineerd werden (RVS_glad_T_25 en RVS_glad_T_26). In wat volgt wordt eerst het laminatieproces met teflon mal beschreven en vervolgens worden de proefstukken geanalyseerd.

¹ Dikte 0,05 mm.

Laminatieproces teflon mal

Om het vloeien zo veel mogelijk te vermijden kan gebruik gemaakt worden van polytetrafluoretheen (PTFE), beter gekend als teflon. Dit kunststof hecht niet aan het vloeibare SGP en kan bovendien weerstaan aan de hoge druk en temperatuur in de autoclaaf¹. Een teflonplaatje met dezelfde oppervlakte als het glasplaatje (150 x 100 x 5 mm) werd centraal voorzien van een sleuf met dezelfde afmetingen als het metaalelement (50 x 12 mm). Wanneer het teflonplaatje vastgeklemd wordt op het glasplaatje fungeert het als mal voor het metaalelement en tevens verhindert het de vloeï. De mal werd in beide gevallen met kleefband op het glasplaatje vastgekleefd (Figuur 3.13 links). De onnauwkeurigheden van de sleuf in de mal werden weggewerkt door strookjes mylar² tussen het metaalelement en de mal te plaatsen (Figuur 3.13 rechts).



Figuur 3.13: teflon mal (links) en strookjes mylar (rechts).

Nadat de nodige bescherming was aangebracht (Figuur 3.14 links), werd het geheel vacuüm verpakt³. Vervolgens kon het verpakte proefstuk in de autoclaaf geplaatst worden en werd het onderworpen aan de noodzakelijke druk- en temperatuurcyclus.

¹ Het smeltpunt van teflon is 375 °C.

² Doorzichtig materiaal dat net als teflon niet hecht met SGP. Het smeltpunt is 254 °C en de dikte bedraagt ± 0,2 mm.

³ De dikte van de vacuüm bags bedroeg 0,05 mm.



Figuur 3.14: proefstuk RVS_glad_T_25 verpakt (links) en na laminatie (rechts).

Wanneer het autoclaafproces afgelopen was, kon de zak, de bescherming en de mal voorzichtig verwijderd worden (Figuur 3.14 rechts). Het eventueel weggevoerd SGP-materiaal werd weggesneden terwijl het nog warm was.

Analyse van de resultaten

Er werd na de laminatie veel vloeï vastgesteld en weggesneden. Het SGP-materiaal vloeide weg in horizontale (tussen de teflon mal en het glas) en verticale (tegen de zijkant van het metaalelement) richting. Bij de teflon mallen zelf werd een lichte vervorming vastgesteld, te wijten aan de hoge temperaturen in de autoclaaf. De (weliswaar kleine) bolling van de teflon mal werkte de vloeï in de hand. Bij het losmaken diende telkens enige kracht op de mal uitgeoefend te worden, wat eveneens tot een blijvende vervorming van de mallen bijdroeg.

Ten gevolge van de vloeï was de dikte van de tussenlaag ongeveer gehalveerd (zie Bijlage A). Verder betroffen het zeer zuivere verbindingen zonder waarneembare luchtinsluitingen (Figuur 3.15).



Figuur 3.15: proefstuk RVS_glad_T_25.

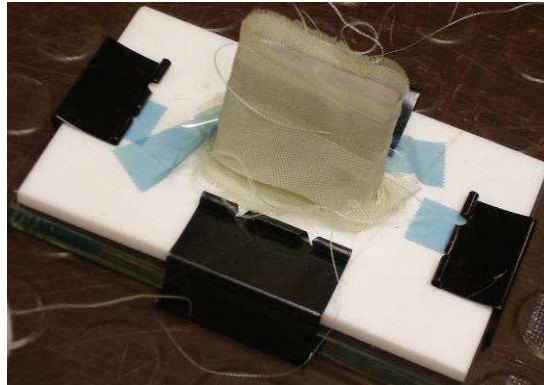
Voor α en β wordt naar de tabel in § 3.3.7 verwezen.

3.3.4 Cyclus II

Tijdens de tweede autoclaafcyclus bevonden zich zes proefstukken in de autoclaaf waarvan vier met een teflon mal en twee met een metalen mal.

Laminatieproces teflon mal

Bij de proefstukken van de tweede cyclus werden naast kleefband ook vier zwarte klemmen (Figuur 3.16) aangebracht om de vervormde teflonmal optimaal in contact te brengen met het glas en op die manier de vloeï te beperken.

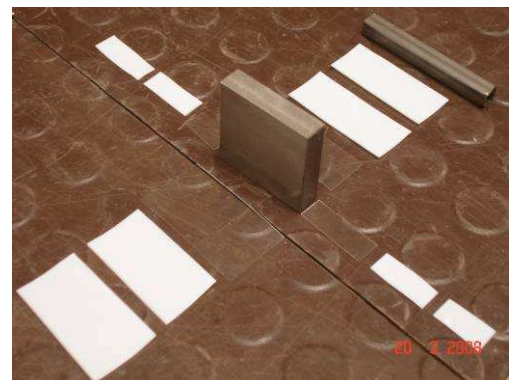
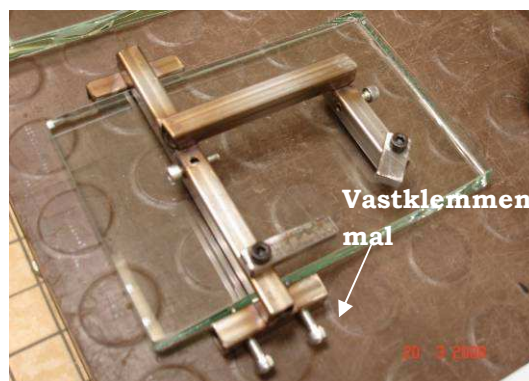


Figuur 3.16: vastgeklemd teflonmal voor optimaal contact tussen teflon en glas.

Voorts verliep het laminatieproces met de teflon mallen analoog aan de eerste cyclus.

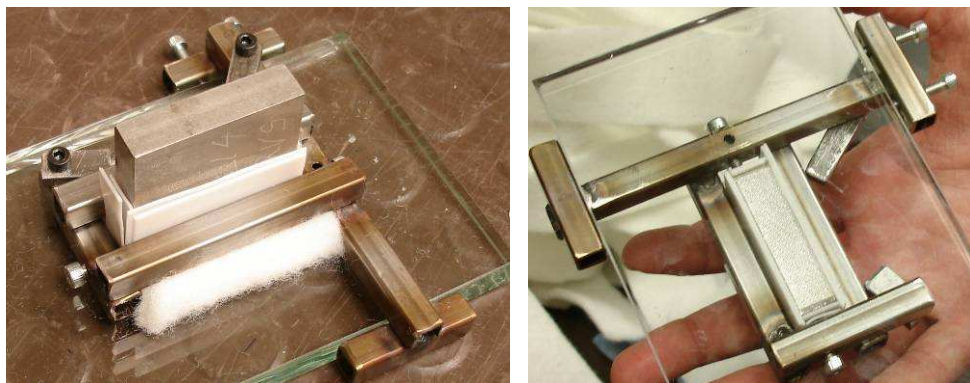
Laminatieproces metalen mal

Twee proefstukken werden vervaardigd met behulp van een metalen mal. Deze mal bestond uit enkele inox kokerprofieltjes en werd doormiddel van twee regelschroeven vastgeklemd op het glasplaatje (Figuur 3.17 links). De mal werd zodanig opgebouwd dat nergens contact gemaakt werd met de SGP tussenlaag. Er werd namelijk gevreesd dat door vloeï de kans bestond dat de mal zelf aan het glasplaatje gelamineerd zou worden. Aan de kopse zijden van het metaalelement werd het contact met de SGP tussenlaag vermeden door twee regelbare boutjes (Figuur 3.17 links).



Figuur 3.17: metalen mal (links) en strookje teflon/mylar om vloeï te vermijden (rechts).

Tussen de mal en het metaalblokje werden rondom telkens drie plastic strookjes¹ geplaatst (Figuur 3.17 rechts) om de vloeit te vermijden. Er werd op toegezien dat de strookjes zorgvuldig tot tegen het glas geplaatst werden (Figuur 3.18).



Figuur 3.18: proefstuk RVS_glad_9 met metalen mal.

Opnieuw werden scherpe randen en oneffenheden met zacht (isolatie)materiaal beschermd om scheuren in de vacuüm bag te vermijden (Figuur 3.19 links). Figuur 3.19 toont rechts een vacuüm verpakt proefstuk. Let op de sterke vervorming van het witte verpakkingsmateriaal en de duidelijke afdruk van de bovenrand van het metaalelement in de zak. Dit benadrukt het belang van het verpakkingsmateriaal.

Na het autoclaafproces werden de proefstukken vrijgemaakt en het eventueel weggevloeid SGP-materiaal werd weggesneden.



Figuur 3.19: verpakt proefstuk voor (links) en na (rechts) het vacuüm zuigen.

Analyse van de resultaten

Van de zes proefstukken werden er drie (RVS_vijl_M_1, RVS_vijl_T_2 en RVS_vijl_T_3) succesvol gelamineerd tijdens de tweede autoclaafcyclus. Bij de

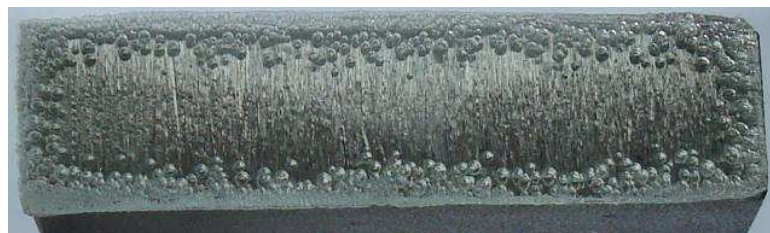
¹ Eén strookje mylar en twee strookjes teflon met een dikte van 0,9 mm.

andere drie proefstukken werd vastgesteld dat de zak gescheurd was. Bij één van de drie gescheurde zakken werd de verpakking verwijderd en vastgesteld dat zich geen hechting voordeed tussen glas en metaal. De andere twee proefstukken werden niet uitgepakt en (samen met het uitgepakte proefstuk) meteen voorzien van een nieuwe zak om tijdens de derde autoclaafcyclus te lamineren. Tabel 3.1 geeft een overzicht van het aantal geslaagde en niet geslaagde proefstukken per type mal.

type mal	# geslaagd	# gefaald
teflon	2	2
metaal	1	1

Tabel 3.1: aantal geslaagde en niet geslaagde proefstukken tijdens cyclus II.

Bij de geslaagde proefstukken met een teflon mal (RVS_vijl_T_2 en RVS_vijl_T_3) bleken in eerste instantie de klemmen te helpen, want de vloeï was ditmaal quasi nihil en de dikte van het SGP was ongewijzigd. Deze adhesieve verbindingen bevatten echter tal van luchtinsluitingen. De luchtbellën situeerden zich aan de randen en dit zowel aan de glaszijde als aan de metaalzijde van de SGP (Figuur 3.20).



Figuur 3.20: proefstuk RVS_vijl_T_2.

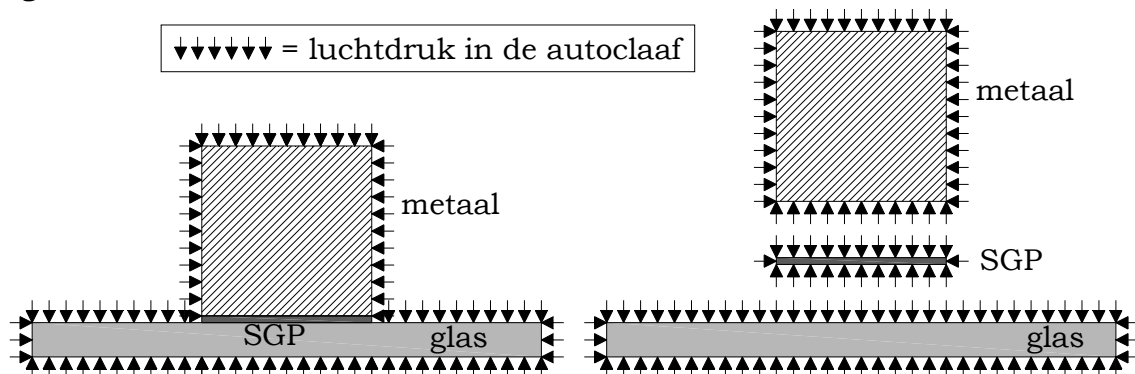
Er zijn verschillende mogelijke oorzaken die aan de basis kunnen liggen van dit verschijnsel.

- Een eerste mogelijkheid is de *oppervlakteruwheid* van het metaalelement. (Beide proefstukken werden met een vijl bewerkt.) Dit lijkt echter onwaarschijnlijk aangezien in dezelfde autoclaafcyclus een analoog proefstuk (RVS_vijl_M_1) met behulp van een metalen mal werd gelamineerd waarbij geen luchtinsluitingen werden vastgesteld (en wel vloeï optrad).
- Misschien *scheurden* de *vacuüm bags* tijdens de autoclaafcyclus wat meteen een tweede mogelijke oorzaak is. Tijdens het voorbereiden van de proefstukken bleven verschillende afvalresten achter op de werkbank in het laboratorium: minuscule glassplinters, teflonresten, metaalresten (afkomstig van de metalen mallen), enz. De kans dat deze resten in het isolatiemateriaal terecht kwamen is reëel. Tijdens het vacuüm zuigen (en onder de verhoogde druk in de autoclaaf) wordt de zak stevig tegen het

proefstuk geperst en hierdoor mogelijk beschadigd door de afvaldeeltjes in het isolatiemateriaal. Ook de scherpe randen van de klemmen (die wellicht te weinig beschermd werden) kunnen de aanleiding zijn van het bezwijken van de vacuüm bag.

De laatste oorzaak lijkt het meest waarschijnlijk aangezien bij twee van de vier proefstukken de scheur in de zak opgemerkt werd. Het lijkt dus aannemelijk dat zich bij de andere twee proefstukken eveneens een scheur in de vacuüm bag voordeed die echter niet opgemerkt werd tijdens het uitpakken van de proefstukken. Er trad bij deze proefstukken wel al een zekere hechting op alvorens de zak scheurde in een later stadium onder invloed van de langzaam opgevoerde druk en temperatuur in de autoclaaf. De gescheurde vacuüm bags zijn de ook de reden dat geen vloeï optrad en veel grote luchtinsluitingen aanwezig waren.

Op het ogenblik dat de vacuüm bag scheurde, werd hij volgezogen met lucht. De lucht, die zich ook boven en onder het SGP bevond (luchtinsluitingen), stond onder dezelfde druk als in de autoclaaf. De samenstellende elementen ondervonden dus een quasi uniforme druk en werden niet meer tegen elkaar geperst (Figuur 3.21). Door deze uniforme druk vloeide het vloeibare SGP niet weg.



Figuur 3.21: drukverdeling bij ongescheurde vacuüm bag (links) en bij gescheurde vacuümbag (rechts).

Bij één proefstuk met metalen mal scheurde eveneens de zak. De scherpe randen van de mal zijn hier waarschijnlijk de oorzaak van. Het tweede proefstuk (RVS_vijl_M_1) was wel geslaagd, maar de teflonstrookjes vervormden echter zoveel, zodat veel vloeï optrad (in horizontale richting). De dikte t was bijna niet te zien. Bovendien waren zeer kleine luchtinsluitingen waarneembaar, verspreid over de volledige oppervlakte.

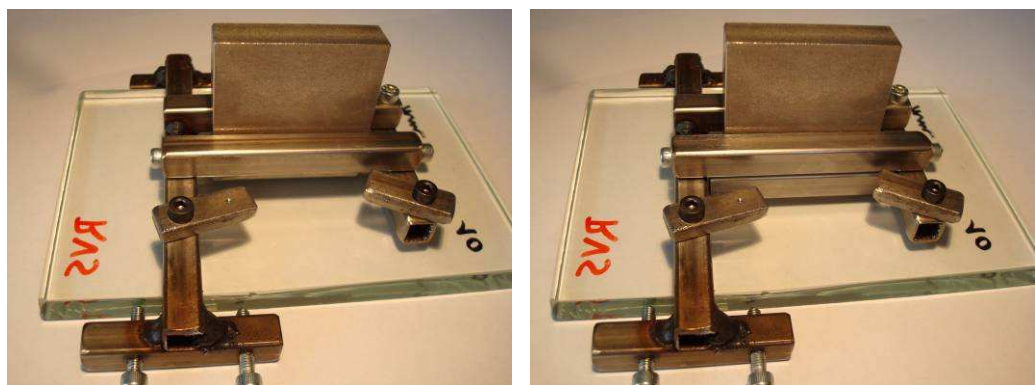
3.3.5 Cyclus III

Tijdens een derde autoclaafcyclus werden nogmaals zes proefstukken gelamineerd waarvan vier met een teflon mal en twee met een metalen mal.

Laminatieproces

Het laminatieproces van de proefstukken met teflon mal verliep analoog als bij cyclus II. Ditmaal werden de scherpe randen van de zwarte klemmen dan ook beter beschermd.

Aan één van de twee metalen mallen werd een kleine wijziging doorgevoerd om de vloeï te beperken: de mal werd aan de twee lange zijden van het metaalelement voorzien van een bijkomend kokerprofieltje (Figuur 3.22). Het rechtstreeks contact tussen de mal en de SGP tussenlaag werd opnieuw vermeden met teflonstrookjes. Aan de kopse zijden bleef het systeem ongewijzigd: één mylarstrookje en twee teflonstrookjes werden met een boutje tegen het metaalelement gedrukt.



Figuur 3.22: aanpassing metalen mal.

Analyse van de resultaten

Tijdens deze cyclus werden vijf proefstukken succesvol gelamineerd (RVS_glad_M_9, RVS_glad_T_10, RVS_glad_T_11, RVS_glad_T_23 en RVS_glad_T_24). Bij één proefstuk met metalen mal scheurde de zak tijdens het proces. Tabel 3.2 geeft een samenvatting van het aantal geslaagde en niet geslaagde proefstukken per type mal.

Type mal	# geslaagd	# gefaald
teflon	4	0
metaal	1	1

Tabel 3.2: aantal geslaagde en niet geslaagde proefstukken tijdens cyclus III.

Bij de proefstukken met een teflon mal werden de zakken niet beschadigd, maar bij al de proefstukken trad het vloeiverschijnsel hardnekkig op. Het SGP-materiaal werd in een zeer dun laagje, maar over een grote oppervlakte uitgesmeerd rond het metaalelement. De teflon mal en het glasplaatje waren in alle gevallen blijkbaar onvoldoende in contact met elkaar. Bovendien was er ook vloeï in verticale richting tegen de zijkanten van het metaalelement. Als gevolg van de overvloedige vloeï was de dikte t quasi nihil. Bij proefstuk RVS_glad_T_24 was de

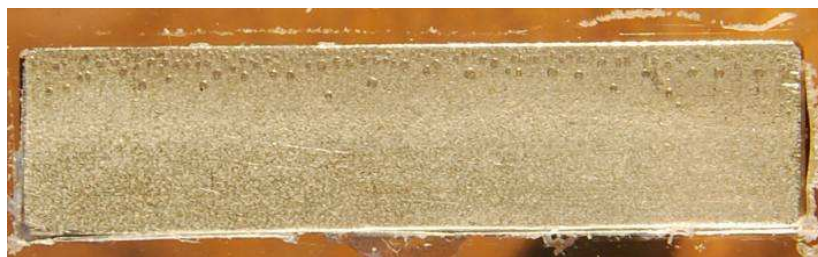
hoek α slechts 87° en de dikte van de tussenlaag varieerde er van quasi nihil tot $\pm \frac{1,52}{2}$ mm (Figuur 3.23).



Figuur 3.23: scheefstand proefstuk RVS_glad_T_24.

Zoals eerder vermeld, ondergingen de teflon mallen een lichte blijvende vervorming tijdens de eerste twee autoclaafcycli. Dit is vermoedelijk de oorzaak voor het slechte contact tussen het glas en het teflon waardoor het SGP-materiaal kon wegvloeien (de dunne mylarstrookjes boden in dit geval geen weerstand).

Bij proefstukken RVS_glad_T_10 en RVS_glad_T_23 werden minuscule luchtbelletjes waargenomen, verspreid over het volledige oppervlak. Proefstuk RVS_glad_T_11 bevatte grotere luchtinsluitingen (tot ± 1 mm diameter) eveneens verspreid over het volledige oppervlak. Ten slotte waren bij proefstuk RVS_glad_T_24 slechts langs één zijde kleine luchtinsluitingen (van dezelfde omvang als bij proefstuk RVS_glad_T_11) waarneembaar (Figuur 3.24). De luchtinsluitingen bevonden zich aan de dunne zijde van de SGP tussenlaag wat er kan op wijzen dat er een verband bestaat tussen de dikte van de tussenlaag en de aanwezigheid van luchtbelletjes.



Figuur 3.24: proefstuk RVS_glad_T_24 (let op de vloeiresten).

Het feit dat geen van de zakken ditmaal beschadigd werd en de luchtinsluitingen kleiner waren en niet geconcentreerd aan de randen, sterkt het vermoeden dat bij de tweede autoclaafcyclus de scherpe randen van de klemmen de oorzaak waren van de gescheurde vacuüm bags.

Eén proefstuk met een metalen mal faalde alweer door een gescheurde zak, terwijl een ander proefstuk (RVS_glad_M_9) wel goed gelamineerd werd. Na de laminatie werd vastgesteld dat langs de twee lange zijden van het metaalelement nauwelijks vloeï was opgetreden in horizontale richting. Er vloeide wel in beperkte mate materiaal weg in verticale richting. Aan de kopse zijden daarentegen trad wel veel vloeï op (Figuur 3.25). Deze was zo hevig dat bijna al het SGP-materiaal wegvloeide en de resulterende dikte van de tussenlaag andermaal quasi nihil was. Door de hevige vloeï kleefde de mal aan de kopse zijden van het metaalelement gedeeltelijk vast. Ze kon echter tijdig verwijderd worden. Het wijzigen van de mal had niet veel effect op de uiteindelijk dikte van de SGP tussenlaag.



Figuur 3.25: vloeï bij proefstuk RVS_glad_M_9.

Bij dit proefstuk werden eveneens kleine luchtbelletjes vastgesteld. Belangrijk hierbij is het feit dat de luchtinsluitingen groter waren nabij de kopse zijden van het metaalelement en bijna niet met het blote oog waar te nemen in het midden. Met andere woorden: daar waar de vloeï hevig optrad, waren de luchtinsluitels het grootst (Figuur 3.26).



Figuur 3.26: proefstuk RVS_glas_M_9.

3.3.6 Cyclus IV

Tot slot werden nogmaals 12 proefstukken gelamineerd. Dit gebeurde echter niet in het bijzijn van de auteur. Gedetailleerde informatie over de autoclaafcycli, de mallen en de al dan niet gescheurde vacuüm bags is eveneens niet voorhanden. Wel is zeker dat één proefstuk met een metalen mal werd gelamineerd en alle andere proefstukken met een teflon mal.

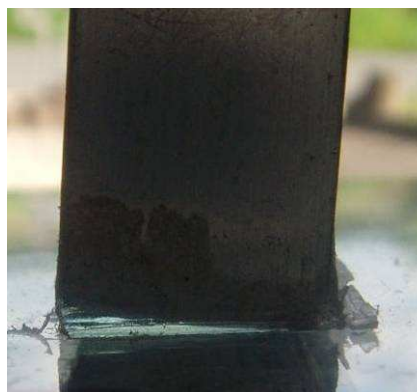
Het proefstuk met een metalen mal (RVS_vijl_M_4) vertoonde identieke verschijnselen als proefstukken RVS_vijl_T_2 en RVS_vijl_T_3 (zie cyclus II): er trad geen vloeï op, de dikte van de SGP tussenlaag wijzigde nauwelijks en er waren bijzonder veel (grote) luchtinsluitingen waar te nemen.



Figuur 3.27: proefstuk RVS_vijl_M_4.

Wellicht scheurde andermaal de vacuüm bag in de loop van de autoclaafcyclus zoals ook bij proefstukken RVS_vijl_T_2 en RVS_vijl_T_3 ondersteld werd (Figuur 3.21). Bij de drie gevallen waar dit verschijnsel zich voordeed, werd de oppervlakteruwheid vergroot met behulp van een vijl. De schrijver wijt dit echter aan toeval, gezien verschillende ander proefstukken met een aangepaste oppervlakteruwheid wél goed gelamineerd werden.

De proefstukken met een teflon mal vertoonden globaal dezelfde verschijnselen. Er trad overal veel vloeï op (de vele niet weggesneden vloeïresten maakten dit duidelijk) en de dikte t was telkens quasi nihil. Bij 7 proefstukken waren kleine luchtinsluitingen waarneembaar (niet altijd zichtbaar op de foto's in Bijlage A). Bij proefstuk alu_vijl_T_26 bedroeg de hoek α slechts 85° en de dikte van de tussenlaag varieerde er van quasi nihil tot $\pm 1,52$ mm (Figuur 3.28). Analoog was bij proefstuk alu_vijl_T_31 de hoek α 87° en varieerde de dikte van quasi nihil tot $\pm \frac{1,52}{2}$ mm.



Figuur 3.28: scheefstand proefstuk alu_vijl_T_26.

3.3.7 Besluit

Tabel 3.3 vat voorgaande zaken samen waarbij $\frac{t}{1,52}$ de verhouding is van de effectieve dikte van de tussenlaag na laminatie tot de nominale dikte van 1,52 mm.

n°	cyclus	naam	t/1,52mm []	luchtbellen	α [°]	β [°]
1	I	RVS_glad_T_25	± 0,5	nee	90	90
2	I	RVS_glad_T_26	± 0,5	nee	90	89,5
3	II	RVS_vijl_M_1	± 0	ja	90	90
4	II	RVS_vijl_T_2	± 1	ja	90	90
5	II	RVS_vijl_T_3	± 1	ja	89	90
6	III	RVS_glad_M_9	± 0	ja (klein)	89	90
7	III	RVS_glad_T_10	± 0	ja (klein)	90	90
8	III	RVS_glad_T_11	± 0	ja	89,5	90
9	III	RVS_glad_T_23	± 0	ja (klein)	90	90
10	III	RVS_glad_T_24	± 0 - 0,5	ja - nee	87	90
11	IV	alu_vijl_T_26	± 0 - 1	ja - nee	85	90
12	IV	alu_vijl_T_27	± 0	ja	90	90
13	IV	alu_vijl_T_28	± 0	ja (klein)	90	90
14	IV	alu_vijl_T_29	± 0	nee	88	90
15	IV	alu_vijl_T_30	± 0	ja	89	90
16	IV	alu_vijl_T_31	± 0 - 0,5	ja	87	90
17	IV	RVS_glad_T_12	± 0	nee	90	90
18	IV	RVS_glad_T_13	± 0	nee	90	90
19	IV	RVS_glad_T_14	± 0	nee	90	90
20	IV	RVS_glad_T_15	± 0	nee	90	90
21	IV	RVS_glad_T_16	± 0	ja (klein)	89	90
22	IV	RVS_vijl_M_4	± 1	ja	89	90

Tabel 3.3: eigenschappen van de gelamineerde proefstukken.

Tabel 3.4 geeft een overzicht van het aantal geslaagde proefstukken en het aantal proefstukken waarbij de vacuüm zak scheurde, voor cycli I, II en III (10 geslaagde proefstukken). Bij de gefaalde proefstukken wordt onderscheid gemaakt tussen die waar toch hechting optrad (RVS_vijl_T_2 en RVS_vijl_T_3) en die waar geen hechting optrad (of die niet gecontroleerd werden).

cyclus	# geslaagd	# gefaald, toch gelamineerd	# gefaald, niet gelamineerd
I	2	0	0
II	1	2	3
III	5	0	1
Totaal:	8	2	4

Tabel 3.4: aantal geslaagde en gefaalde proefstukken voor cycli I, II en III.

Het aantal gescheurde zakken was behoorlijk groot. Dit was vermoedelijk te wijten aan afvalresten die in het isolatiemateriaal achterbleven of scherpe randen van de mal, de klemmen, het metaalelement en/of het glasplaatje. Ook de dikte van de vacuüm bags speelt hier een rol. Bij drie proefstukken (RVS_vijl_T_2, RVS_vijl_T_3 en RVS_vijl_M_4) waren opmerkelijk veel luchtinsluitingen aanwezig en bleek geen vloeï opgetreden te zijn (ongewijzigde dikte van het SGP). Dit was wellicht te wijten aan het scheuren van de vacuüm bag in een iets later stadium van het laminatieproces.

Bij de overige proefstukken trad het vloeiverschijnsel hardnekkig op. Opvallend hierbij is de volgende trend: wanneer $\frac{t}{1,52}$ ongeveer 0,5 was, bleken weinig

(zichtbare) luchtinsluitingen aanwezig te zijn. Was $\frac{t}{1,52}$ echter heel klein (± 0), dan

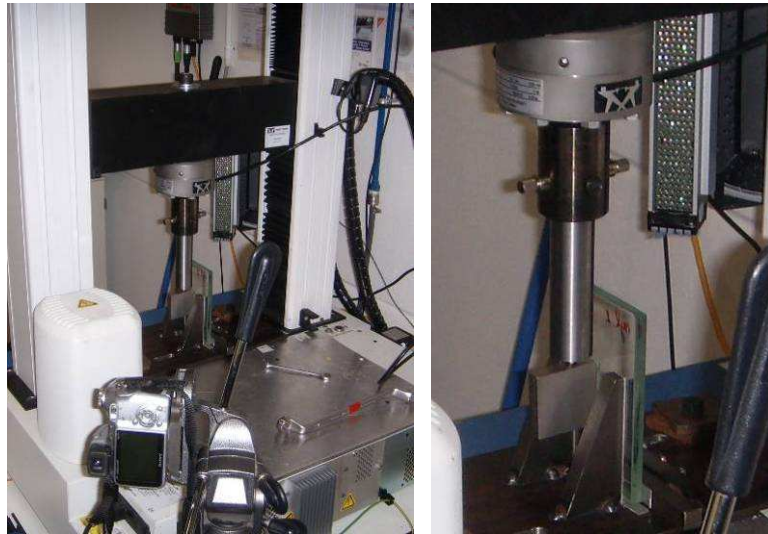
kwamen in 70% van de gevallen wél zichtbare luchtinsluitingen voor (zie Tabel 3.4). Hoe minder vloeï optrad, hoe kleiner de kans op luchtinsluitingen. Bij proefstukken RVS_glad_T_24, alu_vijl_T_26 en alu_vijl_T_31 wordt deze stelling bevestigd door het feit dat enkel luchtbelletjes te zien waren aan de dunne zijde van de SGP tussenlaag. Ook proefstuk RVS_glad_M_9 spreekt deze stelling niet tegen: aan de kopse zijden, waar de meeste vloeï optrad, waren de luchtinsluitingen het grootst. Elders waren er bijna geen luchtbelletjes zichtbaar.

De oppervlakteruwheid van de metaalelementen blijkt geen onmiddellijke invloed te hebben op de adhesieve verbinding. Proefstukken RVS_vijl_M_1 en RVS_glad_M_9 vertoonden allebei hetzelfde uitzicht en bezaten allebei luchtinsluitingen. De proeven zullen uitwijzen of de oppervlakteruwheid een invloed heeft op de sterkte van de verbinding.

3.4 Excentrische drukproeven

3.4.1 Proefopstelling

De proeven werden uitgevoerd met behulp van de vervorminggestuurde trek- en drukbank van de Vakgroep Textielkunde¹ (Figuur 3.29 links). Dit toestel betreft een elektromechanische, universele trekbank Instron 3369 met een Bluehill2 Control Console en een uitleestoestel op PC. Er werd een aangepaste proefopstelling ontworpen om het proefstuk tijdens de test vast te klemmen.

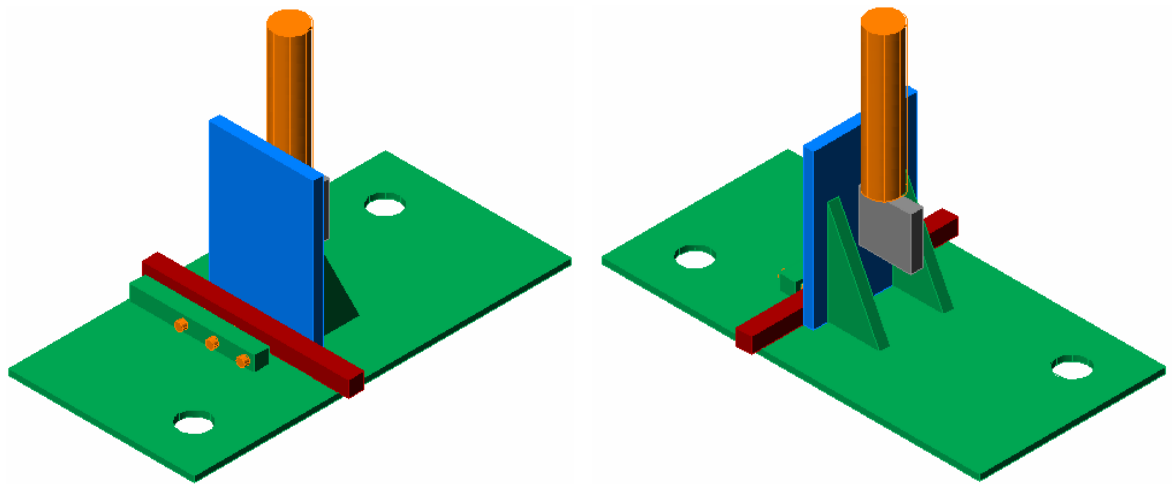


Figuur 3.29: trek- en drukbank van de Vakgroep Textielkunde (links) en detail van de meetcel (rechts).

Door aan de voorzijde van het glasplaatje twee driehoekige steuntjes op de bodemplaat van de proefopstelling vast te lassen, werd het kantelen van het proefstuk verhinderd. Aan de achterzijde van het glasplaatje volstond een stalen staafje dat tegen het glas geklemd werd met enkele boutjes (Figuur 3.30). De opstelling werd op de correcte positie vastgebout aan de testbank. In de stalen proefopstelling werd rechtstreeks contact met glas verhinderd door dunne aluminiumplaatjes. Bijlage B bevat de werktekeningen van de eerste versie van deze proefopstelling.

De drukkracht op het proefstuk werd uitgeoefend door een stalen staaf met in het ondervlak een klein boorgat. Door de opstelling te verplaatsen, werd dit boorgat exact boven de stalen kogel, die op het metaalelement van het proefstuk gelegd werd (in een klein boorgat), gepositioneerd (Figuur 3.31 links).

¹ Vakgroep Textielkunde, Faculteit Ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent. Technologiepark-Zwijnaarde 907, Zwijnaarde, B 9052 Gent, België.



Figuur 3.30: proefopstelling, versie 1.

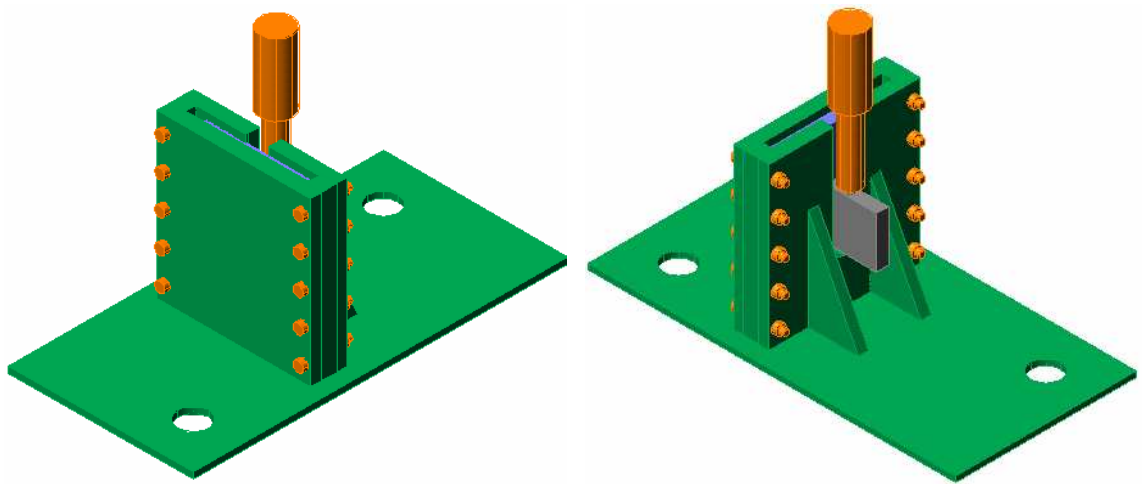
Tijdens het beproeven van de eerste vier proefstukken bleek echter in twee gevallen het glas te bezwijken voor de verbinding (Figuur 3.31 rechts). De afstand tussen de driehoekige steuntjes bedroeg 52 mm en blijkbaar was het glas niet in staat het hier veroorzaakte buigmoment te weerstaan. Daarom werd besloten de proefopstelling aan te passen.



Figuur 3.31: stalen kogel (links) en vroegtijdig bezwijken van het glas bij versie 1 van de proefopstelling, let op het metaalelement waarbij geen onthechting optrad (rechts).

Bij de tweede versie van de proefopstelling werd het proefstuk volledig ingeklemd (Figuur 3.32). Dit gebeurde door het glasplaatje in een sleuf van 15 mm breed te schuiven. Met behulp van dunne aluminium- en mylarplaatjes werd het glasplaatje (10 mm dik) vastgeklemd. De grootste overspanning van het glas bedroeg in dit geval 22 mm (zie Bijlage B, versie 2). Met deze opstelling werden de overige proefstukken beproefd. Om bij eventuele glasbreuk het breukpatroon te kunnen vaststellen, werd bovendien een doorzichtige folie op de glasplaatjes gekleefd.

Tijdens de proef werd de geleverde kracht F gemeten door een meetcel¹ met een bereik tot 50 kN². Bij aanvang van de proef werd de drukstang tot net boven de kogel neergelaten waarna de proef gestart werd. Om de speling tussen de kogel en het metaal (van drukstaaf en proefstuk) weg te nemen, bedroeg de belastingssnelheid eerst 0,2 mm/min tot een belasting van 20 N. Vanaf deze waarde nam de belastingssnelheid toe tot 1 mm/min en startte het opmeten van de drukkracht F in functie van de vervorming n . De vervorming n is de verticale verplaatsing van drukstang tijdens de proef en werd op nul gekalibreerd bij het begin van de opmeting (de kracht F niet). De proef stopte zodra F met 90% daalde. Er werden 10 metingen per seconde uitgevoerd.



Figuur 3.32: proefopstelling, versie 2.

3.4.2 Proefresultaten

Er werden 19 van de 22 proefstukken beproefd. Tabel 3.5 vat de belangrijkste resultaten van de proeven samen. De eerste vier proefstukken in de tabel werden met de eerste versie van de proefopstelling beproefd, de rest met de tweede versie. In de tabel wordt voor elk proefstuk aangegeven welke bezwijkfenomenen zich voordeden: volledige glasbreuk (G_b), loskomen van een glasschil (G_s), onthechting tussen SGP en glas (A_g), onthechting tussen SGP en metaal (A_m) en/of kantelen van het metaalelement om de zwakke as (Z). Deze bezwijkfenomenen worden in wat volgt gedetailleerd besproken. Bij ‘opmerkingen’ wordt voor elk proefstuk vermeld welke onthechting zich bovenaan voordeed. Bij de proefstukken waar G_b of G_s optrad wordt bij ‘opmerkingen’ eveneens aangegeven tot op welke hoogte (van de onderzijde) glas aan het metaalelement was blijven kleven.

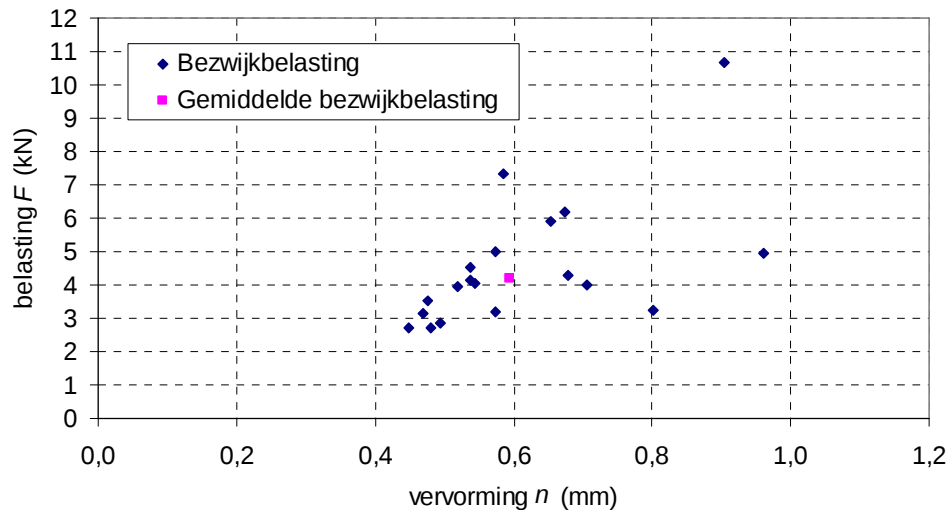
¹ De meetnauwkeurigheid van de meetcel is 0,01 kN, de meetnauwkeurigheid van de verplaatsing bedraagt 0,1 mm.

² De andere beschikbare meetcellen van 0,5 en 2 kN volstonden in dit geval niet.

De grafiek in Bijlage C geeft voor alle proeven grafisch het verband weer tussen F en n . Bijlage D bevat afbeeldingen van de bezwiken proefstukken. De duur van de proeven varieerde van 27 tot 58 seconden. De bezwijkbelasting F_{max} is de maximale drukkracht die tijdens de proef bereikt werd. Figuur 3.33 toont de spreiding van de bezwijkbelastingen. De allereerste proef resulteerde in een bezwijkbelasting van 10,65 kN (Tabel 3.5). Dit bleek een uitzonderlijk hoge waarde te zijn en bij de berekening van de gemiddelde bezwijkbelasting werd, zowel in Tabel 3.5 als in Figuur 3.33, deze extreme waarde buiten beschouwing gelaten. Er is op het eerste zicht geen merkbaar verband tussen hoge/lage bezwijkbelastingen en het metaaltype of de oppervlakteruwheid.

naam	duur (sec)	n (mm)	F_{max} (kN)	G_b	G_s	A_g	A_m	Z	Opmerkingen
RVS_vijl_M_1	54,4	0,90	10,65	x			x		$h/2$, A_m
RVS_vijl_T_2	40,4	0,67	6,17				x		A_m
RVS_vijl_T_3	34,6	0,57	5,02		x	x			$h/2$, A_g
RVS_glad_T_24	35,1	0,59	7,35	x					h
RVS_glad_T_25	39,3	0,65	5,92			x	x		A_g
RVS_glad_T_26	28,6	0,47	3,54			x	x	x	A_g en A_m
RVS_glad_M_9	42,6	0,71	3,99			x	x	x	A_m
RVS_glad_T_10	31,3	0,52	3,96			x	x		A_g
RVS_glad_T_11	32,4	0,54	4,51		x	x	x	x	$h/2$, A_m
RVS_glad_T_23	28,2	0,47	3,16	x		x	x		$h/2$, A_g en A_m
alu_vijl_T_27	57,8	0,96	4,95		x	x	x		$h/3$, A_m en A_g
alu_vijl_T_28	40,9	0,68	4,29	x			x		$3h/4$, A_m
alu_vijl_T_29	48,7	0,80	3,24			x	x	x	A_g en A_m
alu_vijl_T_30	34,5	0,57	3,18		x	x	x	x	$h/3$, A_g
alu_vijl_T_31	32,8	0,54	4,06			x	x	x	A_g en A_m
RVS_glad_T_13	27,1	0,45	2,71	x			x		$h/2$, A_m
RVS_glad_T_15	28,9	0,48	2,72			x	x		A_g en A_m
RVS_glad_T_16	32,6	0,54	4,14			x			A_g
RVS_vijl_M_4	29,7	0,49	2,87		x	x			$4h/5$, A_g
Gemiddelde:	35,9	0,59	4,21	10		12	15	6	

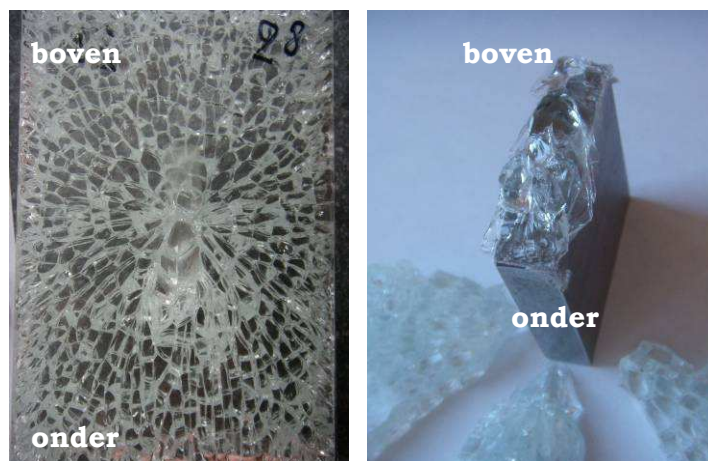
Tabel 3.5: proefresultaten.



Figuur 3.33: spreiding van de bezwijkbelastingen.

Glasbreuk (G_b) of loskomen van een glasschil (G_s)

Bij vijf proefstukken brak (G_b) het glas en werd een ‘roosvormig’ breukpatroon vastgesteld. Twee van deze proefstukken werden met de eerste versie van de proefopstelling beproefd en hadden geen folie tegen het glas waardoor het beginpunt van de breuklijnen niet kon waargenomen worden. Bij de andere proefstukken vertrokken de breuklijnen op $\pm h/4$ van de onderzijde van het metaalelement (Figuur 3.34 links). Dit strookt met de verwachtingen: t.g.v. het veroorzaakte moment oefent het metaalelement onderaan een drukkracht uit op het glas. Bij één proefstuk trad geen onthechting op (Figuur 3.34 rechts), bij de andere proefstukken trad over $\pm$ de halve hoogte onthechting op tussen SGP en metaal.

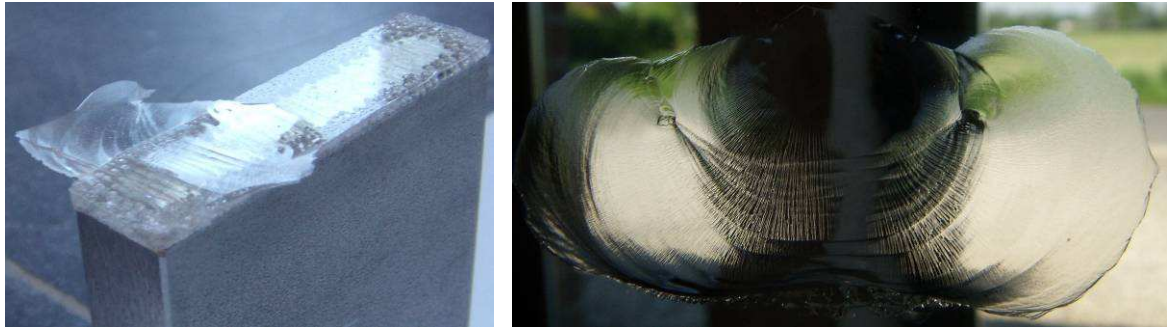


Figuur 3.34: breukpatroon achterzijde proefstuk alu_vijl_T_28 (links) en het metaalelement met glasresten van proefstuk RVS_glad_T_24 (rechts).

Bij vijf andere proefstukken brak een glasschil (G_s) van het glasplaatje (Figuur 3.35). De afmetingen van deze schil variëren van 28 tot 60 mm in de lengte en 14 tot 40 mm in de hoogte. De dikte van de drukzone van het thermisch gehard glas

is ± 2 mm (cfr. § 1.1.1). De glasschil was nooit dikker dan 1 mm en brak dus af in de drukzone van het glas. Daarom brak de rest van het glas niet.

Meestal kleefde het glas aan de onderste helft van het metaalelement en trad bovenaan onthechting van het SGP op. Bij al deze proefstukken trad onthechting op tussen glas en SGP (in vier gevallen ook bovenaan) en bij drie proefstukken trad eveneens onthechting op tussen het metaal en het SGP (Figuur 3.36).



Figuur 3.35: afgebroken glasschil van proefstuk RVS_vijl_T_3 (links) en afdruk in het glas (rechts).



Figuur 3.36: metaalelement proefstuk alu_vijl_T_27.

Van de acht hoogste bezwijkbelastingen behoren er zes tot proefstukken waarbij het glas brak (volledig of een schil). Er kan dus gesteld worden dat bij glasbreuk de bezwijkbelasting over het algemeen hoger is. Hierbij dient wel vermeld te worden dat het proefstuk met de laagste bezwijkbelasting eveneens bezweek met glasbreuk.

Van de acht hoogste bezwijkbelastingen behoren er vijf tot proefstukken waarbij het metaalelement een verhoogde oppervlakteruwheid kreeg. Er kan dus eveneens gesteld worden dat een verhoogde oppervlakteruwheid een hogere bezwijkbelasting tot gevolg heeft.

Adhesieve breuk tussen SGP en glas (A_g)

Bij veertien proefstukken werd (eventueel gedeeltelijk) onthechting tussen SGP en glas vastgesteld. Bij elf van deze proefstukken trad eveneens onthechting tussen SGP en metaal op.

Bij drie proefstukken deden zich A_g en A_m voor, maar geen van de andere bezwijkfenomenen. Opvallend hierbij was het feit dat bij deze drie proefstukken

aan de bovenzijde van het metaal onthechting tussen SGP en glas optrad over een kleine zone ($\pm h/5$). De overige oppervlakte van het metaalelement was quasi volledig losgekomen van het SGP, Alsof de onthechting bovenaan tussen SGP en glas een kleine schok veroorzaakte die elders onthechting tussen SGP en metaal teweegbracht.

Eén proefstuk kende enkel onthechting aan de glaszijde (en geen andere bezwijkfenomenen).

Adhesieve breuk tussen SGP en metaal (A_m)

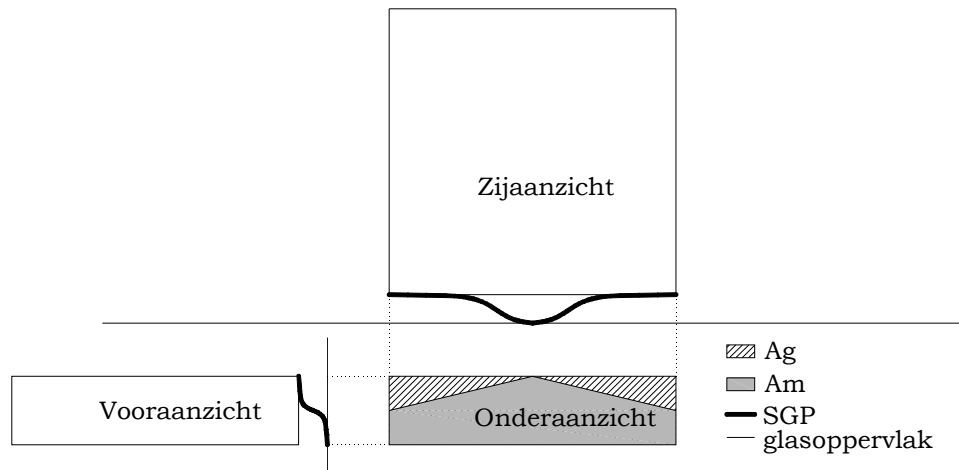
Bij vijftien proefstukken trad onthechting op tussen SGP en metaal, maar slechts in één geval kwam geen van de andere bezwijkfenomenen voor, de SGP tussenlaag bleef er ongeschonden achter op het glasplaatje.

Kanteling om de zwakke as (Z)

Dit fenomeen deed zich voor bij zes proefstukken, samen met A_g , A_m en soms G_b/G_s . Bij deze proefstukken stopte de proef zonder dat het metaalelement van het glasplaatje viel. Er was met andere woorden steeds een zeker resthechting. Er werd nadien vastgesteld dat het metaalelement gemakkelijk gekanteld kon worden om de zwakke as. Bovendien bleek over de volledige SGP-oppervlakte onthechting op te treden, ofwel aan de metaalzijde ofwel aan de glaszijde, maar zelden deden A_g en A_m zich op één plaats tegelijk voor. Figuur 3.37 en Figuur 3.38 illustreren dit fenomeen voor proefstuk alu_vijl_T_29.



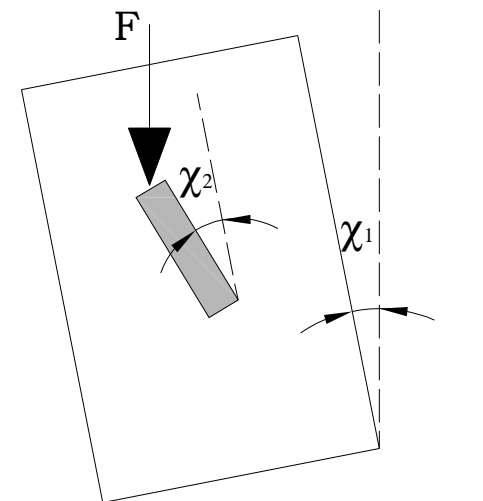
Figuur 3.37: kanteling om de zwakke as bij proefstuk alu_vijl_T_29, zijaanzicht (links) en vooraanzicht (rechts).



Figuur 3.38: kanteling om de zwakke as bij proefstuk alu_vijl_T_29, schematisering A_g en A_m .

Bij 10 van de 22 proefstukken bleek $\alpha < 90^\circ$ (Tabel 3.3). De zes proefstukken waarbij het verschijnsel Z werd vastgesteld, bleken allemaal tot deze groep te behoren. Deze scheefstand kan een verklaring zijn voor de kanteling om de z-as.

Figuur 3.39 toont een tweede mogelijke oorzaak van dit fenomeen. Vermoedelijk stond het proefstuk tijdens de drukproef niet volkomen verticaal (χ_1) of werd het metaalelement niet verticaal gelamineerd op het glasplaatje (χ_2). De hoek χ_2 werd vooraf niet opgemeten omdat de randen van het glasplaatje niet volkomen recht waren. Wanneer het proefstuk in de proefopstelling aangebracht was, kon de hoek $|\chi_1 - \chi_2|$ gemeten worden, wat echter niet gebeurde bij deze proefreeks.



Figuur 3.39: mogelijke scheefstand van het metaalelement en het proefstuk

3.4.3 Besluit

De proeven leverden vrij uiteenlopende resultaten op, zowel wat betreft de bezwijkbelastingen als de bezwijkfenomenen. Bij glasbreuk was de

bezwijkbelasting over het algemeen hoger en de oppervlakteruwheid bleek globaal een positief effect te hebben op de bezwijkbelasting. De drie proefstukken die veel luchtinsluitingen en een ongewijzigde SGP-dikte hadden (t.g.v. een gescheurde vacuüm bag, cfr. § 3.3.4), kenden bezwijkbelastingen van 6,17; 5,02 en 2,87 kN. Deze waarden liggen in dezelfde grootteorde als de bezwijkbelastingen van de andere proefstukken. Er werd echter verwacht dat een fout tijdens het laminatieproces een kleinere sterkte zou teweegbrengen. Blijkbaar was de hechting bij deze proefstukken toch voldoende of beschikten de andere proefstukken (eveneens) over een kleinere sterkte t.g.v. de overvloedige vloeï (en de kleine resulterende dikte van de tussenlaag). De resultaten van de proeven kunnen er ook op wijzen dat de dikte van de SGP tussenlaag na laminatie weinig rol speelt, net als eventuele luchtinsluitingen.

Om deze proefreeks te kunnen staven, zal moeten getracht worden betere laminaten te maken (zonder vloeï en luchtinsluitingen) waaruit moet blijken in welke mate de voorgaande conclusies kloppen.

3.5 Evaluatie fase I

De doelstellingen van de eerste proefreeks werden bereikt. Er werd uitgebreid kennis gemaakt met het laminatieproces. In geen van de gevallen werd echter een 'perfecte' laminaatverbinding - zonder luchtinsluitingen en met een normale dikte van de SGP tussenlaag - gerealiseerd. In een volgende fase zal dan ook meer aandacht geschonken worden aan de volgende zaken:

- Vloeï moet vermeden worden. Dit vereist een goed en blijvend contact tussen de mal en het glas. De mal moet eveneens zeer goed aan sluiten tegen het te lamineren metaalelement. Een nieuw mal-systeem dringt zich op.
- Gescheurde vacuüm bags moeten vermeden worden. Scherpe randen en niveauverschillen dienen zo mogelijk nog beter beschermd te worden en het verpakkingsmateriaal moet zuiver van afvaldeeltjes blijven.

Er werd ook getracht een idee te krijgen van de sterkte van een laminaatverbinding met betrekking tot ontwerp T1_01. In dit ontwerp wordt in UGT op het metaalelement een puntkracht van 5 kN uitgeoefend (zie § 3.2.3). De bezwijkbelasting van de proefstukken bleek slechts in 25 % hoger te zijn en de minimale bezwijkbelasting was maar half zo groot. In een volgende ontwerp zal de oppervlakte van de laminaatverbinding dan ook groter moeten zijn.

HOOFDSTUK 4: Fase II

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden verschillende schetsen van ontwerpen voorgesteld. Het ATP geldt nog steeds als uitgangspunt qua afmetingen en belastingen. Op T1_02 na zijn alle ontwerpen gebaseerd op het principe van basisontwerp T1_01. In tegenstelling tot ontwerp T1_01 worden in wat volgt noch de hoofdligger noch de gording van onder- of bovenwapening voorzien. De wapening wordt namelijk in geen enkel ontwerp gebruikt in functie van de verbinding. Het blijft echter in de meeste gevallen een optie om deze wapening toch toe te voegen.

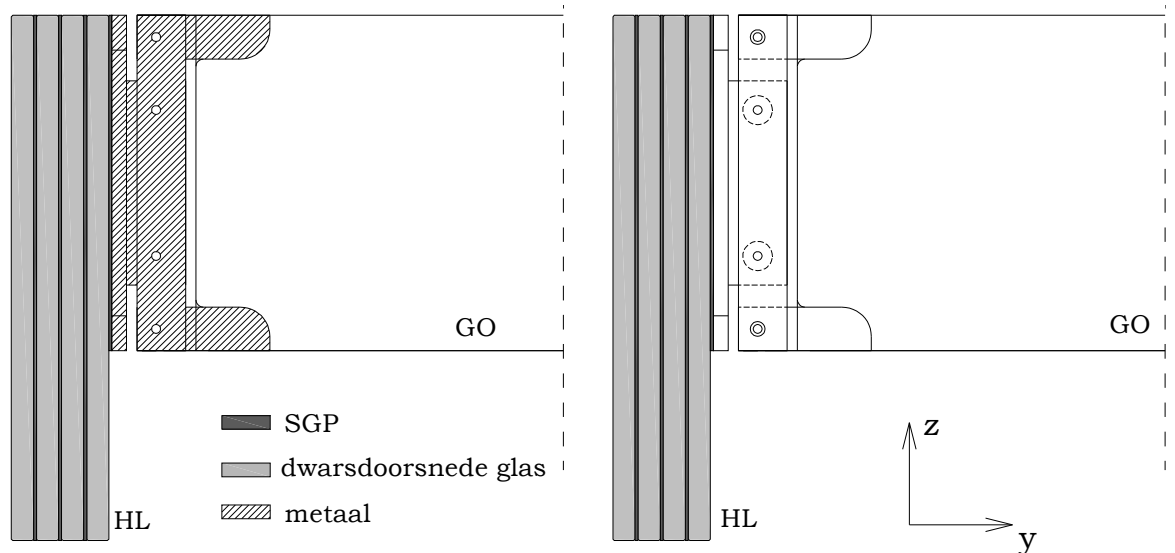
Naast een toelichting van het basisidee werd voor elk ontwerp getracht de voor- en nadelen op te sommen. Op die manier werden twee ontwerpen geselecteerd om gerealiseerd te worden. De criteria bij deze selectie waren ondermeer: transparantie van de verbinding, sterkte van de verbinding, de mate waarin het mogelijk is om de verbinding te realiseren (m.b.t. tot het laminatieproces), toleranties tijdens de montage, enz. De realisatie van de geselecteerde ontwerpen komt uitgebreid aan bod in § 4.3. Tot slot wordt een evaluatie gehouden van dit hoofdstuk in functie van de volgende fase.

4.2 Ontwerpen

4.2.1 Ontwerp T1_02

Een eerste nieuw ontwerp wordt in Figuur 4.1 aan de hand van een zijaanzicht en een snede geïllustreerd. In dit ontwerp wordt de verbinding gerealiseerd met behulp van voorspanbouten. Figuur 4.2 toont een principeschets. Tegen de hoofdligger wordt een stalen I-profiel met afgeronde binnenhoeken gelamineerd. Alle belastingen (dwarskracht én buigmoment) worden volledig opgevangen door de SGP tussenlaag. Indien een rechthoekig profiel gebruikt wordt, zal bij afmetingen van 230 x 28 mm (doorsnede van de gording) bovenaan in de SGP tussenlaag door het buigmoment een trekspanning van $\pm 15,4$ MPa opgewekt worden in UGT (spanning in de y-richting). De proefstukken in het vorige hoofdstuk toonden aan dat de gemiddelde bezwijkspanning bovenaan in de SGP

tussenlaag $\pm 14,5$ MPa bedroeg. Zonder hier dieper op in te gaan, blijkt dat het I-profiel noodzakelijk is om de trekspanningen in de SGP tussenlaag te beperken. Een plaat met twee gaten van diameter 20 mm wordt vooraf loodrecht tegen dit profiel gelast.



Figuur 4.1: ontwerp T1_02, algemeen.

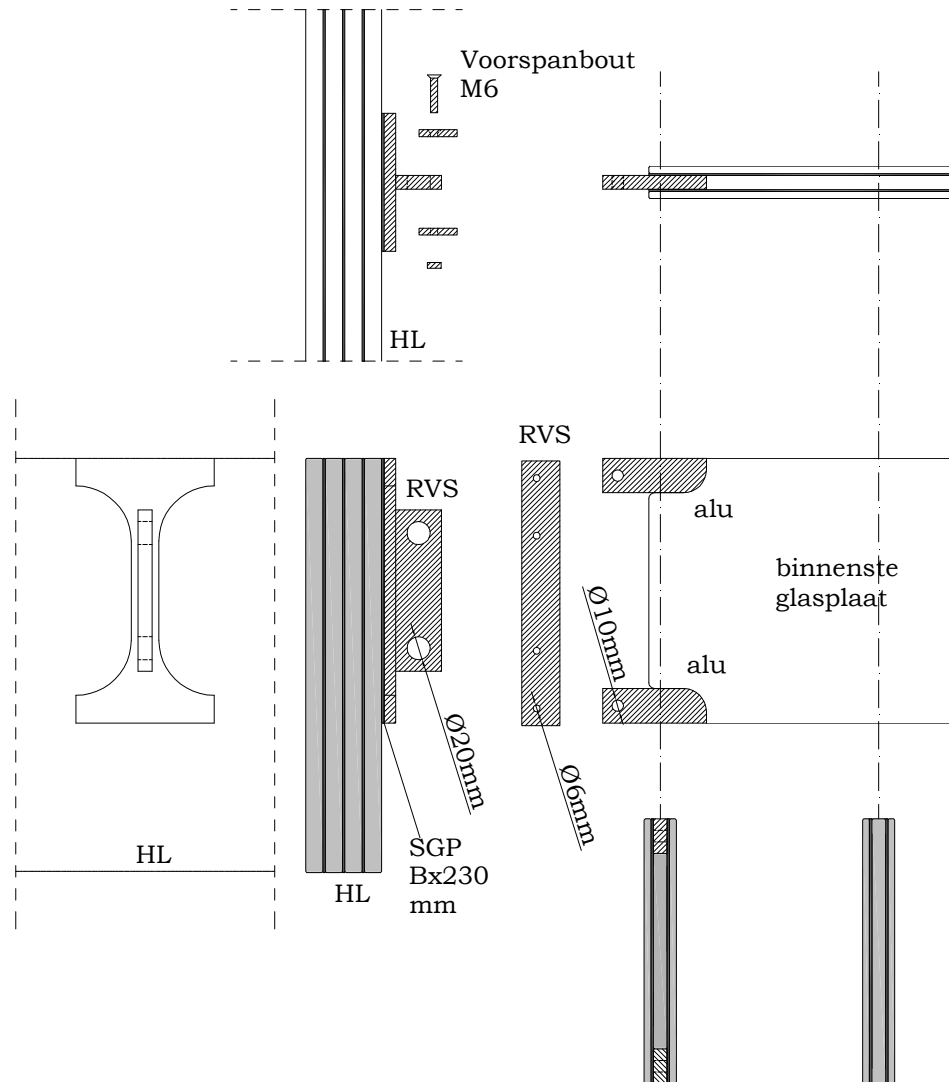
De gording is boven- en onderaan voorzien van twee uitkragende aluminium insteekelementen met dezelfde afmetingen. In de insteekelementen is een gat gemaakt van diameter 10 mm. Met behulp van twee secundaire staalplaatjes wordt de gording aan de hoofdligger bevestigd met behulp van voorspanbouten. Door de gaten in het element tegen de hoofdligger groter te maken dan nodig, zijn toleranties voorzien tijdens de montage. De bouten hebben diameter 6 mm, er is dus in in y- en z-richting 2 x 7 mm speling voorhanden. Een derde vrijheidsgraad die toleranties toelaat is φ_x . De *voordelen* van deze verbinding zijn:

- De bovenzijden van de hoofdliggers en gordingen liggen in één vlak.
- Het betreft een inklemming die bovendien toleranties met betrekking tot de vrijheidsgraden v , w en φ_x toelaat.

De *nadelen* van dit ontwerp zijn:

- Het betreft een zware verbinding die weinig transparant is. Het I-profiel dat tegen de hoofdligger gelamineerd wordt, oogt lomp.
- Er is relatief veel metaalverbruik.
- De montage is bewerkelijk.

- Wegens de cirkelvormige doorsnede bedraagt de speling die in y- en z-richting tegelijk mogelijk is slechts $\frac{(20-6)}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 5 \text{ mm}$ in plaats van 7 mm.



Figuur 4.2: ontwerp T1_02, principeschets.

- Een korte berekening¹ leert dat bij dit ontwerp de voorspanning nooit voldoende is om aan het inklemmingsmoment te weerstaan:

$$\gamma M_k \leq M_g \text{ met:} \quad (4.1)$$

$$M_k = 3,6 + 5,05 \cdot 0,030 = 3,75 \text{ kNm}$$

¹ Vandepitte D. (1980). *Berekening van Constructies II*. Story - Scientia, Academia Press, Gent, Hoofdstuk 22, p. 49 e.v.

$$\gamma = 1,25$$

$$M_g = \mu P(|y_i| + y_i) = 0,783 \text{ kNm met:} \quad (4.2)$$

$$\mu = 0,5$$

$$y_i = 0,05 \text{ m}$$

$$P = 0,8 \cdot A_s \cdot f_{0,2} = 15,66 \text{ kN met:} \quad (4.3)$$

$$A_s = \frac{3^2 \cdot \pi}{1,3} = 21,7 \text{ mm}^2 \text{ (verminderde keeldoorsnede)} \quad (4.4)$$

$$f_{0,2} = 900 \text{ MPa}$$

$$4,69 \text{ kNm} \leq 0,783 \text{ kNm} \rightarrow \text{voldoet niet!}$$

Bouten met diameter 10 mm voldoen nog steeds niet en meer dan twee voorspanbouten aanbrengen lijkt onmogelijk. Bovendien geldt deze berekening voor voorspanbouten waarbij de middellijn van het gat maximaal 2 mm groter is dan die van de bout. Dit is hier niet het geval, integendeel.

Voorgaande berekening maakt duidelijk dat dit ontwerp nooit sterk genoeg zal zijn. Een alternatief kan er in bestaan de grote gaten in het profiel op te vullen met een nylon prop¹. Tijdens de montage kunnen in deze schijfjes passende gaten geboord worden afhankelijk van de positie van de gording. Dit blijft echter een zeer arbeidsintensieve montage en een weinig transparant ontwerp, wat doet besluiten deze verbinding niet verder uit te werken noch te realiseren.

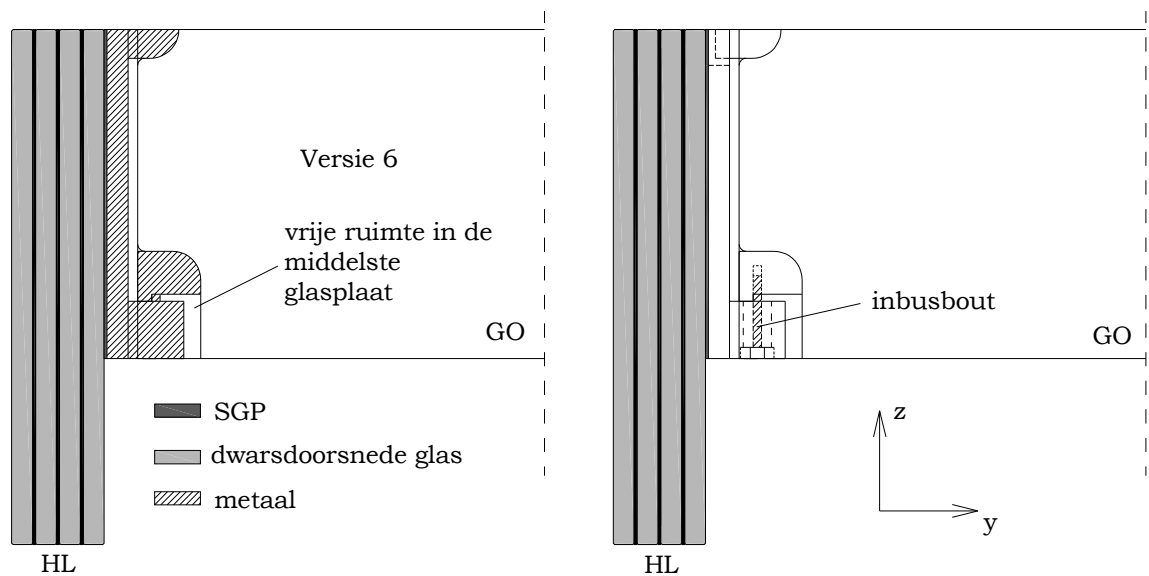
Van type 1 blijkt geen van de ontworpen verbindingen (T1_01 en T1_02) realistisch qua sterkte. Het lijkt onmogelijk een verbinding te ontwerpen waarbij de bovenzijden van hoofdliggers en gordingen in één vlak liggen en die voldoet qua esthetiek, sterkte en toleranties. De overstap naar type 3 is onvermijdelijk. In wat volgt wordt eerst ingegaan op de ontwerpen van Type 2.

4.2.2 Ontwerp T2_01

Ontwerp T2_01 kende zes verschillende versies. Deze 'evolutie' wordt in Bijlage E weergegeven. Het basisprincipe bleef echter onveranderd: de verbinding wordt opgevat als een oplegging waarbij de gording onderaan steunt op een metaalelement dat tegen de hoofdligger gelamineerd is. Bovenaan wordt een voorziening getroffen die verhindert dat de gording kantelt. De maximale dwarskracht bedraagt in UGT 4,04 kN (cfr. § 2.2.3). Versie 1 is gebaseerd op ontwerp T1_01, maar de proefresultaten in het vorige hoofdstuk wezen uit dat een

¹ Nijssse R. (2003). *Glass in Structures*. Birkhäuser, Bazel, Zwitserland, p. 33 e.v.

grotere oppervlakte van de SGP tussenlaag van het metaalelement tegen de hoofdligger noodzakelijk is. In versie 2 werd dit aangepast en in de finale versie van dit ontwerp (Figuur 4.3) wordt tegen de hoofdligger een L-vormig (zijaanzicht in de richting van de x-as) metaalelement gelamineerd over de volledige hoogte van de gording (Figuur 4.4). Het visuele verschil tussen versie 6 en versies 1 en 2 blijkt niet groot te zijn. Bovendien biedt het L-vormig element als voordeel dat slechts één metaalstuk tegen de hoofdligger gelamineerd wordt en op die manier laminatiefouten, relatief tussen twee afzonderlijke elementen, vermeden worden. In het ondersteunend gedeelte van het L-vormig element is een sleuf voorzien waarin een inbusbout past ($\varnothing 6$ mm) die vastgeschroefd wordt in het onderste insteekelement van de gording. Op die manier wordt na de montage verplaatsing van de gording in de x- en z-richting verhinderd. De inbusbout wordt, zoals bij ontwerp T1_01, verzonken uitgevoerd in het metaalelement.



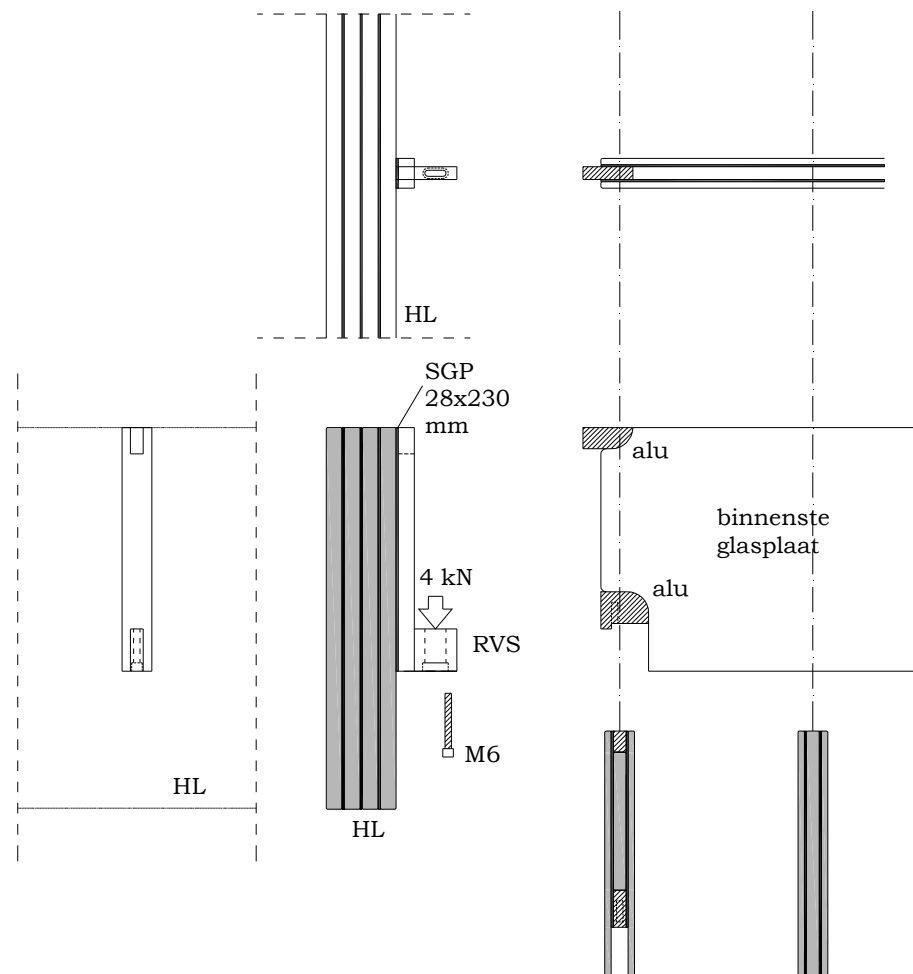
Figuur 4.3: ontwerp T2_01, finale versie.

Bij versies 1 t.e.m. 4 wordt de onderste insteek in de gording onderaan afgerond opdat een rotatie φ_x vrij kan plaatsvinden. Dit biedt echter enkele nadelen:

- De excentriciteit van de dwarskracht is groter dan in de configuratie bij versies 5 en 6.
- Opdat na montage de gording niet in x- en z-richting kan bewegen is de bout onderaan noodzakelijk. Een rotatie φ_x veroorzaakt echter een buigmoment in deze bout.
- De afronding is bewerkelijker bij de realisatie van het insteekelement.

De configuratie bij versies 5 en 6 biedt het hoofd aan deze nadelen. Door de insteek van een 'tand' te voorzien wordt de excentriciteit beperkt. Bovendien zal de rotatie φ_x bijzonder klein zijn zodat bij nader inzien de afronding aan het

insteekelement (versies 1 t.e.m. 4) niet nodig is. Het aluminium kan door lokaal vloeien de stand van de gording enigszins aannemen. Door de inbusbout in de laatste versie 8 mm naar links te plaatsen (tot tegen de tand), kon het ondersteunend gedeelte van het L-vormig element korter gemaakt worden. Om toleranties in de z-richting op te vangen wordt geopteerd om onder tand van het onderste insteekelement *stelplaatjes* aan te brengen tijdens de montage op de werf. Andere oplossingen lijken niet mogelijk (rekening houdend met de vereiste toleranties).



Figuur 4.4: ontwerp T2_01, finale versie, principeschets.

Bovenaan de gording verhindert een bevestiging dat kantelen optreedt. Bij versies 1 en 2 werd getracht deze bevestiging zodanig op te vatten dat enkel weerstand geboden wordt aan een verplaatsing u en een rotatie φ_y . Dit gebeurt door bij de montage een hulpstuk vast te schroeven op het L-vormig metaalelement dat voorzien is van een cilindervormig staafje. Het staafje past in een sleuf van het bovenste insteekelement van de gording. Dit levert echter een vrij complex onderdeel op. Bovendien is een tolerantie met betrekking tot de vrijheidsgraad φ_z geen absolute vereiste (cfr. § 2.3.7). In de finale versie wordt de gording bovenaan voorzien van een insteekelement dat 17 mm uitkraagt en past

in een uitsparing bovenaan het L-vormig metaalelement. Dit is verenigbaar met de toleranties die het onderste insteekelement toelaat en bovendien veel eenvoudiger te vervaardigen. De afronding van beide insteekelementen heeft een straal van 20 mm.

De *voordelen* van ontwerp T2_01 zijn:

- De bovenzijden van de hoofdliggers en gordingen liggen in één vlak.
- De verbinding staat toleranties toe met betrekking tot de vrijheidsgraden v (2×7 mm) , w en φ_x .
- De SGP tussenlaag ondervindt geen trekkracht t.g.v. een inklemmingsmoment.
- De montage is niet arbeidsintensief.
- De verbinding oogt transparant.
- Er is relatief weinig metaalverbruik.

Als *nadelen* gelden:

- De eindpunten van de gording worden opgevat als opleggingen. Het maximale buigmoment ($pl^2/8$ in het midden) is groter dan dat bij een ligger waarvan de uiteinden ingeklemd zijn ($pl^2/12$ aan de steunpunten).
- Het L-vormig metaalelement zal niet gemakkelijk te realiseren zijn. Ofwel wordt het uit één stuk gemaakt, wat uiteraard zeer duur is (veel materiaalverlies). Ofwel worden twee delen tegen elkaar gelast. Dit brengt echter spanningsconcentraties in het metaal teweeg en kan tot gevolg hebben dat de te lamineren zijde niet meer perfect vlak is.

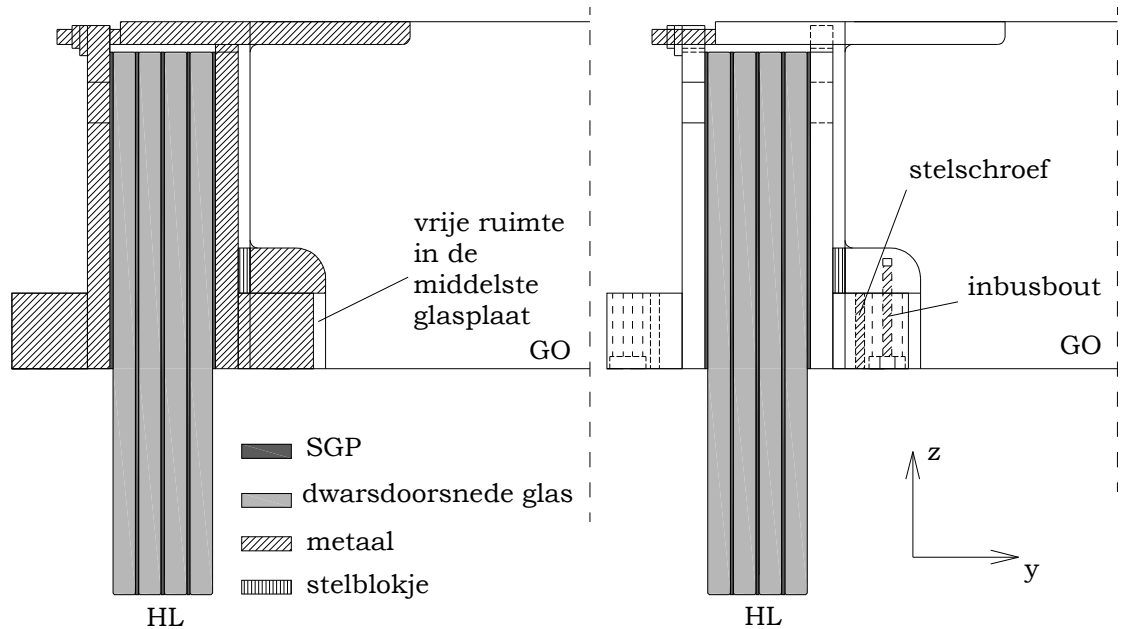
De auteur van deze scriptie oppert dat de voordelen van deze verbinding meer opwegen tegen de nadelen. Hieruit werd besloten deze verbinding te realiseren (cfr. infra).

4.2.3 Ontwerp T3_01

Een eerste ontwerp van type 3 wordt in Figuur 4.5 afgebeeld. Het basisidee is als volgt: de gording wordt bovenaan bevestigd aan het metaalstuk dat tegen de andere zijde van de hoofdligger gelamineerd is.

Tegen de centrale hoofdligger wordt aan beide zijden een L-vormig metaalelement gelamineerd dat als een 'vork' boven de hoofdligger uitsteekt (Figuur 4.6). In planzicht (gericht volgens de z-as) liggen de ondersteunende delen van de L-vormige stukken niet in elkaars verlengde. De langsassen van de gordingen liggen dus eveneens niet op één rechte (Figuur 4.6 bovenaan). Het bovenste insteekelement van de gording is aan het uiteinde voorzien van een draadstang met diameter 10 mm. De draadstang van de gording past tussen de

vork van het metaalelement aan de andere zijde van de hoofdligger. Door op de draadstang een moer (met tussenvoegplaatje) te draaien, is de inklemming een feit. De draadstang is voldoende lang opdat een tolerantie in de y-richting voorhanden is van 2 x 7 mm.



Figuur 4.5: ontwerp T3_01, algemeen

Het ondersteunend gedeelte van het L-vormig element is opgevat zoals in het basisontwerp T1_01: een sleufgat voor de inbusbout ($\varnothing 6$ mm) en een stelschroef ($\varnothing 6$ mm) om speling in de z-richting toe te laten. De maximale dwarskracht in UGT bedraagt 5,05 kN en het maximale inklemmingsmoment veroorzaakt onder- en bovenaan respectievelijk een druk- en trekkracht van $\frac{3,64}{0,17} = 21$ kN (cfr. §

2.2.3). Een *stelblokje* is noodzakelijk om deze drukkracht op te vangen (Figuur 4.5). Het metalen stelblokje wordt aangebracht tijdens de montage en de dikte is afhankelijk van de positie van de gording. Als alternatief kan een *hars* gebruikt worden dat al dan niet vloeibaar wordt aangebracht tijdens de montage. Het laatste geval is arbeidsintensiever. Een derde mogelijkheid bestaat erin te werken met een *vertanding* tussen het onderste insteekelement en het ondersteunende deel van het L-vormig metaalelement (Figuur 4.7 rechts). Er kan snel berekend worden wat de minimale grootte van de hoek θ moet zijn opdat geen verschuiving optreedt (Figuur 4.7 links):

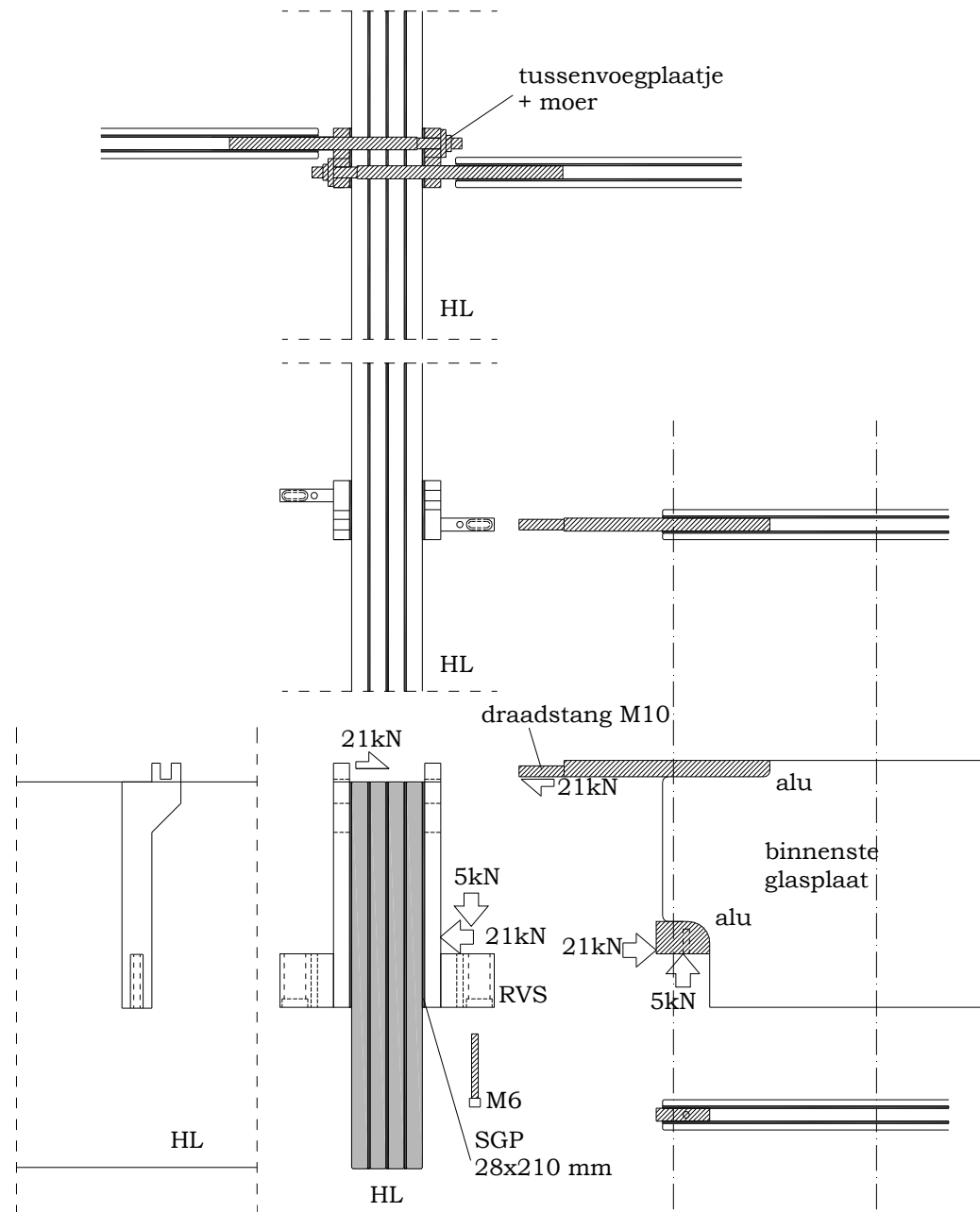
$$T = \mu \cdot N \quad (4.5)$$

$$W = N \cdot \sin \theta + T \cdot \cos \theta \quad (4.6)$$

$$V = N \cdot \cos \theta - T \cdot \sin \theta \quad (4.7)$$

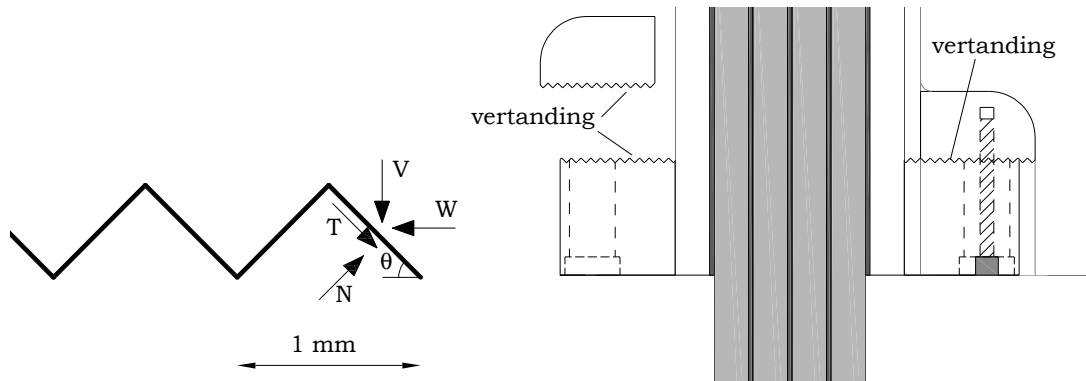
met: $\mu = 0,5$; $W = 21 \text{ kN}$ en $V = 5,05 \text{ kN}$ (UGT) (cfr. § 2.2.3)

→ $\theta = 50^\circ$



Figuur 4.6: ontwerp T3_01, principeschets.

Om de nodige toleranties in de y-richting toe te laten is een maximale tandbreedte van 1 mm wenselijk. Het realiseren van deze vertanding vergt aangepaste machines en zal duur uitvallen. Bovendien kan bij deze configuratie geen stelschroef gebruikt worden. Een tolerantie in de z-richting is dus niet mogelijk, tenzij stelplaatjes met dezelfde vertanding gebruikt worden.



Figuur 4.7: veranding om de drukkracht t.g.v. het inklemmingsmoment te weerstaan.

De gording kan op dezelfde manier aan de randhoofdliggers bevestigd worden. Daartoe wordt eveneens een metaalelement aan de andere zijde van de hoofdligger gelamineerd, echter zonder het uitkragend, ondersteunend gedeelte.

De *voordelen* van deze verbinding zijn:

- Er zijn toleranties met betrekking tot de vrijheidsgraden v en w .
- De SGP tussenlaag ondervindt geen trekkracht t.g.v. het inklemmingsmoment.
- De montage is niet arbeidsintensief.
- De verbinding oogt transparant.

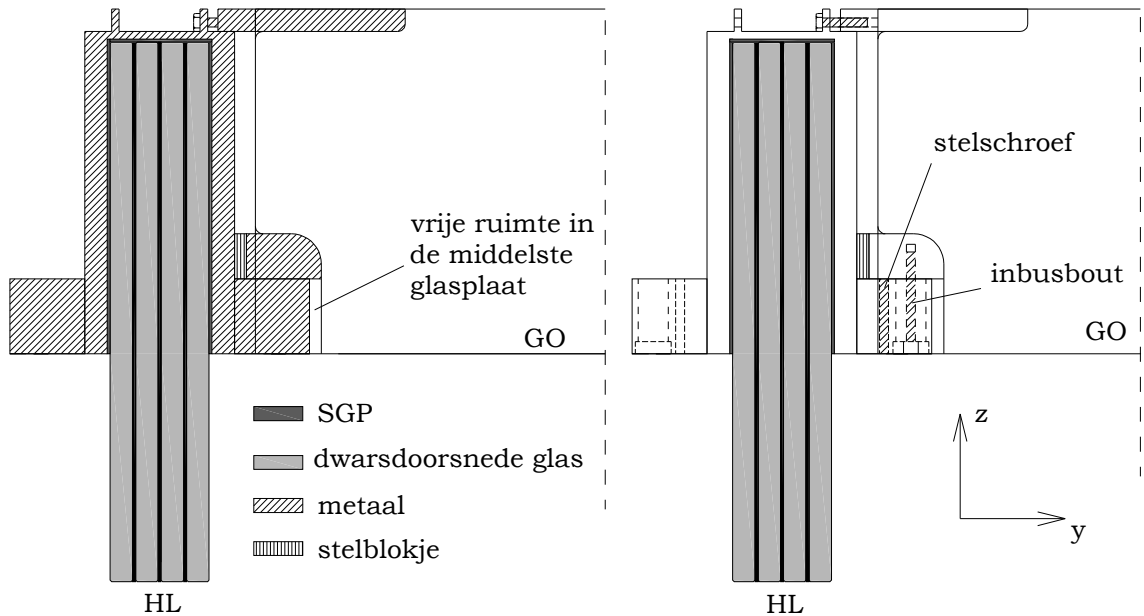
Er zijn ook *nadelen*:

- De bovenzijden van hoofdliggers en gordingen liggen niet in één vlak (type 3), het hoogteverschil bedraagt 20 mm wat moeilijk overbrugbaar is.
- Het element dat tegen de hoofdliggers gelamineerd wordt is vrij complex om te maken.
- Het feit dat de langsassen (in planzicht) van de gordingen niet in elkaars verlengde liggen, veroorzaakt moeilijkheden bij de schikking van de dakpanelen.
- Het uitkragende insteekelement van de gording is gevoelig voor schade tijdens het transport/de montage.
- Er wordt relatief veel metaal gebruikt.

Bij deze verbinding zijn de nadelen talrijker dan de voordelen waardoor de voorkeur naar andere ontwerpen gaat.

4.2.4 Ontwerp T3_02 versie 1

Figuur 4.8 toont een tweede ontwerp van type 3. Het idee bij deze verbinding is om twee L-vormige metaalelementen bovenaan met elkaar te verbinden en het geheel tegen de hoofdligger te lamineren.



Figuur 4.8: ontwerp T3_02, algemeen.

De opvatting van het L-vormig metaalelement en de onderste insteek van de gording is volledig analoog als bij ontwerp T3_01 (stelschroef, sleuf, stelblokjes, enz.). Ook de maximale belasting (inclusief de hefboomsarm) is analoog. Bovenop de verbinding zijn twee rechtopstaande staalplaatjes aangebracht die allebei voorzien zijn van twee gaten (Figuur 4.9). De gording bezit bovenaan een uitkragend insteekelement waarbij het uitkragende deel breder is dan het ingelamineerde deel. De verbreding is voorzien van twee boutgaten met schroefdraad. Met behulp van twee bouten ($\varnothing 6$ mm) wordt de gording vastgebout aan de hoofdligger. Door de boutgaten voldoende diep te maken, is in de y-richting een speling van 2×7 mm mogelijk.

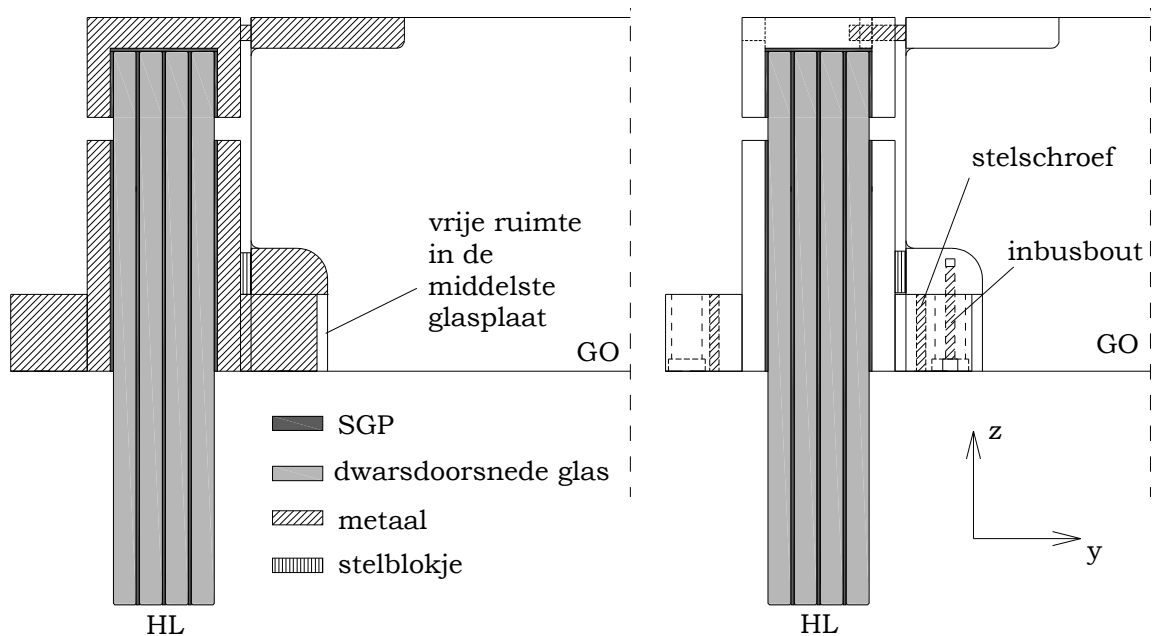
Dit systeem wordt ook toegepast bij de randhoofdliggers waar eveneens een metaalelement, echter zonder uitkragend deel, tegen de andere zijde van de hoofdligger gelamineerd wordt.

tegen elkaar geperst en ontstaat een goede hechting met het SGP. Bij dit ontwerp kunnen de L-vormige metaalelementen zich niet verplaatsen in de y-richting omdat ze bovenaan met elkaar verbonden zijn. Er zal dus geen (of een slechte) hechting ontstaan. Het metaalelement moet ook perfect passend gemaakt worden, wat quasi onmogelijk is. Er zal steeds een zekere afwijking zijn wat betreft de dimensies van het metaalelement of de dikte van de hoofdligger.

Het voorgaande toont aan dat dit ontwerp vermoedelijk niet realiseerbaar is.

4.2.5 Ontwerp T3_02 versie 2

Een tweede versie van ontwerp T3_02 wordt geïllustreerd in Figuur 4.10.



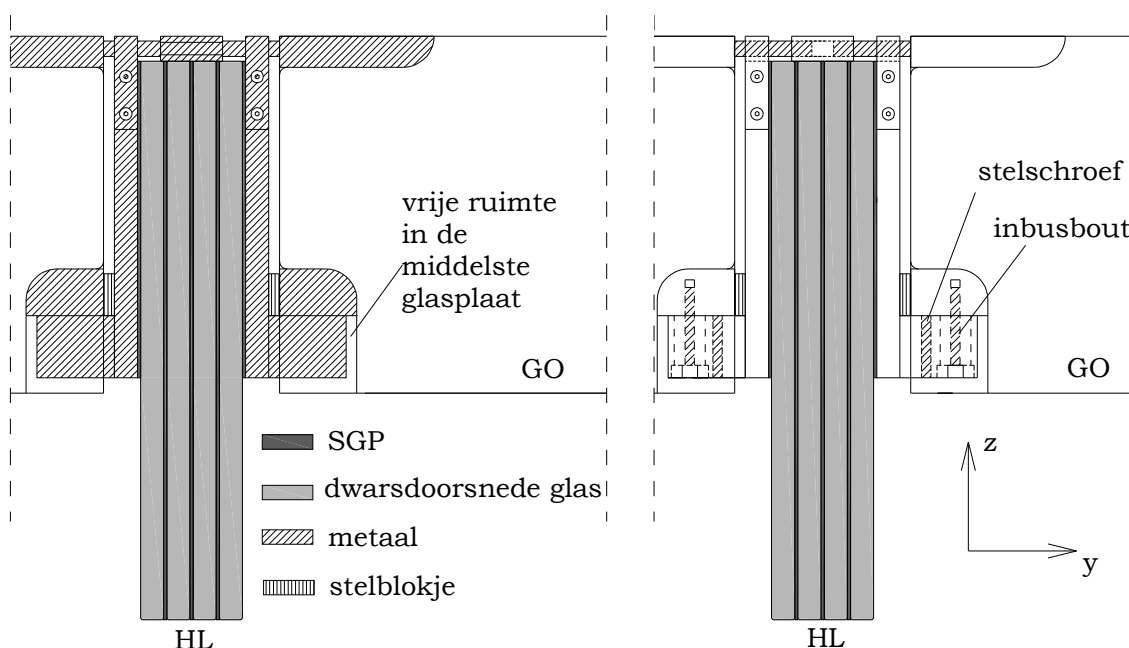
Figuur 4.10: ontwerp T3_02, alternatief.

Bij deze verbinding worden de L-vormige metaalelementen niet met elkaar verbonden. Wel wordt een stalen 'kap' op de hoofdligger verlijmd waaraan de gordingen verlijmd bevestigd kunnen worden. Er zal echter niet dieper ingegaan worden op dit alternatieve ontwerp aangezien dezelfde nadelen als bij de eerste versie kunnen aangehaald worden: de kap moet perfect passend gemaakt worden en bovendien kunnen de zijanten tijdens het verlijmen niet aangedrukt worden. Opdat de kap niet zou bezwijken onder de trekkrachten zijn vrij massieve hoeken nodig wat het geheel zwaar maakt. Tevens kan het nut van de gelamineerde elementen tegen de hoofdligger in vraag gesteld worden. Een massieve kap die tot aan de onderzijde van de gordingen reikt en op een bepaalde manier bevestigd wordt aan de hoofdligger, zal wellicht eenvoudiger zijn. Hiermee wordt echter geen

transparante verbinding nagestreefd en wordt afgeweken van de hoofddoelstelling van deze scriptie: onderzoek naar verbindingen tussen glas en metaal m.b.v. SGP.

4.2.6 Ontwerp T3_03

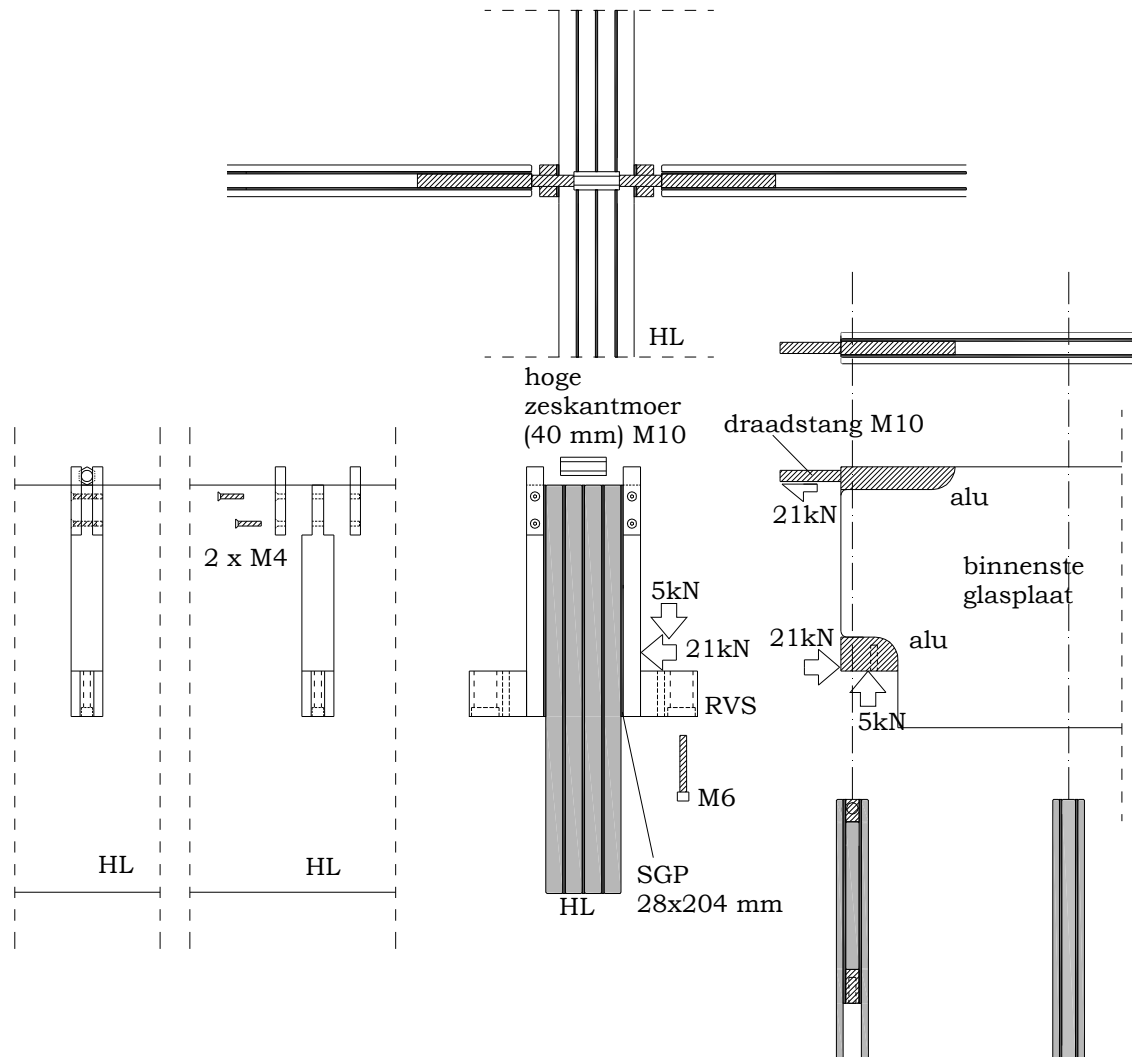
Een derde verbinding van type 3 wordt in Figuur 4.11 afgebeeld. Bij dit ontwerp worden de gordingen bovenaan met elkaar verbonden d.m.v. een hoge zeskantmoer.



Figuur 4.11: ontwerp T3_03, algemeen.

Er worden twee L-vormige metaalelementen tegen de centrale hoofdligger gelamineerd (zoals in voorgaande ontwerpen). Het principe van het ondersteunende gedeelte en de onderste insteek van de gording is volledig analoog als bij de vorige ontwerpen van type 3 (stelschroef, sleuf, stelblokjes, enz.). Ook de maximale belasting (inclusief de hefboomsarm) wijzigde niet (Figuur 4.12). Tussen de onderranden van de gording en het L-vormig metaalelement is een hoogteverschil van 10 mm. Op die manier zal bij eventuele onnauwkeurigheden in de z-richting (opgevangen met de stelschroef) het metaalelement nooit lager komen dan de gording (visueel aantrekkelijker). De gording is bovenaan voorzien van een insteekelement met uitkragende draadstang ($\varnothing$ 10 mm). Figuur 4.13 toont het montageschema dat hoort bij deze verbinding. Een eerste gording wordt geplaatst en de hoge zeskantmoer wordt volledig op de draadstang van deze gording gedraaid. Vervolgens wordt de tweede gording aan de andere zijde van de hoofdligger geplaatst zodanig dat de draadstangen van beide gordingen in elkaars verlengde liggen. Daarna wordt de moer deels teruggedraaid op de draadstang van de tweede gording zodat beide draadstangen met elkaar verbonden worden. Tenslotte worden aan de L-vormige elementen twee plaatjes bevestigd die het

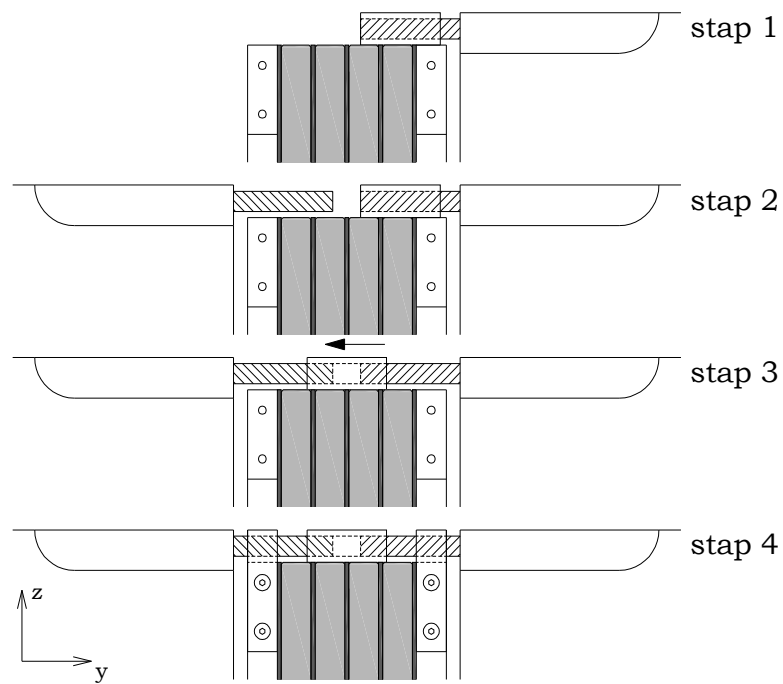
kantelen van de gording moeten verhinderen. De zeskantmoer is 40 mm lang, zodat elke gording 7 mm volgens de positieve of negatieve y-as kan verschuiven (Figuur 4.14).



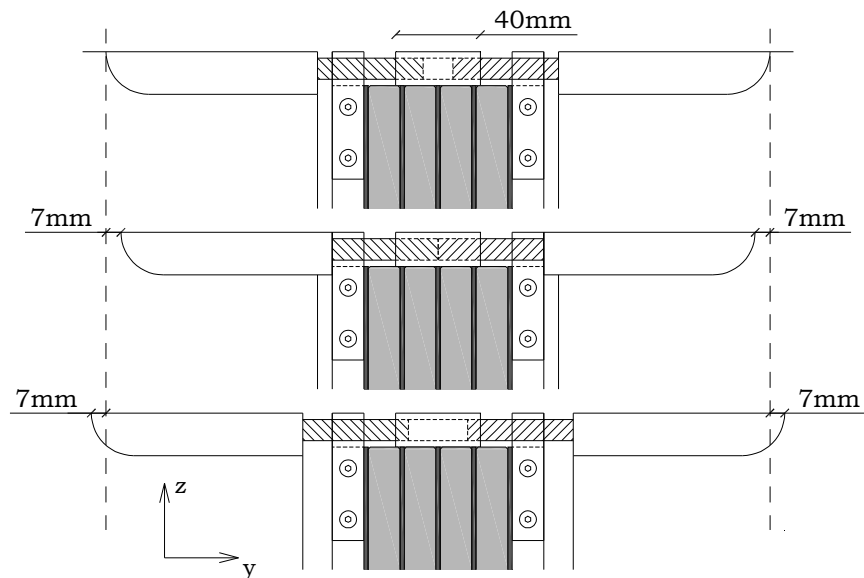
Figuur 4.12: ontwerp T3_03, principeschets.

De verbinding van gording aan de randhoofdliggers is geïllustreerd in Figuur 4.15. Met behulp van een moer en een tussenvoegplaatje wordt de gording bevestigd aan een metaalelement dat tegen de andere zijde van de hoofdligger gelamineerd werd. Ontwerp T3_03 bezit volgende *voordelen*:

- Er zijn toleranties met betrekking tot de vrijheidsgraden v en w .
- De SGP tussenlaag ondervindt geen trekkracht t.g.v. het inklemmingsmoment.
- Het hoogteverschil tussen de bovenzijden van hoofdliggers en gordingen bedraagt (slechts) 16 mm.
- Er zijn weinig complexe metaalelementen.
- De verbinding oogt transparant.



Figuur 4.13: ontwerp T3_03, montageschema.



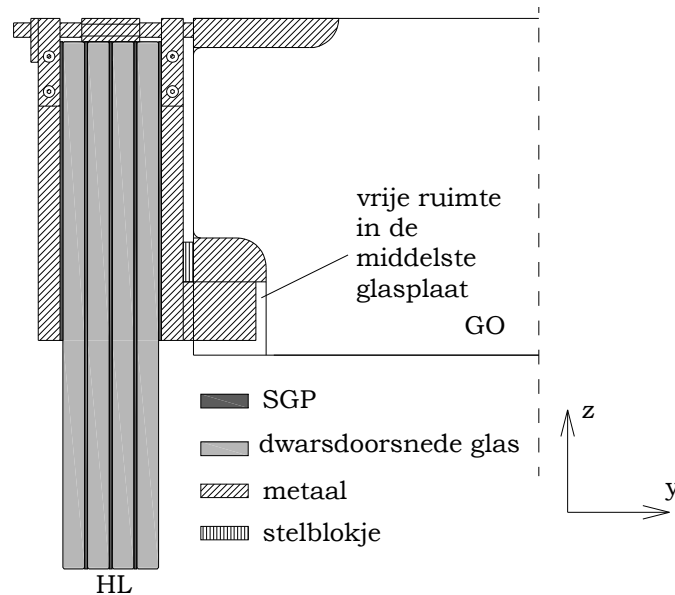
Figuur 4.14: ontwerp T3_03, toleranties in de y-richting.

Nadelen zijn:

- De draadstangen dienen perfect in elkaars verlengde te liggen. Een rotatie φ_x of φ_z geeft problemen.
- Mocht om één of andere reden het onderste insteekelement een rotatie om de x-as in wijzerzin ondergaan (bijvoorbeeld door laminatiefouten), en de stelschroef werd niet gebruikt, dan steunt de gording op het

eindpunt van het ondersteunend deel van het L-vormig metaalstuk. De excentriciteit (van de dwarskracht) is dan veel groter en brengt een groter moment in de SGP tussenlaag teweeg.

- De montage is bewerkelijker dan sommige andere ontwerpen (t.g.v. de verschillende montagestappen).



Figuur 4.15: ontwerp T3_03, randhoofdliggers.

In overleg met de promotoren en begeleider, werd door besloten ook deze verbinding te realiseren.

4.3 Technologie prototypen fase II

In deze paragraaf wordt de realisatie van de ontwerpen T2_01 en T3_03 beschreven. Er werden metaalelementen en glasplaatjes voorzien voor twee versies van elk van deze verbindingen. Toch werd in deze fase slechts één versie gelamineerd van elk ontwerp om kennis te maken met specifieke problemen tijdens het laminatieproces, vooral wat de gordingen betreft. De tweede versie werd in fase III (cfr. Hoofdstuk 5) gelamineerd zodat rekening gehouden kon worden met de bevindingen tijdens fase II. De verbindingen werden op ware schaal gemaakt, maar met een beperkte lengte van hoofdliggers en gordingen. De prototypen werden als volgt benoemd: $T[\text{typenummer}]_{[\text{ontwerpnummer}]}[G(\text{gording}) \text{ of } H(\text{hoofdligger})]_{[\text{versienummer}]}$.

Eerst wordt dieper ingegaan op de realisatie van de metaalelementen en de verschillende glasplaatjes. Daarna wordt het laminatieproces besproken en tot slot volgt een grondige analyse van de gemaakte prototypes.

4.3.1 Samenstellende onderdelen

Omdat roestvast staal moeilijk bewerkbaar is, werd geopteerd om ook de L-vormige metaalelementen in aluminium¹ te maken. Op die manier kon alles binnen afzienbare tijd vervaardigd worden in het Laboratorium voor Modelonderzoek². De glasonderdelen bestonden allemaal uit floatglas. De insteekelementen en uitsparingen in de middelste glasplaat van de gording werden los van elkaar gemaakt. Dimensies van deze middelste glasplaten en al de metaalelementen zijn terug te vinden in Bijlage F.

Insteekelementen gordingen

De metaalelementen dienden exact dezelfde dikte te hebben als de middelste glasplaat. Bij afwijkingen konden namelijk spanningsconcentraties ontstaan tijdens de autoclaafcyclus en mogelijk scheuren in het glas. Om te garanderen dat de metaalelementen een exacte dikte van 12 mm bezaten, werd een stip aluminium met deze dikte aangekocht. Om de afrondingen van de insteekelementen (straal 20 mm) te maken, werd eerst een cirkelboog op het aluminium getekend. Vervolgens werd met een freesmachine het overtollige materiaal weggefreesd. Hierdoor is de nauwkeurigheid niet zo groot als bij een computergestuurde snijmachine. In de bovenste insteek van ontwerp T3_03 werd een gat met schroefdraad gemaakt waarin een draadstang ($\varnothing$ 10 mm) gedraaid (en verlijmd) werd.

Om de insteekelementen tijdens het laminatieproces op de juiste plaats te fixeren, werden mallen ontworpen. Figuur 4.16 toont de insteekelementen en de mal van prototype T2_01_G1.



Figuur 4.16: metaalelementen en mal van prototype T2_01_G1.

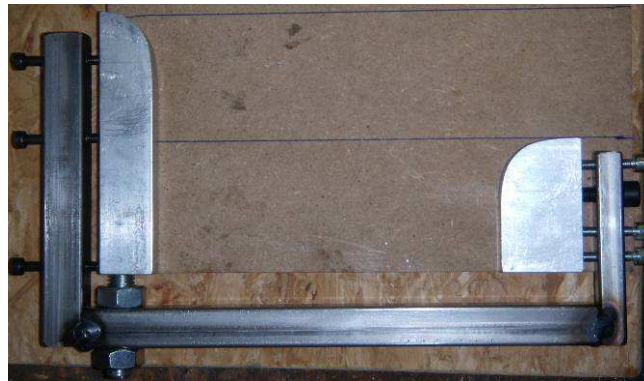
Het boorgat met schroefdraad in het onderste element (rechts op de figuur) werd gebruikt om het metaalelement en de mal aan elkaar te bevestigen (zwarte bout). De bovenste insteek werd voorzien van een extra gat met schroefdraad om

¹ Type aluminium: EN 6060 T6-ALMGSiO,5 F22.

² LMO, Vakgroep Bouwkundige Constructies, Faculteit Ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent. Technologiepark-Zwijnaarde 904, Zwijnaarde, B 9052 Gent, België.

ook dit metaalelement aan de mal te kunnen vastmaken (bout links onderaan op de figuur). De overige bouten drukten tegen de insteken en lieten enige tolerantie toe bij het positioneren van de metaalstukken.

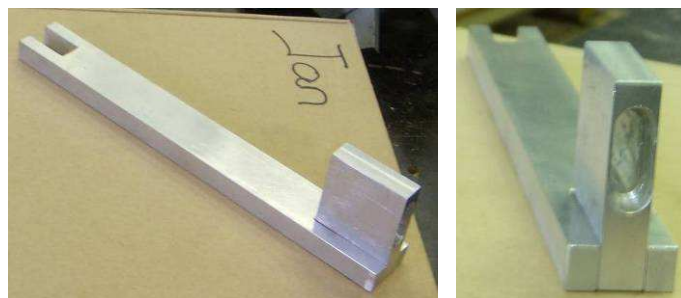
Analoog is Figuur 4.17 een afbeelding van de metaalonderdelen en de mal van prototype T3_03_G1. Ook hier bezit de onderste insteek een gat met schroefdraad (zwarte bout rechts op de figuur). Bij het bovenste metaalstuk werd van de uitkragende draadstang gebruik gemaakt om metaalelement en mal aan elkaar te bevestigen (met behulp van twee moeren links onderaan op de figuur).



Figuur 4.17: metaalelementen en mal van prototype T3_03_G1.

Metaalelementen hoofdliggers

Het zou zeer bewerkelijk en duur zijn om de L-vormige elementen uit één stuk te maken. Vandaar dat geopteerd werd om deze elementen in twee delen te maken en ze naderhand aan elkaar te lassen. Figuur 4.18 illustreert hoe de twee delen in elkaar pasten.



Figuur 4.18: passende onderdelen van het L-vormig metaalelement, prototype T2_01_H1.

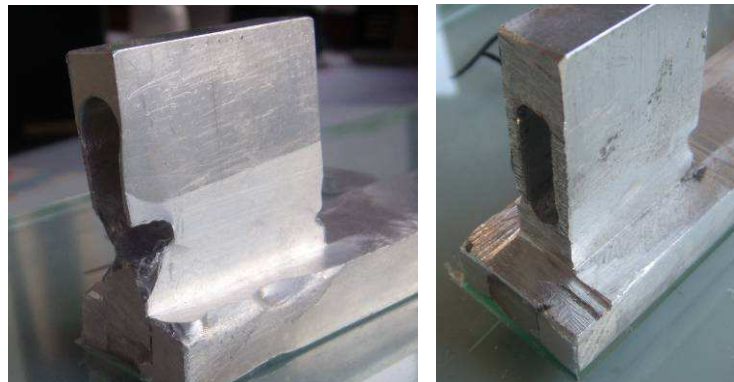
De stukken werden gelast met behulp van een halfautomaat en met toevoeging van aluminium¹ (Figuur 4.19). Er werd zowel aan de voorzijde als aan de achterzijde van het metaalelement - telkens rondom het uitkragende blokje - een las gelegd. Na het lassen werden alle metaalstukken vlak gefreesd. Bij het

¹ Het lassen gebeurde aan de Vakgroep Toegepaste Fysica, Faculteit Ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent. Jozef Plateaustraat 22 B 9000 Gent, België.

metaalelement van ontwerp T2_01 bevond het sleufgat zich te dicht bij de las en smolt een deel van de rand weg (Figuur 4.20 links). Deze rand was onderaan slechts 1 mm dik (de kop van de inbusbout heeft een diameter van 10 mm). Bij prototype T2_01_H₂ werd onderaan een zone van ± 10 mm weggefreest (Figuur 4.20 rechts).

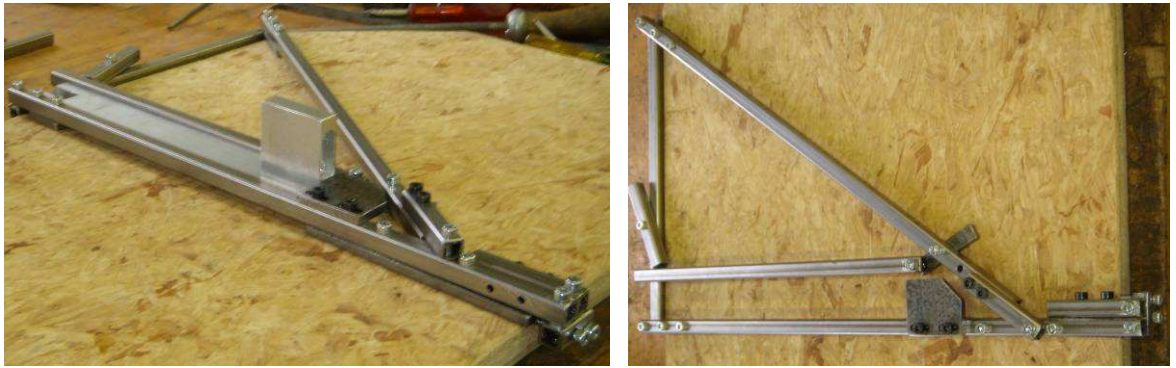


Figuur 4.19: lassen van de L-vormige metaalelementen.



Figuur 4.20: vlak gefreesde metaalelementen met weggesmolten delen van de onderrand bij prototype T2_01_H₁ (links) en weggefreeste onderrand van prototype T2_01_H₂ (rechts).

Voor deze stukken werd eveneens een mal gemaakt (Figuur 4.21). De mal bestond uit RVS kokerprofieltjes en werd met behulp van stelschroefjes (onderaan rechts op de figuur) vastgeklemd op het glas van de hoofdligger. De constructie kon verschillende standen innemen naargelang de hoogte en breedte van het metaalelement. Contact tussen de mal en het glas werd, ter plaats van het te lamineren element, vermeden om te verhinderen dat de mal vastgelamineerd zou worden. Met behulp van (dikke) teflonstrookjes, die tussen de mal en het metaalstuk geplaatst werden, kon vloeï ver hinderd worden.



Figuur 4.21: mal voor het L-vormig metaalelement dat tegen de hoofdligger gelamineerd werd, hier gefotografeerd op een houten plaat.

Glas

Voor de hoofdliggers werden gelamineerde glasplaten gebruikt (6mm/PVB/6mm) met een hoogte van 360 mm en een lengte van ± 200 mm. Voor de gordingen werden drie monolithische glasplaten gemaakt die later tijdens de autoclaafcyclus op elkaar gelamineerd werden. De buitenste glasplaten waren 6 mm dik en maten 300 x 230 mm. De centrale glasplaat had een dikte van 12 mm en diende voorzien te worden van enkele uitsparingen waarin de insteekelementen pasten. Deze uitsparingen ontstonden door eerst een gat in het glas te boren met een watergekoelde kolomboormachine¹. Daarna werd met behulp van een watergekoelde lintzaagmachine twee maal van de glasrand naar het boorgat toe gezaagd (Figuur 4.22 en Figuur 4.23).



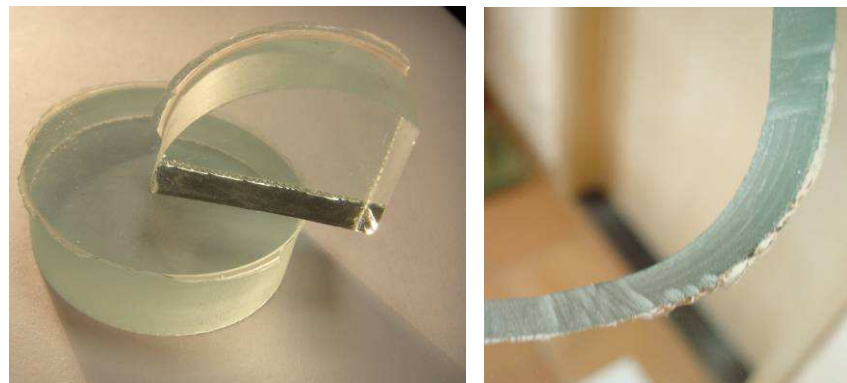
Figuur 4.22: zagen van een uitsparing in de middelste glasplaat met een watergekoelde lintzaagmachine.

¹ Het glas werd bewerkt in de Facultaire Werkplaats Wetenschappen, Universiteit Gent. Krijgslaan 281, gebouw S4 bis B 9000 Gent, België.



Figuur 4.23: resulterende middelste glasplaten van de prototypen van de gordingen.

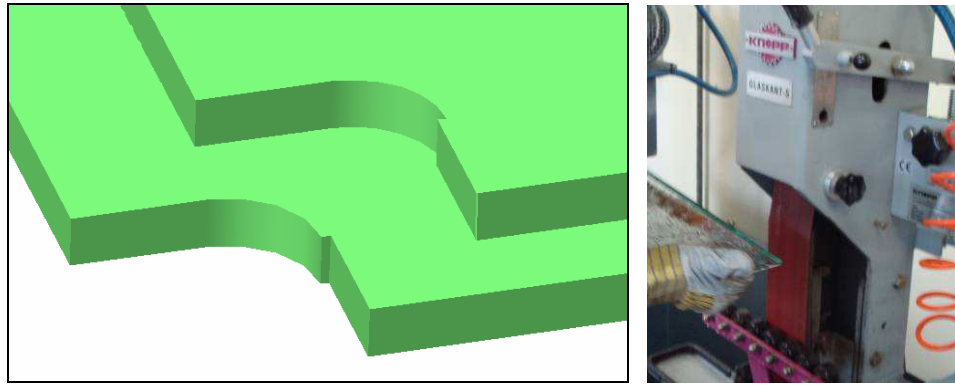
Net voor de diamantboor het glas volledig doorboord had, brak het glas uit het boorgat (door de druk van de boor) (Figuur 4.24 links). Deze conische uitscheuring, die ook bij Callewaert¹ werd vastgesteld, resulteerde in een geribbelde, onnauwkeurige gatrand (Figuur 4.24 rechts).



Figuur 4.24: conische uitscheuring zichtbaar op de glasresten (links) en geribbelde, onnauwkeurige glasrand van prototype T3_03_G₂ (rechts).

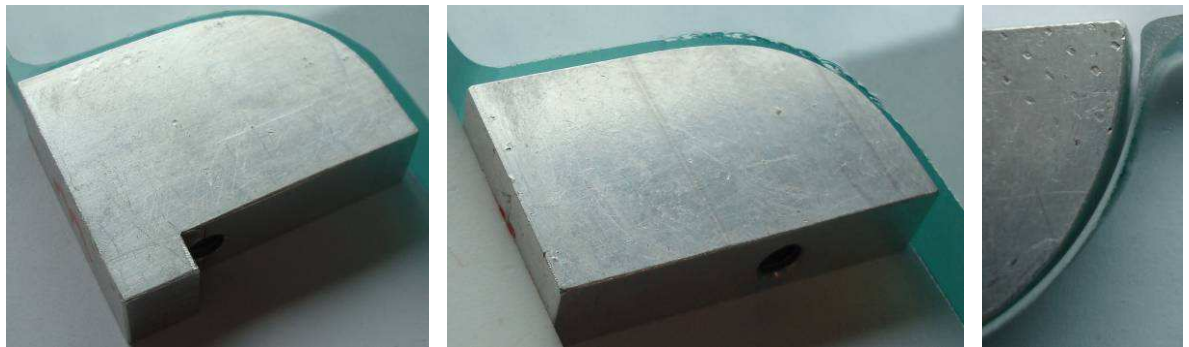
Bij de lintzaagmachine werd het glaselement handmatig langs een geleidende staaf verschoven. Deze staaf kon handmatig in de breedte versteld worden wat echter met een onnauwkeurigheid gepaard ging. Bovendien was het zaaglint gevoelig aan drukveranderingen. Wanneer het glaselement met te veel druk werd voortbewogen, onderging het lint gemakkelijk een kleine rotatie wat resulteerde in een gekromde zaagrand. Na het zagen bleek, t.g.v. voorgaande verschijnselen, de gezaagde glasrand in de meeste gevallen niet aan de boorgatrand te raken, zoals op de schets links in Figuur 4.25 is weergegeven.

¹ Callewaert D. (2006). *Bout- en Lasverbindingen in floatglas: experimentele studie*. Scriptie, Laboratorium voor Modelonderzoek, Universiteit Gent, p. 38.



Figuur 4.25: twee situaties waarbij de gezaagde glasrand niet aan de boorgatrand raakt (links) en de schuurband (rechts).

Al deze onnauwkeurigheden konden enigszins worden weggewerkt met behulp van de schuurband (waarmee ook de randen van alle glasplaatjes afgeschuind werden, Figuur 4.25 rechts), maar het resultaat bleef onnauwkeurig. De insteekelementen bleken in geen van de gevallen perfect te passen in de glasuitsparing (Figuur 4.26 en Figuur 4.34) wat ook te maken had met de onnauwkeurigheid van de metaalstukken zelf.



Figuur 4.26: slecht passende onderste insteekelementen van prototypes T2_01_G₂ (links) en T3_03_G₂ (midden) en slecht passend bovenste insteekelement prototype T2_01_G₂.

Bij de voorbereiding van de proefstukken werd getracht de metaalelementen zodanig te positioneren dat zo veel mogelijk contact met het glas gemaakt werd. Dit resulteerde uiteraard in kleine, ongewenste rotaties om de x-as en verplaatsingen v en w (cfr. 4.3.3).

4.3.2 Laminatieproces

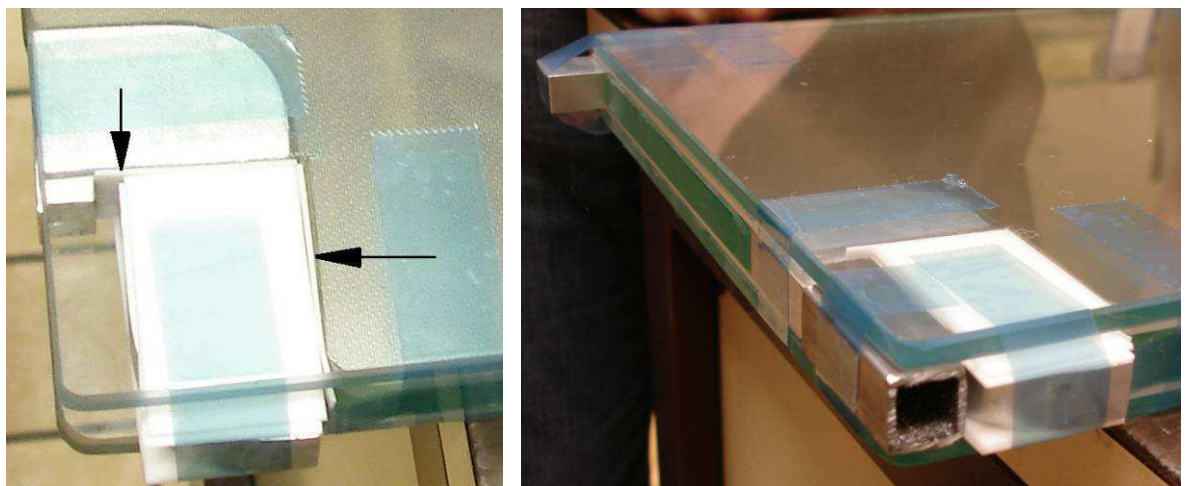
De laminaties gebeurden andermaal in de autoclaaf van het laboratorium van DuPont de Nemours.

Vorbereiding

Analoog als bij de proefstukken in fase I werd metaal ontvet met aceton, glas gereinigd met een ontvettingsproduct en SGP stofvrij gemaakt met een Dust

Cleaning Roller. Op aanraden van de laboranten werd geen van de ontworpen mallen gebruikt, uit vrees voor gescheurde vacuüm bags t.g.v. de scherpe randen.

Nadat de prototypen van de gordingen werden samengesteld, werd het geheel vastgetaped met kleefband opdat de verschillende onderdelen niet meer konden bewegen ten opzichte van elkaar. Ook de insteekelementen werden op die manier gefixeerd (Figuur 4.27). Om het versnijden van het SGP eenvoudiger te maken, werd tussen de tand van het onderste insteekelement en de buitenste glasplaten geen SGP geplaatst, zoals zichtbaar is op Figuur 4.27. Daarna werden ter hoogte van de onderste insteek rechtopstaande teflonstrookjes aangebracht langs de randen van de uitsparing (zie pijltjes Figuur 4.27 links). Deze strookjes hadden een hoogte van $1,52 \text{ mm} + 12 \text{ mm} + 1,52 \text{ mm} = \pm 15 \text{ mm}$ en dienden vloeit van de SGP tussenlaag te verhinderen. Door de hoge druk in de autoclaaf bestond het gevaar dat de uitkragende buitenste glasplaten zouden breken. Daarom werd deze uitsparing opgevuld met behulp van metaalblokjes. A.d.h.v. dunne teflonstripjes kon de juiste dikte gerealiseerd worden (Figuur 4.27, het kokerprofieltje op de rechtse figuur (dat enkel bij prototype T2_01_G1 gebruikt werd) had een doorsnede van $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ en behoefde geen teflonstripjes).



Figuur 4.27: rechtopstaande teflonstrookjes (links) en opvulling van de uitsparing (rechts) van prototype T2_01_G1.

Bij de prototypen van de hoofdliggers werd met behulp van teflon ($\pm 5 \text{ mm}$ dik) een 'bekisting' rond het L-vormig metaalelement gemaakt om vloeit te verhinderen. De teflonstroken werden met kleefband bevestigd aan het glas (Figuur 4.28).

Tenslotte werd bij alle prototypen zorgvuldig bescherming aangebracht die diende te vermijden dat de vacuüm bags scheurden. Alle scherpe randen, niveauverschillen en uitkragende onderdelen (bovenste insteekelementen) werden op die manier bekleed (Figuur 4.28 rechts en Figuur 4.29 links). De bescherming bestond, zoals bij de proefstukken in fase I, uit een zijdeachtige stof en een soort isolatiedeken (§ 3.3.2, Figuur 3.11).



Figuur 4.28: prototype T3_03_H1: teflon mal met kleefband bevestigd (links) en vacuüm verpakt element (rechts).

Vacuüm bag

Prototypen T2_01_H1, T3_03_G1 en T3_03_H1 werden vacuüm verpakt¹ met behulp van het vacuümtoestel, zoals beschreven staat in § 3.3.2 (Figuur 4.28 rechts).

Bij prototype T2_01_G1 werd een andere techniek gebruikt: het *permanent vacuüm zuigen* tijdens de autoclaafcyclus. Er werd vernomen dat bij deze techniek de kans kleiner is dat luchtinsluitingen in de SGP tussenlaag aanwezig zijn. Er kon echter maar één zak tegelijk vacuüm gezogen worden in de autoclaaf. Om tijdens het permanent vacuüm zuigen te garanderen dat zo weinig mogelijk lucht achterblijft tussen het SGP en het glas/metaal, werd rond de verbinding een luchtkanaal gecreëerd. Dit gebeurde door isolatiemateriaal op en naast het element aan te brengen (Figuur 4.29 links) zodat de lucht tijdens het vacuüm zuigen optimaal geëvacueerd kon worden.



Figuur 4.29: luchtkanalen rond prototype T2_01_G1 (links) en ventiel met dichtingsring (rechts).

Vervolgens werd het element in een vacuüm bag verpakt. Dit gebeurde door een klein toestel langs de zak te bewegen (Figuur 4.30). In een sleuf van dit toestel worden twee metalen staven opgewarmd die de zak dichtsmelten.

¹ Dikte vacuüm bags: 0,05 mm.



Figuur 4.30: dichtsmelten van de vacuüm bag.

Een stalen schijf met centrale opening en schroefdraad werd ter hoogte van enkele luchtkanalen naast het element geplaatst en mee verpakt (Figuur 4.29 links). Nadat een kleine inkeping in de zak gemaakt was - ter hoogte van het gat in de stalen schijf - kon een tweede stalen schijf met ventiel op de eerste vastgeschroefd worden. Tussen deze schijven bevond zich een rubberdichting. (Figuur 4.29 rechts). In de autoclaaf werd aan het ventiel een luchtslang gekoppeld (Figuur 4.31).



Figuur 4.31: permanent vacuüm zuigen van prototype T2_01_G1 in de autoclaaf: vastkoppelen van de luchtslang (links) en vacuüm zuigen (rechts).

Een vacuümpomp naast de autoclaaf zorgde voor het constant vacuüm zuigen tijdens de laminatie.

Autoclaaf

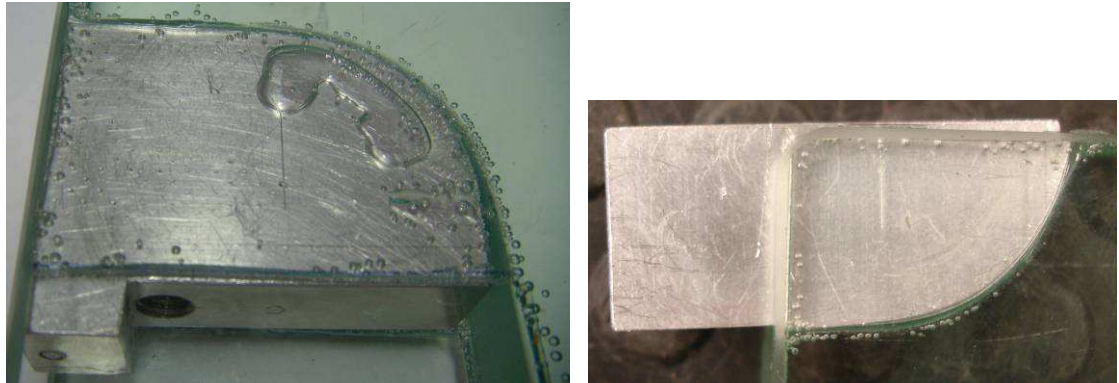
Het druk- en temperatuurschema beschreven in § 1.2.3 werd tijdens deze autoclaafcycli toegepast.

4.3.3 Analyse van de resultaten

Bijlage G bevat afbeeldingen van de vier gerealiseerde prototypen.

Prototype T2_01_G₁

Tijdens het uitpakken van dit prototype bleek dat de vacuüm bag gescheurd was. Dit verklaarde meteen waarom de vacuümpomp tijdens de autoclaafcyclus uitgevallen was.



Figuur 4.32: details van de insteekelementen van prototype T2_01_G₁.

Desondanks was de laminaatverbinding tussen de verschillende glasplaten goed gelukt en volledig transparant. Er bleken echter aan de randen overal kleine luchtinsluitingen (tot 1 mm diameter) aanwezig te zijn. Ook ter hoogte van de insteekelementen kwamen talrijke luchtinsluitingen voor. Op één van de zijvlakken van de onderste insteek bevonden zich zelfs enkele grote luchtballen (Figuur 4.32 links). Op het moment dat de vacuüm bag scheurde, werd deze vol lucht gezogen. Waar rechtstreeks contact tussen SGP en lucht plaatsvond, nestelden zich luchtinsluitingen in de tussenlaag.

Er trad tijdens het laminatieproces nergens vloeï op (ook niet ter hoogte van de tand). Het metaal en teflon dat gebruikt werd om de uitsparing op te vullen, kon gemakkelijk verwijderd worden. Het feit dat geen vloeï optrad, had te maken met de gescheurde vacuüm bag, want in fase I werd eveneens vastgesteld dat bij gescheurde vacuüm bags geen vloeï optrad (cfr. § 3.3.4).

Het bovenste insteekelement bleek $\pm 2^\circ$ geroteerd te zijn om de x-as (Figuur 4.32 rechts). Dit kon te wijten zijn aan verschillende zaken:

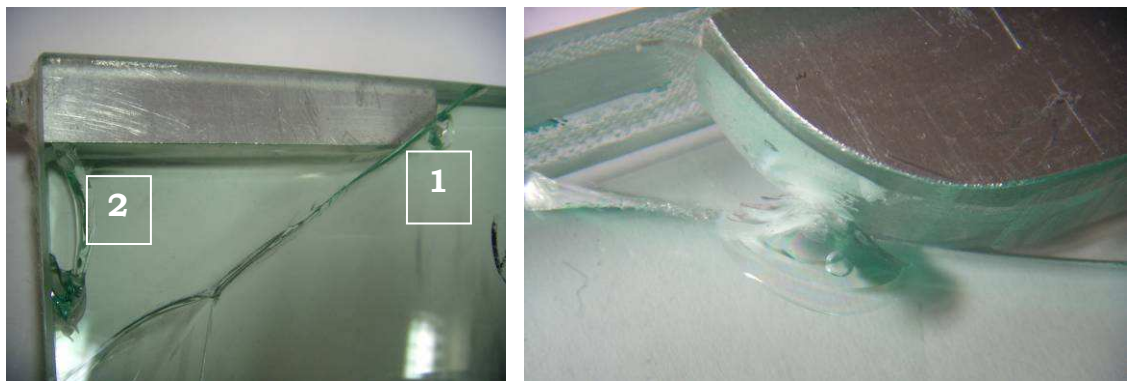
- Het aanbrengen van de bescherming
- Het transporteren van het ingepakte element
- Het vacuüm zuigen
- De druk in de autoclaaf

Deze laminatiefout heeft geen invloed op de werking van de verbinding. Anderzijds is de bovenzijde van de gording niet vlak wat problemen kan opleveren tijdens het aanbrengen van de dakpanelen.

Prototype T3_03_G₁

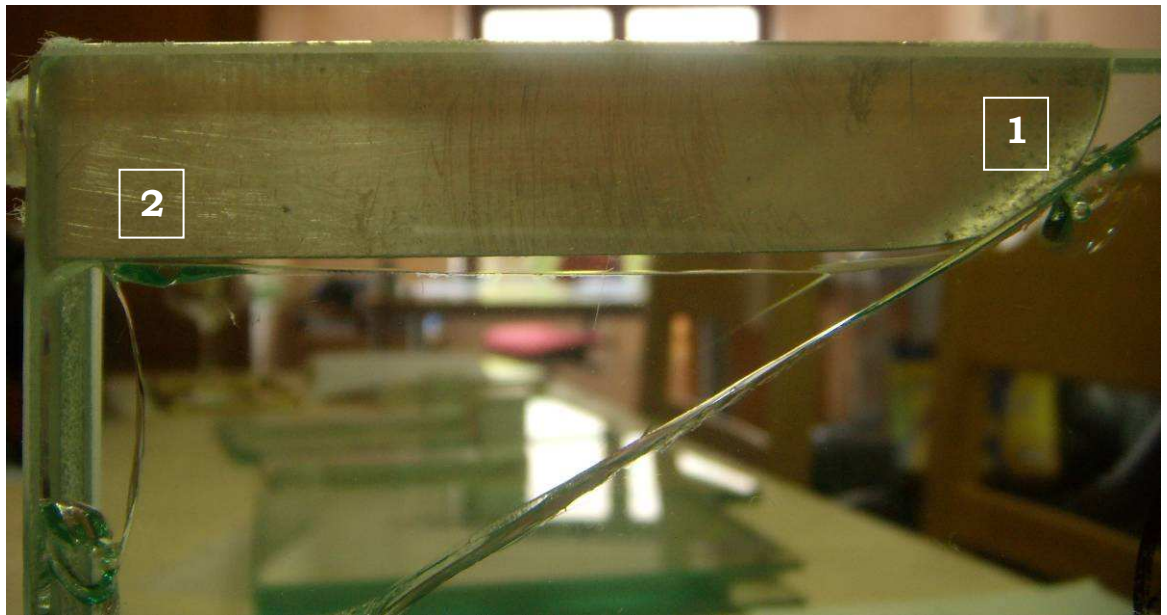
Dit prototype bleek goed gelamineerd te zijn: er werden nergens luchtinsluitingen vastgesteld. Er trad wel een beetje vloeï op en het kostte iets meer moeite om de opvulling aan de onderste insteek te verwijderen. Het glas brak echter ter hoogte van het bovenste insteekelement en aan het andere uiteinde van het prototype.

Ter hoogte van de bovenste insteek werden twee scheuren vastgesteld (nummering Figuur 4.33 en Figuur 4.34). De eerste scheur was in de buitenste glasplaat en bleek te beginnen aan de afronding van het metaalelement. Vermoedelijk werd deze scheur veroorzaakt door de druk van een kleine glassplinter die loskwam van de middelste glasplaat. Dit is zichtbaar op de rechtse foto van Figuur 4.33 die genomen werd langs de achterzijde van het prototype (terwijl de linkse foto van Figuur 4.33 langs de voorzijde (= in de richting van de negatieve x-as) genomen werd). Het driehoekige glasstuk dat door de eerste scheur ontstond (Figuur 4.33 links), onderging een zeer kleine rotatie met de scheur als rotatie-as. De rotatie gebeurde naar het metaalelement toe. Ter hoogte van de draadstang werd (inderdaad) vrij veel vloeï vastgesteld.



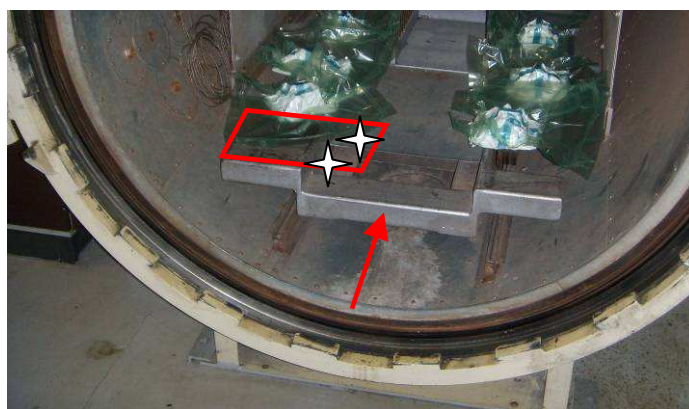
Figuur 4.33: twee scheuren bij prototype T3_03_G₁ ter hoogte van de bovenste insteek (links) en beginpunt van de eerste scheur (rechts).

De tweede scheur bleek in de middelste glasplaat te zijn en was maar enkele centimeters lang. Op Figuur 4.34 is zichtbaar hoe het metaalelement ter plaatste van het (tweede) scheurbegin contact maakte met de middelste glasplaat. Deze figuur toont ook dat, uitgezonderd daar waar de scheuren begonnen, nergens anders contact was tussen de insteek en de middelste glasplaat (zeer onnauwkeurige uitsparing). Het metaalelement ondervond in de autoclaaf een zeer hoge druk en dit veroorzaakte lokale piekspanningen ter hoogte van de twee contactpunten. Vermoedelijk is dit de oorzaak van de glasbreuk in de middelste (en onrechtstreeks in de buitenste) glasplaat. Dit beklemtoont het belang van een goed contact tussen de insteekelementen en de middelste glasplaat.



Figuur 4.34: slechte aansluiting tussen metaal en glas bij de bovenste insteek prototype T3_03_G₁.

Aan het andere uiteinde van het prototype werden eveneens enkele scheuren vastgesteld in één van de buitenste glasplaten (scheur 1 aan de bovenste insteek bevond zich in de andere buitenste glasplaat) (zie Bijlage G). De scheuren liepen over de volledige hoogte van het prototype en waren vermoedelijk te wijten aan het feit dat het element in de autoclaaf slechts gedeeltelijk op de trapvormige stalen bodemplaat lag. In Figuur 4.35 werd geschetst hoe het prototype in de autoclaaf lag (op het linkse trapje). Het deel van het glas dat niet in contact was met de stalen bodemplaat koelde vermoedelijk sneller af dan het deel dat wel in contact was met het staal. De temperatuursverschillen veroorzaakten thermische spanningen die uitmondten in glasbreuk.



Figuur 4.35: trapvormige stalen bodemplaat in de autoclaaf, de sterretjes geven aan waar de scheuren in prototype T3_03_G₁ ontstonden.

Prototype T2_01_H₁

Tijdens het uitpakken van dit prototype werd vastgesteld dat zich geen hechting had voorgedaan. Blijkbaar scheurde de vacuüm bag in een zeer vroeg stadium van het autoclaafproces. Het element werd opnieuw verpakt en gelamineerd tijdens een tweede autoclaafcyclus. Ditmaal werd het permanent vacuüm gezogen.

Het resultaat was een zuivere verbinding met aan de langse uiteinden enkele zeer kleine luchtinsluitingen in de tussenlaag. Er trad wel dermate veel vloeï op dat de resulterende dikte van de SGP tussenlaag quasi nihil was (zie Bijlage G). Tevens lag de bovenzijde van het metaalelement 5 mm lager dan de bovenzijde van het glas (laminatiefout in de z-richting).

Prototype T3_03_H₁

Bij het vierde en laatste prototype scheurde andermaal de vacuüm bag, ditmaal echter in een later stadium waardoor toch hechting optrad. Het resultaat was een onveranderde dikte van de SGP tussenlaag (geen vloeï) met zeer veel luchtinsluitingen. Bij dit prototype lag de bovenzijde van het metaalelement 2 mm lager dan de bovenzijde van het glas.

4.3.4 Besluit

Tabel 4.1 vat de gerealiseerde prototypen in fase II samen.

prototype	permanent Vacuüm zuigen?	gescheurde Vacuüm bag?	glasbreuk?
T2_01_G ₁	ja	ja	nee
T3_03_G ₁	nee	nee	ja
T2_01_H ₁	nee/ja	ja/nee	nee
T3_03_H ₁	nee	ja	nee

Tabel 4.1: samenvatting prototypen fase II.

Een eerste opvallende vaststelling is het feit dat bij drie van de vier prototypes de vacuüm bag scheurde. Het vermoeden is groot dat - net als in fase I - tijdens de voorbereiding kleine afvaldeeltjes in het isolatiemateriaal vasthaakten. Bij de vacuüm bags die permanent vacuüm gezogen werden, kan ook de manier waarop de zak gesloten werd een rol spelen. Het toestel waarmee dit gebeurde (Figuur 4.30) bleek namelijk zeer gevoelig en een kleine inwendige temperatuurswijziging van de metalen staven (de temperatuur was regelbaar) kon reeds leiden tot een slechte smelt of anderzijds het volledige doorbranden van de zak. Het is niet ondenkbaar dat dit voor minuscule foutjes zorgde die tijdens de autoclaafcyclus fataal werden.

Het feit dat de insteekelementen onvoldoende pasten in de uitsparingen van de middelste glasplaat leidde bij één van de prototypen tot glasbreuk. De spanningsconcentraties op de lokale contactpunten bleken te groot.

Tot slot deed zich opnieuw veel vloeï voor bij de metaalelementen die op het glas gelamineerd werden. De teflon mal die met tape vastgekleefd werd, bleek niet te voldoen.

4.4 Evaluatie Fase II

4.4.1 Technologie

Er werd in deze fase ervaring opgedaan over de constructiewijze van de samenstellende onderdelen en het laminatieproces van de insteekelementen. Wat de gescheurde vacuüm bags betreft, werd weinig vooruitgang geboekt. Ook het probleem van vloeï bij de metaalelementen die op het glas gelamineerd worden, kent nog steeds geen goede oplossing. Voorts bleek glasbreuk op te treden als gevolg van slecht passende insteekelementen. In een volgende fase zal getracht worden onderstaande ideeën uit te werken:

- Door gebruikt te maken van dikkere vacuüm bags wordt vermoedelijk de kans op scheuren gereduceerd. Anderzijds dient extra aandacht gegeven te worden aan de zuiverheid van het isolatiemateriaal.
- Bij de metaalelementen die op het glas gelamineerd worden, kan getracht worden teflon op het glas te verlijmen (in plaats van met tape te bevestigen zoals in deze fase gebeurde). Indien de lijm niet loskomt tijdens het autoclaafproces, zal dit efficiënt de vloeï verhinderen. Het zal experimenteel moeten onderzocht worden of deze mal naderhand gemakkelijk kan verwijderd worden, zonder het prototype te beschadigen.
- Het realiseren van de insteekelementen en de uitsparingen in de middelste glasplaat mag niet meer los van elkaar gebeuren. Het lijkt interessant eerst het glas te bewerken om daarna passende metaalstukken te maken.

4.4.2 Laminatiefouten

In § 2.3 werd een overzicht gegeven van de mogelijke oorzaken van relatieve verplaatsingen en rotaties tussen de hoofdligger en de gording. Tabel 4.2 bevat grootteordes van de waargenomen laminatiefouten bij de gerealiseerde prototypen in deze fase. Er wordt telkens naar de oorzaak in de desbetreffende paragraaf verwezen. Ook de vormfouten met betrekking tot uitsparingen in de middelste glasplaat werden opgenomen in de tabel.

vrijheidsgraad	paragraaf	oorzaak	maximale waarde
u	2.3.2	b)	/
v	2.3.3	b)	/
		c)	/
w	2.3.4	a)	5 mm
		c)	/
		d)	1 mm
φ_x	2.3.5	d)	2 °
		e)	/
φ_y	2.3.6	a)	/
φ_z	2.3.7	c)	/

Tabel 4.2: waargenomen laminatie- en vormfouten bij de prototypen van fase II.

Uit de tabel, die enkel laminatiefouten en enkele vormfouten beschouwt, blijkt dat een tolerantie in de z-richting van ± 10 mm zeker vereist is. De rotatie om de x-as van de bovenste insteek (prototype T2_01_G1) kan opgevangen worden in de verbinding.

4.4.3 Ontwerp T2_01

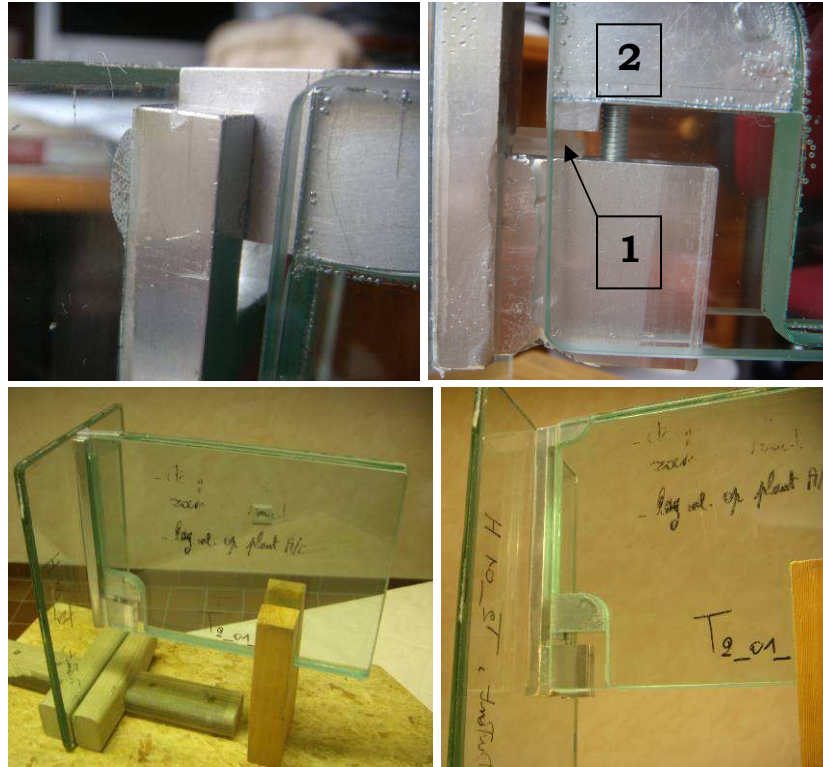
Met behulp van een ondersteunende constructie werden de prototypen van ontwerp T2_01 aan elkaar bevestigd (Figuur 4.36). Dit bracht volgende positieve zaken aan het licht:

- De verbinding oogde opvallend sober en transparant.
- De montage verliep zonder al te grote problemen.
- De toleranties met betrekking tot vrijheidsgraden v , w en φ_x bleken mogelijk. Met behulp van drie stelplaatjes ($\pm 1,5$ mm dik) lukte het om de bovenzijden van beide prototypen in één vlak te brengen. De laminatiefouten (rotatie bovenste insteek en verschil bovenvlakken metaal en glas bij de hoofdligger) konden dus opgevangen worden.

Tijdens de Montage doken ook enkele minpunten op:

- De kop van de inbusbout paste niet meten in de verbrede sleuf onderaan. Tijdens het lassen was een deel van de rand weggesmolten (Figuur 4.20) en naar binnen toe vervormd. Met behulp van een tang kon de rand voorzichtig naar buiten geplooid worden totdat de kop van de inbusbout volledig kon verzonken worden.
- Het aanbrengen van de stelplaatjes was vrij bewerkelijk. Eerst diende de gording geplaatst te worden en kon het hoogteverschil tussen de bovenzijden gemeten worden. Daarna werd de gording terug opgelicht (positieve z-richting) opdat de stelplaatjes konden geplaatst worden.

- Doordat het bovenste insteekelement tijdens de laminatie een kleine rotatie onderging (Figuur 4.32 rechts), zorgt dit voor een kleine uitstulping aan de bovenzijde van de gording. Dit kon eventueel met een vijl weggewerkt worden.



Figuur 4.36: ontwerp T2_01 (1: stelplaatjes, 2: verzonken inbusbout).

Als algemeen besluit kan gesteld worden dat deze verbinding voldoet aan de vooropgestelde eisen.

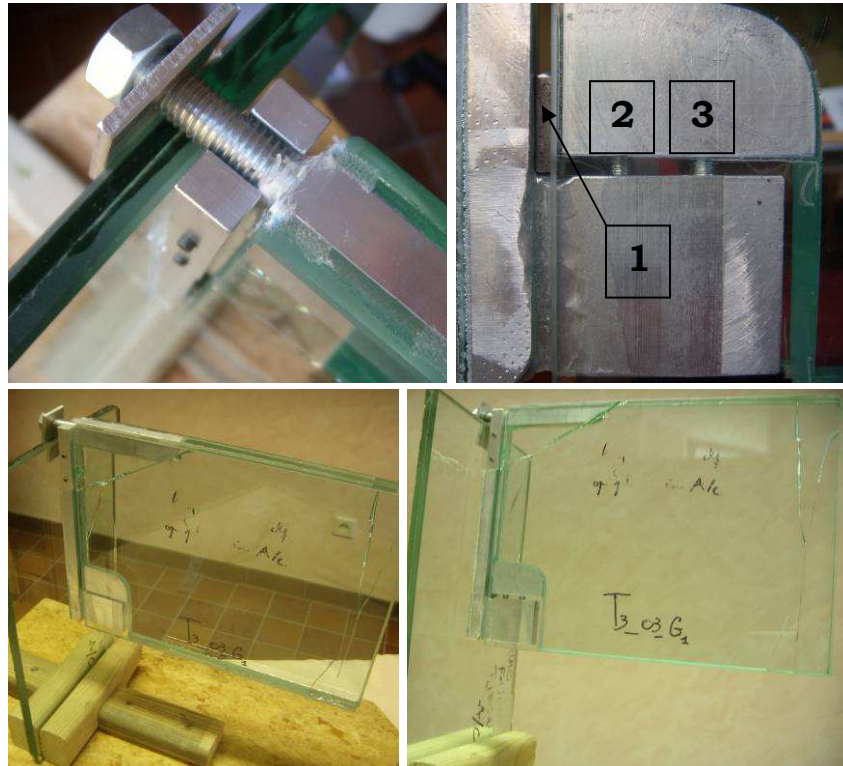
4.4.4 Ontwerp T3_03

De prototypen van ontwerp T3_03 werden eveneens aan elkaar bevestigd, bovenaan werd de gording vastgeklemd met behulp van een tussenvoegplaatje (Figuur 4.37). Onderaan werd een stelblokje geplaatst om de druk t.g.v. het buigmoment op te vangen. Uit deze montage bleken volgende voordelen:

- Ook deze verbinding gaf een transparante indruk.
- De montage verliep vlot.
- De toleranties in y- en z-richting bleken voorhanden te zijn. Met behulp van de stelschroef kon de gording in de z-richting verplaatst worden. De schroef werd onderaan van een groefje voorzien zodat hij gemakkelijk met een schroevendraaier kon aangedraaid worden.

De mindere aspecten aan deze verbinding bleken te zijn:

- Het stelblokje zorgde voor enig ‘prutswerk’ hoewel dit minder bewerkelijk was dan bij de stelplaatjes van ontwerp T3_03. De gording diende hiervoor niet verplaatst te worden.
- Tijdens de bevestiging van de kantelplaatjes bovenaan is de gording nog niet stabiel en diende ze gesteund te worden.



Figuur 4.37: ontwerp T3_03 (1: stelblokje, 2: stelschroef, 3: verzonken inbusbout).

De verbinding voldeed aan de verwachtingen, hoewel ze (nog) niet gemonteerd werd zoals in het ontwerp vooropgesteld werd. In de volgende fase werd een tweede versie van dit ontwerp gerealiseerd. In § 5.4.4 wordt ingegaan op de gelijktijdige montage van beide versies.

HOOFDSTUK 5: Fase III

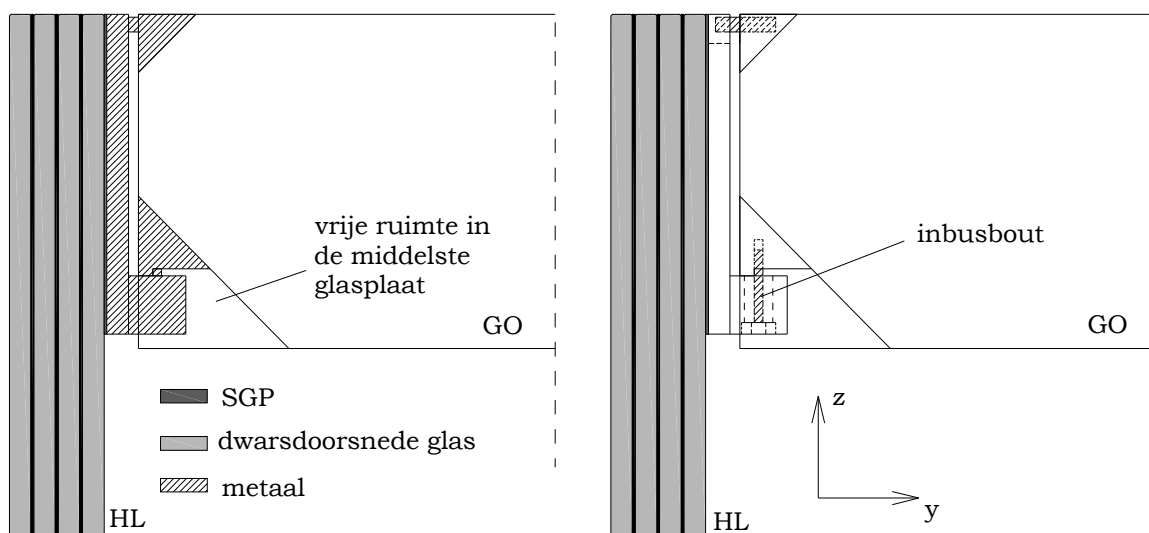
5.1 Inleiding

De indeling van dit hoofdstuk is analoog als Hoofdstuk 4. Eerst worden twee nieuwe ontwerpen voorgesteld. Het betreffen aanpassingen/verfijningen van ontwerpen T2_01 en T3_03, voornamelijk in functie van het laminatieproces. In § 5.3 wordt beschreven hoe deze ontwerpen, samen met een tweede versie van de verbindingen uit fase II, gerealiseerd werden. Tot slot volgt een evaluatie van deze fase.

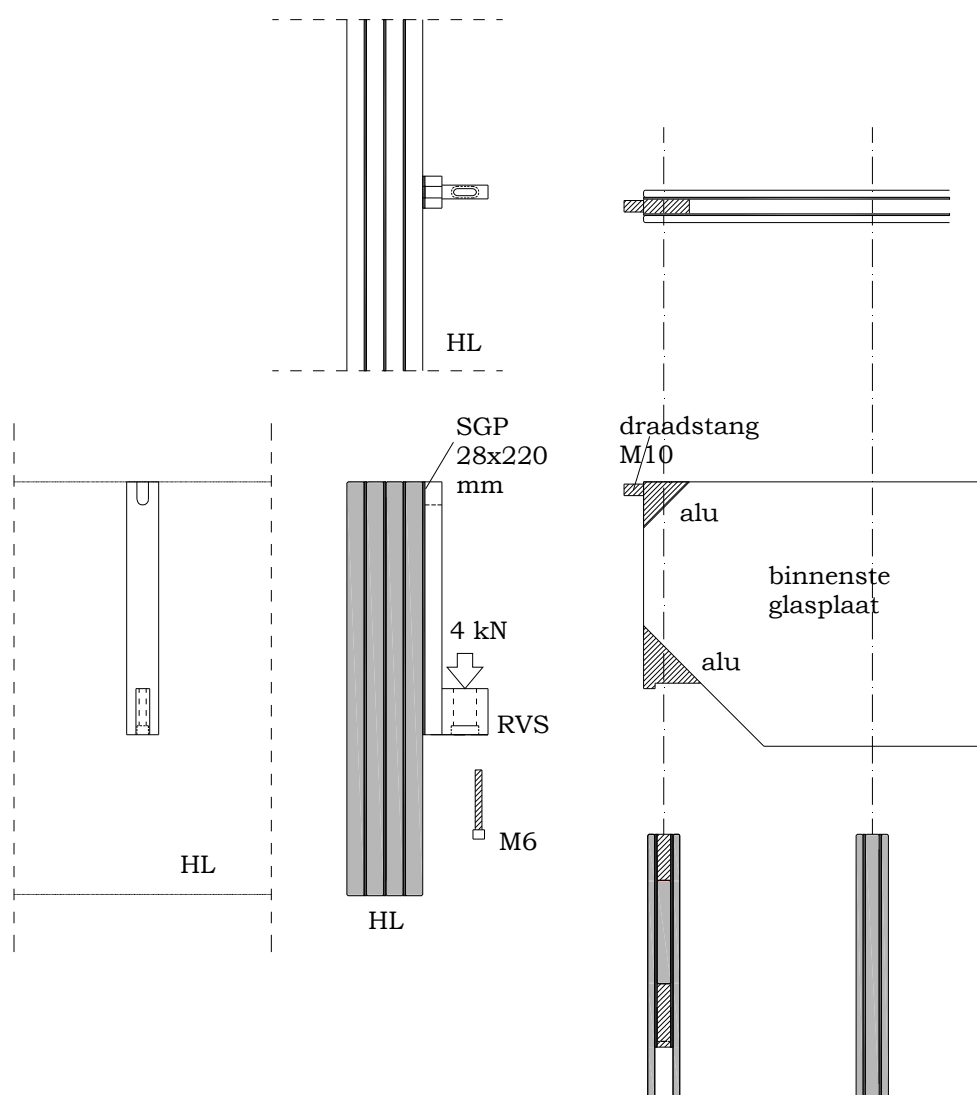
5.2 Ontwerpen

5.2.1 Ontwerp T2_04

Figuur 5.1 toont een zijaanzicht (links) en een snede (rechts) van ontwerp T2_04. In Figuur 5.2 is een principeschets van deze verbinding weergegeven. Het concept is volledig analoog als bij ontwerp T2_01 (cfr. § 4.2.2), alleen werden een aantal kleine wijzigingen doorgevoerd. De eerste - en voornaamste - wijziging betreft de vorm van de insteekelementen. In de vorige fase bleken deze slecht te passen in de voorziene uitsparingen van de middelste glasplaat. Bovendien leidde dit tot glasbreuk tijdens de laminatie bij één van de prototypen (cfr. § 4.3.3). Het slecht passen van de insteekelementen was vooral te wijten aan de onnauwkeurigheid van de uitsparingen. Daarom wordt bij ontwerp T2_04 geopteerd om met driehoekige uitsparingen te werken. Deze kunnen met behulp van een cirkelzaag weggezaagd worden uit het glas, zodat de randen recht zijn en de onnauwkeurigheid veel kleiner tot zelfs nihil is. De onderste uitsparing is groter dan bij ontwerp T2_01, maar de auteur meent dat de visuele inpakt hiervan klein is. De insteekelementen zijn eveneens driehoekig en de hechtingsoppervlakte met de buitenste glasplaten is even groot als bij de overeenkomstige insteken van ontwerp T2_01 ($\pm 1250 \text{ mm}^2$). Wanneer de prototypen ooit beproefd worden, kan dit nuttig zijn.



Figuur 5.1: ontwerp T2_04, algemeen.



Figuur 5.2: ontwerp T2_04, principeschets.

De driehoekige insteken hebben wel tot gevolg dat de middelste glasplaat niet meer horizontaal steunt op het onderste insteekelement. De dwarskracht moet dus volledig door de SGP tussenlaag opgevangen worden. De schuifspanning in de tussenlaag bedraagt in UGT, in de onderstelling dat de wrijving tussen het insteekelement en de middelste glasplaat nihil is, $\frac{5050N}{2 \cdot 1250mm^2} = 2 \text{ MPa}$. Dit lijkt haalbaar, afgaande op de gemiddelde waarde van 12 MPa, bekomen door Mihaylov¹ (cfr. § 3.2.3).

In fase II werd na de laminatie van prototype T2_01_G1 vastgesteld dat het bovenste (uitkragende) insteekelement geroteerd was om de x-as (cfr. § 4.3.3). Om dit te vermijden is bij ontwerp T2_04 de bovenste insteek niet meer uitkragend. Wel wordt een gat met schroefdraad voorzien waarin, na de laminatie, een draadstang (diameter 10 mm) kan gedraaid worden. Deze draadstang past in de uitsparing bovenaan het L-vormig metaalelement zodat het kantelen van de gording verhinderd wordt.

Tenslotte is tussen de onderranden van de gording en het L-vormig metaalelement een hoogteverschil van 10 mm voorzien, zoals eerder bij ontwerp T3_03 werd toegepast (cfr. § 4.2.6).

Voorts gelden bij deze verbinding dezelfde voor- en nadelen als bij ontwerp T2_01 (cfr. § 4.2.2).

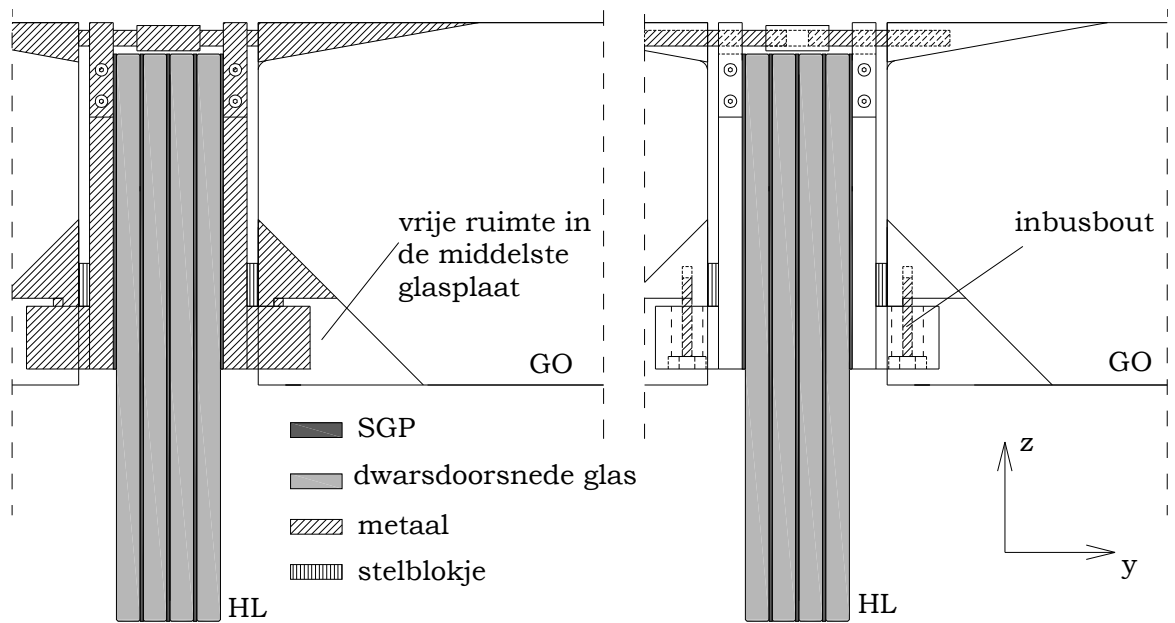
5.2.2 Ontwerp T3_04

In Figuur 5.3 wordt ontwerp T3_04 afgebeeld. Een principeschets van deze verbinding is weergegeven in Figuur 5.4. Hier geldt ontwerp T3_03 (cfr. § 4.2.6) als uitgangspunt en werden andermaal enkele kleine wijzigingen doorgevoerd.

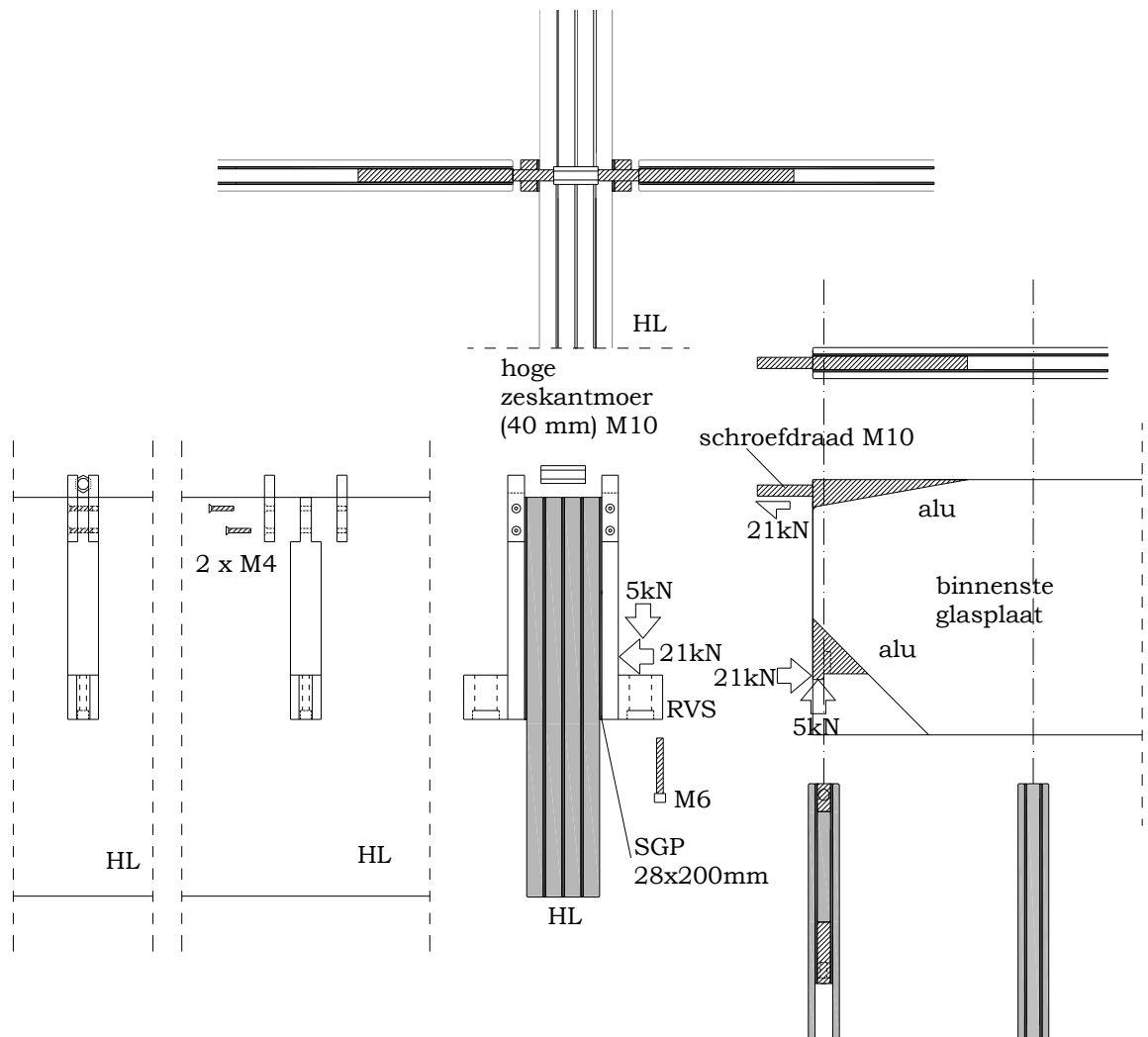
Om analoge redenen als bij ontwerp T2_04, zijn bij deze verbinding de uitsparingen en insteekelementen driehoekig. Ook hier hebben de insteken dezelfde oppervlakte ($\pm 1250 \text{ mm}^2$) als de overeenkomstige insteekelementen bij ontwerp T3_03.

De verticale dwarskracht en de horizontale drukkracht (t.g.v. het buigmoment) op het onderste insteekelement (dat hoeken van 45° heeft) zullen slechts uitzonderlijk even groot zijn, wat betekent dat in het merendeel van de belastingsgevallen de belastingen door de SGP tussenlaag opgevangen moeten worden. De schuifspanning in de tussenlaag bedraagt in UGT, in de onderstelling dat de wrijving tussen het insteekelement en de middelste glasplaat nihil is, $\frac{\sqrt{5050^2 + 21000^2}N}{2 \cdot 1250mm^2} = 8,6 \text{ MPa}$. Dit lijkt eveneens haalbaar, andermaal afgaande op de gemiddelde waarde van 12 MPa, bekomen door Mihaylov.

¹ Mihaylov J. (2007). Niet gepubliceerd. ILEK, Universiteit Stuttgart.



Figuur 5.3: ontwerp T3_04, algemeen.



Figuur 5.4: ontwerp T3_03, principeschets.

De draadstang in het bovenste insteekelement wordt pas na de laminatie in het voorziene gat met schroefdraad gedraaid (in tegenstelling tot fase II).

De stelschroef wordt niet gebruikt in dit ontwerp. Wel wordt aan de onderste insteek een tand voorzien, analoog als bij ontwerpen T2_01 en T2_03. Op die manier is het ondersteunend gedeelte van het L-vormig metaalelement korter (in y-richting). Bovendien garandeert de tand in alle omstandigheden de kleinst mogelijke excentriciteit. Bij ontwerp T3_03 bestaat de kans dat de stelschroef niet gebruikt wordt en bovendien het onderste insteekelement (op welke manier dan ook) een kleine rotatie om de x-as in wijzerzin ondergaat. In dat geval steunt de gording op het eindpunt van het ondersteunend deel. Dit gaat gepaard met een grotere excentriciteit (van de dwarskracht) en zodoende een groter moment in de SGP tussenlaag.

Tenslotte ligt de bovenrand van de gording in dit ontwerp 20 mm hoger dan de bovenrand van de hoofdligger (bij ontwerp T3_03 is dit slechts 16 mm). Op die manier is er iets meer ruimte voorhanden bij de bevestiging van de hoge zeskantbout. Bovendien kan zo de gording een verplaatsing in negatieve z-richting ondergaan.

Voorts wordt verwezen naar § 4.2.6 waar de voor- en nadelen beschreven staan die ook van toepassing zijn op dit ontwerp.

5.3 Technologie prototypen fase III

In wat volgt wordt beschreven hoe prototypes van ontwerpen T2_04 en T3_04 gerealiseerd werden. Tevens werd een tweede versie van ontwerpen T2_01 en T3_03 gelamineerd. Zoals eerder vermeld, werden de samenstellende onderdelen van die verbindingen reeds vervaardigd in fase II (cfr. § 4.3.1). De indeling van deze paragraaf is analoog als in § 4.3.

5.3.1 Samenstellende onderdelen

Net als in de vorige fase werden alle metaalelementen uit aluminium gemaakt en bestonden de glasonderdelen uit floatglas. Dimensies van de metaalonderdelen en de middelste glasplaten van de gordingen zijn terug te vinden in Bijlage H.

Insteekelementen gordingen

De realisatie van de insteekelementen verliep eenvoudiger dan in de vorige fase, omdat geen afrondingen dienden gemaakt te worden. Zoals eerder vermeld, werden de draadstangen in de bovenste insteekelementen nog niet aangebracht, maar werd enkel een gat met schroefdraad voorzien. Mallen voor de insteken werden ditmaal niet gemaakt.

Er werd eveneens getracht de insteekelementen van prototypes T2_01_G₂ en T3_03_G₂, die in de vorige fase gemaakt werden, in de mate van het mogelijke aan

te passen aan de vorm van de uitsparingen in het glas. Op die manier werd het contactoppervlak tussen het metaal en de middelste glasplaat bij alle elementen vergroot.

Metaalelementen hoofdligger

De L-vormige metaalelementen werden op identiek dezelfde manier gemaakt als in de vorige fase¹. Alleen werden daar waar de las zou komen, de randen afgeschuind zodat een V-vormige naad ontstond (± 2 mm afschuining). Op die manier werd een diepere inbranding verkregen. Ditmaal smolt geen materiaal aan de sleuf randen weg. Wel werd na het vlakfrezen vastgesteld dat de inbranding niet overal voldoende diep was, ondanks de V-naden (Figuur 5.5). Vermoedelijk werd iets teveel materiaal weggefreest.



Figuur 5.5: onvoldoende inbranding van de las bij prototype T2_04_H.

Glas

De afmetingen van de glasplaten voor de prototypen waren identiek als die in fase II. De uitsparingen in de middelste glasplaten van de gordingen werden met een watergekoelde cirkelzaagmachine vervaardigd² (Figuur 5.6). Deze machine kon enkel gebruikt worden om glas te zagen van rand naar rand, vandaar dat in de vorige fase de toevlucht diende genomen te worden tot de lintzaagmachine. De cirkelzaagmachine had een stationair bodemvlak en een horizontaal bewegend zaagblad. De glasplaatjes werden met gewichten verzwaard, opdat ze tijdens het zagen niet zouden verplaatsen (Figuur 5.6). Met behulp van de schuurband werden de randen van alle glasplaatjes afgeschuind.

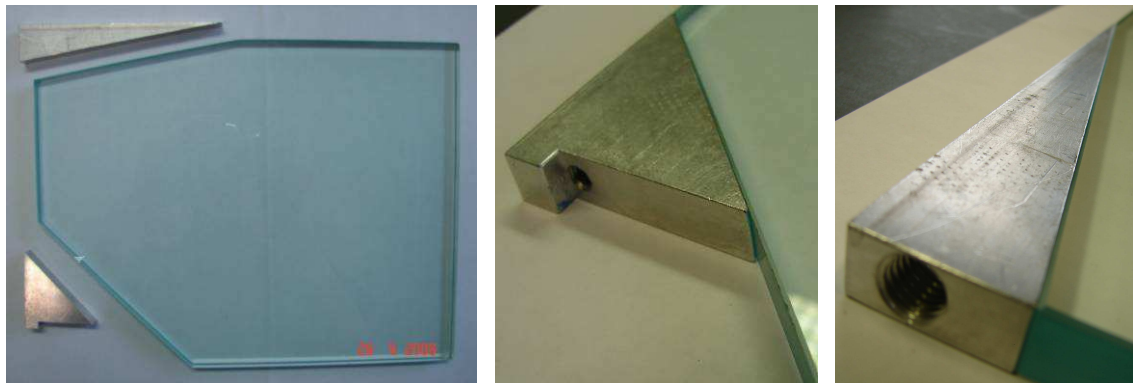
¹ Het lassen gebeurde weerom aan de Vakgroep Toegepaste Fysica (cfr. supra).

² Het glas werd opnieuw bewerkt in de Facultaire Werkplaats Wetenschappen (cfr. supra).



Figuur 5.6: zagen van de uitsparingen met behulp van een watergekoelde cirkelzaagmachine.

De resulterende uitsparingen hadden volkomen rechte randen en de insteekelementen pasten ditmaal perfect (Figuur 5.7).



Figuur 5.7: middelste glasplaat met insteekelementen van prototype T3_04_G.

5.3.2 Laminatieproces

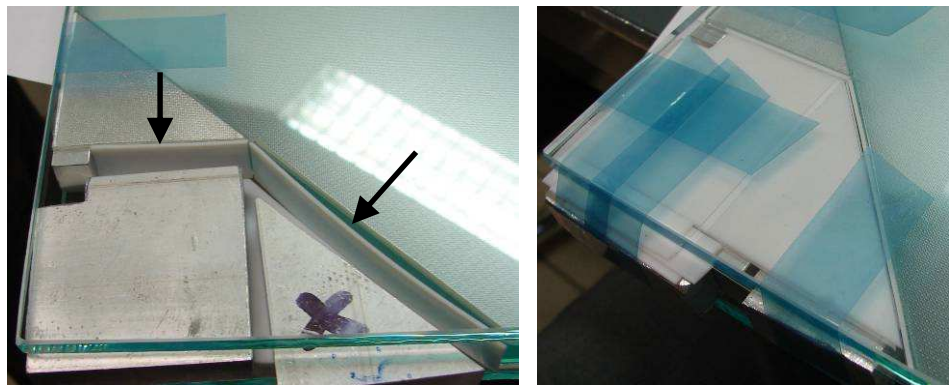
Ook ditmaal gebeurden de laminaties in de autoclaaf van het laboratorium van DuPont de Nemours. De proefstukken werden echter in het Laboratorium voor Modelonderzoek samengesteld en verpakt.

Vorbereiding

De metaalelementen werden ontvet met aceton en de reiniging van het glas gebeurde met een ontvettingsproduct. Een Dust Cleaning Roller was niet beschikbaar, daarom werd de toevlucht genomen tot een kleeftborstel¹ om het SGP stofvrij te maken.

¹ Wordt gebruikt om haren en pluusjes van textiel te verwijderen.

Om te vermijden dat de insteekelementen tijdens de voorbereiding, verpakking of autoclaafcyclus een verplaatsing of rotatie ondergingen, werden ze tijdens de samenstelling van de prototypen vastgelijmd¹ aan de middelste glasplaat. Om het versnijden van het SGP eenvoudiger te maken, werd tussen de tand van de onderste insteekelementen en de buitenste glasplaten nooit SGP geplaatst. Ter plaatste van de onderste insteekelementen werden - net als in fase II (cfr. § 4.3.2) - rechtopstaande teflonstrookjes tegen de randen van de uitsparing geplaatst (zie pijltjes Figuur 5.8 links). Daarna werd de uitsparing opgevuld met metaalstukjes om glasbreuk in de autoclaaf te vermijden (Figuur 5.8 rechts). Met behulp van teflon- en mylarstripjes kon de juiste dikte verkregen worden.



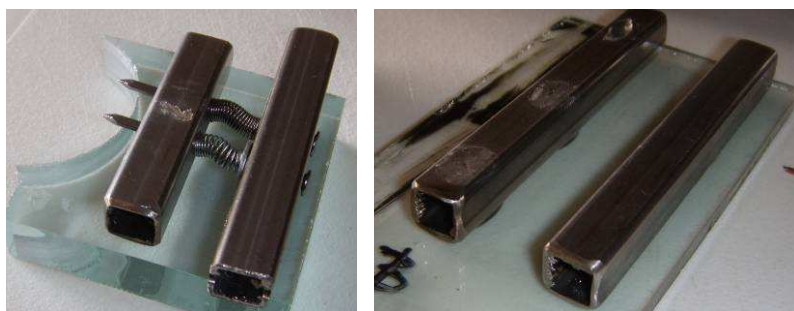
Figuur 5.8: opvulling van de uitsparingen bij prototypen T2_04_G (links) en T3_04_G (rechts).

Bij de prototypen van de hoofdliggers werd ditmaal een ‘bekisting’ verlijmd² op het glas om vloeit te verhinderen en tevens het metaalelement te fixeren tijdens de laminatie. De gebruikte lijm is volgens de leverancier bruikbaar bij temperaturen tot 120 °C en verliest hierbij tot 50 % van zijn sterkte³. Om dit te staven werd vooraf een klein experiment uitgevoerd: vier kokerprofieltjes, verlijmd op een glasplaatjes, gingen gedurende ± 70 min. in een oven bij ± 145 °C (= temperatuur in de autoclaaf). Figuur 5.9 toont hoe tussen twee van deze elementen enkele veertjes geplaatst werden. Na enkele minuten in de oven, begaf de lijm bij één van deze profieltjes. Bij de overige drie stukken bleef de lijm stand te houden en kon na het experiment het metaalelement losgemaakt worden door er een kortstondige belasting op uit te oefenen. Ondanks het vroegtijdig begeven van het metaalstuk onder een bijkomende belasting, werd toch geopteerd deze techniek uit te proberen. In de autoclaaf wordt namelijk, naast een zijdelingse druk afkomstig van het vloeibaar SGP, een grote verticale drukkracht op de elementen uitgeoefend en het vermoeden bestond dat hierdoor de lijmverbinding toch stand zou houden.

¹ Type lijm: Loctite® 401^M. (sneldrooglijm).

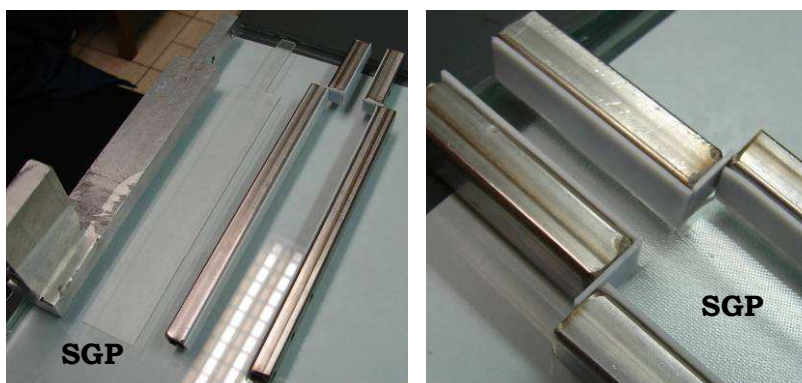
² Type lijm: Loctite® 401^M.

³ <http://www.farnell.com/datasheets/113897.pdf>.



Figuur 5.9: vier verlijmde metaalelementjes werden gedurende 60 min. in een oven geplaatst bij 145 °C.

Bij prototypen T2_01_H₂ en T3_03_H₂ werden inox kokerprofieltjes (doorsnede 10 mm x 10 mm, wanddikte 1 mm) gebruikt. Om rechtstreeks contact met SGP te vermijden, werden teflonstrookjes tegen de metaalelementen gekleefd (Figuur 5.10). Aan de bovenzijde van het te lamineren metaalelement (z-richting) werd een aluminiumstripje gekleefd om ook daar vloeit te verhinderen (analoog als op Figuur 5.11 (rechts) waar echter twee kleine teflonstripjes gebruikt werden). Bij prototype T2_01_H₂ werd de uitsparing bovenaan opgevuld met een kort kokerprofieltje (Figuur 5.19 links).



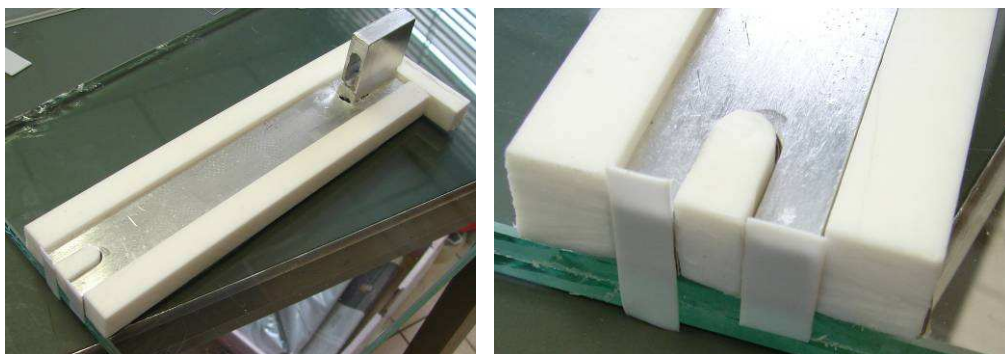
Figuur 5.10: metalen mal bij prototype T3_03_H₂.

Bij prototypen T2_04_H en T3_04_H werd de mal met teflon staafjes (15 mm x 15 mm) gemaakt (Figuur 5.11). Bij deze prototypen werden aan de bovenzijde van het metaalelement (z-richting) teflonstrookjes gekleefd om ook daar vloeit te verhinderen (Figuur 5.11 rechts). De uitsparing bovenaan bij prototype T2_04_H werd opgevuld met een teflonblokje dat op maat gezaagd werd (Figuur 5.11 rechts).

Alle prototypen kregen voldoende bescherming om scheuren in de vacuüm bags te vermijden. Dit gebeurde op dezelfde manier en met hetzelfde materiaal als in fase II (cfr. § 4.3.2). Ditmaal werd er op toegezien dat het isolatiemateriaal zuiver bleef van afvaldeeltjes.

Om tijdens het transport van de prototypen (naar het laboratorium van DuPont de Nemours) te vermijden dat het SGP met licht en vocht in contact kwam (cfr. § 1.1.2), werden alle prototypen licht- en luchtdicht verpakt (Figuur 5.12 rechts). Bij

elke prototype werd een zakje¹ met vochtabsorberende silica korrels mee verpakt (Figuur 5.12 links).



Figuur 5.11: teflon mal bij prototype T2_04_H.



Figuur 5.12: vochtabsorberende silica korrels (links) en verpakte proefstukken (rechts).

Vacuüm bag en autoclaaf

Al de prototypen van de gordingen, evenals prototype T3_03_H₂, werden vacuüm verpakt² met behulp van het vacuümtoestel (cfr. § 3.3.2). Deze vijf stukken werden samen met prototype T3_04_H, dat permanent vacuüm gezogen werd (cfr. § 4.3.2), gelamineerd tijdens een eerste autoclaafcyclus (zoals eerder vermeld, kon slechts één vacuüm bag per autoclaafcyclus permanent vacuüm gezogen worden). Naderhand bleek echter de vacuüm bag van prototype T3_03_H₂ gescheurd te zijn. Daarom werd dit prototype tijdens een nieuwe cyclus onder constant vacuüm zuigen gelamineerd. Prototypes T2_01_H en T2_04_H werden eveneens met permanent vacuüm zuigen, tijdens afzonderlijke autoclaafcycli, gelamineerd. Alle prototypen van de hoofdliggers werden dus met permanent vacuüm zuigen gerealiseerd en tevens werd bij deze stukken een vacuüm bag gebruikt van 0,08 mm dik in plaats van de gebruikelijke 0,05 mm. Dit bleek wel degelijk effect te hebben, want bij geen van deze vier prototypen scheurde de zak.

¹ Hiervoor werden koffiefilters gebruikt omwille van de vochtdoorlatende eigenschappen.

² Dikte vacuüm bag: 0,05 mm.

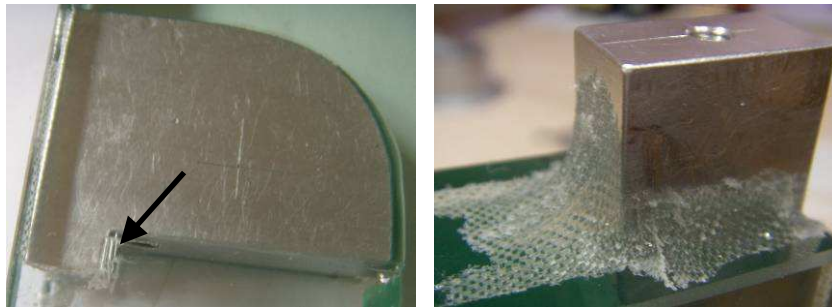
Het druk- en temperatuurschema beschreven in § 1.2.3 werd tijdens al de autoclaafcycli toegepast.

5.3.3 Analyse van de resultaten

Bijlage I bevat afbeeldingen van de acht gerealiseerde prototypen.

Prototype T2_01_G₂

Dit prototype bleek zeer goed gelamineerd te zijn: er deed zich geen glasbreuk voor en er waren nergens luchtinsluitingen te bespeuren. Er trad wel vloeit op ter hoogte van de insteekelementen. Tussen de tand van het onderste insteekelement en de buitenste glasplaten vloeide SGP en de vloeiresten onderaan de tand konden met een mes verwijderd worden (Figuur 5.13 links).

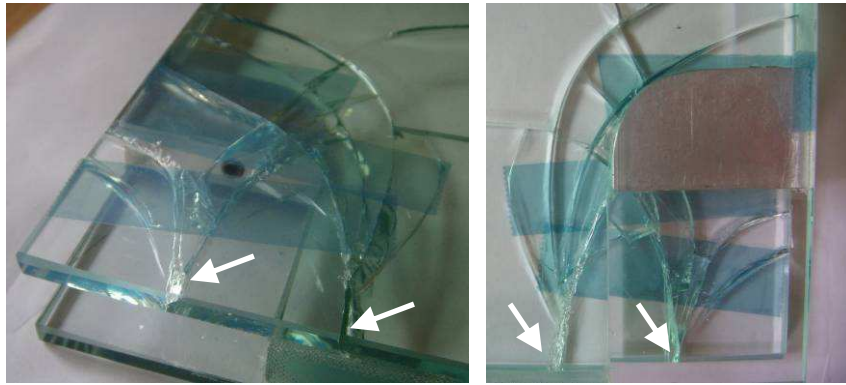


Figuur 5.13: vloeiresten bij de insteekelementen van prototype T2_01_G₂.

Aan het bovenste insteekelement werd niets voorzien om de vloeit te verhinderen. Vandaar dat het vloeiverschijnsel hevig optrad en vloeiresten bleken moeilijk verwijderbaar (Figuur 5.13 rechts). Op de figuur is zichtbaar hoe de vloeiresten de vorm van de vacuüm bag (die tegen het element gedrukt werd) aannamen. Als gevolg van dit probleem kunnen de tolerantiemogelijkheden tijdens de montage niet volledig benut kunnen worden.

Prototype T3_03_G₂

Hier werd andermaal een mooie laminatie vastgesteld, zonder luchtinsluitingen. De vloeit aan het onderste insteekelement was beperkt, ter hoogte van de bovenste (uitkragende) insteek werden veel vloeiresten waargenomen, maar deze konden verwijderd worden. Er trad echter glasbreuk op aan de uitsparing onderaan. Er werden twee breukwaaiers in de buitenste glasplaat vastgesteld die allebei hun beginpunt hadden aan de onderrand van het prototype (aangeduid met pijltjes op Figuur 5.14). De breuklijnen liepen (in verschillende richtingen) over het insteekelement zelf door tot andere uiteinde van het prototype (zie Bijlage I).

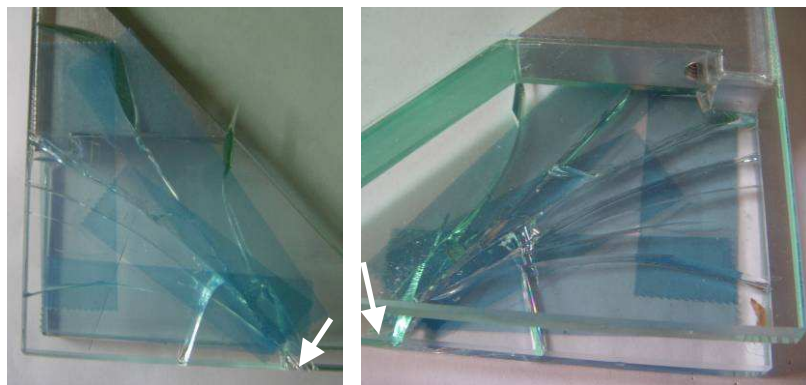


Figuur 5.14: glasbreuk ter hoogte van de uitsparing van prototype T3_03_G₂, voor- (links) en achterzijde (rechts).

Vermoedelijk werd de uitsparing niet voldoende opgevuld en brak het glas onder de hoge druk in de autoclaaf.

Prototype T2_04_G

Bij dit prototype was de laminatie andermaal goed gelukt en werden bijzonder weinig vloeiresten vastgesteld. Er werd echter opnieuw een breukwaaier in de buitenste glasplaat vastgesteld die begon aan de onderzijde van het prototype (Figuur 5.15). De breuklijnen deden zich ditmaal enkel voor ter hoogte van de uitsparing en één enkele breuklijn liep over het insteekelement.



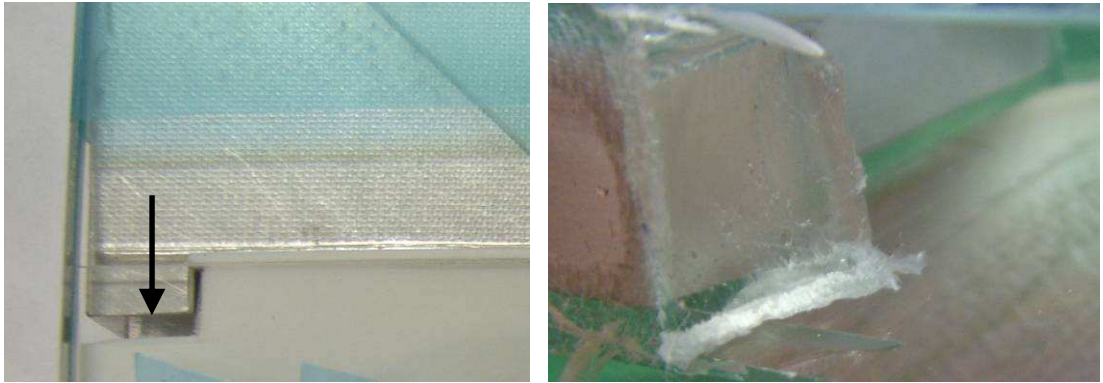
Figuur 5.15: glasbreuk ter hoogte van de uitsparing van prototype T2_04_G, voor- (links) en achterzijde (rechts).

Het breukpatroon doet vermoeden dat de opvulling andermaal te dun was, waardoor het glas brak in de autoclaaf. Er vloeide SGP tussen de tand en de buitenste glasplaten. Dit leidde tot een plaatselijk verminderde dikte van de tussenlaag wat misschien de glasbreuk in de hand werkte.

Prototype T3_03_G

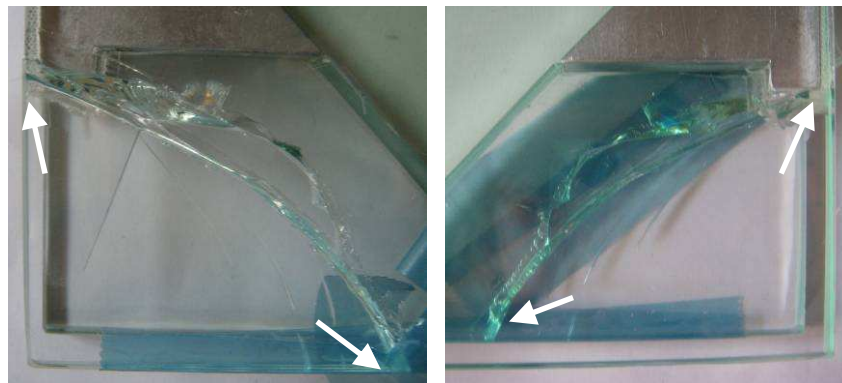
Het laatste prototype van de gordingen kende gelijkaardige verschijnselen als de twee voorgaande gevallen. De laminaties bleken goed gelukt en zonder

luchtinsluitingen. Het element bezat echter aan de onderzijde van het onderste insteekelement veel vloeiresten die niet konden verwijderd worden zonder het glas te beschadigen (Figuur 5.16 rechts). Hieruit bleek nogmaals dat voortaan de opvulling, inclusief de rechtopstaande teflonstrookjes, tot tegen de tand moeten aangebracht worden, wat in dit (en de voorgaande) geval(len) onvoldoende gebeurde (Figuur 5.16 links).



Figuur 5.16: opvulling tijdens de laminatie (links) en vloeiresten naderhand (rechts), ter hoogte van het onderste insteekelement van prototype T3_04_G.

Er werd andermaal een breuklijn vastgesteld in één van de buitenste glasplaten ter hoogte van de uitkraging (Figuur 5.17). Ditmaal kon moeilijk vastgesteld worden waar de scheur begon, één van de uiteinden was vlakbij de tand. Dit doet opnieuw vermoeden dat te weinig opvulmateriaal gebruikt werd waardoor het uitkragende glas net voor het metaalelement brak.

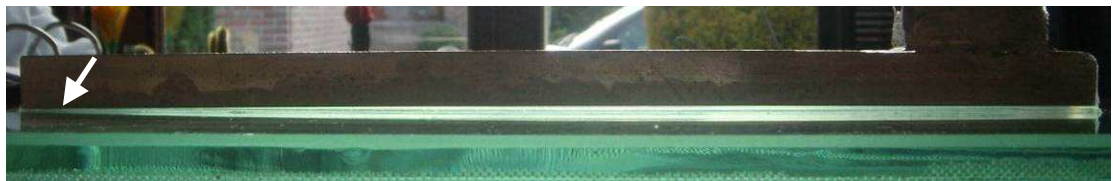


Figuur 5.17: glasbreuk ter hoogte van de uitsparing van prototype T3_04_G, voor- (links) en achterzijde (rechts).

Prototype T2_01_H₂

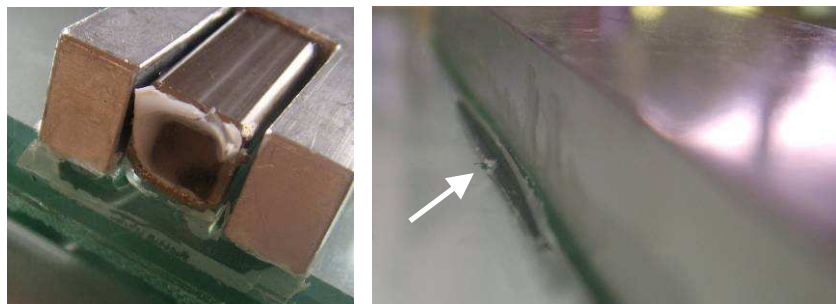
De laminatie van dit prototype bleek zeer goed gelukt. Het betrof een zuivere verbinding, vrij van luchtinsluitingen. Bovendien trad zeer weinig vloeï op en bleek de dikte van de tussenlaag quasi overal onveranderd te zijn. Ter hoogte van de bovenzijde van het metaalelement (z-richting) trad wel vloeï op en wel zodanig dat

de dikte van de tussenlaag daar plots afnam tot quasi nihil (Figuur 5.18). Het metaalelement bleek bovenaan een weinig kromgebogen tijdens het autoclaafproces (rotatie om de x-as). Het aluminiumstripje dat tijdens de laminatie tegen de bovenzijde kleefde, bleek niet goed aan te sluiten tegen het (te korte) kokerprofieltje in de uitsparing. Op Figuur 5.19 (links) is zichtbaar hoe het SGP in het kokerprofieltje vloeide. De halve lengte van het profieltje werd op die manier opgevuld met SGP.



Figuur 5.18: verminderde dikte van de tussenlaag aan het linkerruiteinde bij prototype T2_01_H₂.

Op enkele plaatsen waren langs de rand van het metaalelement vloeiresten zichtbaar (Figuur 5.19 rechts). Dit was te wijten aan de afgeronde randen van de kokerprofieltjes die op het glas gelijmd waren. Het pijltje op de figuur wijst een zeer kleine beschadiging van het glas aan, wat vermoedelijk ontstond bij het verwijderen van de mal.



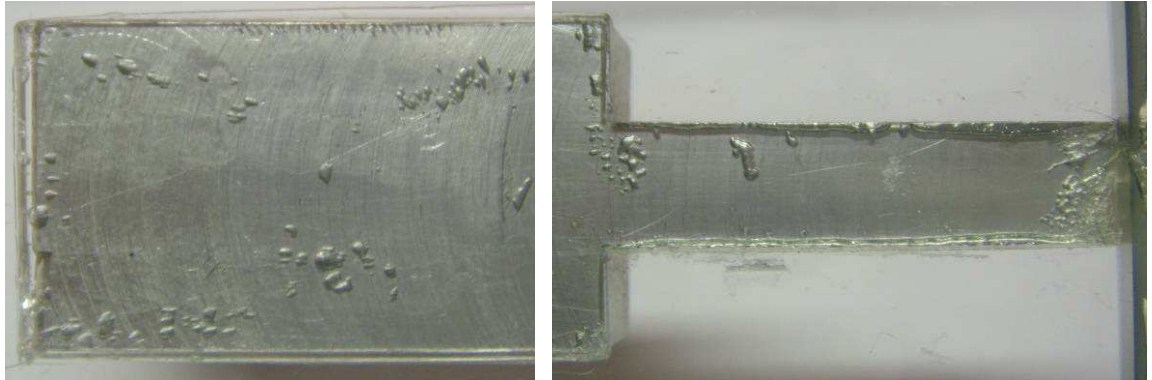
Figuur 5.19: vloeiresten in het kokerprofieltje ter hoogte van de uitsparing (links) en ten gevolge van de afgeronde kokerprofieltjes (rechts) bij prototype T2_01_H₂.

Bij dit prototype deed zich geen laminatiefout in de z-richting voor. Met de verlijmde mal was het perfect mogelijk dit te vermijden en bij de andere prototypen trad hierdoor evenmin een laminatiefout in de z-richting op.

Prototype T3_03_H₂

Zoals eerder vermeld, scheurde de vacuüm bag bij een eerste poging. Toen werd vastgesteld dat toch een zekere hechting aanwezig was en eveneens veel luchtinsluitingen in de tussenlaag (identiek als bij prototype T3_03_H1, zie Bijlage G). Toch werd besloten het prototype opnieuw te lamineren en naderhand bleek het merendeel van de luchtinsluitingen verdwenen te zijn (zie Bijlage I). Slechts

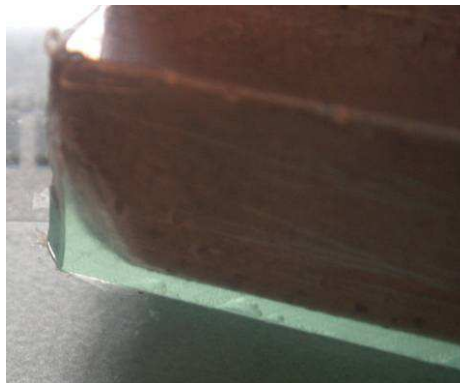
enkele kleine luchtbelletjes bleven achter (Figuur 5.20). Er bleek geen vloeï opgetreden te zijn en de dikte van de SGP tussenlaag was overal onveranderd.



Figuur 5.20: luchtinsluitingen (aan de uiteinden) bij prototype T3_03_H₂.

Prototype T2_04_H

De laminatie van dit prototype was zeer mooi, er waren geen luchtinsluitingen en de dikte van de tussenlaag was overal quasi onveranderd. Aan de onderzijde van het metaalelement (z-richting) trad vloeï op ten gevolge van afgeronde hoeken en daardoor slecht aansluitende teflonstaafjes (Figuur 5.21). Deze afrondingen werden veroorzaakt tijdens het lassen van het element. De vloeï had ditmaal geen kromming van het metaalelement tot gevolg, wel onderging het een zeer kleine rotatie om de x-as (bijna niet waarneembaar) van $\pm \arctan\left(\frac{1}{220}\right) = 0,26^\circ$.

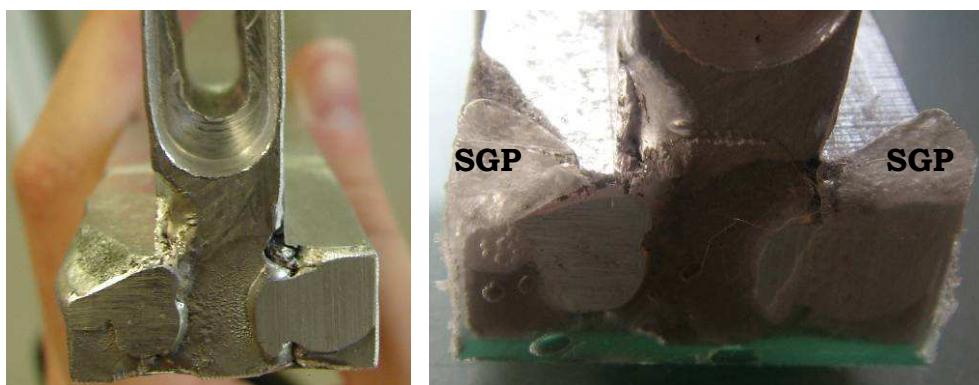


Figuur 5.21: vloeï aan de onderzijde van het L-vormig metaalelement bij prototype T2_04_H, ten gevolge van afgeronde hoeken.

Prototype T3_04_H

Het laatste prototype bleek opnieuw over een mooi laminaat te beschikken, zonder luchtinsluitingen en met een constante SGP-dikte. Ter hoogte van de onderzijde van het metaalelement (z-richting) werden wel vrij veel vloeïresten vastgesteld (Figuur 5.22 rechts). Dit had ondermeer te maken met het feit dat de

onderzijde van dit metaalelement niet voldoende vlak gefreesd werd (Figuur 5.22 links). Op die manier sloot het teflonstaafje niet goed aan tegen het element en vond het SGP een weg naar boven. Als gevolg van de vloeï onderging het metaalelement - net als bij het vorige prototype - een zeer kleine rotatie om de x-as (bijna niet waarneembaar) van $\pm \arctan\left(\frac{1}{200}\right) = 0,29^\circ$.



Figuur 5.22: oneffen onderzijde van het L-vormig metaalelement bij prototype T3_04_H (links) en vloeiresten na de laminatie (rechts).

5.3.4 Besluit

Tabel 5.1 vat de gerealiseerde prototypen in fase III samen.

prototype	permanent Vacuüm zuigen?	gescheurde Vacuüm bag?	glasbreuk?
T2_01_G ₂	nee	nee	nee
T3_03_G ₂	nee	nee	ja
T2_04_G	nee	nee	ja
T3_04_G	nee	nee	ja
T2_01_H ₂	nee/ja	ja/nee	nee
T3_03_H ₂	ja	nee	nee
T2_04_H	ja	nee	nee
T3_04_H	ja	nee	nee

Tabel 5.1: samenvatting prototypen fase III.

Tijdens deze fase scheurde slechts één vacuüm bag. Zowel het zuiver isolatiemateriaal als de dikkere vacuüm bags (bij de prototypen van de hoofdliggers) droegen hier toe bij. Het prototype waarvan de vacuüm bag scheurde, werd aan een tweede autoclaafcyclus onderworpen en naderhand bleek het merendeel van de luchtinsluitingen in de tussenlaag verdwenen te zijn.

Bij de prototypen van de gordingen trad in drie van de vier gevallen glasbreuk op ter hoogte van de uitsparing. Vermoedelijk had dit in alle drie de gevallen te maken met een onvoldoende dikte van de opvulling in de uitsparing. Het glas

ondervond in de autoclaaf een te groot buigmoment (waar door de opvulling onvoldoende weerstand aan geboden werd) en brak.

De tanden aan de onderste insteekelementen bleken niet voldoende beschermd tegen vloeï en vaak was het moeilijk om de vloeïresten te verwijderen. Bij twee van de drie gebroken prototypes werkte vloeï ter hoogte van de tand vermoedelijk de glasbreuk in de hand.

Uitkragende insteekelementen worden best vermeden, ze zijn namelijk gevoelig aan rotaties tijdens het laminatieproces en ook de vloeï rond de uitkraging kan moeilijk vermeden/verwijderd worden.

Bij de metaalelementen die op het glas gelamineerd werden, bleek het verlijmen van een teflon mal zeer doeltreffend. Ten gevolge van onvoldoende vlakke randen van de metaalelementen trad toch soms vloeï op. Ook de metalen mallen verhinderden ruimschoots de vloeï al bleken de afgeronde randen niet ideaal. Tevens bleek in één geval het glas beschadigd na het verwijderen van de mal.

5.4 Evaluatie fase III

5.4.1 Technologie

In deze fase werd heel wat vooruitgang geboekt. Zowel de driehoekige insteekelementen als de driehoekige uitsparingen in de middelste glasplaat bleken veel eenvoudiger te realiseren. Bovendien werden op die manier perfect passende onderdelen gemaakt. Het vermijden van uitkragende insteekelementen bleek een goed idee: de bovenste insteekelementen van prototypes T2_04_G en T3_04_G betroffen zeer mooie laminaatverbindingen, zonder fouten. Het aantal gescheurde vacuüm bags daalde drastisch en het verlijmen van de mallen op het glas bleek zeer doeltreffend. Volgende zaken kunnen nog verbeterd worden:

- De uitsparingen ter hoogte van de onderste insteekelementen werden vermoedelijk niet voldoende opgevuld, waardoor glasbreuk optrad. In plaats van teflonstrookjes als opvulling te gebruiken, kan misschien beter met metalen opvulstukken gewerkt worden, die de juiste dikte van de uitsparing hebben.
- Het lassen van het L-vormig aluminium metaalelement verliep moeizaam en lag aan de basis van enkele problemen. De zijvlakken dienen volmaakt recht te zijn om vloeï te vermijden. Misschien moet uitgekeken worden naar een andere verbindingstechniek, bijvoorbeeld bouten. Ofwel brengt een andere constructiewijze soelaas.

5.4.2 Laminatiefouten

In § 2.3 werd een overzicht gegeven van de mogelijke oorzaken van relatieve verplaatsingen en rotaties tussen de hoofdligger en de gording. Tabel 5.2 bevat

grootteordes van de waargenomen laminatiefouten bij de gerealiseerde prototypen in deze fase. Er wordt telkens naar de oorzaak in de desbetreffende paragraaf verwezen. Ook de vormfouten met betrekking tot uitsparingen in de middelste glasplaat werden opgenomen in de tabel.

vrijheidsgraad	paragraaf	oorzaak	maximale waarde
u	2.3.2	b)	/
v	2.3.3	b)	/
		c)	/
w	2.3.4	a)	/
		c)	/
		d)	1 mm
φ_x	2.3.5	d)	/
		e)	0,3 °
φ_y	2.3.6	a)	/
φ_z	2.3.7	c)	/

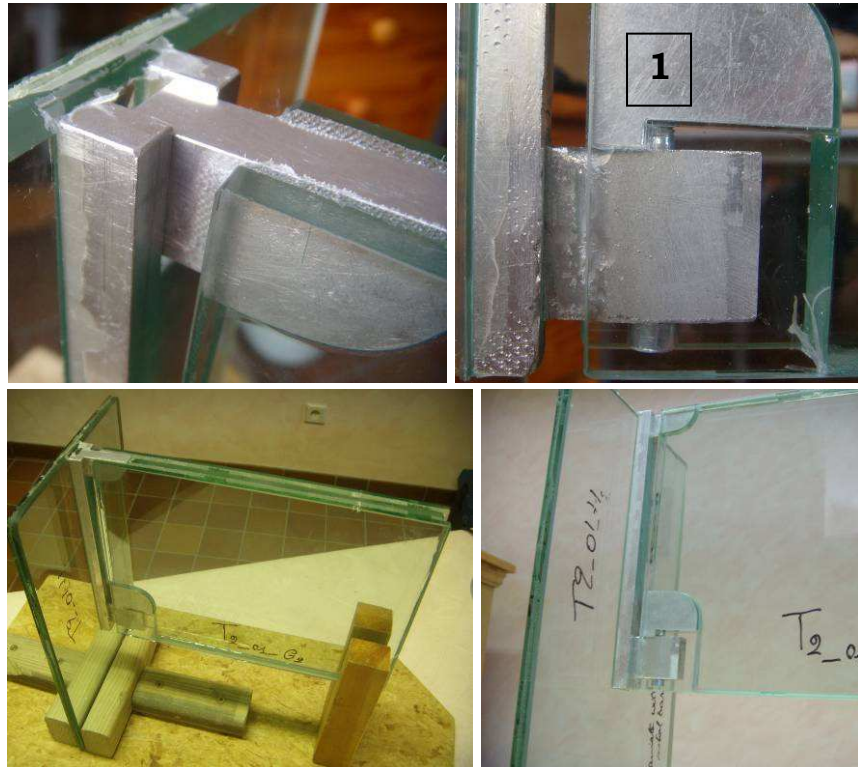
Tabel 5.2: waargenomen laminatie- en vormfouten bij de prototypen van fase III.

In vergelijking met de vorige fase (§ 4.4.2) nam de fout met betrekking tot vrijheidsgraad w sterk af. Dit was vooral te wijten aan het feit dat het verlijmen van de mallen toeliet de bovenzijde van het L-vormig metaalelement te laten samenvallen met de bovenzijde van het glas. De waargenomen rotatie om de x-as van de L-vormige metaalstukken is verwaarloosbaar klein.

5.4.3 Ontwerp T2_01

De tweede versie van dit ontwerp, werd tijdens deze fase gelamineerd. Er bleken tijdens de montage (Figuur 5.23) geen stelplaatje nodig te zijn en dezelfde pluspunten als in fase II (cfr. § 4.4.3) kwamen aan het licht. Als minpunten kunnen volgende zaken aangebracht worden:

- De inbusbout was niet verzonken, wat visueel minder aantrekkelijk was.
- Door de overvloedige vloeï rond het bovenste insteekelement kon in de y-richting de vooropgestelde tolerantie van 2 x 7 mm niet gegarandeerd worden.



Figuur 5.23: Ontwerp T2_01, versie 2 (1: niet verzonken inbusbout).

Tijdens de montage van dit ontwerp kwam de auteur tot de conclusie dat een fout in de ontwerpen geslopen was. In de ideale toestand - zonder opstel-, vorm- of laminatiefouten - steunde de tand van de onderste insteek op het metaalelement dat tegen de hoofdligger gelamineerd werd, zonder dat hierbij stelplaatjes gebruikt werden. Door stelplaatjes toe te voegen kon de gording in positieve z-richting verplaatst worden, maar omgekeerd kon de gording niet volgens de negatieve z-as verplaatst worden. Om dit toch toe te laten had het basisontwerp (ideale toestand) reeds stelplaatjes, in totaal 5 mm dik, moeten bevatten. Geen van de gerealiseerde ontwerpen van type 2 (in fase II en III) voldeed hieraan. Toevallig bleek bij geen van de verbindingen van type 2 een verplaatsing in negatieve z-richting nodig te zijn.

5.4.4 Ontwerp T2_04

Figuur 5.24 toont de gemonteerde prototypen van dit ontwerp. Alvorens de montage van deze prototypen aan te vangen, werd bovenaan bij het gordingelement een korte draadstang in het gat met schroefdraad gedraaid. Voor dit ontwerp kunnen dezelfde voordelen als bij ontwerp T2_01 aangehaald worden (cfr. § 4.4.3 en § 5.4.3). Opvallend was het feit dat de bovenzijden van beide prototypen quasi perfect in één vlak lagen, zonder dat hierbij stelblokjes aangewend werden. Dit toont aan dat uitsparingen in de middelste glasplaat van de gording zeer nauwkeurig werden aangebracht. Buiten het feit dat dezelfde fout met betrekking tot de stelplaatjes gemaakt werd, konden geen noemenswaardige

minpunten vastgesteld worden tijdens de montage van deze verbinding. Er werd met dit ontwerp duidelijk vooruitgang geboekt t.o.v. ontwerp T2_01.



Figuur 5.24: Ontwerp T2_04, versie 2 (1: verzonken inbusbout).

5.4.5 Ontwerp T3_03

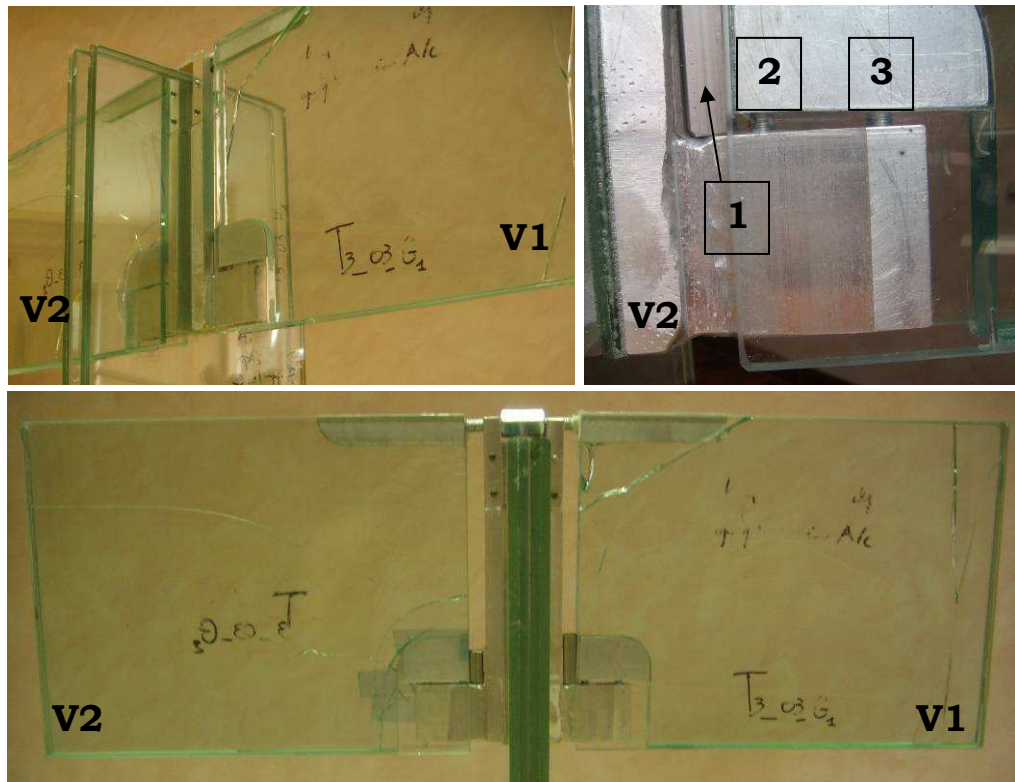
Tijdens deze fase werd een tweede versie van ontwerp T3_03 gerealiseerd. Deze prototypen werden samen met de eerste versie gemonteerd (Figuur 5.25). Bovenaan werden de gordingen verbonden met behulp van een hoge zeskantmoer.

Er wordt naar § 4.4.4 verwezen voor de voor- en nadelen van dit verbindingstype. De montage in deze fase kende volgende (bijkomende) minpunten:

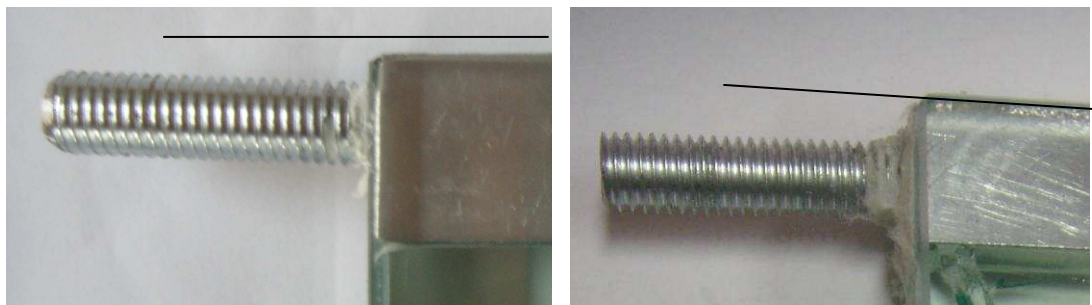
- Tijdens de montage werd vastgesteld dat de bovenste insteekelementen van beide gordingen een kleine vormfout bezaten (Figuur 5.26). De draadstang bleek schuin in het metaalelement te zitten (rotatie om de x-as) echter met tegengestelde rotatiehoeken bij de twee insteken. Hierdoor konden de draadstangen toch in elkaars verlengde gebracht worden (door gebruik te maken van de stelschroeven). Ondanks deze schuine koppeling bleken de bovenzijden van de gordingen min of meer in één vlak te liggen (Figuur 5.27) hoewel de gordingen een zeer kleine rotatie om de x-as ondergingen t.o.v. elkaar (Figuur 5.25 onderaan). Uiteraard vormde dit geen ideale verbinding. Bij gelijke rotatiehoeken

van de draadstangen had de verbinding tussen de gordingen zelfs helemaal niet kunnen verwezenlijkt worden.

- De gordingen dienden allebei ondersteund te worden tijdens de montage opdat ze niet zouden kantelen. Pas na het aanbrengen van de kantelplaatjes was het geheel stabiel.

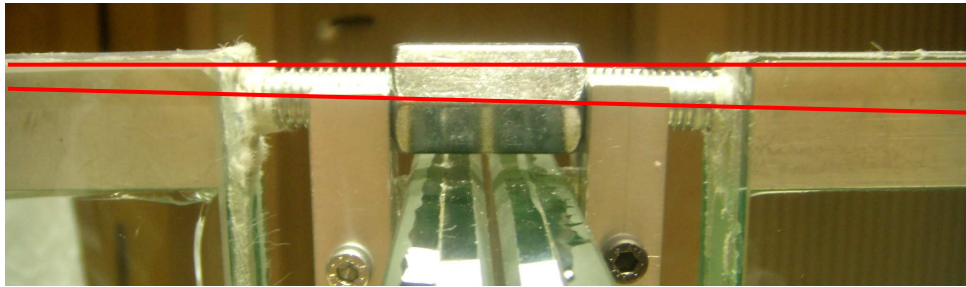


Figuur 5.25: Ontwerp T3_03, versie 2 (1: stelblokje, 2: stelschroef, 3: verzonken inbusbout).



Figuur 5.26: vormfout bij de bovenste insteekellemen van prototypes T3_03_G₂ (links) en T3_03_G₁ (rechts).

De verbinding kon gerealiseerd worden, maar toonde aan dat het absoluut noodzakelijk is dat de draadstang evenwijdig is met de bovenzijde van de gording (yz-vlak). Bovendien bleek hieruit dat het bij deze verbinding een groot nadeel is dat geen tolerantiemogelijkheden beschikbaar is met betrekking tot een rotatie om de x-as.



Figuur 5.27: ontwerp T3_03, de bovenzijden van de gordingen liggen min of meer in één vlak ondanks de schuine koppeling.

De auteur stelde tijdens de montage van deze verbinding vast dat (zowel in fase II als fase III) bij de ontwerpen van type 3 dezelfde fout gemaakt werd als bij die van type 2. De ontwerpen waren zo opgevat dat de stelschroef niet gebruikt werd in ideale toestand, wat echter geen toleranties in de z-richting toeliet. De stelschroef had zich in het basisontwerp 5 mm hoger moeten bevinden.

5.4.6 Ontwerp T3_04

Na het aanbrengen van een draadstang in de bovenste insteek kon ontwerp T3_04 gemonteerd worden (Figuur 5.28). Bovenaan werd de gording vastgeklemd met behulp van een tussenvoegplaatje. De voor- en nadelen van dit type ontwerp werden reeds aangegeven in § 4.4.4.



Figuur 5.28: Ontwerp T3_04 (1: stelblokje, 2: verzonken inbusbout).

De vloeit aan de onderzijde van de tand (aan het onderste insteekelement) kon niet verwijderd worden en had tot gevolg dat de gording 7 mm hoger stond dan voorzien. Deze fout kon niet opgevangen worden aangezien de gording enkel in positieve z-richting kon verplaatst worden, zoals eerder aangehaald werd. Dit onderstreept het belang van tolerantie mogelijkheden in positieve én negatieve z-richting.

HOOFDSTUK 6: Conclusies

6.1 Samenvatting en besluit

In het kader van deze scriptie werd onderzoek verricht naar constructieve verbindingen van glas en metaal met SGP. Enkele *recente realisaties* toonden aan dat dit tal van toepassingsmogelijkheden biedt. Geïnspireerd door deze constructies werd besloten een loodrechte verbinding tussen glazen liggers te ontwerpen (en realiseren) waarbij enkel gebruik gemaakt wordt van adhesieve verbindingen tussen glas en metaal met SGP. Zo kon op een gestructureerde en doeltreffende manier eveneens de technologie van deze laminaatverbinding onderzocht worden.

Het *uitgangspunt* van de ontwerpen was het „All Transparent Pavilion“ (ATP) dat in 2004 gerealiseerd werd aan de Technische Universiteit Delft. Tijdens de montage van deze constructie bleek de verbinding tussen de hoofdliggers en de gordingen onvoldoende geschikt om toleranties op te vangen. Daarom werd, vooraleer aan te vangen met de eigen ontwerpen, grondig onderzocht wat de mogelijke oorzaken zijn van relatieve verplaatsingen en rotaties tussen de hoofdliggers en de gordingen (met betrekking tot de dimensies van het ATP). Daarbij werd onderscheid gemaakt tussen vormfouten, opstelfouten en laminatiefouten. De slotconclusie van deze analyse luidt dat montagetoleranties met betrekking tot de vrijheidsgraden v en w absoluut vereist zijn. Daarnaast is het aangewezen dat de verbinding tijdens de montage een rotatie φ_x kan opvangen.

Fase I ving aan met het uitwerken van een basisontwerp. Bij deze verbinding werd een balkvormig element uit roestvast staal met SGP tegen de hoofdligger gelamineerd. Hierop steunde een gording die aan de uiteinden boven- en onderaan voorzien is van een ingelamineerd aluminiumelement. Onder het onderste insteeklement is (in de middelste glasplaat van de gording) een uitsparing in het glas voorzien waarin het metaalelement van de hoofdligger past. De gording werd bovenaan aan de hoofdligger bevestigd, zodat een inklemming bekomen wordt. Met behulp van een sleufgat en een stelschroef werden toleranties in y - en z -richting toegestaan. De vraag drong zich op of de

laminaatverbinding van het balkvormig element in staat was de dwarskracht op te vangen. Een eerste proefreeks diende dit uit te wijzen.

Hiervoor werd bij 22 kleine glasplaatjes een metaalblokje, identiek als bij het basisontwerp, tegen het glas gelamineerd. Dit gebeurde door de proefstukken vacuüm te verpakken en daarna te onderwerpen aan een druk- en temperatuurscyclus in een autoclaaf. Om vloeï van de tussenlaag te verhinderen en het metaalelement correct te fixeren, werden mallen uit metaal en teflon ontworpen. De scherpe randen werden beschermd om het scheuren van de vacuüm bag te vermijden. De mallen bleken echter onvoldoende aan te sluiten tegen het glas, want bij alle proefstukken trad het vloeiverschijnsel hevig op. Bij drie proefstukken werd geen vloeï vastgesteld, maar deden zich veel luchtinsluitingen in de tussenlaag voor. Dit was te wijten aan het scheuren van de vacuüm bag tijdens de autoclaafcyclus.

De proefstukken werden vervolgens onderworpen aan een excentrische drukkracht, analoog aan de heersende dwarskracht in het basisontwerp. Volgende bezwijkfenomenen werden, al dan niet gelijktijdig, vastgesteld: glasbreuk, het afbreken van een glasschil, adhesieve breuk tussen SGP en glas en adhesieve breuk tussen SGP en metaal. Bij glasbreuk en glasschil was de bezwijkbelasting over het algemeen hoger. De oppervlakteruwheid bleek globaal een positief effect te hebben op de bezwijkbelasting. Deze bleek slechts in 25 % van de gevallen de dwarskracht bij het basisontwerp te overtreffen. Hieruit werd geconcludeerd dat een groter contactoppervlak tussen glas en metaal noodzakelijk was.

In *fase II* werden verschillende nieuwe ontwerpen, gebaseerd op het basisontwerp, voorgesteld en kritisch geanalyseerd. Uiteindelijk werden twee van deze verbindingen gerealiseerd: één inklemming en één oplegging. Bij deze ontwerpen werd een L-vormig metaalstuk tegen de hoofdligger gelamineerd. De gording, opnieuw voorzien van insteekelementen, werd bevestigd op het uitkragend deel van het L-vormig metaalstuk. Het hoekpunt van de rechthoekige insteekelementen dat volledig contact maakt met de middelste glasplaat van de gording, werd afgerond om spanningspieken in het glas te vermijden.

In totaal werden in deze fase vier prototypen (twee gordingen en twee hoofdliggers) gelamineerd. Het bleek zeer moeilijk nauwkeurige uitsparingen in de middelste glasplaat van de gording te maken. Geen van de insteekelementen maakte volledig contact met deze glasplaat. Dit zorgde tijdens de autoclaafcyclus voor grote locale contactspanningen tussen de insteken en de glasranden en had glasbreuk tot gevolg bij één prototype. De uitsparing in de middelste glasplaat ter hoogte van het onderste insteekelement werd opgevuld om tijdens het laminatieproces te kunnen weerstaan aan de hoge druk in de autoclaaf. Bij twee andere prototypen (een gording en een hoofdligger) scheurde de vacuüm bag tijdens de autoclaafcyclus. Dit resulteerde in veel luchtinsluitingen in de tussenlaag en geen vloeïresten. Bovendien bleek het uitkragende bovenste insteekelement bij één van de gordingen geroteerd te zijn tijdens het

laminatieproces. Een laatste prototype van een hoofdligger werd wel goed gelamineerd. Er deed zich echter veel vloeï voor. De teflonstaafjes die als mal op het glas vastgetaped werden, bleken dus niet te voldoen. Na de laminatie werd eveneens vastgesteld dat de bovenzijden van het metaalelement en het glas niet in één vlak lagen (laminatiefout).

Tot slot van deze fase werden de verbindingen gemonteerd met behulp van een ondersteunende constructie. Dit liet toe de positieve en negatieve punten van de verbindingen vast te stellen op het vlak van montage, toleranties en esthetiek. De verbindingen bleken globaal te voldoen aan de vereisten.

In een *derde en laatste fase* werden de twee gerealiseerde ontwerpen uit fase II geoptimaliseerd. Bij de nieuwe ontwerpen werden de gordingen voorzien van driehoekige insteekelementen en ook de uitsparingen in de middelste glasplaat waren driehoekig. De uitkragende insteekelementen werden vervangen door draadstangen die pas na de laminatie in het voorziene gat met schroefdraad aangebracht werden. Naast deze aangepaste ontwerpen werd een tweede versie van de ontwerpen uit fase II gelamineerd. De samenstellende onderdelen voor deze laatste werden reeds in de vorige fase gemaakt. In totaal werden dus 8 prototypen gelamineerd tijdens deze fase.

De driehoekige uitsparingen in de middelste glasplaat van de gording bleken veel eenvoudiger te maken en zorgden bovendien voor perfect passende insteekelementen. Bij alle prototypen van de gordingen werden de insteekelementen vooraf vastgelijmd aan de middelste glasplaat zodat relatieve verplaatsing/rotatie tijdens het laminatieproces onmogelijk was. Deze prototypen leverden allemaal mooie laminaatverbindingen. Bij drie van deze vier stukken brak echter één van de uitkragende buitenste glasplaten. Vermoedelijk werd de uitsparing in de middelste glasplaat van de gording onvoldoende opgevuld tijdens het laminatieproces.

Bij de prototypen van de hoofdliggers werd ditmaal een teflon of metalen mal verlijmd op het glas. Dit bleek zeer efficiënt de vloeï te verhinderen en resulteerde in mooie laminaten. De lijmverbinding hield stand tijdens het laminatieproces en de mal kon naderhand gemakkelijk verwijderd worden. Door de slechte afwerking van de L-vormige metaalelementen vloeide op sommige plaatsen toch nog SPG-materiaal weg. Teflon lijkt de beste oplossing, want bij het verwijderen van één van de metaalmallen werd het glas licht beschadigd. In deze fase scheurde slechts bij één prototype de vacuüm bag tijdens de autoclaafcyclus. Dikkere vacuüm bags en voldoende, zuiver beschermingsmateriaal lagen aan de basis van dit succes. Bij het prototype met de gescheurde vacuüm bag bleek het merendeel van de luchtinsluitingen in de tussenlaag na een tweede autoclaafcyclus verdwenen te zijn.

Aan het eind van deze fase werd andermaal een evaluatie gehouden van de gemonteerde verbindingen. De verbindingen bleken globaal te voldoen aan de vereisten. Er werd echter vastgesteld dat in alle gerealiseerde prototypes (van fase II en III) een fout met betrekking tot de vrijheidsgraad w sloop.

Er werden in deze scriptie enkele loodrechte verbindingen ontworpen die de nodige toleranties toelaten tijdens de montage. De ontwerpen werden ook daadwerkelijk gerealiseerd, wat toeliet kennis te nemen van de moeilijkheden en de knelpunten. Daarbij werd veel ervaring opgedaan over de technologie van een constructieve verbinding tussen glas en metaal met SGP. De auteur meent te kunnen zeggen dat de doelstellingen van deze scriptie werden bereikt.

6.2 Suggesties voor verder onderzoek

Wat het lamineren van metaal tegen glas (prototypen hoofdliggers) betreft, staat de technologie quasi op punt. Er werd met het verlijmen van teflon op glas een manier gevonden om vloeï efficiënt te verhinderen. Een volgende stap in het onderzoek zou kunnen zijn:

- Het beproeven van enkele/al de prototypes van de hoofdliggers om de sterkte van de laminaatverbinding te bepalen
- Het realiseren van een nieuwe testreeks kleinere (geslaagde!) proefstukken om eveneens te beproeven

Bij de prototypen van de gordingen bleek in de laatste fase bij drie van de vier stukken één van de uitkragende buitenste glasplaten te breken. Met de realisatie van enkele nieuwe proefstukken kan onderzocht worden of dit inderdaad te wijten was aan onvoldoende opvulling. Een volgende stap is dan het beproeven van deze ingelamineerde metaalelementen om de sterkte te bepalen.

Ook het tijdsafhankelijk gedrag en de invloed van temperatuur, vocht, UV-stralen, enz. zou in een later stadium uitgebreid onderzocht kunnen worden.

Een volgende fase, met betrekking tot de ontworpen verbindingen, kan bestaan uit het realiseren van een hoofdligger en enkele gordingen op ware schaal én met de juiste lengten. Op die manier zal nog beter kunnen bepaald worden of de nodige toleranties in alle omstandigheden kunnen gegarandeerd worden.

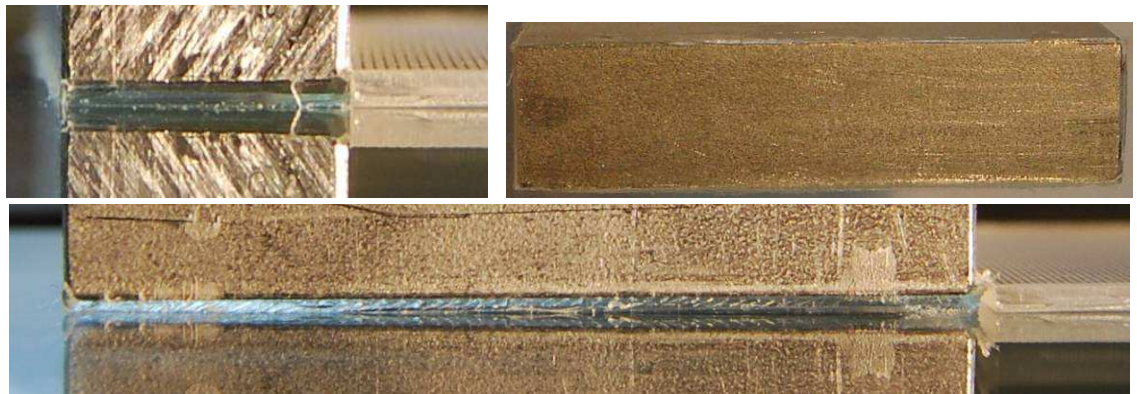
De auteur hoopt met dit werk een inspiratiebron te zijn voor verder onderzoek naar dit innovatieve concept dat tal van toepassingsmogelijkheden kent.

BIJLAGE A: Proefstukken fase I

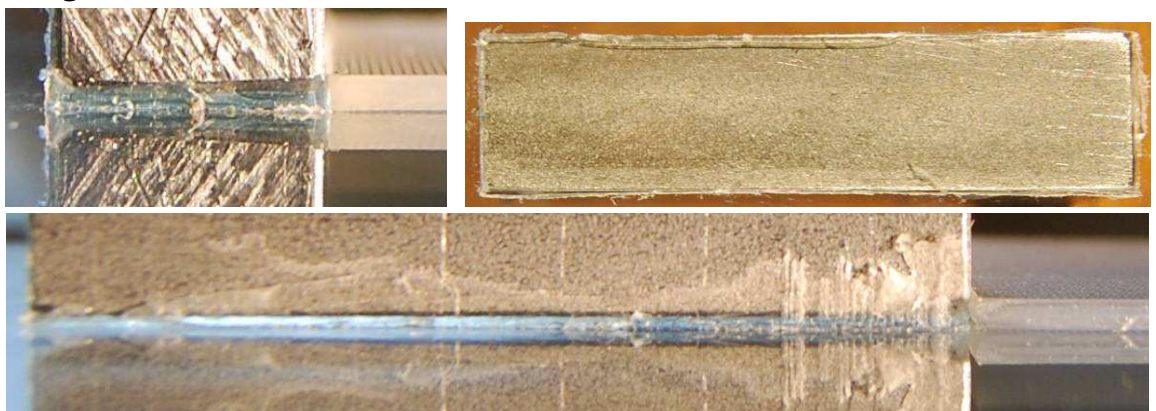
De figuur links boven toont telkens een aanzicht van de adhesieve verbinding aan de kopse zijde van het metaalelement, waarbij een strookje SGP op het glas naast het metaal geplaatst werd (witte strook met geribbeld bovenvlak, rechts van het metaalelement). Op die manier kan een beeld gevormd worden van de dikte van de SGP-tussenlaag na laminatie. De spiegellijn van de reflectie in het glas kan helpen bij het waarnemen van de dikte van de gelamineerde tussenlaag en het strookje SGP. De onderste figuur is telkens een zijaanzicht van het metaalelement waarbij eveneens een strookje SGP op het glas geplaatst werd. De figuur rechts boven toont telkens een bovenaanzicht van de adhesieve verbinding (genomen aan de achterzijde van het proefstuk). Vaak zijn sporen van vloe nog zichtbaar in de vorm van achtergebleven SGP-materiaal of krassen op het metaal ten gevolge van het verwijderen van SGP-materiaal.

Cyclus I

RVS_glad_T_25:



RVS_glad_T_26:

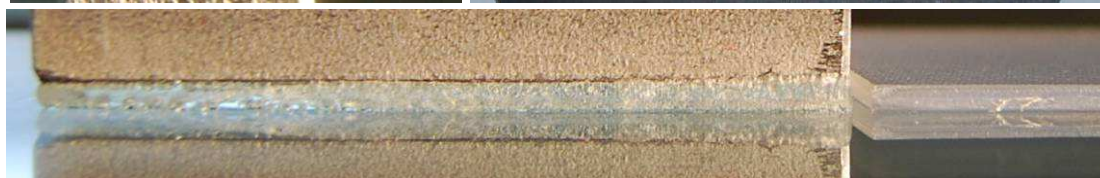
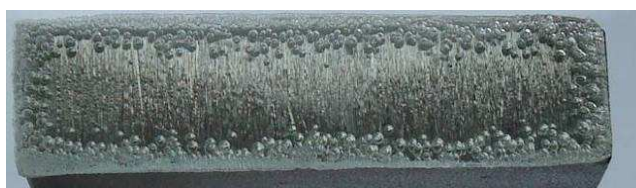
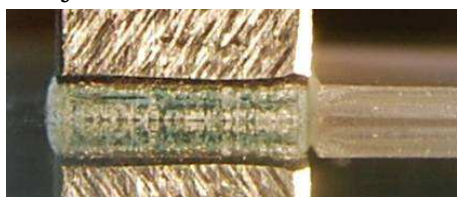


Cyclus II

RVS_vijl_M_1:



RVS_vijl_T_2:



RVS_vijl_T_3:

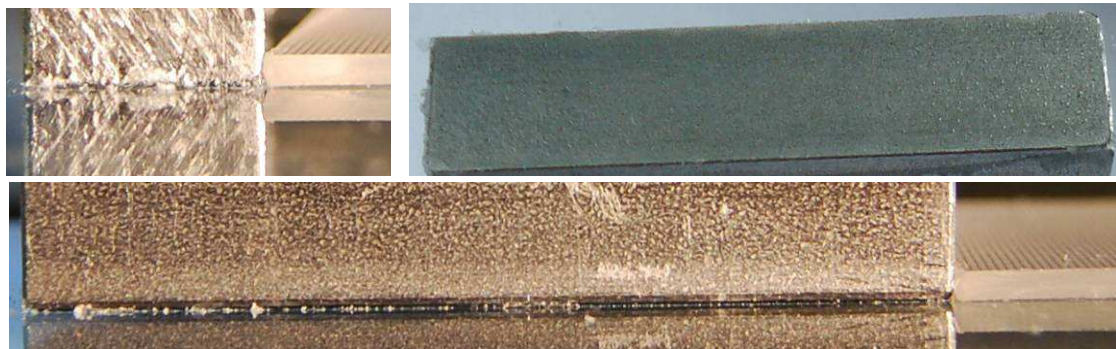


RVS_glad_M_9:

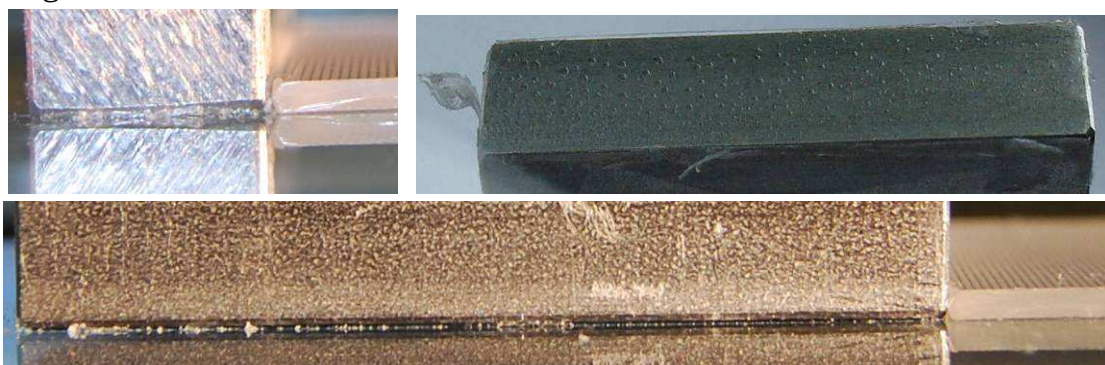


Cyclus III

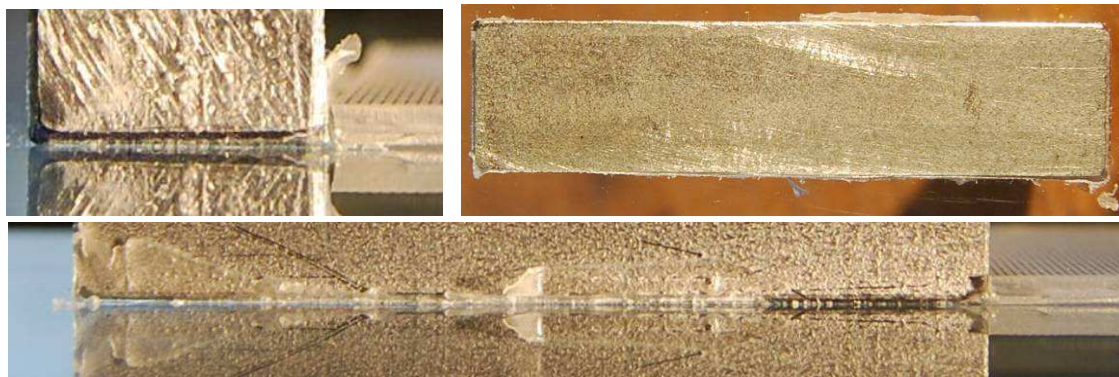
RVS_glad_T_10:



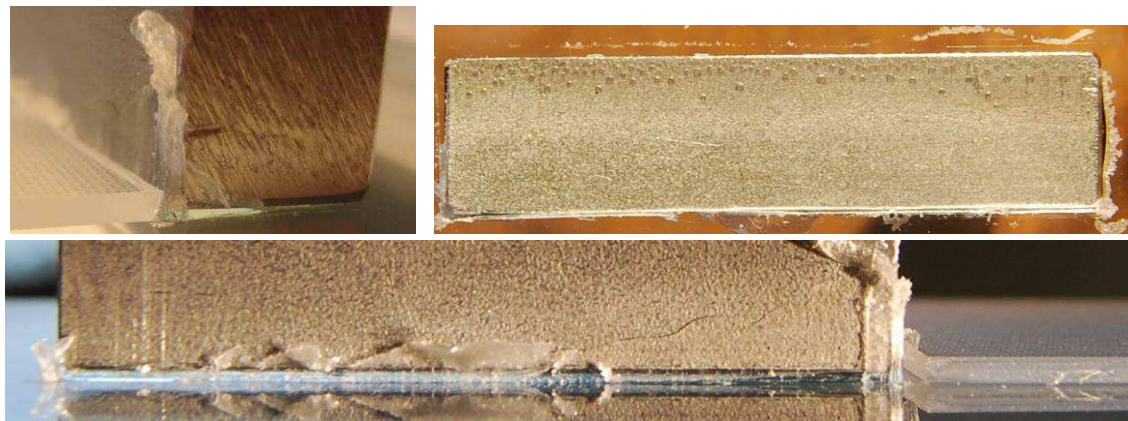
RVS_glad_T_11:



RVS_glad_T_23:

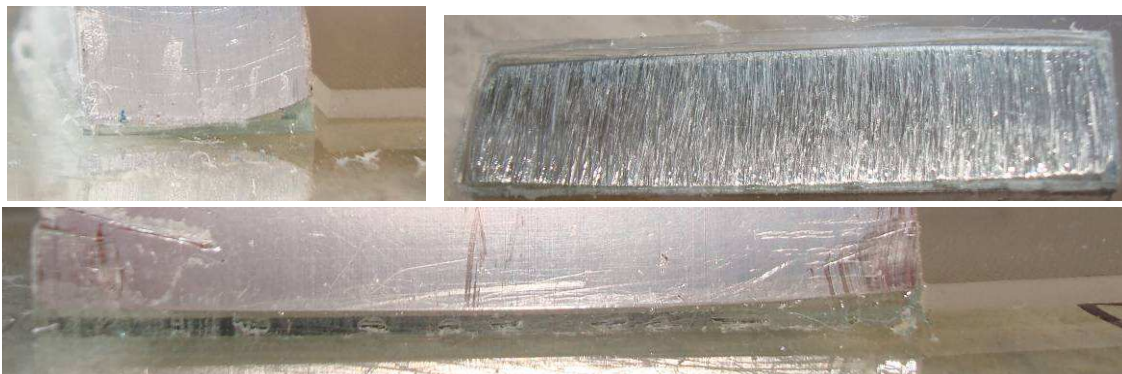


RVS_glad_T_24:

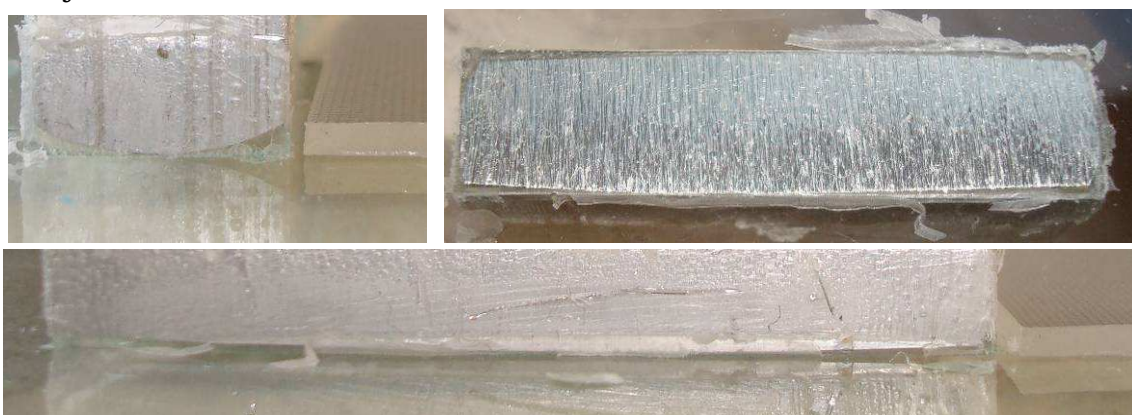


Cyclus IV

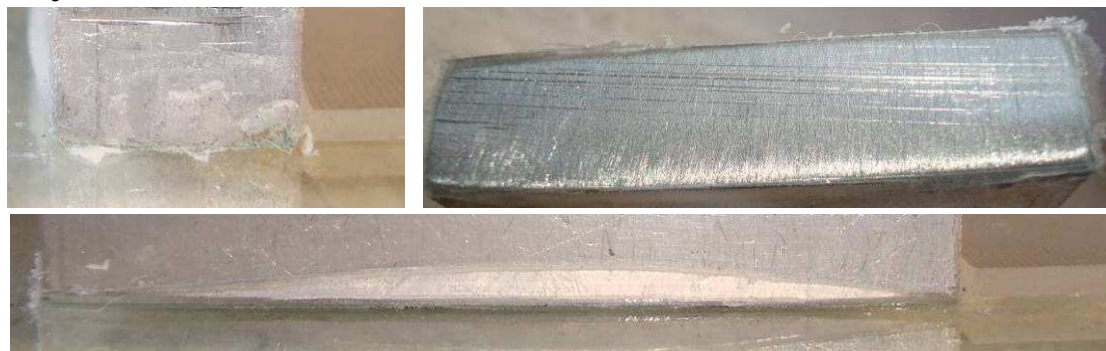
alu_vijl_T_26:



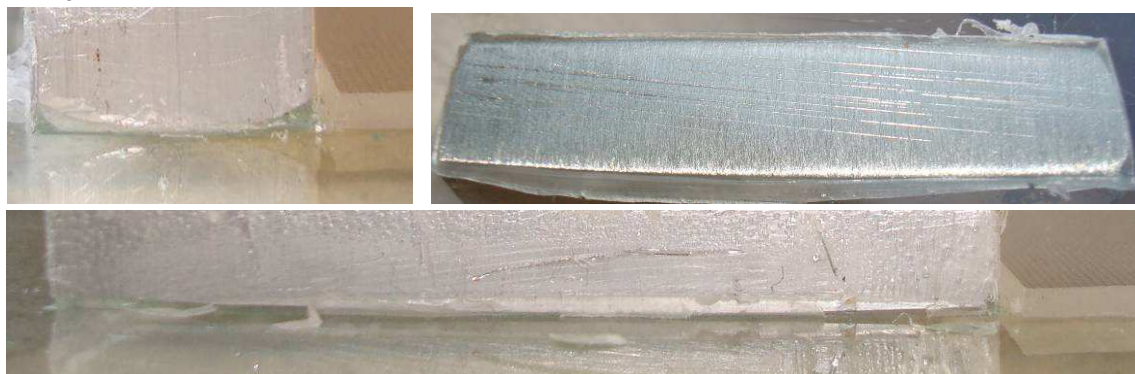
alu_vijl_T_27:



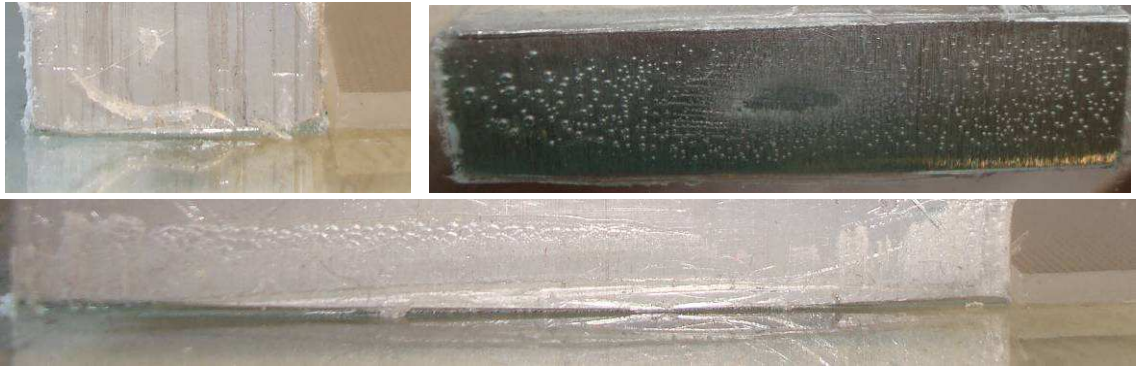
alu_vijl_T_28:



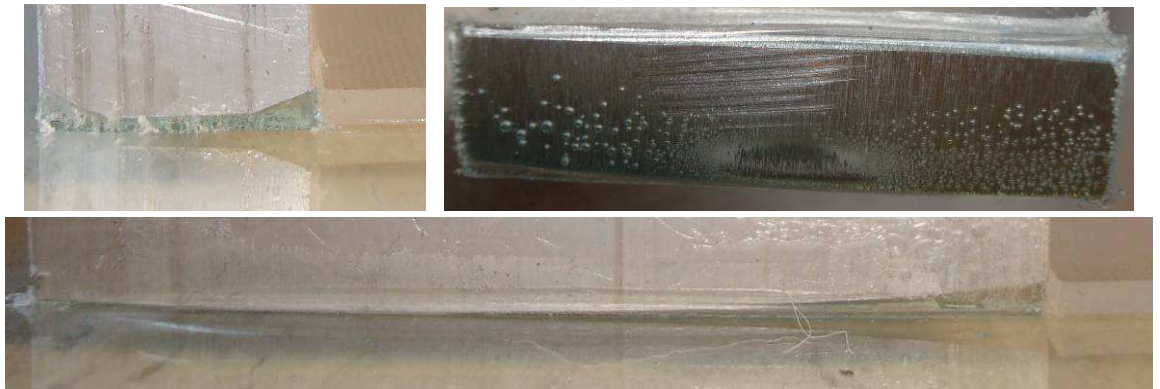
alu_vijl_T_29:



alu_vijl_T_30:



alu_vijl_T_31:



RVS_glad_T_12:



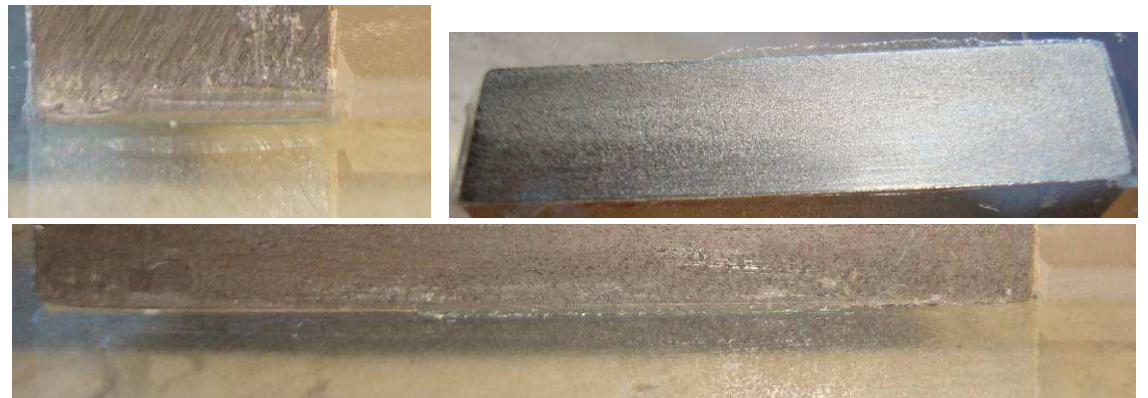
RVS_glad_T_13:



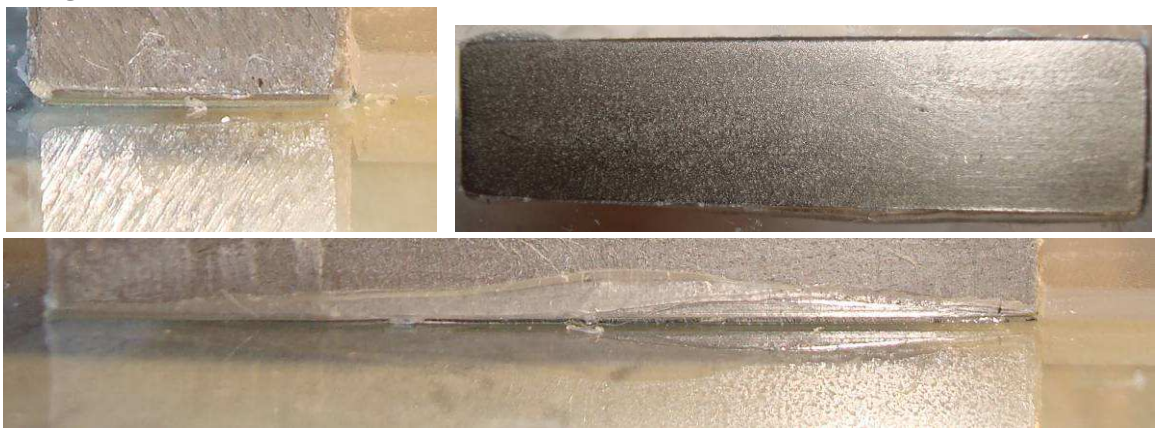
RVS_glad_T_14:



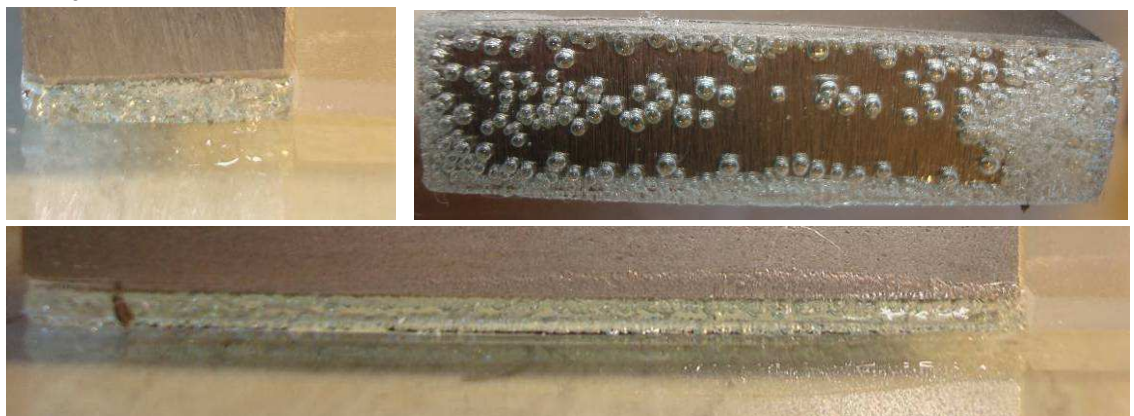
RVS_glad_T_15:



RVS_glad_T_16:



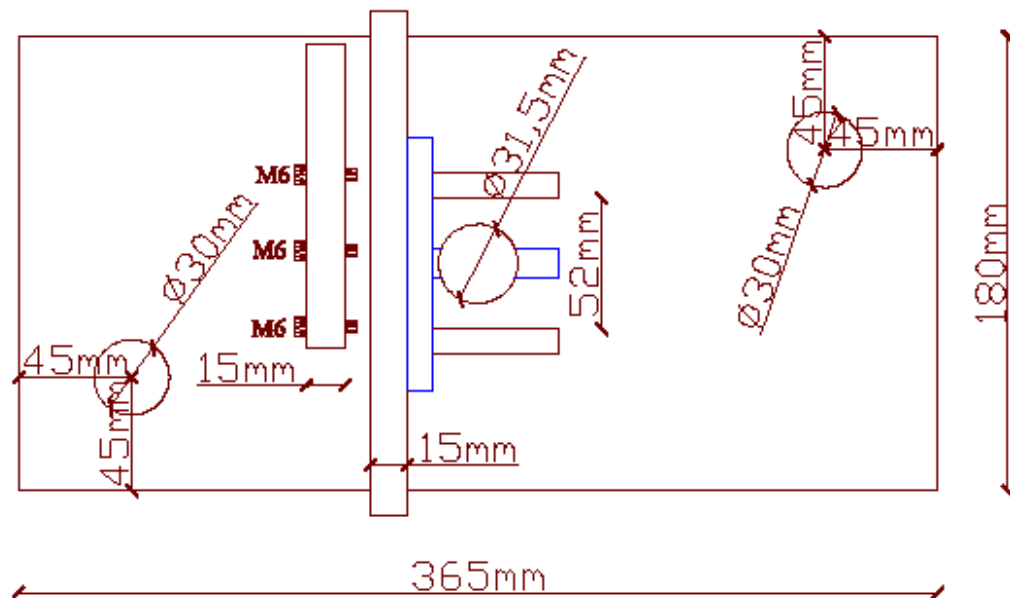
RVS_vijl_M_4:



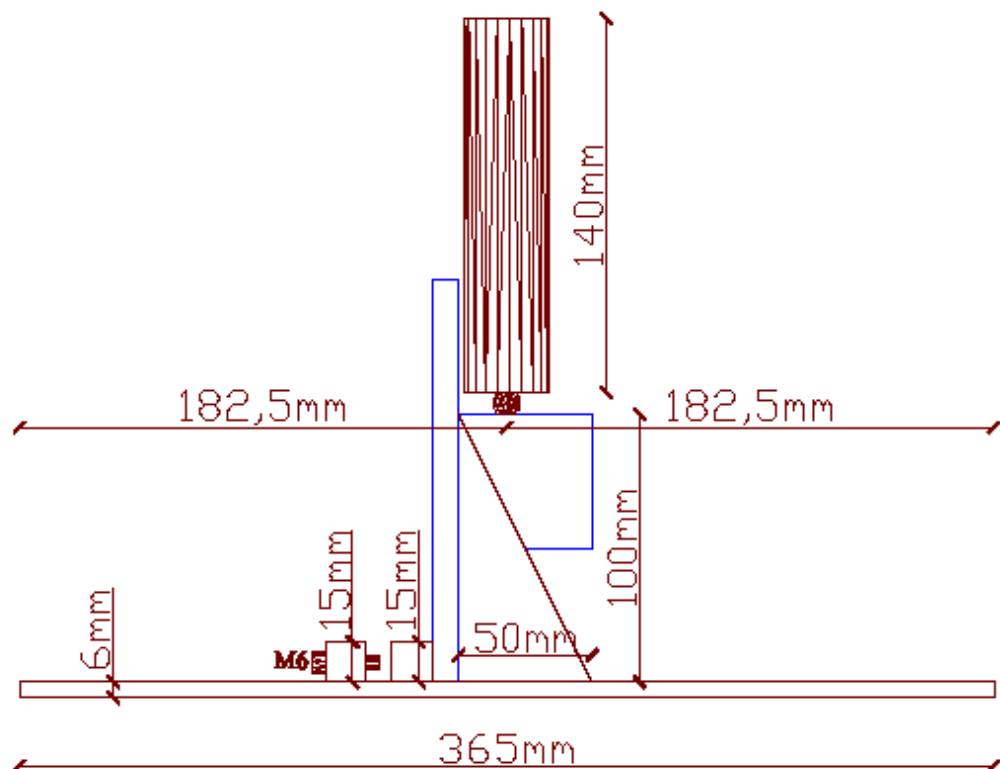
BIJLAGE B: Proefopstelling

Versie 1

Bovenaanzicht:

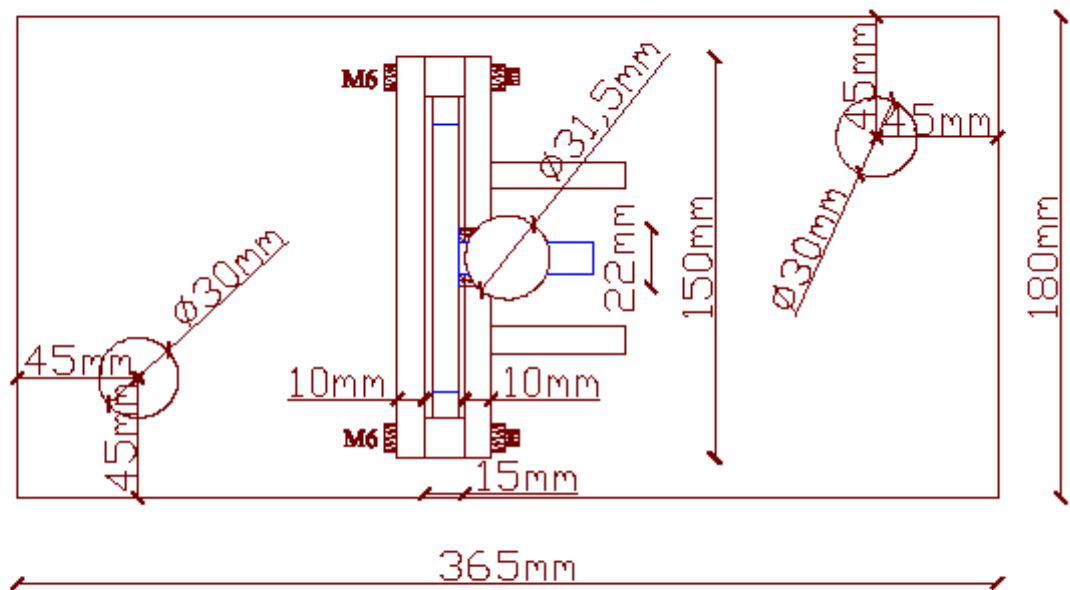


Zijaanzicht:

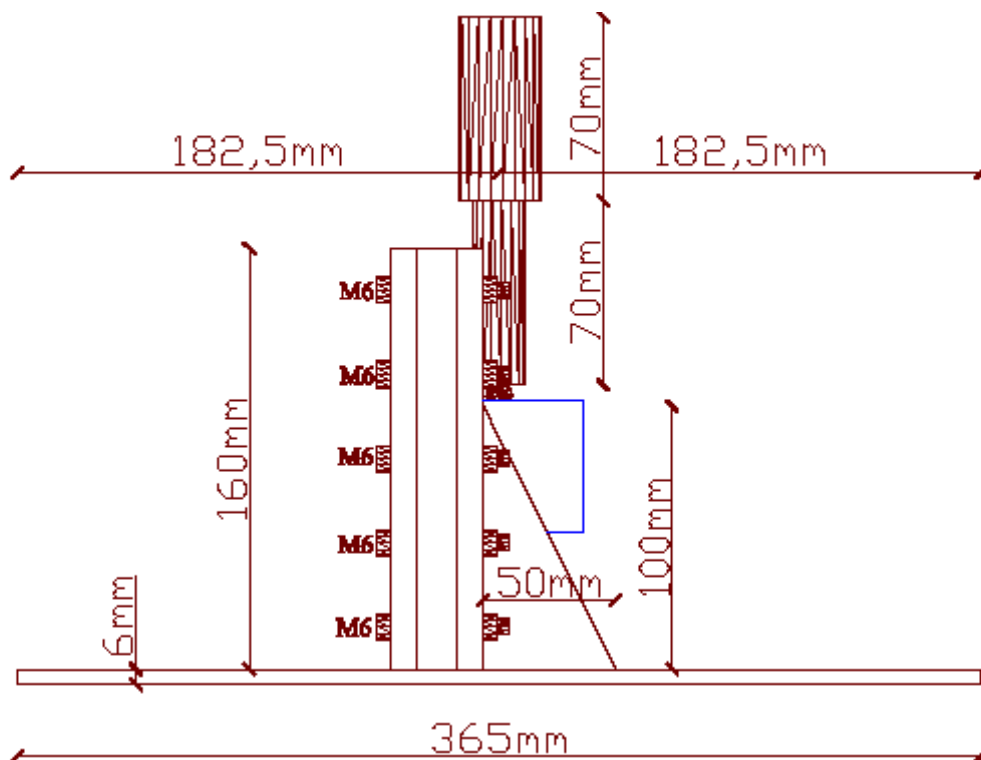


Versie 2:

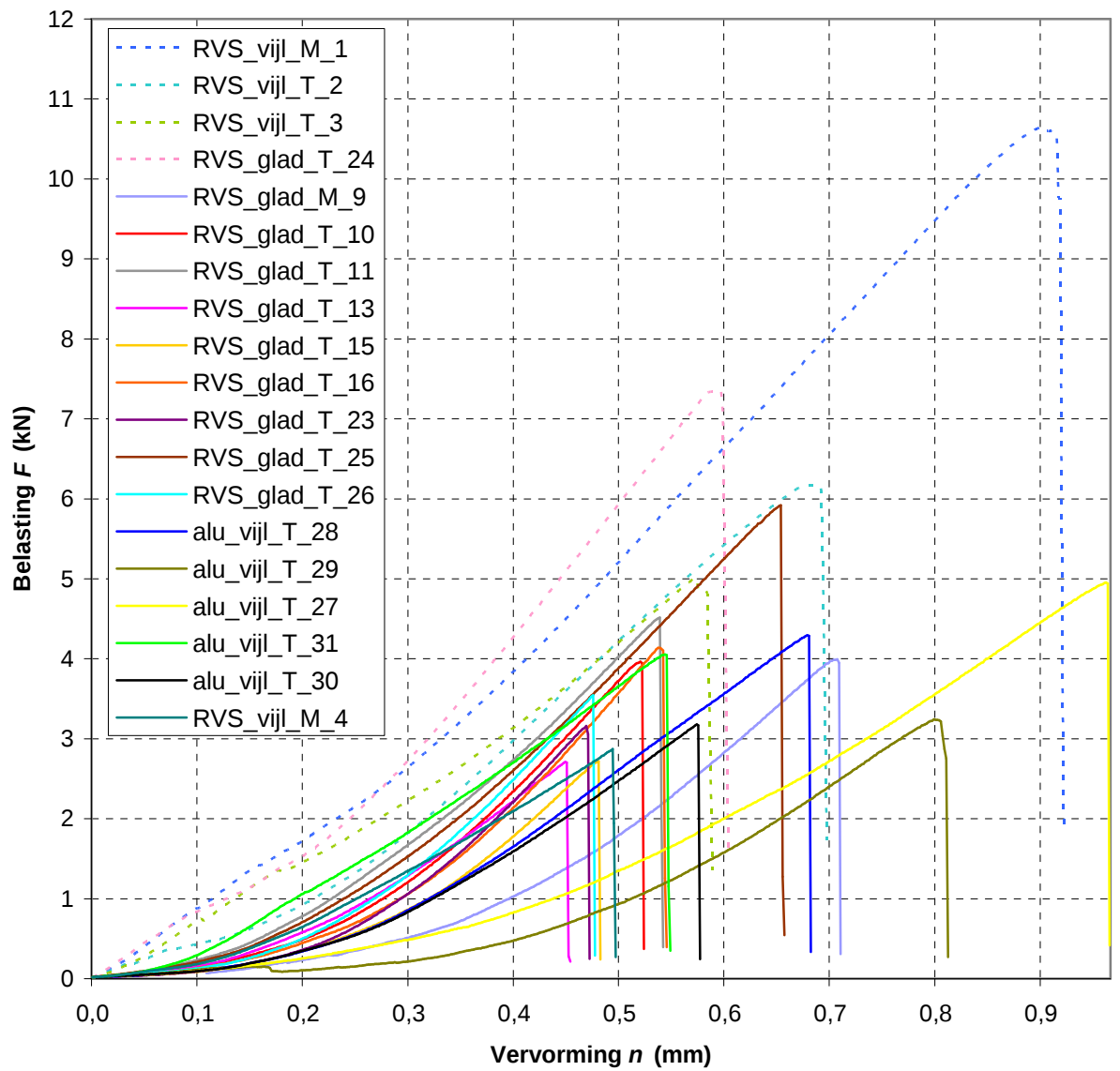
Bovenaanzicht:



Zijaanzicht:



BIJLAGE C: Proefresultaten fase I



BIJLAGE D: Beproefde proefstukken fase I

Op deze figuren bevindt de bovenzijde (= belaste zijde) van het metaalelement zich steeds bovenaan of rechts.

RVS_vijl_M_1:



RVS_vijl_T_2:



RVS_vijl_T_3:



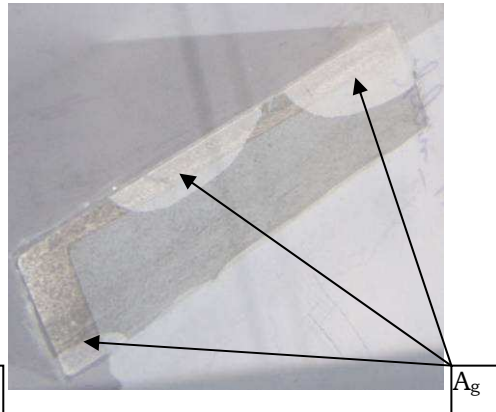
RVS_glad_T_24:



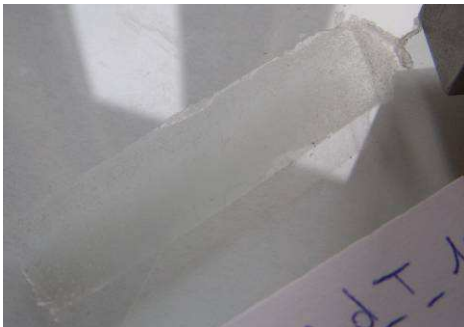
RVS_glad_T_25:



RVS_glad_T_26:



RVS_glad_T_10:



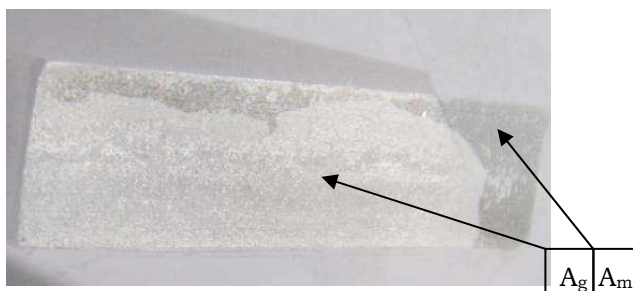
RVS_glad_T_11:



RVS_glad_T_23:



RVS_glad_M_9:



alu_vijl_T_27:



alu_vijl_T_28:



alu_vijl_T_29:



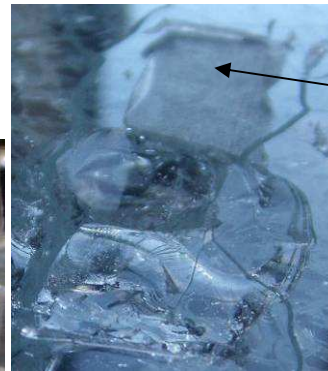
alu_vijl_T_30:



alu_vijl_T_31:

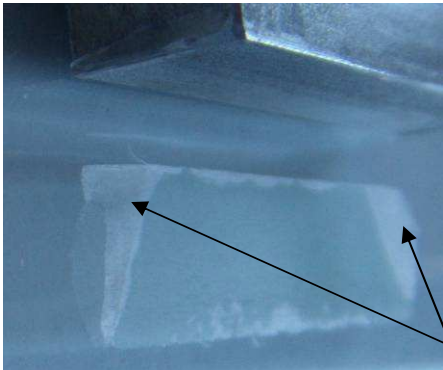


RVS_glad_T_13:



SGP

RVS_glad_T_15:



A_g

RVS_glad_T_16:

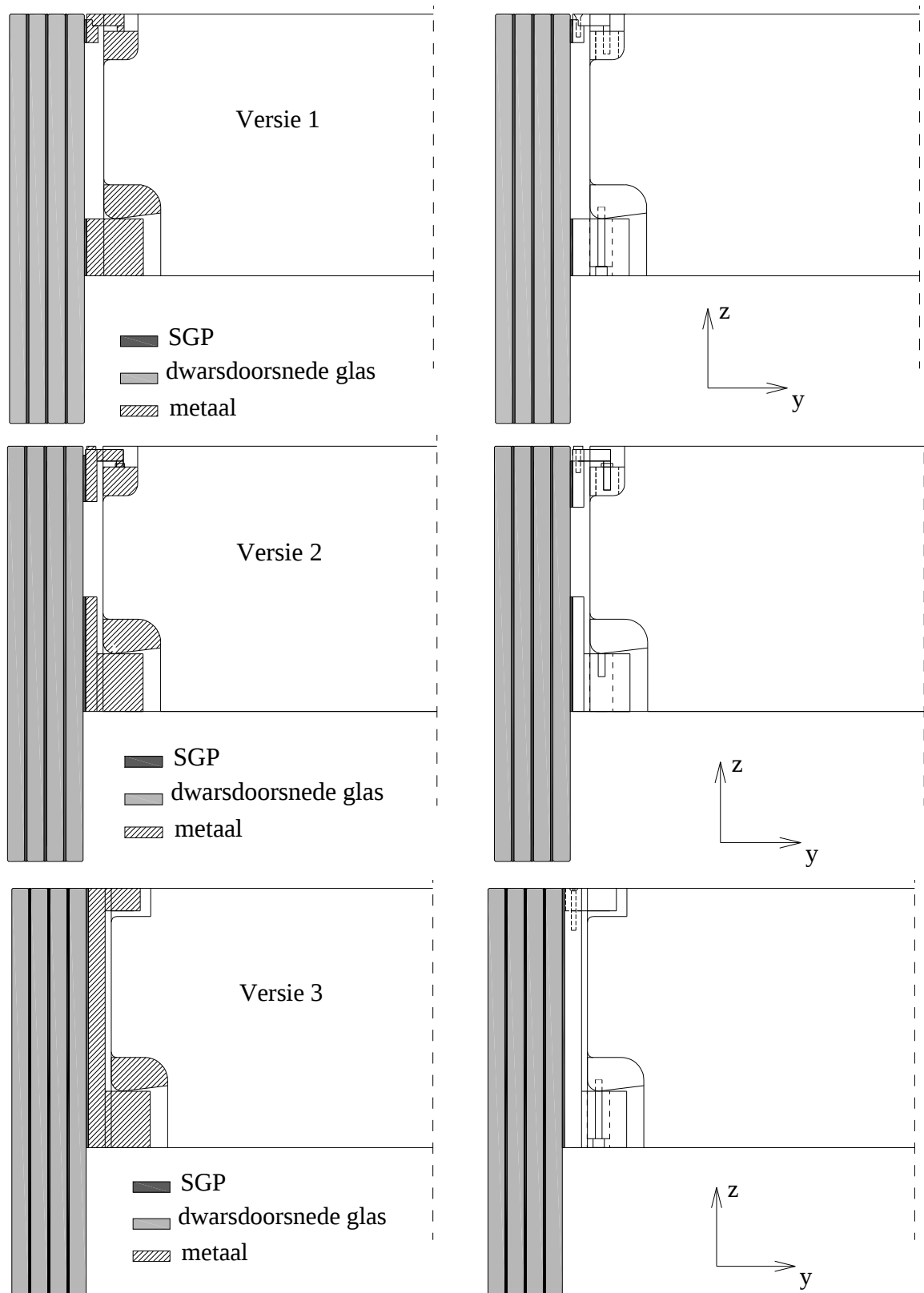


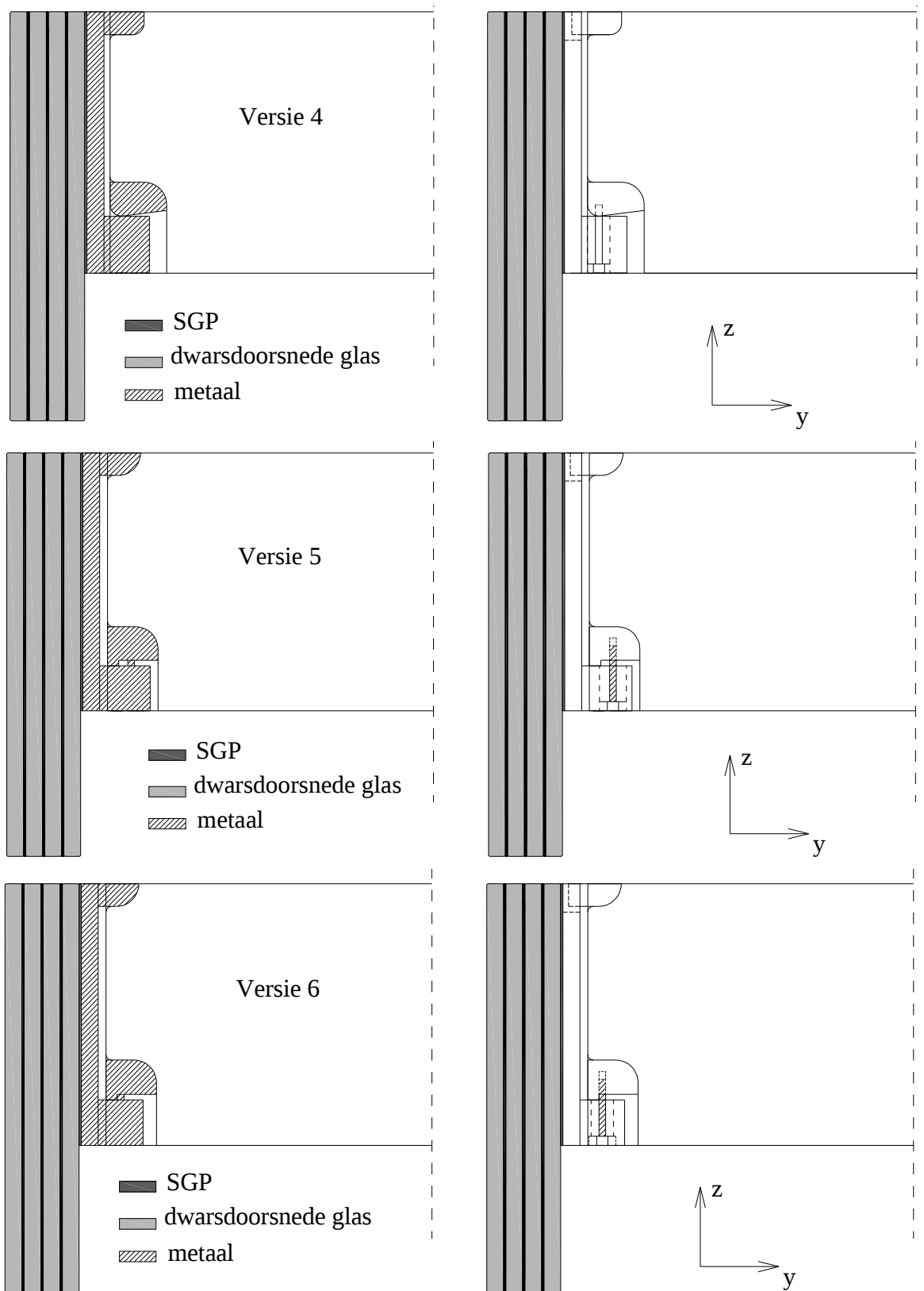
A_m

RVS_vijl_M_4



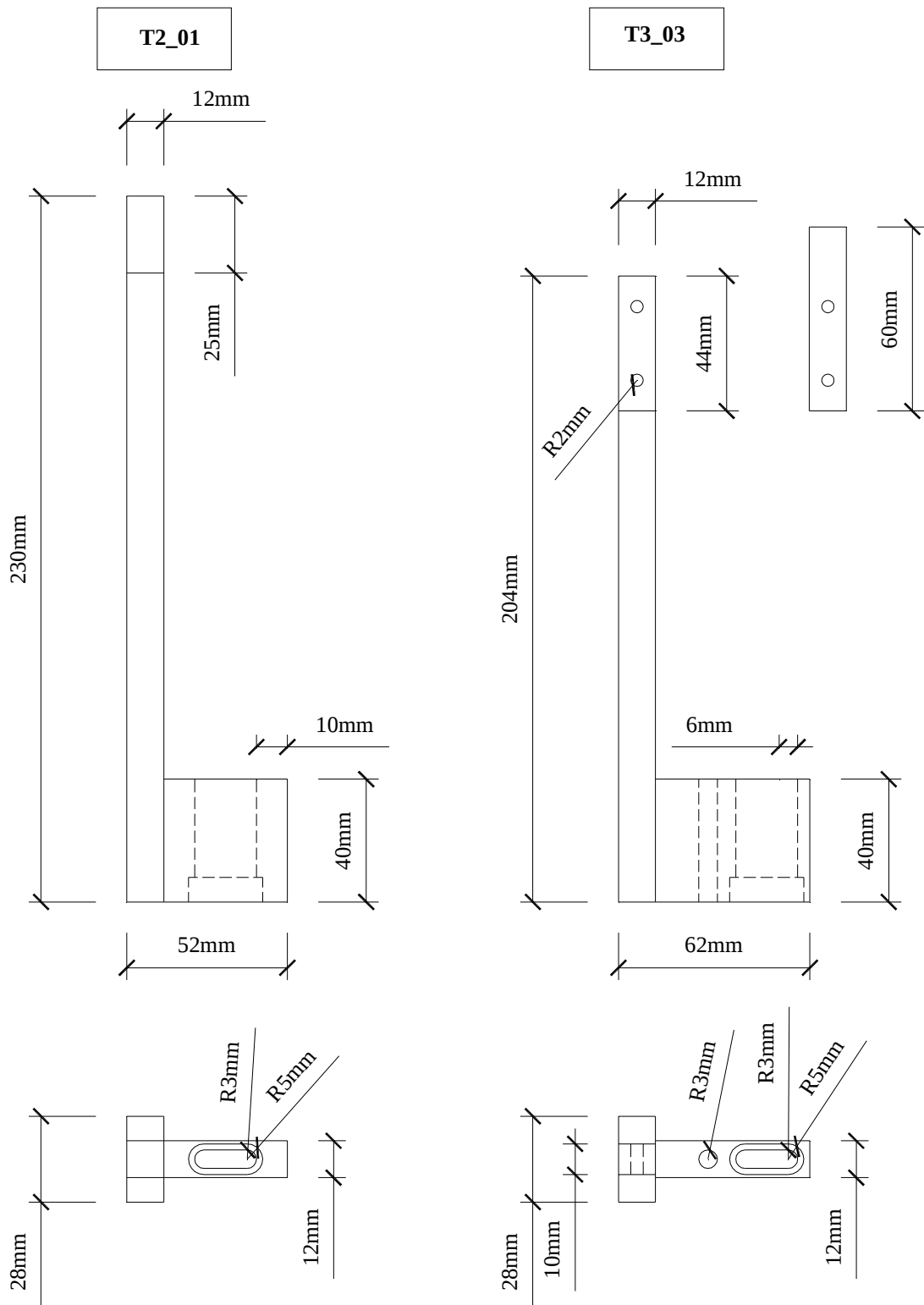
BIJLAGE E: Evolutie ontwerp T2_01



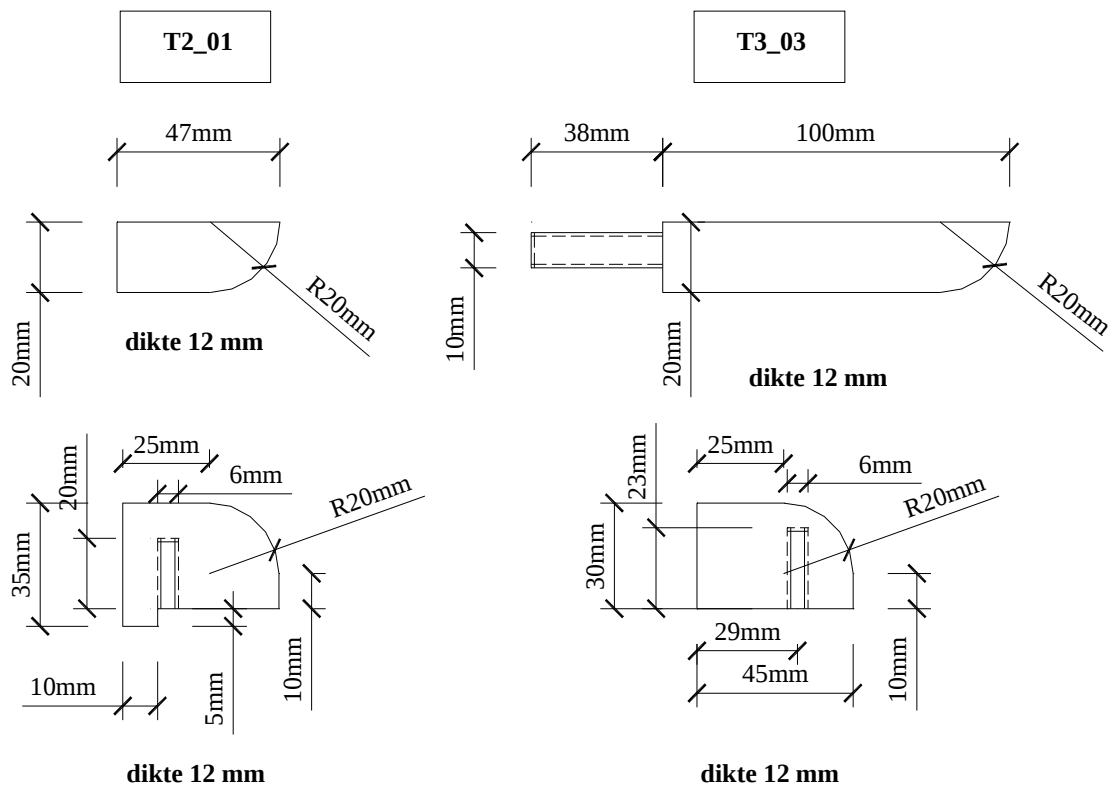


BIJLAGE F: Dimensies T2_01 en T3_03

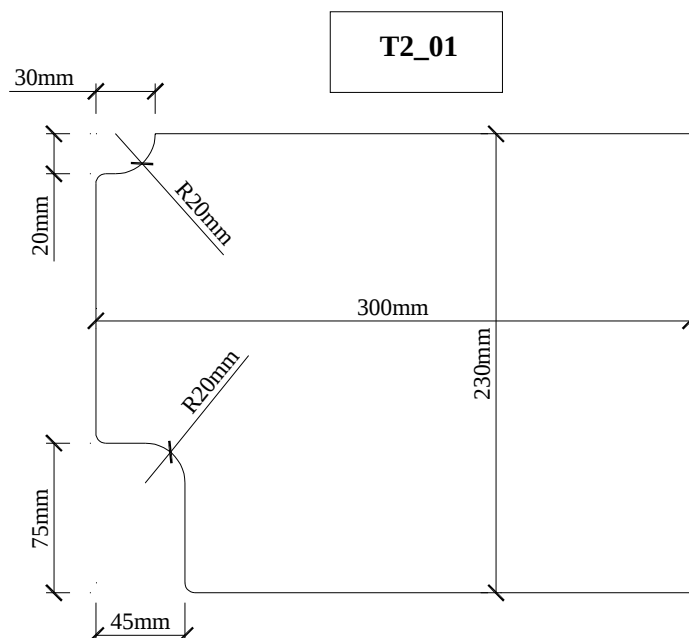
Metaalelementen hoofdligger:

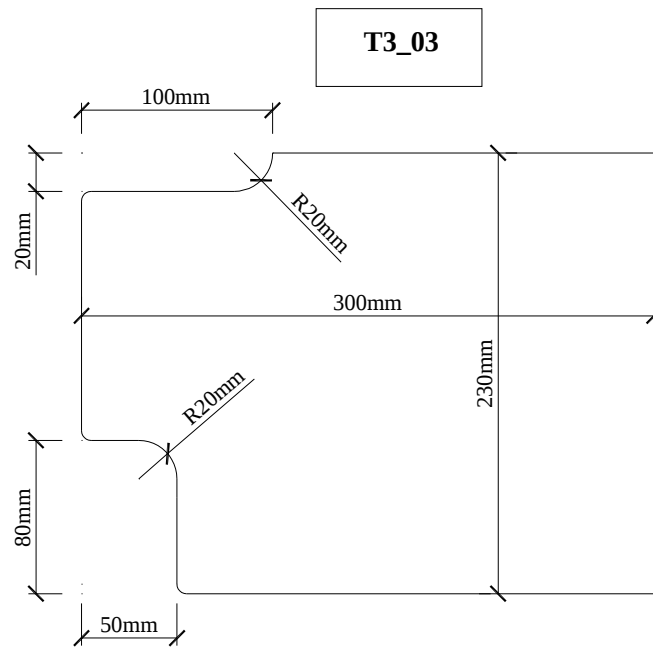


Insteekelementen gording:



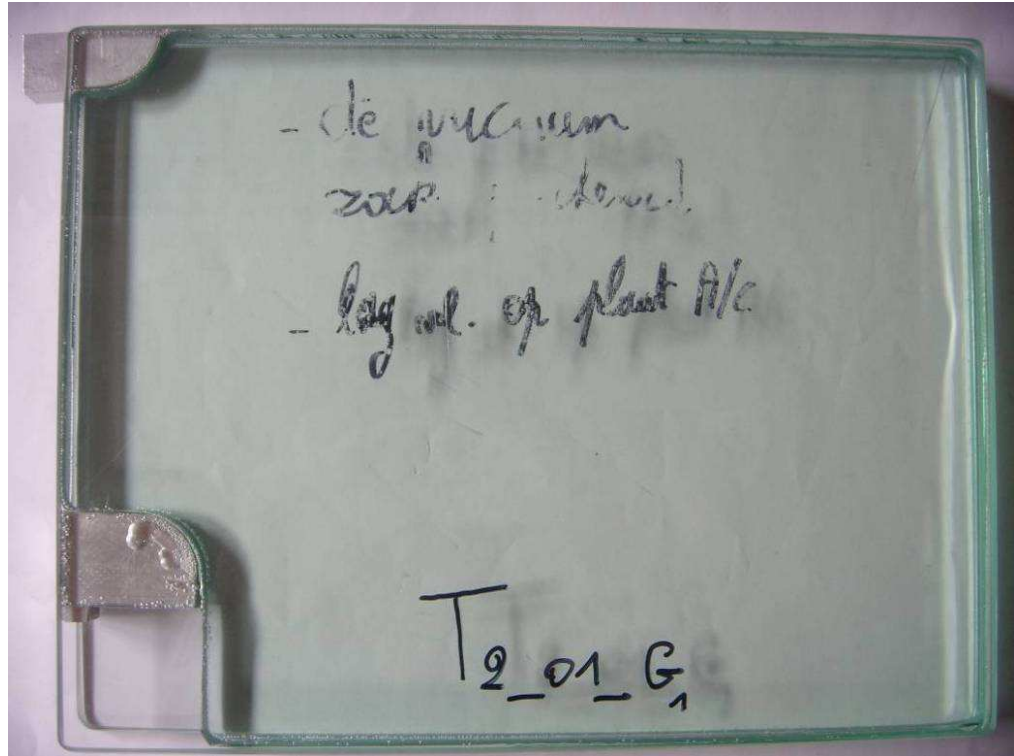
Middelste glasplaatjes gordingen:



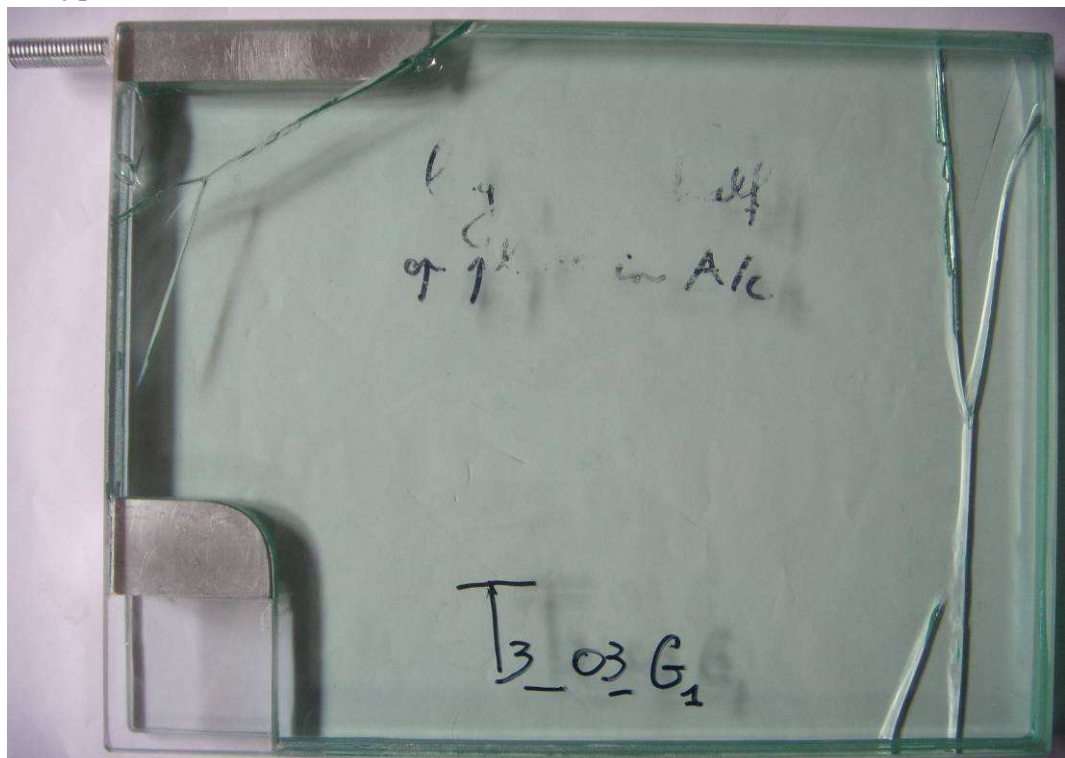


BIJLAGE G: Prototypen fase II

Prototype T2_01_G₁:

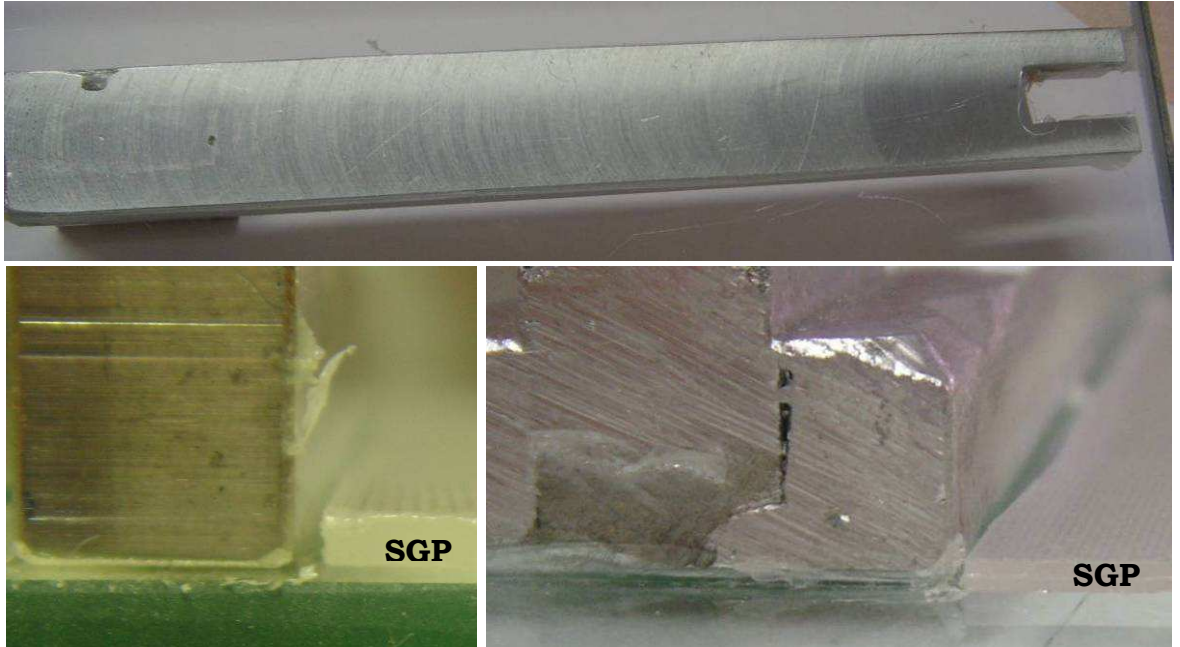


Prototype T3_03_G₁:

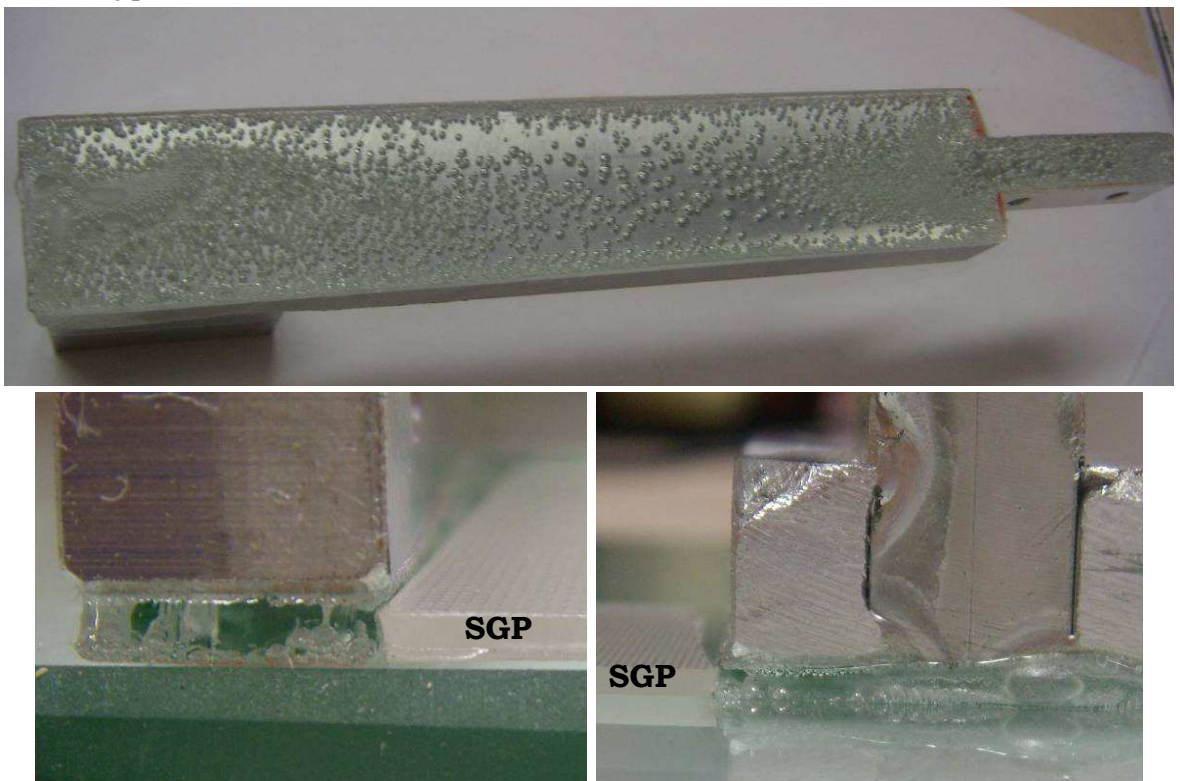


Bij de zijaanzichten van onderstaande afbeeldingen werd een strookje SGP op het glas naast het metaalelement geplaatst (witte strook met geribbeld bovenvlak). Op die manier kan een beeld gevormd worden van de dikte van de SGP-tussenlaag na laminatie.

Prototype T2_01_H1:

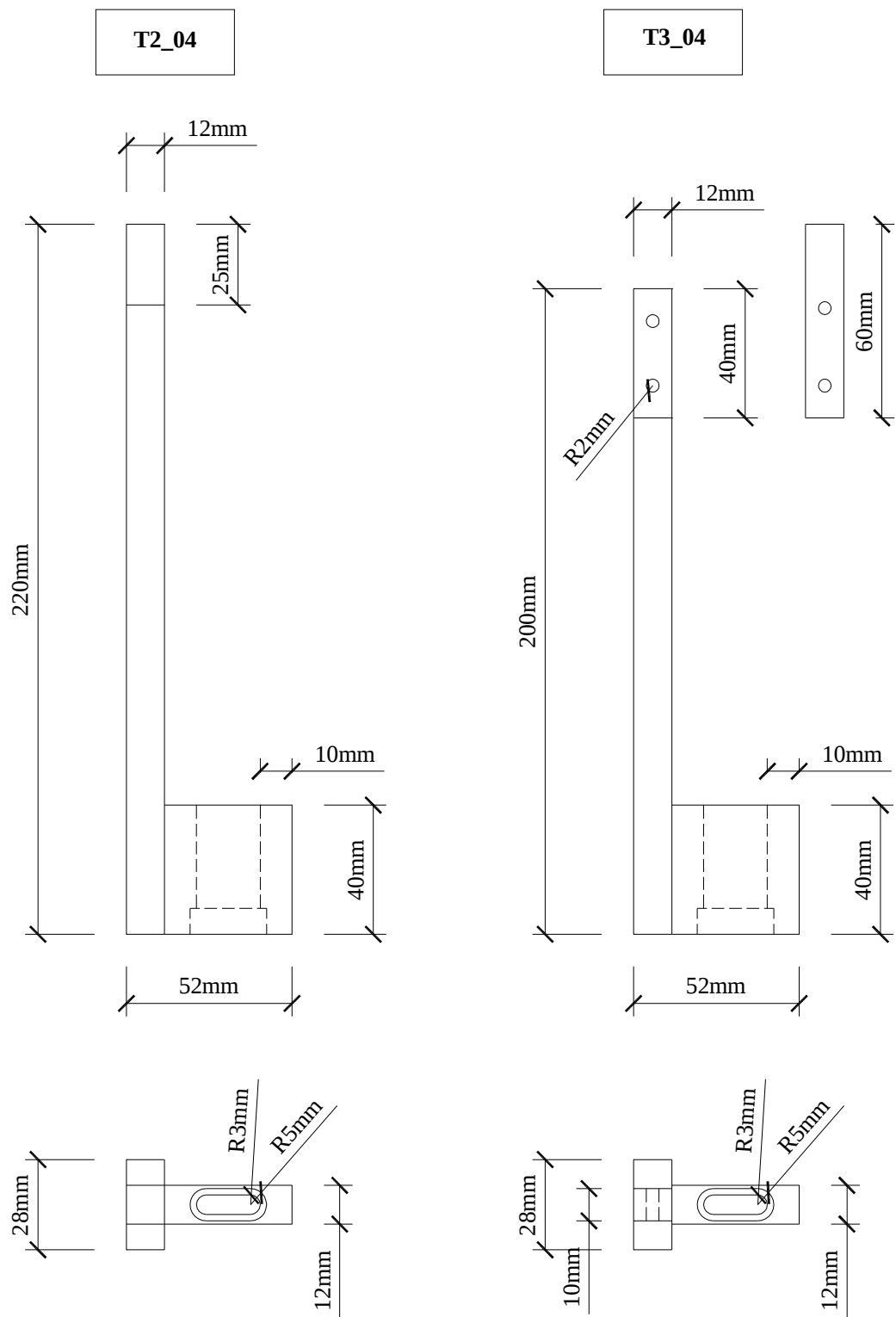


Prototype T3_03_H1:

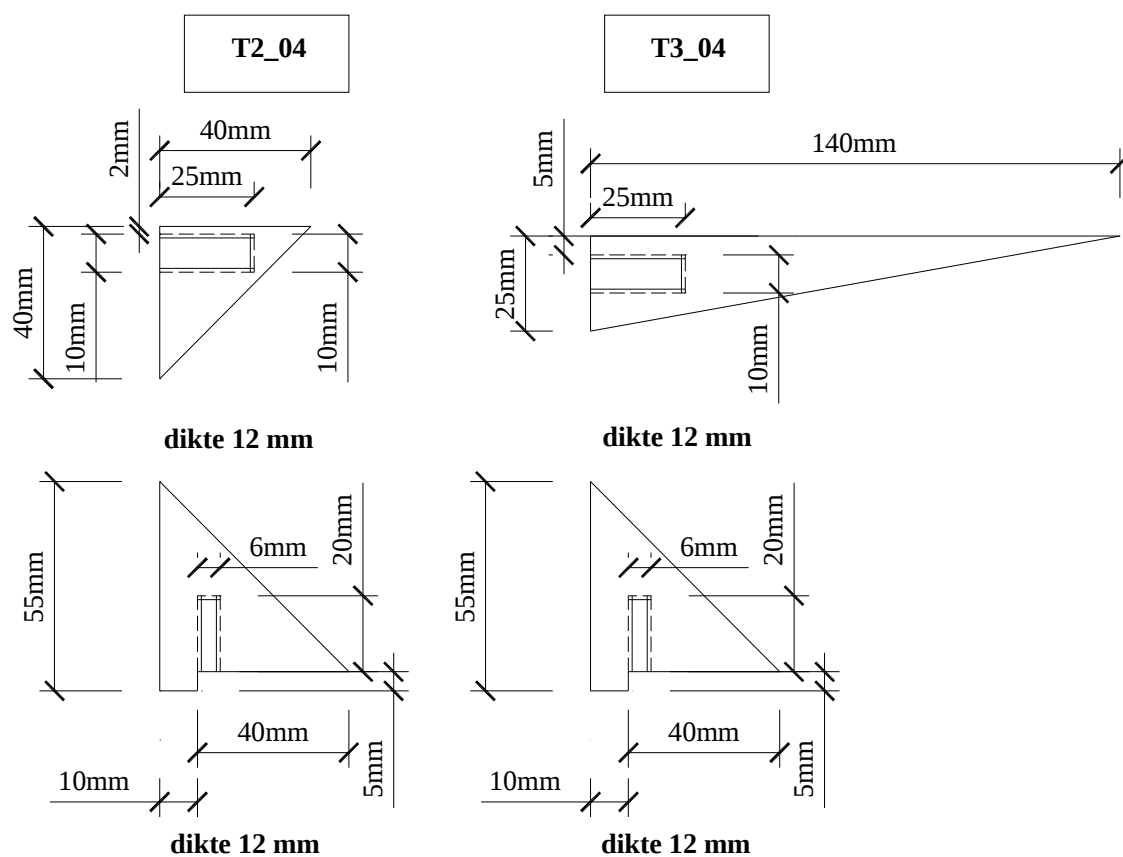


BIJLAGE H: Dimensies T2_04 en T3_04

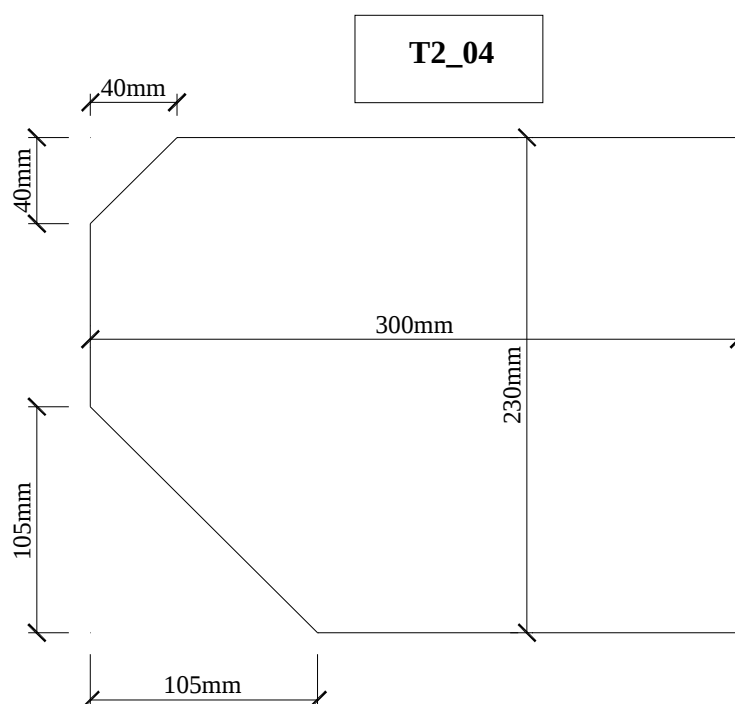
Metaalelementen hoofdlijger:

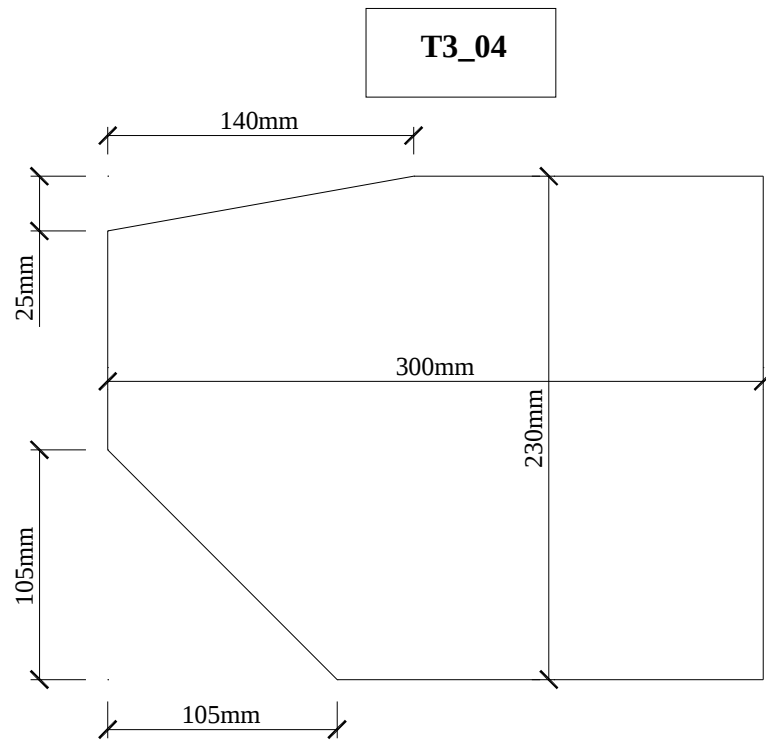


Insteekelementen gording:



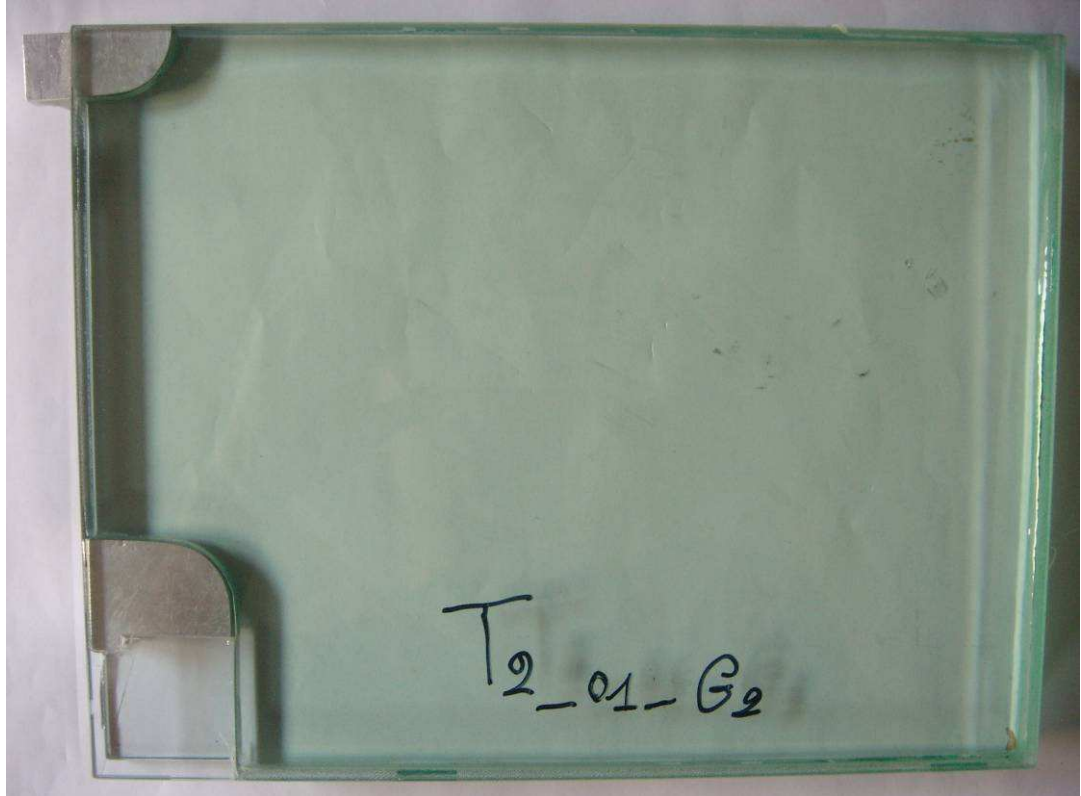
Middelste glasplaatjes gordingen:



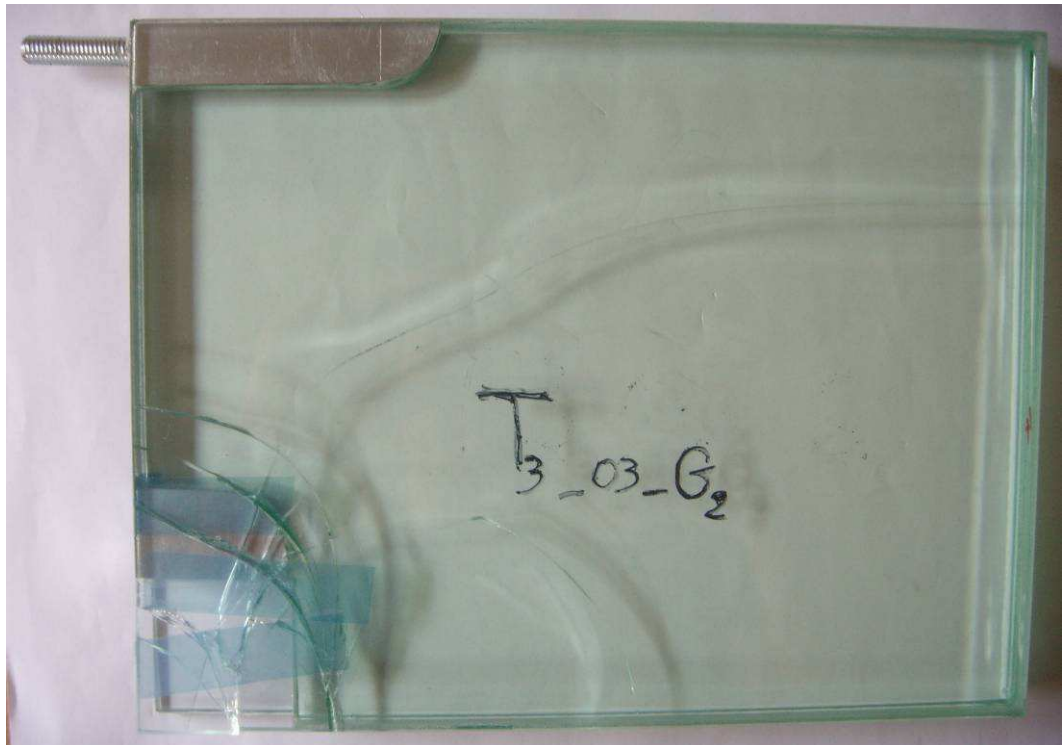


BIJLAGE I: Prototypen fase III

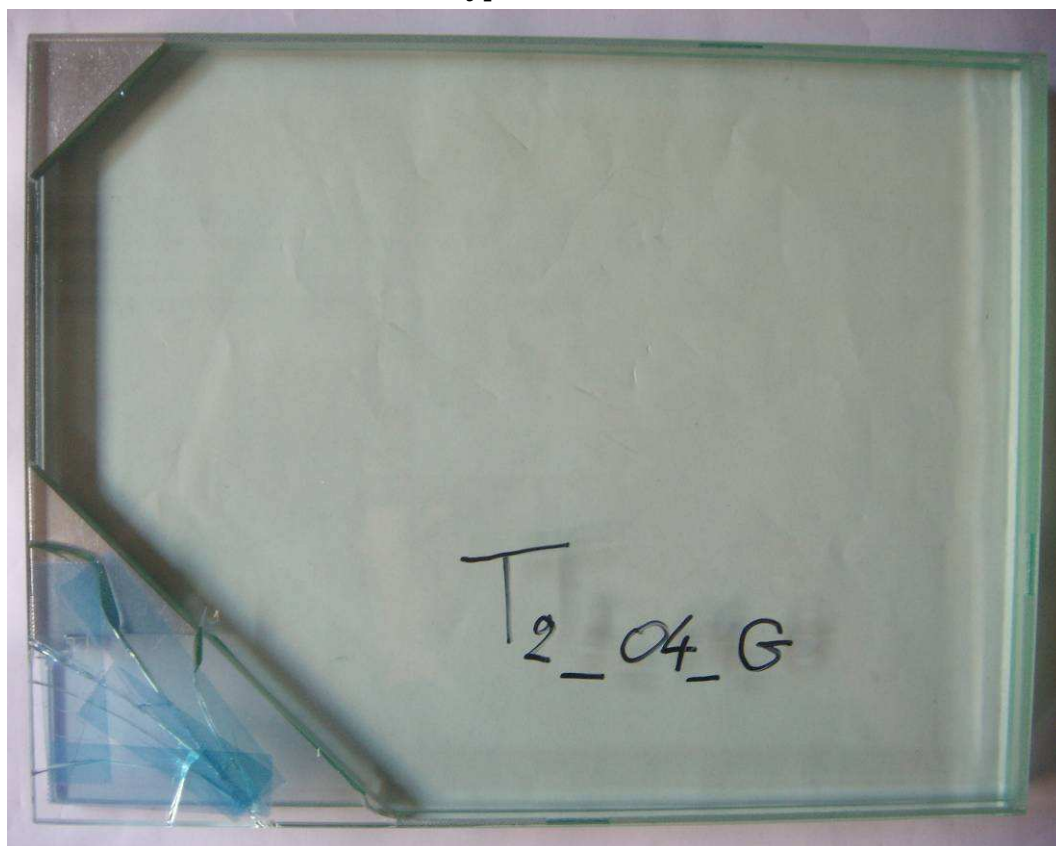
Prototype T2_01_G₂:



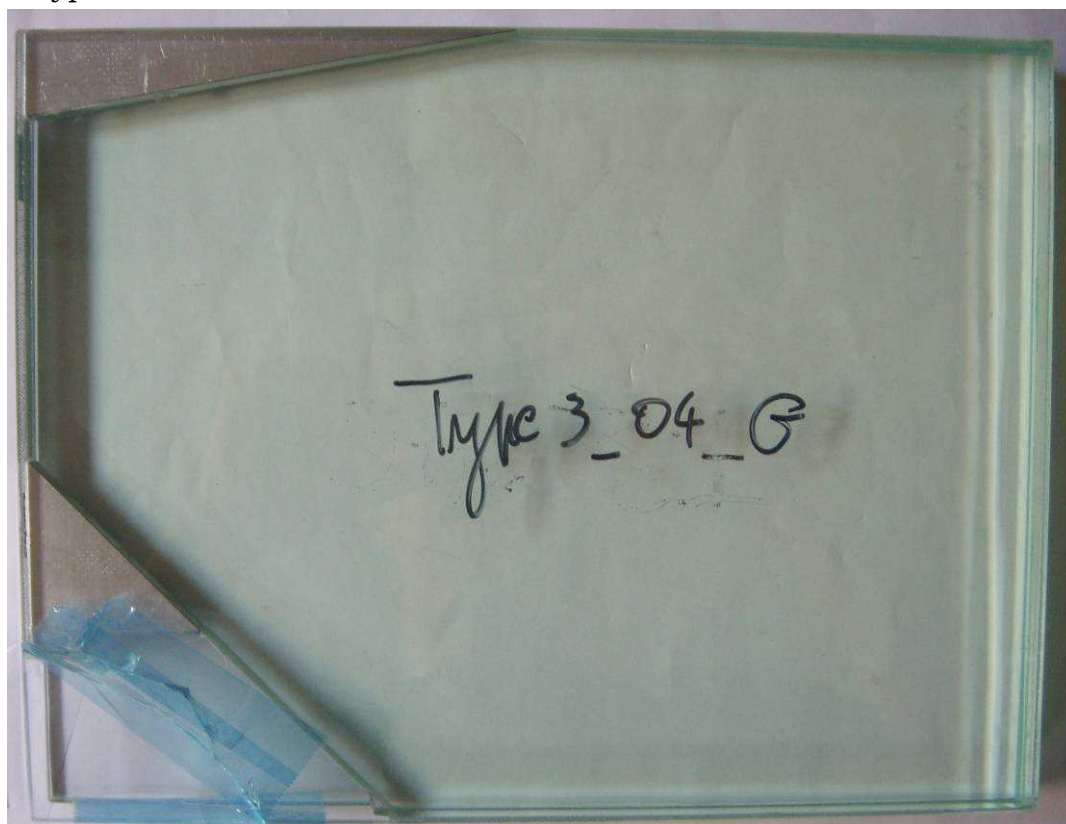
Prototype T3_03_G₂:



Prototype T2_04_G:

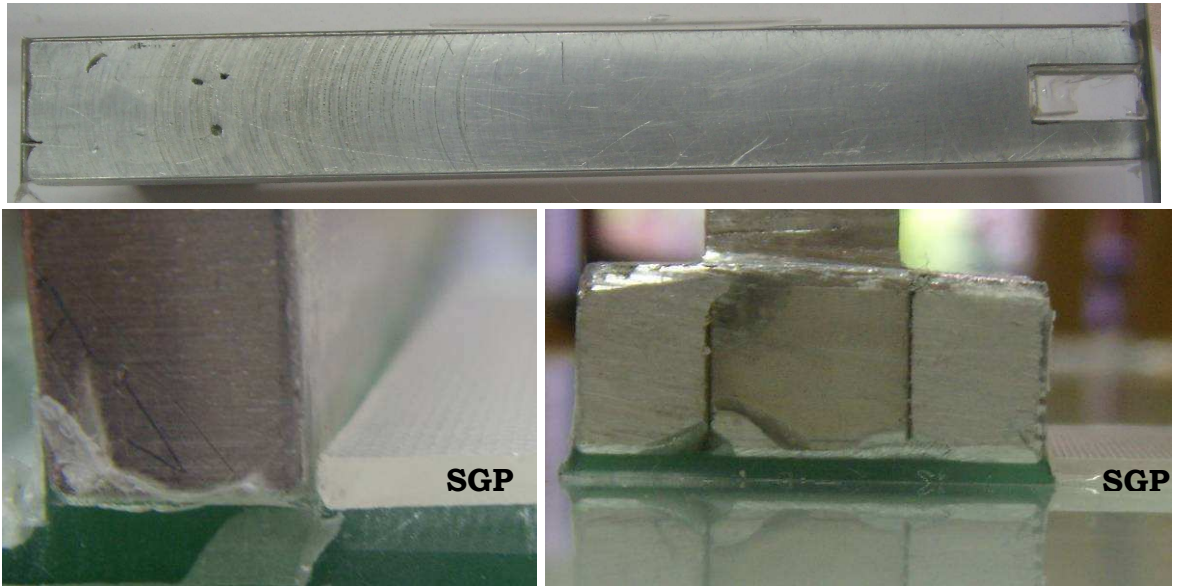


Prototype T3_04_G:

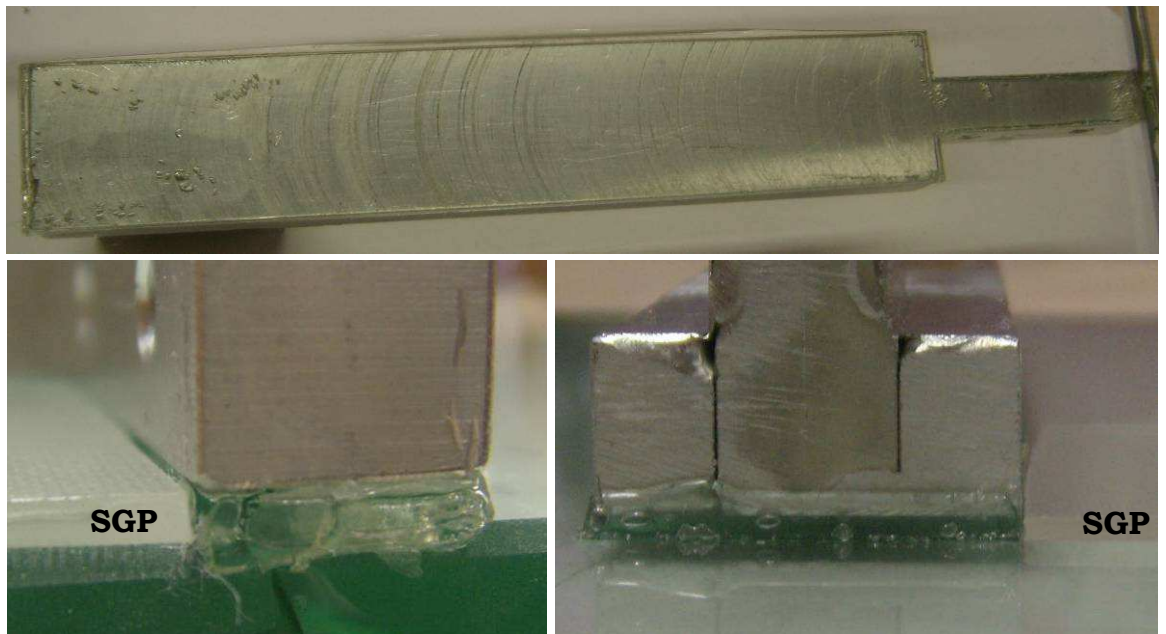


Bij de zijaanzichten van onderstaande afbeeldingen werd een strookje SGP op het glas naast het metaalelement geplaatst (witte strook met geribbeld bovenvlak). Op die manier kan een beeld gevormd worden van de dikte van de SGP-tussenlaag na laminatie.

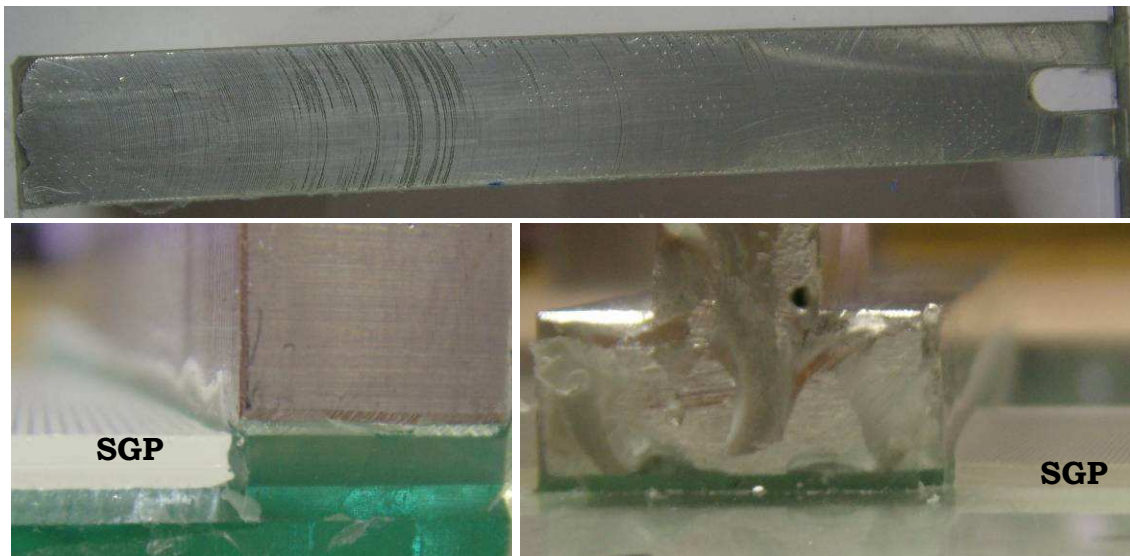
Prototype T2_01_H₂:



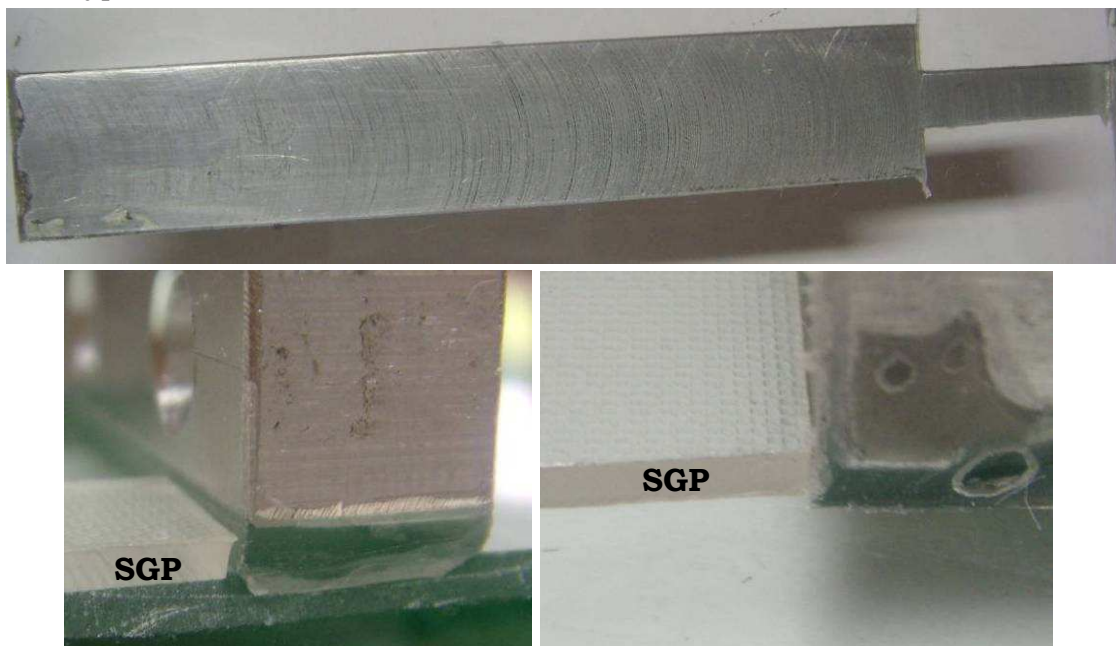
Prototype T3_03_H₂:



Prototype T2_04_H:



Prototype T3_04_H:



Bibliografie

- Belis J. (2005). *Kipsterkte van monolithische en gelamineerde glazen liggers*. Doctoraatsthesis, Laboratorium voor Modelonderzoek, Universiteit Gent.
- Bos F., Veer F., Belis J., Louter C. & van Nieuwenhuijzen E. (2005a). The Joints for the All Transparent Pavilion. *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 385 - 388.
- Bos F., Veer F., Hobbelman G., Romein T., Nijssse R., Belis J., Louter C. & van Nieuwenhuijzen E. (2005b). Designing and Planning the World's Biggest Experimental Glass Structure. *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 401 - 405.
- Bos F., Veer F., Romein T., Nijssse R. (2005c). The evaluation of the All Transparent Pavilion Project. *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 396 - 400.
- Bucak O., Meißner M. (2005). *Trag- und Resttragfähigkeitsuntersuchungen an Verbundglas mit der Zwischenlage „SentryGlas® Plus“*. Abschlußbericht AiF-Forschungsproject, Munchen.
- Bucak O., Schuler C. & Meißner M (2006). Verbund im Glasbau - Neues und Bewährtes. *Stahlbau* 75, p. 529 - 543.
- Callewaert D. (2006). *Bout- en Lasverbindingen in floatglas: experimentele studie*. Scriptie, Laboratorium voor Modelonderzoek, Universiteit Gent.
- DuPont (2003). Carpenter Blue Glass Passage resembles “a transposed slice of water” thanks to new SentryGlas Secure™ technology. Internetreferentie: <http://www.dupont.com/safetyglass/lgn/stories/2601.html>.

- DuPont (2006). Innovation award for the staircase in laminated safety glass with DuPont™ SentryGlas® Plus interlayers. Internetreferentie: http://www.dupont.com/safetyglass/lgn/35/pdfs/seele_pr.pdf.
- DuPont (2007). SentryGlas® Plus permits non-positive connections in balustrade design. *Laminated Glass News* 36.
- DuPont (2008). DuPont™ SentryGlas® Plus ionoplast interlayer, *Specifying and technical data*, DuPont.
- ETAG 002 (1999). Guideline for European technical approval for Structural Sealant Glazing Systems (SSGS) - Part 1: Supported and unsupported systems. EOTA.
- Huveners E.M.P., van Herwijnen F., Soetens F. & Hofmeyer H. (2007). Mechanical shear properties of adhesives. *Proceedings of Glass Performance Days*, p. 367-370.
- ISO 12543-5 (1998). Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass - Part 5: dimensions and edge finishing. ISO.
- Louter C., Belis J., Bos F., Veer F., Hobbelman G. (2005). Reinforced Glass Cantilever Beams. *Proceedings of Glass Performance Days*, p. 430-434.
- NBN EN 572 (2004). Verre dans la construction - Produits de base: verre de silicate sodocalcique - Partie 2 : Glace. IBN. Version Française.
- Mihaylov J. (2007). Niet gepubliceerd. ILEK, Universiteit Stuttgart.
- Nijssse R. (2003). *Glass in Structures*. Birkhäuser, Bazel, Zwitserland.
- O'Callaghan J. (2003). Apple Computer Inc Retail Store - All Glass Staircase and Bridge. *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 191-194.
- O'Callaghan J. (2005). A Case Study of the Apple Computer Stores - Glass Structures 2001-2005. *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 406 - 409.
- Praet W. (2006). *Kip van gelamineerde glazen liggers met een ionoplast tussenlaag*. Scriptie, Laboratorium voor Modelonderzoek, Universiteit Gent.
- Royer-Carfagni G. & Silvestri M. (2007). New prospects in frameless glazing technology: the Gecko system. *Proceedings of Glass Performance Days*, p. 145-150.

- Vandepitte D. (1980). *Berekening van Constructies II*. Story - Scienta, Academia Press, Gent.
- Van Impe R. (2004). *Berekening van bouwkundige constructies I*. Cursus, Laboratorium voor Modelonderzoek, Universiteit Gent.
- Veer F.A. (2005). 10 Years of Zappi Research. *Proceedings of Glass Processing Days*, p. 424 - 428.
- Weller B. & Tasche S. (2005). Adhesive Fixing in Glass Construction. *Proceedings of Glass Processing Days*, p.265-268.
- Wurm J. (2007). *Glass Structures - Design and construction of self-supporting skins*. Birkhäuser, Bazel, Zwitserland.