

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

Ontwikkeling en analyse van circulaire connectoren voor CircuWallPanels

Pieter Gielkens
Jente Jans

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

PROMOTOR :

dr. ing. Rik STEENSELS

PROMOTOR :

ir. arch Benjamin BRANS

COPROMOTOR :

Dhr. Eric VAN DE HEYNING

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



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

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



2023
2024

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

Ontwikkeling en analyse van circulaire connectoren voor CircuWallPanels

Pieter Gielkens

Jente Jans

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

PROMOTOR :

dr. ing. Rik STEENSELS

PROMOTOR :

ir. arch Benjamin BRANS

COPROMOTOR :

Dhr. Eric VAN DE HEYNING



KU LEUVEN

Woord vooraf

Met trots presenteren we onze masterthesis: de culminatie van maandenlang onderzoek en diepgaande reflectie. Deze boeiende reis heeft ons in staat gesteld onze kennis en ideeën toe te passen op een concrete uitdaging uit de praktijk. We ervaren voldoening in de wetenschap dat ons onderzoek waardevolle inzichten heeft opgeleverd voor zowel WoodInc als ShellterWood.

De realisatie van deze thesis was enkel mogelijk dankzij de steun en aanmoediging van velen. Graag willen we onze dankbaarheid uiten aan allen die hebben bijgedragen aan dit werk.

Onze oprechte dank gaat allereerst uit naar onze interne promotor, dr. ing. Rik Steensels, voor zijn voortdurende begeleiding, waardevolle feedback en kritische reflectie gedurende het gehele proces. Zijn expertise en onvoorwaardelijke steun vormden de onmisbare basis voor dit onderzoek.

We willen onze erkentelijkheid betuigen aan het bedrijf WoodInc, met name aan onze externe promotor, ir. arch. Benjamin Brans. Zijn bereidwilligheid om zijn kennis en tijd te delen was van onschatbare waarde voor de kwaliteit van deze thesis.

Onze speciale dank gaat uit naar CEO en oprichter, dhr. Eric Van de Heyning, voor het vertrouwen dat hij in ons stelde door ons de kans te geven dit onderzoek voor hem uit te voeren. We waarderen ten zeerste zijn openheid om zijn inzichten en kennis te delen, en zijn bereidwilligheid om kostbare tijd vrij te maken gedurende het hele traject.

Hoewel dit onderzoek zich binnen de beperkingen van een masterthesis bevindt, zijn we ervan overtuigd dat het een significante bijdrage levert aan het bredere spectrum van wetenschappelijk onderzoek. We hopen oprecht dat deze studie een waardevolle impuls zal geven aan de evolutie van circulair bouwen en op die manier een positieve impact zal hebben op de toekomst van de bouwsector.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst met tabellen	5
Lijst met figuren	8
Verklarende woordenlijst	9
Abstract	15
Abstract	17
1 Inleiding	19
1.1 Situering	19
1.2 Probleemstelling	20
1.3 Doelstellingen	20
1.4 Methode	22
2 Literatuurstudie	23
2.1 Theoretisch kader	23
2.2 Bestaand concept	23
2.3 Berekeningsmethodiek	26
2.3.1 Windbelastingen op de constructie	26
2.3.2 Windbelasting volgens Wind Interactive	29
2.4 Berekening van houtconstructies	30
2.4.1 Basisvariabelen, veiligheidsfactoren en klimaatinvloed	30
2.4.2 Bepaling stuiksterkte van de staal-op-houtverbinding	30
2.5 Staal-op-houtverbinding met bouten	32
3 Methode ontwerp connector	37
3.1 Positionering van de connector	37
3.2 Dimensionering connectie	38
3.2.1 Positioneren van de sleufgaten	38
3.2.2 Selectie van de randvoorwaarden	42
3.2.3 Selectie van bouten	44
3.2.4 Selectie materiaal connector	44
3.2.5 Categorieën van boutverbindingen	45
3.3 Optredende belastingen	46

3.3.1	Horizontale kracht veroorzaakt door de wind	46
3.3.2	Verticale kracht veroorzaakt door de CircuWallPanels	50
3.3.3	Rekenwaarde horizontale kracht	50
3.3.4	Rekenwaarde verticale kracht	51
3.4	Controle boutverbindingen	52
3.4.1	Weerstand van de boutverbindingen	52
3.4.2	Belasting van lasnaad	53
3.4.3	Draagvermogen lasnaad	55
3.4.4	Controle	55
3.5	Spanningsanalyse via berekeningen	57
3.5.1	Verticale kracht	57
3.5.2	Horizontale kracht	60
3.5.3	Controle van de gecombineerde momenten	64
3.6	Spanningsanalyse via software	65
3.6.1	Spanningscontrole van L-profiel volgens handberekeningen	65
3.6.2	Zonder sleufgaten	66
3.6.3	Spanningscontrole van L-profiel met sleufgaten	67
3.6.4	Spanningscontrole van L-profiel met sleufgaten en steundriehoek	69
4	Gerelateerd onderzoek	71
4.1	Dikte dragend wandpaneel (Doorbuiging paneel uit het vlak)	71
4.1.1	Controle doorbuiging veroorzaakt door de wind	71
4.1.2	Controle doorbuiging veroorzaakt door eigengewicht	78
4.2	Doorbuiging paneel in het vlak	81
5	Besluit	83
	Referentielijst	86

Lijst van tabellen

2.1	Terreincategorieën en terreinparameters	27
2.2	Aanbevolen partiële factoren γ_M voor materiaaleigenschappen en weerstanden . .	30
2.3	Partiële veiligheidsfactoren voor verbindingen	32
2.4	Categorieën van boutverbindingen	33
2.5	Minimale en maximale hart-op-hartafstanden, eind- en randafstanden	34
2.6	Boutafmetingen met eigenschappen	34
2.7	Boutklasse met de bijhorende vloeigrens en treksterkte van stalen bouten	34
2.8	Rekenwaarde van de weerstand voor individuele verbindingsmiddelen, die zijn onderworpen aan afschuiving en/of trek	35
3.1	Minimale tussen-, eind- en randafstanden voor bouten	40
3.2	Inwendige radius haaks	41
3.3	Inwendige radius scherp	41
3.4	Mechanische eigenschappen bij kamertemperatuur voor platte en lange producten van staalsoorten en staalkwaliteiten	44
4.1	Belastingsduurklassen	74
4.2	Voorbeelden van toewijzing aan een belastingsduurklassen	74
4.3	Partiële factor γ_M	75
4.4	Waarden van k_{mod}	75
4.5	Waarden van k_{def}	76

Lijst van figuren

2.1	Toebehorende connectoren van het Structurez-systeem	24
2.2	CircuWallPanels op paal- en balkstructuur	24
2.3	Overzicht onderdelen Box 4.0	25
2.4	Illustraties van de oppervlakteruwheid voor elke terreincategorie	27
2.5	Blootstellingsfactor	28
2.6	Referentiehoogte z_e afhankelijk van de hoogte en breedte	29
2.7	Bezwijkmechanismen voor een staal-op-houtverbinding	31
2.8	Parameters eind-, rand- en hart-op-hartafstand	33
3.1	Detaillering connectie	37
3.2	Plaatsing CircuWallPanels met connectoren	38
3.3	Symbolen voor eind- en randafstanden en hart-op-hartafstanden van verbindingsmiddelen	39
3.4	Aanduiding parameters connector	39
3.5	Tussen-, eind- en randafstanden a) tussenafstand evenwijdig aan de vezelrichting in een rij en loodrecht op de vezelrichting tussen rijen, b) rand- en eindafstanden .	40
3.6	Plooihoeken R_1 en R_2	42
3.7	Beginscherf	47
3.8	Controletools in zones	47
3.9	Referentiewindsnelheden	48
3.10	Resultatenscherf	49
3.11	Resultatenscherf in zones	49
3.12	Detail lasverbinding	54
3.13	Parameters gewichtsanker	57
3.14	Dimensies van verticaal element van de connector	61
3.15	Optredende momenten M_1 en M_2	62
3.16	3D-aanzicht van connector	65
3.17	Zijaanzicht connector	65
3.18	Onderaanzicht connector	66
3.19	Krachten op de connector	66
3.20	Spanningsanalyse van de connector	67
3.21	3D-aanzicht van de connector met sleufgaten	67
3.22	Spanningsanalyse van de connector met sleufgaten	68
3.23	3D-aanzicht van de connector met steundriehoek	69
3.24	Spanningsanalyse van de connector met steundriehoek	69
4.1	Aangrijpende windbelasting	72

4.2	Technische fiche houten wandpaneel	73
4.3	Dragende plaat in Buildsoft Diamonds	77
4.4	Doorbuiging in Buildsoft Diamonds	78
4.5	Resultatenschermbuildsoft Diamonds	80
4.6	Ingeklemde THQ-ligger en paneelspeling t.g.v. rotatie	81

Symbolenlijst

Grondslagen van het constructies ontwerp (EN 1990):	
E	stijfheidsmodulus
F	belasting
F_d	rekenwaarde waarde van een belasting
F_k	karakteristieke waarde van een belasting
G	blijvende belasting
G_d	rekenwaarde waarde van een blijvende belasting
G_k	karakteristieke waarde van een blijvende belasting
G	glijmodulus
I	traagheidsmoment
M	aangrijpend moment
Q	veranderlijke belasting
Q_d	rekenwaarde van een veranderlijke belasting
Q_k	karakteristieke waarde van een veranderlijke belasting
V	aangrijpende dwarskracht
X_d	rekenwaarde van een sterkte-eigenschap
X_k	karakteristieke waarde van een sterkte-eigenschap
V_{Rd}	weerstand tegen dwarskracht
e_{vl}	vloeigrens
e	staalrek
f_{yk}	karakteristieke waarde van de staalspanning
f_{yd}	rekenwaarde van de staalspanning
q	verdeelde belasting
γ_G	partiële factor voor blijvende belastingen, die ook modelonzekerheden en maatafwijkingen in aanmerking neemt
γ_Q	partiële factor voor veranderlijke belastingen, die ook modelonzekerheden en maatafwijkingen in aanmerking neemt

Belastingen op constructies - Windbelasting (EN 1991-1-4):	
I_v	turbulentie-intensiteit
c_0	orografiefactor
c_{dir}	windrichtingsfactor
c_d	dynamische factor
c_e	blootstellingsfactor
c_{pe}	drukcoëfficiënt voor de uitwendige druk
c_{pi}	drukcoëfficiënt voor de inwendig druk
c_r	ruwheidsfactor
c_{season}	seizoensfactor
c_s	afmetingsfactor
h	hoogte van de constructie
h_{dis}	verplaatsingshoogte
k_r	terreinfactor
q_b	referentie gemiddelde (basis)stuwdruk
q_p	extreme stuwdruk
v_b	basiswindsnelheid
$v_{b,0}$	gemiddelde windsnelheid
v_m	gemiddelde windsnelheid
w_e	winddruk werkend op de buitenzijde
z_0	ruwheidslengte
$z_{0,II}$	ruwheidslengte bij terreincategorie II
z_e	referentiedrukhoogte
z_{max}	maximale hoogte
z_{min}	minimale hoogte
ρ	dichtheid van de lucht

Ontwerp en berekeningen van verbindingen (EN 1993-1-8):	
A_b	bouteigenschap: trekspanning doorsnede, afschuifvlak door de schacht
A_s	bouteigenschap: trekspanning doorsnede, afschuifvlak door de draad
$B_{p,Rd}$	ponsweerstand
$F_{b,Rd}$	stuikweerstand
$F_{t,Ed}$	rekenwaarde trekkracht
$F_{t,Rd}$	trekweerstand
$F_{v,Ed}$	rekenwaarde afschuifkracht
$F_{v,Rd}$	afschuifweerstand
R_e	connectoreigenschap: vloeigrens
d_0	gatdiameter
d_m	bouteigenschap: diameter boutkop
e_1	eindafstand: afstand van het middelpunt van een gat voor een verbindingsmiddel naar de dichtstbijzijnde rand, gemeten in de richting van de krachtsoverdracht, zie Tabel 2.5
e_2	eindafstand: afstand van het middelpunt van een gat voor een verbindingsmiddel naar de dichtstbijzijnde rand, gemeten loodrecht op de richting van de krachtsoverdracht, zie Tabel 2.5
e_3	afstand van de aslijn van een sleufgat naar de dichtstbijzijnde rand, zie Tabel 2.5
e_4	afstand van het middelpunt van de eindstraal van een sleufgat naar de dichtstbijzijnde rand, zie Tabel 2.5
f_u	treksterkte
f_{ub}	rekgrens van staal
f_{yb}	vloeigrens van staal
f_{yk}	connectoreigenschap: karakteristieke waarde staalspanning
f_{yd}	connectoreigenschap: rekenwaarde staalspanning
p_1	hart-op-hartafstand tussen de middelpunten van verbindingsmiddelen in eenzelfde rij in de richting van de krachtsoverdracht, zie Figuur 2.5
$p_{1,0}$	hart-op-hartafstand tussen de middelpunten van verbindingsmiddelen in een buitenste rij in de richting van de krachtsoverdracht, zie Figuur 2.5
$p_{1,i}$	hart-op-hartafstand tussen de middelpunten van verbindingsmiddelen in een binnenste rij in de richting van de krachtsoverdracht, zie Figuur 2.5
p_2	hart-op-hartafstand gemeten loodrecht op de richting van de krachtsoverdracht tussen twee naburige rijen van verbindingsmiddelen, zie Figuur 2.5
t_p	factor voor de berekening van ponsweerstand, plaatdikte

α_d	factor voor de berekening van stuikweerstand, in de richting van de krachtsoverdracht
α_v	reductiefactor afschuiving
k_1	factor voor de berekening van stuikweerstand, loodrecht op de richting van de krachtsoverdracht
α_b	factor voor de berekening van stuikweerstand, reductiefactor eindbout
γ_{M2}	partiële veiligheidscoëfficiënt bij de afschuifweerstand per afschuifvlak van een bout
ϕ	bouteigenschap: boutdoorsnede
Lasverbinding (EN 1993-1-8, Roloff/Matek Machineonderdelen):	
A_w	oppervlakte van de keeldoorsnede
$F_{x,Ed}$	aangrijpende kracht
$M_{y,Ed}$	aangrijpend moment
R_e	treksterkte van het constructiemateriaal
a	lasdikte (of keelhoogte)
l_{eff}	effectieve lengte van de las
α_w	correctiefactor
$\sigma_{\perp}$	normaalspanning loodrecht op het vlak van de keeldoorsnede
σ_w	afgeleide spanning
$\tau_{\perp}$	schuifspanning (in het vlak van de keeldoorsnede) loodrecht op de lengte-as van de lasnaad
$\tau_{//}$	schuifspanning (in het vlak van de keeldoorsnede) parallel aan de lengte-as van de lasnaad

Ontwerp en berekeningen van houtconstructies (EN 1995-1-1):	
$F_{v,Rk}$	karakteristieke sterkte per verbindingsmiddel per snede
$F_{ax,Rk}$	karakteristieke rekenwaarde van de axiale uittreksterkte van een verbindingsmiddel
$M_{y,Rk}$	karakteristiek vloeimoment van een verbindingsmiddel
a	afstand
d	diameter
$f_{h,k}$	karakteristieke stuiksterkte
k_{def}	vervormingsfactor
k_{mod}	modificatiefactor voor belastingsduur en vochtgehalte
t	dikte
w_{fin}	uiteindelijke doorbuiging
w_{inst}	ogenblikkelijke doorbuiging
γ_M	partiële factor voor materiaaleigenschappen
δ	doorbuiging

Abstract

Deze masterproef richt zich op de ontwikkeling van circulaire connectoren voor CircuWallPanels volgens het WoodInc-systeem, in samenwerking met WoodInc en hun partner ShelterWood. De connectoren worden geïntegreerd in het bouwproject van de Bouwcampus in Diepenbeek en de verdere ontwikkeling van de Box 4.0.

Bij het controleren van de maximale spanning in de connector zijn zowel het eigengewicht van het gevelpaneel als de windbelasting als maatgevende belastingen in overweging genomen. Deze factoren zijn cruciaal voor een nauwkeurige bepaling van de belastingslimieten van de connector. Berekeningen en structurele controles zijn uitgevoerd volgens de geldende Eurocodes. Een bijkomende spanningscontrole is uitgevoerd door middel van een eindige-elementensimulatie met de 3D CAD software Autodesk Inventor. De resultaten zijn ten slotte samengevoegd in modulaire Microsoft Excel-bestanden, waardoor eenvoudige aanpassingen aan belastingen mogelijk zijn om een optimale connector te ontwikkelen, rekening houdend met materiaalkosten.

De uiteindelijke connector is een L-profiel met afmetingen 120 mm x 80 mm x 100 mm, met een dikte van 8 mm. Hierbij wordt een gewichtsanker met afmetingen 20 mm x 8 mm gelast op het L-profiel, waardoor efficiënte installatie op de werf mogelijk is. De stalen connector is voorzien van zes sleufgaten waarin M8-bouten de wandpanelen bevestigen. Het ontwerp maakt eenvoudige montage van de CircuWallPanel met hijskranen mogelijk en houdt circulariteit centraal in het ontwerp.

Abstract

This master's thesis focuses on the development of circular connectors for CircuWallPanels following the WoodInc system, in collaboration with WoodInc and their partner ShellterWood. The connectors will be integrated into the *Bouwcampus* construction project in Diepenbeek and further development of the Box 4.0.

The self-weight of the facade panel and the wind load, crucial for controlling the maximum stress in the connector, were taken into account as normative loads. Calculations and structural checks were carried out according to the applicable Eurocodes. An additional stress check was performed through a finite element simulation with the 3D CAD software Autodesk Inventor. Finally, the results were compiled into modular Microsoft Excel files, allowing simple adjustments to loads to develop an optimal connector, taking into account material costs.

The final connector is a 120 mm x 80 mm x 100 mm L-profile with a thickness of 8 mm. A welded 20 mm x 8 mm weight anchor enables efficient on-site installation. The steel connector features six slotted holes in which M8 bolts secure the wall panels. The design allows easy installation of the CircuWallPanel with cranes and keeps circularity central to the design.

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Situering

Dit onderzoek wordt uitgevoerd in samenwerking met het bedrijf “WoodInc” en hun partner “ShellterWood”.

De traditionele bouwsector kenmerkt zich door een lineair model, waarbij grondstoffen worden ontgonnen, verwerkt en vervolgens toegepast in bouwprojecten. Eens de levensduur van die projecten ten einde loopt, belanden de gebruikte materialen vaak in de afvalstroom, met alle ecologische en economische gevolgen van dien. Dit model is niet langer houdbaar. De toenemende vraag naar woningen en infrastructuur, gecombineerd met de dringende noodzaak om onze ecologische voetafdruk te verkleinen, dwingt de bouwsector om radicaal te innoveren.

Circulaire economie biedt een alternatief. In dit model worden grondstoffen en materialen zo lang mogelijk in gebruik gehouden en hergebruikt. Toegepast op de bouwsector betekent dit dat gebouwen worden ontworpen met demontage en hergebruik in het achterhoofd, waardoor de levensduur van materialen aanzienlijk wordt verlengd. Afvalstromen worden gereduceerd en grondstoffen blijven optimaal benut.

WoodInc streeft naar een verdere integratie van deze circulaire bouwmethode in hun productlijn. Het bedrijf ontwikkelde reeds met succes het WoodInc-systeem, een houtskeletbouwmethode gebaseerd op LVL-balken [1]. Hierbij worden gevelpanelen, de CircuWallPanels, bevestigd aan deze constructie met behulp van innovatieve connectoren. Deze zelfontwikkelde wandpanelen zijn opgebouwd uit dragend houten plaatmateriaal, houtvezelisolatie en een buitenafwerking. Dankzij hun doordacht ontwerp voldoen ze aan de strenge normen voor dampopenheid, wind- en luchtdichtheid. De gevelcassettes zijn geoptimaliseerd voor een montage zonder lijm of andere permanente bevestigingsmiddelen, hetgeen de demontage en herbruikbaarheid maximaliseert.

De focus van WoodInc op circulariteit uit zich in het gebruik van demonteerbare verbindingen en herbruikbare materialen. Het volledige WoodInc-systeem is circulair ontworpen, wat resulteert in een minimale afvalstroom en een optimale benutting van grondstoffen.

Bedrijfspartner Shellterwood zet het WoodInc-systeem in voor de constructie van tijdelijke bouwunits in de evenementensector. De gestandaardiseerde units, met de toepasselijke naam ‘Box 4.0’, illustreren de flexibiliteit van het systeem. Echter, om deze units te integreren in de woningbouwsector, waar strengere normen en eisen gelden, is verdere optimalisatie vereist.

Daarnaast zullen soortgelijke gevelcassettes worden toegepast op het project van de Bouwcampus te Diepenbeek. Dit project zal de toepasbaarheid van circulair bouwen in diverse contexten bewijzen.

1.2 Probleemstelling

Het doel van dit onderzoek is het verkennen van de structurele aspecten van circulair bouwen, waarbij WoodInc al geruime tijd hun innovatieve Box 4.0 toepast. Met deze methode streven ze ernaar een bijdrage te leveren aan de toekomst van de bouwsector. Dit onderzoek, uitgevoerd in samenwerking met WoodInc en ShellterWood, richt zich voornamelijk op de ontwikkelingen binnen ShellterWood.

ShellterWood heeft zich tot nu toe gericht op de productie van circulaire houtconstructies, die hun nut hebben bewezen in de evenementensector, bijvoorbeeld voor cateringfaciliteiten, ontvangstzalen en kantoren [2]. Met de ambitie om circulair bouwen een integraal onderdeel van de toekomst te maken, willen ze deze techniek geschikt maken voor de brede bouwsector, met name de middelhoogbouw.

ShellterWood en WoodInc stuiten hierbij op een uitdaging: de integratie van bouwunits in permanente constructies. Dit vereist aanvullend onderzoek, vooral gericht op de ontwikkeling van de connectoren van de Box 4.0, die samen met de gevelcassettes zullen worden ingezet op het project van de Bouwcampus.

Het huidige ontwerp van de connectoren voor de CircuWallPanels vertoont tekortkomingen en voldoet niet aan de vereiste normen en eisen voor langdurig gebruik in de woningbouw. Dit belemmert de circulaire bouwmethode die gericht is op duurzaamheid en hergebruik van materialen.

De problemen met het ontwerp van de connectoren liggen op verschillende vlakken. Ten eerste moeten de Europese normen, specifiek Eurocode 3 en 5, die gelden voor de bouwsector, worden geïntegreerd om zowel staal als hout structureel te waarborgen. Ten tweede moeten alle belastingen nauwkeurig worden geïnventariseerd, aangezien de belasting voor woningbouwprojecten aanzienlijk verschilt van die in de evenementensector.

Door deze tekortkomingen aan te pakken, kunnen WoodInc en ShellterWood hun circulaire bouwtechniek succesvol toepassen in permanente constructies. Dit zal niet alleen hun circulaire ambities bevorderen, maar ook de mogelijkheid bieden om actief deel te nemen aan de groeiende markt voor duurzame woningbouw. Het is daarom van groot belang om een geoptimaliseerd ontwerp van de connectoren te realiseren, zodat de CircuWallPanels effectief kunnen worden bevestigd binnen zowel de het project van de Bouwcampus in Diepenbeek als de Box 4.0.

1.3 Doelstellingen

Dit onderzoek, in nauwe samenwerking met WoodInc en hun partner ShellterWood, heeft als hoofddoel de ontwikkeling van de connectoren voor *bio-based* circulaire bouwmethode op basis van het WoodInc-systeem, met de nadruk op duurzaamheid, efficiëntie en het voldoen aan alle bouwnormen en -eisen. De ontwikkeling moet een verschuiving teweegbrengen in de bouwsector door de principes van circulair bouwen te integreren, waarbij *bio-based* bouwmaterialen worden

gebruikt en waarbij aandacht wordt besteed aan CO₂-reductie gedurende de gehele levenscyclus van het bouwproces.

SMART-criteria:

Specifiek: Het doel is om een tool te ontwikkelen, die WoodInc en ShellterWood in staat stelt om diverse connectoren te dimensioneren. Deze applicatie houdt rekening met de Europese normen, namelijk Eurocode 3 en 5. Verder zal de tool ook voorzien zijn van de berekeningen voor de opgelegde belastingen.

Deze masterthesis zal Shellterwood ondersteunen bij het implementeren van bestaande connectoren van WoodInc voor gebruik op de Bouwcampus en voor de verdere ontwikkeling van de Box 4.0. Deze constructies hebben een langere gebruiksperiode dan de bestaande toepassing bij evenementen, waardoor hogere bouwtechnische vereisten worden gesteld. Bij Shellterwood wordt er gewerkt aan verschillende testopstellingen voor diverse proeven, dit varieert van testen met betrekking tot de akoestiek, luchtdichtheid, etc. Voor dit onderzoek wordt er enkel de nadruk gelegd op de testopstellingen die plaatsvinden om structuurmechanische controles uit te voeren. Momenteel legt Shellterwood de focus op de ontwikkeling van een circulaire verbinding van het wandpaneel op de kolommen. De montage van de wandpanelen op de kolommen dient bovendien zonder stellingen en dus eenvoudig en snel te verlopen op de werf. De bijdrage bestaat uit het onderzoeken van de optimale verbindingsmethode van enerzijds de Box 4.0 testopstelling en anderzijds het gelijklopend project van de Bouwcampus in Diepenbeek. Het belangrijkste verschil is dat de wandpanelen op de Bouwcampus zullen worden bevestigd aan stalen balken in plaats van houten kolommen. Hierdoor zullen extra controles nodig zijn.

Meetbaar: Meetbare resultaten omvatten de ontwikkeling van circulaire bouwelementen en technieken die voldoen aan alle regelgevingen met betrekking tot structuur, thermische isolatie, bouwfysica, akoestiek en brandveiligheid.

Acceptabel: De woonunits moeten niet alleen voldoen aan duurzaamheidsvereisten, maar ook economisch haalbaar zijn voor grootschalige implementatie.

Realistisch: Het project houdt rekening met haalbaarheid op technisch, financieel en praktisch vlak, met de actieve betrokkenheid van WoodInc en ShellterWood.

Tijdsgebonden: Het project heeft als doel om *bio-based* circulaire connectoren en gerelateerde bouwelementen tijdig op te leveren, zodat ze tijdig geïntegreerd kunnen worden in zowel de Bouwcampus als de Box 4.0.

Om de hoofddoelstelling te bereiken, worden de volgende deeldoelstellingen vastgesteld:

- ontwerpen en ontwikkelen van *bio-based* bouwelementen die voldoen aan circulaire principes en de geldende bouwvoorschriften;
- herontwerpen van de bestaande connectoren binnen het WoodInc-systeem om te voldoen aan de vereisten voor permanente constructies, met aandacht voor grotere belastingen;
- onderzoeken en implementeren van bouwtechnieken om te bouwen zonder stellingen, waardoor het bouwproces wordt versneld zonder esthetische compromissen, met behoud van duurzaamheid en een verhoogde veiligheid van het bouwproces;

- evaluatie van de economische levensvatbaarheid van *bio-based* circulaire woonunits in vergelijking met traditionele bouwmethoden;
- onderzoeken van hijs- en montagethoden van de CircuWallPanel van ShellterWood om een soepele en veilige montage te garanderen;
- ontwikkelen van richtlijnen en aanbevelingen voor de bredere bouwsector om circulaire, *bio-based* bouwmethoden te omarmen en te implementeren.

Door het bereiken van deze deeldoelstellingen wordt er gestreefd naar de ontwikkeling van *bio-based* circulaire connectoren die hun toepassing terugvinden in het project van de Bouwcampus en de integratie van de Box 4.0 richting de woningbouw. Deze integratie moet niet alleen duurzaam en milieuvriendelijk zijn, maar ook economisch levensvatbaar en snel te realiseren. Hierbij hebben de connectoren het potentieel om een bijdrage te leveren voor een duurzamere toekomst binnen de bouwsector.

1.4 Methode

Het onderzoek naar de herontwikkeling van de connectoren zal gebeuren aan de hand van verschillende werkpakketten.

Het eerste werkpakket is de onderzoeksfase. In deze fase wordt er een ruim onderzoek uitgevoerd naar eerder verschaft kennis door zowel intern onderzoek van WoodInc als externe toepassingen. De reeds opgedane kennis door studies verricht door WoodInc, of studiebureaus en onderzoeken aan de Universiteit UHasselt in opdracht van WoodInc, worden ter beschikking gesteld. Tijdens deze fase worden de interne documenten gedeeld via een gedeelde Google Drive en worden externe bronnen geraadpleegd via de database van UHasselt en KU Leuven. In deze fase worden problemen vastgesteld en wordt er gezocht naar mogelijke oplossingen. Dit werkpakket is dus een literatuuronderzoek met als resultaat een finale projectopzet en planning.

Tijdens het tweede werkpakket zal onderzoek worden gevoerd naar de haalbaarheid van deze oplossingen. Dit wordt besproken tijdens een bezoek aan het bedrijf zelf. Hierbij wordt bovendien het gehele bouwproces nogmaals in detail bekeken. Het derde werkpakket vloeit voort uit de eerste twee werkpakketten. Hierbij wordt er gerapporteerd over het onderzoek en de activiteiten door middel van een scriptie van de literatuurstudie en een voortgangsrapport met een presentatie.

Een laatste, maar zeer belangrijk werkpakket is het opstellen van de scriptie. Met deze scriptie zal het gehele onderzoek gedocumenteerd worden. Er zal een poster en abstract opgesteld worden en er volgt een presentatie van het onderzoek tijdens de verdediging van de masterproef.

Hoofdstuk 2

Literatuurstudie

2.1 Theoretisch kader

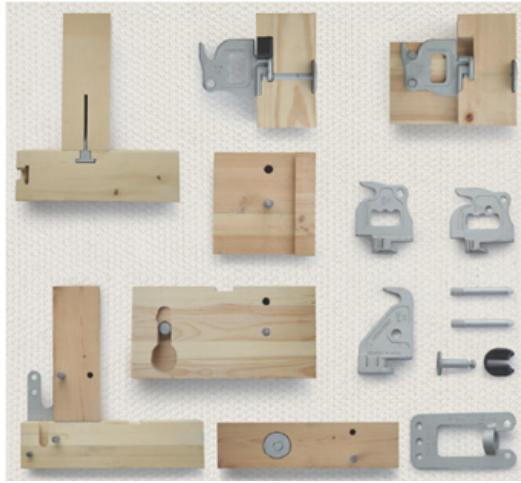
Voorafgaand aan de masterproef is een grondige literatuurstudie van essentieel belang. Deze studie vormt de fundering voor het ontwikkelen van innovatieve connectoren voor circulaire bouwconstructies. Deze studie zal zich in het bijzonder richten op de toepassing van Eurocodes. Deze normenreeks vormt de basis voor het ontwerp en de dimensionering van bouwconstructies in Europa. De studie zal zich specifiek richten op Eurocode 3 (voor staalconstructies) en Eurocode 5 (voor houtconstructies). Dit zorgt ervoor dat de te ontwikkelen connectoren voldoen aan de strenge eisen voor structurele integriteit, veiligheid en duurzaamheid. Daarbij zal specifieke aandacht uitgaan naar de metalen connectoren, bouten en houten wandpanelen. Deze componenten vormen de kern van de circulaire bouwconstructies die WoodInc ontwikkelt.

Eurocode 1 zal als leidraad fungeren bij het beschrijven van de belastingen die worden uitgeoefend op de connectoren in het bouwontwerp. Deze norm biedt een gestandaardiseerd kader voor het bepalen van de verschillende belastingen, zoals windbelasting en sneeuwlast, die essentieel zijn voor het ontwerpen van duurzame en veilige constructies.

Bovendien zal deze literatuurstudie gebruikmaken van interne documenten van het bedrijf WoodInc. Deze bronnen zullen inzicht verschaffen in de praktische toepassing van de Eurocodes in de context van bouwprojecten en dienen als waardevolle aanvulling op de theoretische aspecten die in de literatuur te vinden zijn. Door deze combinatie van externe normen en interne bedrijfsdocumenten wordt beoogd een grondig begrip te verkrijgen van de bestaande kennis en praktijken met betrekking tot hout- en metaalverbindingen, om zo een stevige basis te leggen voor de verdere ontwikkeling van de masterproef.

2.2 Bestaand concept

Dit onderzoek wordt uitgevoerd in samenwerking met het bedrijf WoodInc en hun partner ShelterWood. Het bedrijf biedt al geruime tijd een specifieke bouwmethode van houtskeletbouw aan met behulp van het WoodInc-systeem. Dit systeem bestaat uit een modulaire en snel implementeerbare houtstructuur, genaamd Structurez [1]. Figuur 2.1 geeft dit systeem weer.



Figuur 2.1: Toebehorende connectoren van het Structurez-systeem [1]

Door het gebruik van deze carbonstalen connectoren kan een volledig paal- en balkensysteem, bestaande uit gelamineerd CLT, snel worden opgebouwd om zo het skelet van een gebouw te realiseren. Bij dit systeem zijn bouten en schroeven overbodig, hetgeen dit systeem gebruiksvriendelijk maakt. Er wordt een volledig plan uitgewerkt en elk onderdeel krijgt een uniek label. Op deze manier is er weinig vakkennis vereist om de structuur op de werf te installeren [1].

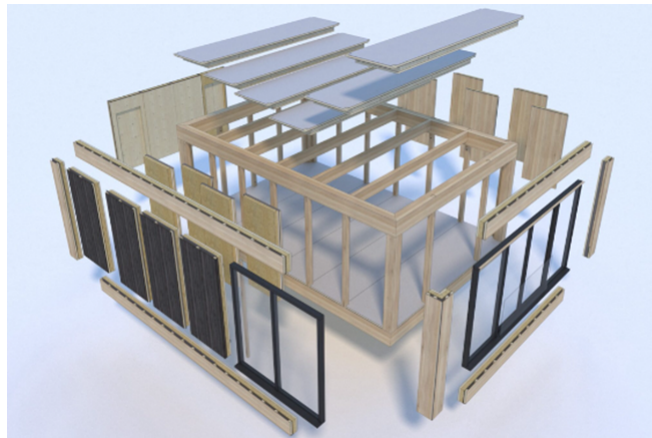
Aan deze houtskeletconstructie worden wandpanelen bevestigd door middel van connectoren. Voor de wandpanelen maakt WoodInc gebruik van hun eigen innovatie, de zogenaamde CircuWallPanels. Dit zijn houten wandelementen die worden verankerd op het geraamte van het gebouw. De panelen worden geplaatst op een vast patroon met een breedte van 1,20 of 1,25 meter. Figuur 2.2 geeft de opstelling van de wandpanelen op het Structurez-systeem weer [1].



Figuur 2.2: CircuWallPanels op paal- en balkstructuur [1]

De gevelpanelen, zoals afgebeeld op Figuur 2.2, zijn gemaakt van biogebaseerde materialen. Het plaatmateriaal is opgebouwd uit CLT-hout, waartussen houtvezelisolatie wordt aangebracht [2].

Het volledige systeem dient circulair te zijn, zodat de bouwmaterialen zeer eenvoudig gerecupe-reerd kunnen worden zonder bouwafval. Bedrijfspartner Shellterwood past dit WoodInc-systeem reeds toe bij de constructie van tijdelijke bouwunits in de evenementensector, de zogenaamde Box 4.0 (Figuur 2.3). Echter is het doel om dit systeem verder te ontwikkelen voor gebruik van permanente constructies [2].



Figuur 2.3: Overzicht onderdelen Box 4.0 [2]

Het huidige ontwerp van de connectoren tussen de CircuWallPanels en het Structurez-systeem vertoont tekortkomingen. Het ontwerp voldoet niet aan de gestelde normen en eisen voor circulair en ecologisch langdurig gebruik in de woningsector, of voor diverse soorten van permanente constructies. Zo worden de wandpanelen momenteel bevestigd op de Structurez-skeletstructuur via bout- en schroefverbindingen. In deze masterproef wordt onderzoek uitgevoerd naar het optimaliseren van het ontwerp voor een circulaire connector die WoodInc in staat stelt de wandpanelen op een snelle en eenvoudige manier te bevestigen binnen de Box 4.0 en het project van de Bouwcampus [2].

Dit onderzoek beoogt de ontwikkeling van een tool die de dimensionering van de connectoren mogelijk maakt, rekening houdend met de Europese normen en relevante belastingen. Deze tool zal ShellterWood en WoodInc toelaten om in de toekomst verschillende connectoren te berekenen die voldoen aan uiteenlopende eisen en belastingen.

Door deze tekortkomingen aan te pakken zullen WoodInc en ShellterWood in staat zijn om hun circulaire bouwtechniek succesvol toe te passen in de woningbouw en de sector van de permanente constructies. Dit zal niet alleen hun circulaire ambities bevorderen, het biedt tevens de kans om actief deel te nemen aan de groeiende markt voor duurzame woningbouw, waardoor waardevolle kansen kunnen worden benut.

2.3 Berekeningsmethodiek

2.3.1 Windbelastingen op de constructie

Hieronder wordt de procedure voor het analyseren van de meest cruciale belasting op de structuur, namelijk de windbelasting, op twee verschillende manieren beschreven, namelijk:

- de windbelasting volgens de Eurocode,
- de windbelasting volgens Wind Interactive.

Windbelasting volgens de Eurocode

In deze masterproef wordt de beschrijving van de windbelasting behandeld aan de hand van Eurocode 1, specifiek Eurocode 1991-1-4 voor windbelastingen.

De nadruk ligt op de afhankelijkheid van verschillende factoren, waaronder de ruwheid van het oppervlak, de hoogte boven het maaiveld, en de aanvangssnelheid van de wind. In gebieden met minimale obstakels, zoals dun bebouwde landelijke gebieden, zullen over het algemeen hogere windsnelheden optreden in vergelijking met dicht bebouwde gebieden. Hieronder wordt de berekeningsprocedure voor het bepalen van de windbelasting beschreven volgens Eurocode 1991-1-4 [3].

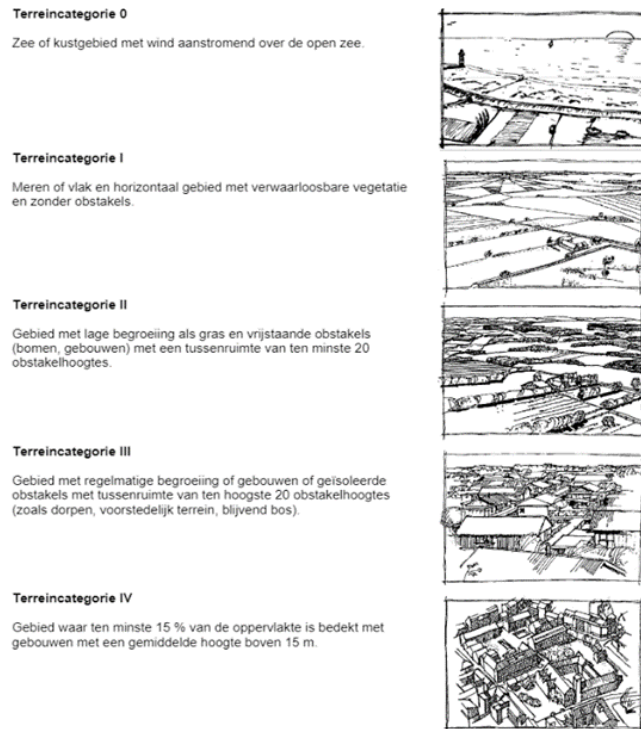
In de eerste stap wordt de basiswindsnelheid v_b bepaald. Dit is de karakteristieke windsnelheid op 10 meter boven het maaiveld [3].

$$v_b = c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{season}} \cdot v_{b,0} \quad (2.1)$$

Met:

- $v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$ (windsnelheid Vlaanderen) [4]
- $c_{\text{dir}} = 1,0$ (aanbevolen)
- $c_{\text{season}} = 1,0$ (aanbevolen)

In de volgende stap dient de terreincategorie achterhaald te worden. Deze zijn opgedeeld volgens de oppervlakteruwheid en worden opgedeeld in vijf categorieën die zichtbaar zijn in Figuur 2.4.



Figuur 2.4: Illustraties van de oppervlakteruwheid voor elke terreincategorie [3, p. 84]

De beschrijving en verduidelijking van iedere terreincategorie zijn zichtbaar in bovenstaande figuur.

A.d.h.v. de terreincategorieën kunnen de ruwheidslengte z_0 en de minimale hoogte z_{min} bepaald worden. Tabel 2.1 geeft de waardes van z_0 en z_{min} weer afhankelijk van de terreincategorie.

Tabel 2.1: Terreincategorieën en terreinparameters [3, p. 21]

Terreincategorie	Beschrijving	z_0 m	z_{min} m
0	Zee of kustgebied met wind aanstromend over open zee	0,003	1
I	Meren of vlak en horizontaal gebied met verwaarloosbare vegetatie en zonder obstakels	0,01	1
II	Gebied met lage begroeiing als gras en vrijstaande obstakels (bomen, gebouwen) met een tussenruimte van ten minste 20 obstakelhoogtes	0,05	2
III	Gebied met regelmatige begroeiing of gebouwen of vrijstaande obstakels met een tussenruimte van ten hoogste 20 obstakelhoogtes (zoals dorpen, voorstedelijk terrein, blijvend bos)	0,31	5
IV	Gebied waar ten minste 15 % van de oppervlakte is bedekt met gebouwen met een gemiddelde hoogte boven 15 m	1,0	10

Vervolgens worden vergelijkingen (2.2) - (2.5) gehanteerd voor de bepaling van de gemiddelde windsnelheid:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (2.2)$$

Met:

$$c_r(z) = \begin{cases} k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{voor } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ c_r(z_{\min}) & \text{voor } z \leq z_{\min} \end{cases} \quad \text{met } z_{\max} = 200 \text{ m} \quad (2.3)$$

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right) \quad (2.4)$$

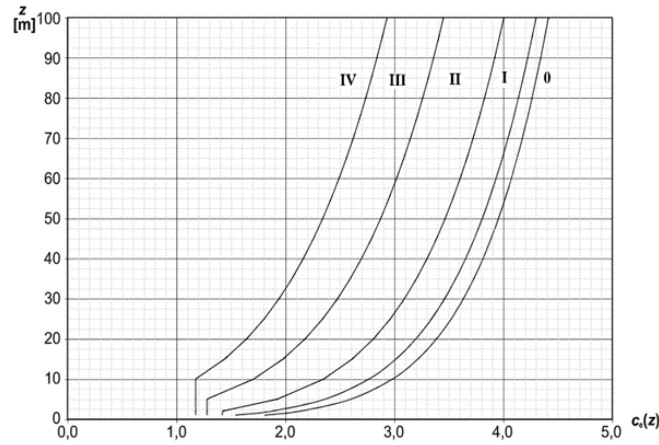
$$c_0(z) = 1 \quad (2.5)$$

Hierna wordt de extreme stuwdruk bepaald [3].

$$q_p(z) = (1 + 7 \cdot I_v(z)) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad (2.6)$$

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (2.7)$$

Hierbij wordt de blootstellingsfactor $c_e(z)$ bepaald door Figuur 2.5.



Figuur 2.5: Blootstellingsfactor [3, p. 24]

De basisstuwdruk wordt gegeven door onderstaande uitdrukking (2.8):

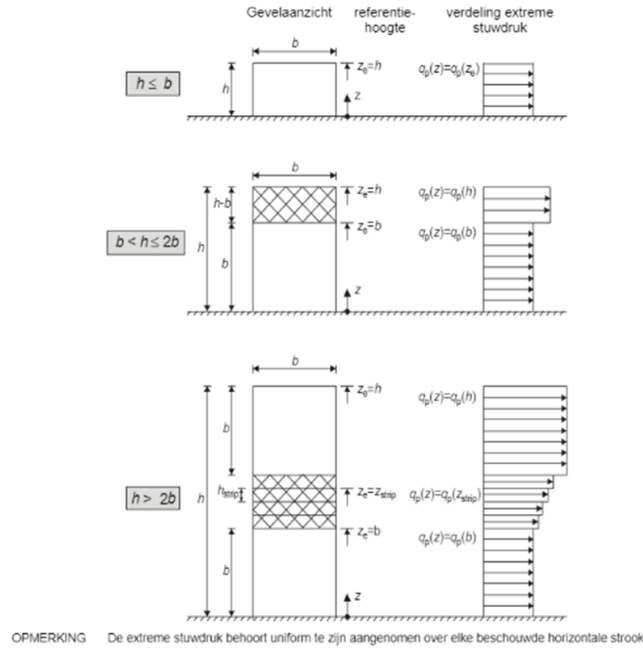
$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (2.8)$$

De aanbevolen luchtdensiteit ρ bedraagt 1,25 kg/m³ [3].

Tenslotte wordt de winddruk op de buitenzijde bepaald:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (2.9)$$

Hierbij wordt de referentiedrukhoogte z_e gebruikt [3]. Deze wordt bepaald volgens Figuur 2.6.



Figuur 2.6: Referentiehoogte z_e afhankelijk van de hoogte en breedte [3, p. 34].

Zoals weergegeven op bovenstaande figuur, is de verdeling van de extreme stuwdruk afhankelijk van de geometrie van het gebouw waarvoor de winddruk bepaald wordt. Opmerkelijk hierbij is dat de extreme stuwdruk toeneemt naarmate de hoogte van het object of gebouw stijgt [3].

Nog enkele opmerkingen en randvoorwaarden bij de berekeningen:

- aangenomen dat het een plat dak is;
- inwendige druk wordt verwaarloosd.

2.3.2 Windbelasting volgens Wind Interactive

Naast het gebruik van de traditionele handberekeningen, zoals in het voorgaande hoofdstuk werd uitgelegd, werd ook de tool Wind Interactive gebruikt.

Wind Interactive is een softwaremodule die gebruikt wordt voor het berekenen van windbelastingen op de gevels en het dak van rechthoekige gebouwen, conform de Eurocode 'Wind' en de nationale Belgische bijlage NBN EN 1991-1-4 ANB. De tool berekent drukwaarden voor verschillende soorten gebouwen, zoals gebouwen met platte daken, één dakschild of twee dakschilden. Het biedt niet alleen lokale drukwaarden voor elk punt van het gebouw, maar ook gemiddelde drukken langs elke zijde. De module kan rekening houden met openingen aan de zijden van het gebouw, of veilige waarden bieden als de openingen onbekend of variabel zijn. Deze softwaremodule is ontwikkeld binnen het kader van de Normen-Antenne Eurocodes van Buildwise.

2.4 Berekening van houtconstructies

Dit onderzoek focust zich op de verbindingswijze tussen houten onderdelen. Voor de berekening van de nodige sterkte van de houtconstructie wordt de procedure van Eurocode 5 toegepast [5].

2.4.1 Basisvariabelen, veiligheidsfactoren en klimaatinvloed

De rekenwaarde van een materiaaleigenschap, zoals de sterkte en stijfheidseigenschappen, worden berekend met behulp van de basisformule (2.10) [5]:

$$X_d = k_{\text{mod}} \cdot \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (2.10)$$

Hierbij geldt:

- k_{mod} : modificatiefactor,
- X_k : karakteristieke waarde,
- γ_M : partiële veiligheidsfactor.

Tabel 2.2 geeft de waarde voor de partiële veiligheidsfactoren weer.

Tabel 2.2: Aanbevolen partiële factoren γ_M voor materiaaleigenschappen en weerstanden [5, p. 30]

Fundamentele combinaties:	
Gezaagd hout	1.3
Gelijmd gelamineerd hout	1.25
LVL, multiplex, OSB	1.2
Spaanplaten	1.3
Vezelplaten, hard	1.3
Vezelplaten, medium	1.3
Vezelplaten, MDF	1.3
Vezelplaten, zacht	1.3
Verbindingen	1.3
Metalen hechtplaten	1.25
Bijzondere combinaties	1.0

Voor dit onderzoek wordt gebruikgemaakt van gelijmd gelamineerd hout. Volgens Tabel 2.2 bedraagt deze partiële veiligheidsfactor 1,25.

2.4.2 Bepaling stuiksterkte van de staal-op-houtverbinding

Het ontwerp van een enkelsnedige staal-op-houtverbinding wordt bepaald aan de hand van de waarde voor $F_{v,Rk}$, de karakteristieke sterkte per snede en per verbindingsmiddel. Dit is afhankelijk van het bezwijkmechanisme. Hierbij is de dikte van de plaat ook van belang. Volgens Eurocode 5 wordt de stalen plaat als dun of dik beschouwd in de volgende situatie [5]:

- dunne staalplaat: $t \leq 0,5 \cdot d$:

De karakteristieke sterkte $F_{v,Rk}$ voor een enkelsnede verbinding wordt dan:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} (a) & 0,4 \cdot f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \\ (b) & 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases} \quad (2.11)$$

Met:

- t = dikte staalplaat,
- d = diameter verbindingsmiddel.

- dikke staalplaat: $t \geq d$ met $(d_0 - d) \leq 0,1 \cdot d$:

$F_{v,Rk}$ voor een enkelsnede verbinding wordt dan:

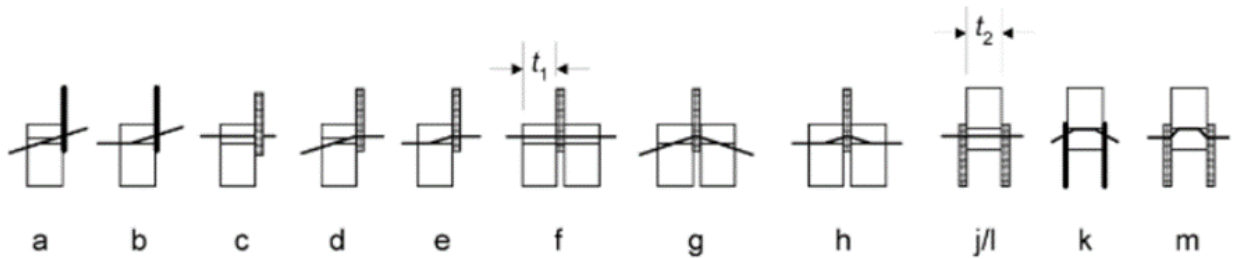
$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} (c) & f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \\ (d) & f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ (e) & 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases} \quad (2.12)$$

- Waarden die hier tussen vallen worden achterhaald via lineaire interpolatie.

Aan de hand van bovenstaande randvoorwaarden kan geconcludeerd worden dat er gewerkt wordt met een dunne staalplaat.

Eurocode 5 beschrijft dat de eerste term overeenkomt met de sterkte volgens de theorie van Johansen en dat de tweede term rekening houdt met het koordeffect. Dit koordeffect duidt op de ontwikkeling van axiale krachten in het verbindingsmiddel die bijdragen aan de sterkte van de verbinding. Hierbij mag de bijdrage door het koordeffect (tweede term) bij bouten niet groter zijn dan 25% van de eerste term [5].

Vergelijkingen (2.11) en (2.12) geven de berekeningsmethode weer per bezwijkmechanisme, aangeduid met letters a tot e. Figuur 2.7 geeft deze mechanismen weer.



Figuur 2.7: Bezwijkmechanismen voor een staal-op-houtverbinding [5, p. 73]

Hierbij geven figuren a tot en met e de bezwijkmechanismen weer bij een enkelsnede verbinding. Figuren f tot en met m geven deze weer voor een dubbelsnede verbinding [5].

De bezwijkmechanismen a tot e worden verder beschreven [5]:

- a) er is een rotatie van het verbindingsmiddel zonder plastische vervorming (geen vloeimoment) en de sterkte is door de stuiksterkte beperkt;
- b) er is een rotatie van het verbindingsmiddel met plastische vervorming en een lokale druk op het hout (stuiksterkte) ontwikkeld;
- c) er is geen rotatie van het verbindingsmiddel en de sterkte is door de stuiksterkte beperkt (uniforme drukspanningen op het hout). Dit soort van bezwijkmechanisme is alleen mogelijk met dikke staalplaten;
- d) er is een rotatie van het verbindingsmiddel met plastische vervorming en een lokale druk op het hout (stuiksterkte) ontwikkeld. Dikke staalplaten;
- e) het verbindingsmiddel gaat onder plastische vervormingen (vloeimoment) in twee dwarsdoorsneden en een lokale druk op het hout (stuiksterkte) ontwikkelen. Dikke staalplaten.

2.5 Staal-op-houtverbinding met bouten

Voor de bepaling van de juiste bouten van de connector worden de procedures volgens [6], [7] gevolgd.

Tabel 2.3 geeft de partiële veiligheidsfactoren weer voor diverse verbindingen [7].

Tabel 2.3: Partiële veiligheidsfactoren voor verbindingen [7, p. 18]

Weerstand van elementen en doorsneden	γ_{M0} , γ_{M1} en γ_{M2} zie EN 1993-1-1
Weerstand van bouten	γ_{M2}
Weerstand van klinknagels	
Weerstand van pennen	
Weerstand van lassen	
Stuikweerstand van platen	

Bij het ontwerp van de connector maken we gebruik van bouten, waardoor de veiligheidsfactor γ_{M2} voor gebouwen wordt toegepast. Deze factor is vastgesteld op 1,25 [6].

In het volgende stadium onderzoeken we de categorie van de verbinding, waarvoor Tabel 2.4 wordt gebruikt.

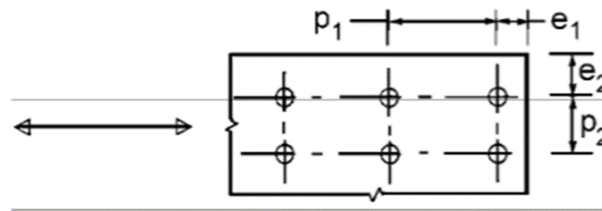
Tabel 2.4: Categorieën van boutverbindingen [7, p. 22]

categorie	criteria	instructies
op afschuiving belaste verbindingen		
A op stuik belast	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	- geen voorspanning vereist - boutklassen 4.6 tot en met 10.9 mogen zijn gebruikt
B glijvast in bruikbaarheidsgrenstoestand	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	- voorspanbouten van klasse 8.8 of 10.9 behoren te zijn gebruikt - voor de glijweerstand in de bruikbaarheidsgrenstoestand, zie 3.9
C glijvast in uiterste grenstoestand	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$	- voorspanbouten van klasse 8.8 of 10.9 behoren te zijn gebruikt - voor de glijweerstand in de uiterste grenstoestand, zie 3.9 - $N_{net,Rd}$ zie 3.4.1 (1) c).
op trek belaste verbindingen		
D niet-voorgespannen	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	- geen voorspanning vereist - boutklassen 4.6 tot en met 10.9 mogen zijn gebruikt. $B_{p,Rd}$ zie tabel 3.4
E voorgespannen	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	- voorspanbouten van klasse 8.8 of 10.9 behoren te zijn gebruikt - $B_{p,Rd}$ zie tabel 3.4

Bij het ontwerpen van de connector zullen de bouten zowel op stuik als op trek belast worden, zonder voorafgaande voorspanning. Conform de informatie in de bovenstaande tabel valt de verbinding binnen zowel categorie A als D. Dit impliceert dat er vier controlestappen nodig zijn:

- beoordeling van de afschuifweerstand per afschuifvlak $F_{v,Rd}$;
- evaluatie van de stuikweerstand $F_{b,Rd}$;
- analyse van de trekweerstand $F_{t,Rd}$;
- controle van de ponsweerstand $B_{p,Rd}$.

Vervolgens wordt de positie van de boutopening in de verbinding bekeken. Figuur 2.8 geeft de parameters voor de eind-, rand- en hart-op-hartafstand weer [7].



Figuur 2.8: Parameters eind-, rand- en hart-op-hartafstand [7, p. 24]

Met behulp van Tabel 2.5 wordt een controle uitgevoerd om te waarborgen dat de boutopening binnen de voorgeschreven minimale en maximale afmetingen valt.

Tabel 2.5: Minimale en maximale hart-op-hartafstanden, eind- en randafstanden [7, p. 23]

Afstanden en tussenafstanden	minimale maat	maximale maat ^{1),2),3)}		
		constructies vervaardigd van staalsoorten overeenkomstig EN 10025 met uitzondering van staalsoorten overeenkomstig EN 10025-5	constructies vervaardigd van staalsoorten overeenkomstig EN 10025-5	
		staal blootgesteld aan het buitenklimaat of aan andere corrosieve invloeden	staal niet blootgesteld aan het buitenklimaat of aan andere corrosieve invloeden	.. onbehandeld staal
eindafstand e_1	1,2 d_0	$4t + 40$ mm		grootste waarden van $8t$ of 125 mm
randafstand e_2	1,2 d_0	$4t + 40$ mm		grootste waarden van $8t$ of 125 mm
afstand e_3 in sleufgaten	1,5 d_0 ⁴⁾			
afstand e_4 in sleufgaten	1,5 d_0 ⁴⁾			
hart-op-hartafstand p_1	2,2 d_0	kleinste waarde van $14t$ of 200 mm	kleinste waarde van $14t$ of 200 mm	kleinste waarde van $14t_{min}$ of 175 mm
hart-op-hartafstand $p_{1,0}$		kleinste waarde van $14t$ of 200 mm		
hart-op-hartafstand $p_{1,i}$		kleinste waarde van $28t$ of 400 mm		
hart-op-hartafstand p_2 ⁵⁾	2,4 d_0	kleinste waarde van $14t$ of 200 mm	kleinste waarde van $14t$ of 200 mm	kleinste waarde van $14t_{min}$ of 175 mm

Vervolgens toont Tabel 2.6 verschillende bouten met hun bijhorende bouteigenschappen. Daarna kan behulp van Tabel 2.7 de vloeigrens en treksterkte worden bepaald, afhankelijk van de toegepaste boutklasse.

Tabel 2.6: Boutafmetingen met eigenschappen [8]

Afmetingen	A_s (mm ²)	bout Φ	d_m
M6	20,1	6	11,5
M8	36,6	8	15
M10	58	10	19,6
M12	84,2	12	21,9
M16	157	16	27,7
M20	245	20	34,6
M24	352	24	41,6
M27	459	27	47,3
M30	561	30	53,1
M36	817	36	63,5

Tabel 2.7: Boutklasse met de bijhorende vloeigrens en treksterkte van stalen bouten [7, p. 20]

Symbol	Beschrijving	Boutklasse						
		4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (MPa)	vloeigrens	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (MPa)	treksterkte	400	400	500	500	600	800	1000

Uit Tabel 2.7 blijkt dat bij een boutklasse 6.8 de vloeigrens 480 N/mm^2 bedraagt. Deze waarde wordt berekend door de twee cijfers van de boutklasse (6 en 8) met elkaar te vermenigvuldigen en het resultaat met 10 te vermenigvuldigen. De treksterkte van 600 N/mm^2 wordt berekend door het eerste cijfer van de boutklasse (6) te vermenigvuldigen met 100 [7].

Na deze stappen wordt het weerstandsvermogen onderzocht. De afschuifweerstand per afschuifvlak en de stuikweerstand worden geëvalueerd aan de hand van Tabel 2.8, die een overzicht biedt van de verschillende bezwijkvormen.

Tabel 2.8: Rekenwaarde van de weerstand voor individuele verbindingsmiddelen, die zijn onderworpen aan afschuiving en/of trek [7, p. 27]

bezwijkvorm	bouten	klinknagels
afschuifweerstand per afschuifvlak	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ - wanneer het afschuifvlak door de draad van de bout gaat (A is dan de spanningsdoorsnede A, van de bout): * voor boutklassen 4.6, 5.6 en 8.8: $\alpha_v = 0,6$ * voor boutklassen 4.8, 5.8, 6.8 en 10.9: $\alpha_v = 0,5$ - wanneer het afschuifvlak door de schacht (zonder draad) van de bout gaat (A is dan de brutodoorsnede van de bout: $\alpha = 0,6$)	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
stuikweerstand ^{1),2),3)}	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{ub} d t}{\gamma_{M2}}$ waarin α_b de kleinste van volgende waarden: α_d ; $\frac{f_{ub}}{f_u}$ of 1,0; in de richting van de krachtoverdracht: - voor eindbouten: $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$; voor binnenste bouten: $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ loodrecht op de richting van de krachtoverdracht: - voor randbouten: k_1 is de kleinste waarden van $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ of 2,5 - voor binnenste bouten: k_1 is de kleinste waarden van $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ of 2,5	
trekweerstand ²⁾	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$ waarin $k_2 = 0,63$ voor bouten met verzonken kop, anders $k_2 = 0,9$	$F_{t,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
ponsweerstand	$B_{p,Rd} = 0,6 \pi d_m t_p \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$	geen toetsing vereist
gecombineerde afschuiving	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0$	

In de bovenstaande tabel worden de toegepaste vergelijking weergegeven, die nodig zijn voor de berekeningen van de weerstanden van de verbinding [6]. Er wordt aangenomen dat bouten zonder verzonken kop worden gebruikt, wat resulteert in een factor k_2 gelijk aan 0,9 [6]. De factor A_s geeft de spanningsdoorsnede van de bout weer [8].

Ten slotte wordt ook gecontroleerd of de axiale sterkte van de bouten voldoet aan de belasting. De axiale sterkte $F_{ax,Rk}$ is de minimumwaarde van de trekkracht van de bout en de sterkte van de staalplaat. Deze kracht zal op de bouten optreden door het rotatiemoment van het wandpaneel ter hoogte van de bovenste connectoren als gevolg van het eigengewicht. Ook zal er axiale kracht op de bouten staan door de zuigkracht van de windbelasting [6].

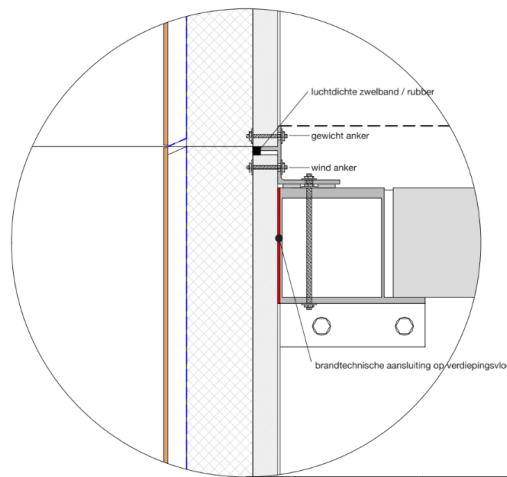
Hoofdstuk 3

Methode ontwerp connector

In dit hoofdstuk doorlopen we het gedetailleerde proces van de connectorontwikkeling, waarbij elke stap gestructureerd wordt toegelicht en onderbouwd met nauwkeurige berekeningen.

3.1 Positionering van de connector

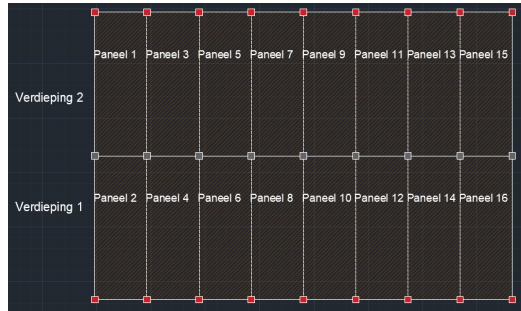
In de beginfase moet de locatie van de verbinding worden geanalyseerd en het benodigde aantal bouten voor de montage van de CircuWallPanel met de connector worden bepaald. Figuur 3.1 biedt een gedetailleerde weergave van deze verbinding.



Figuur 3.1: Detaillering connectie

De bovenstaande afbeelding toont de structuur van de verbinding. Deze details zijn gedeeld via e-mail en een gedeelde Google Drive, samen met andere documenten. De feitelijke koppeling tussen de wandpanelen en de connector gebeurt door middel van boutverbindingen. Daarnaast is de grondplaat van de connector bevestigd aan een stalen balk, een THQ-ligger, die op zijn beurt verbonden is met de kolommen van het gebouw.

Om een beter beeld te krijgen van de positionering van de CircuWallPanels, is een vooraanzicht in AutoCAD getekend. Dit vooraanzicht wordt weergegeven in Figuur 3.2.



Figuur 3.2: Plaatsing CircuWallPanels met connectoren

De bovenstaande figuur toont twee verdiepingen, elk met een wandpaneel van 3300 mm hoog en 1200 mm breed. Met de gegeven afstand tussen de kolommen in het gebouw is het mogelijk om zes panelen te plaatsen tussen telkens twee opeenvolgende kolommen. De connectoren zijn hierbij aangeduid met rode en grijze kleur en bevinden zich in de hoeken van ieder wandpaneel. Het is belangrijk op te merken dat de twee buitenste wandpanelen zich in het midden van de kolom bevinden. Bovendien worden de connectoren reeds gemonteerd op iedere verdiepingvloer alvorens de panelen worden bevestigd.

3.2 Dimensionering connectie

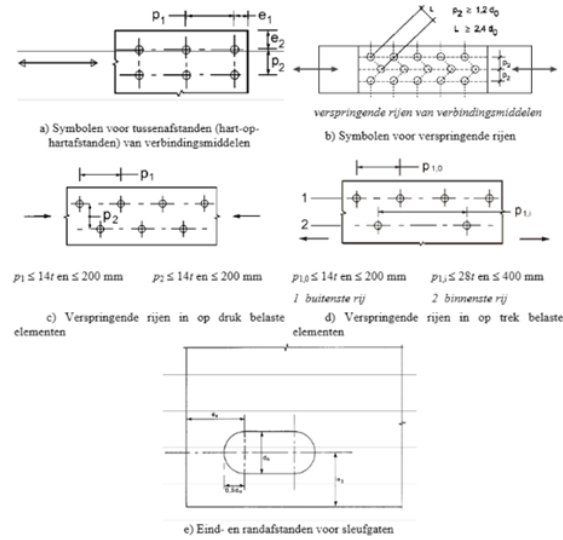
Voorafgaand aan het evalueren van de weerstanden van de verbinding tussen de stalen connector en de houten CircuWallPanels, dient eerst het ontwerp van de connector te worden uitgewerkt. Voor de volledige berekening wordt er verwezen naar Bijlage A.

Uit de bronnenstudie werd reeds bepaald dat de veiligheidsfactor voor boutverbindingen γ_{M2} gelijk is aan 1,25. Verder wordt de verticaal aangrijpende belasting op de connector beschouwd als een permanente belasting. Hierbij wordt de connector op sterkte en maximale spanning uitgerekend in uiterste grenstoestand UGT-B. Waarbij de permanente belasting vermenigvuldigd wordt met factor 1,35 [9].

3.2.1 Positioneren van de sleufgaten

Voordat de afmetingen van de connector kunnen worden bepaald, moeten de posities van de sleufgaten worden vastgesteld. Deze moeten correct worden geplaatst om aan de gestelde eisen en normen te voldoen. Het is belangrijk om een consistente diameter voor de sleufgaten te hanteren. Volgens [8] is de minimale diameter $d_{0,plaat}$ 9 mm, maar er wordt gekozen voor een opening van 12 mm om meer marge te bieden bij het bevestigen van de bouten. Het vastzetten van de bouten gebeurt met behulp van rondellen, waardoor de grotere opening mogelijk is zonder de bevestiging te compromitteren. Vervolgens kunnen via [7] de minimale en maximale hart-op-hartafstanden, evenals de eind- en randafstanden, worden bepaald. Tabel 2.5 geeft deze minimale en maximale afmetingen weer.

Om deze afstanden te verduidelijken, wordt gebruikgemaakt van Figuur 3.3.

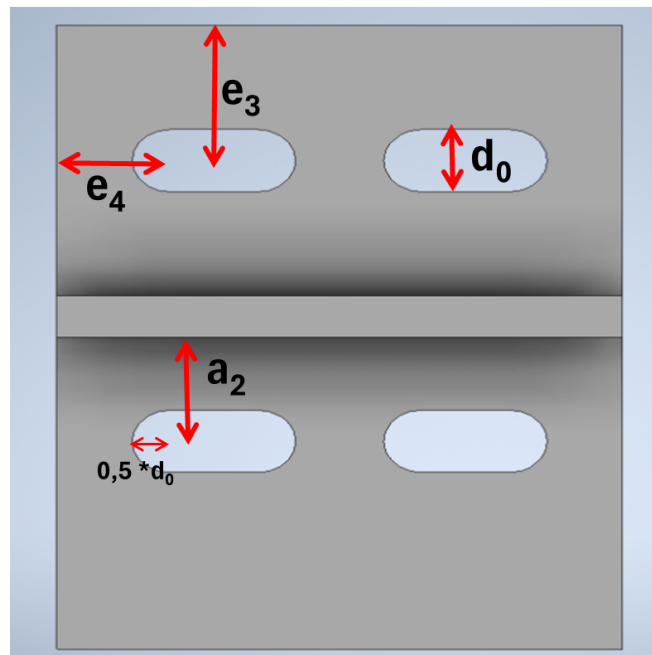


Figuur 3.3: Symbolen voor eind- en randafstanden en hart-op-hartafstanden van verbindingsmiddelen [7, p. 24]

Bovenstaande figuur illustreert duidelijk de betekenis van elk symbool. Door Tabel 2.5 en Figuur 3.3 te combineren, kunnen de volgende vergelijkingen voor de afmetingen worden afgeleid:

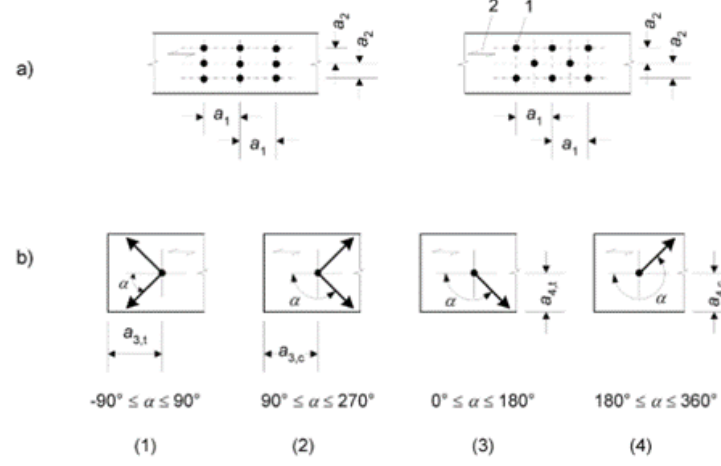
- minimale afstand in sleufgaten $e_3 = 1,5 \cdot d_0 = 1,5 \cdot 12 \text{ mm} = 18 \text{ mm}$,
- minimale afstand in sleufgaten $e_4 = 1,5 \cdot d_0 = 1,5 \cdot 12 \text{ mm} = 18 \text{ mm}$,
- minimale hart-op-hartafstand $p_1 = 2,2 \cdot d_0 = 2,2 \cdot 12 \text{ mm} = 26,4 \text{ mm}$,
- maximale hart-op-hartafstand $p_1 = \min(14 \cdot t, 200 \text{ mm}) = \min(112 \text{ mm}, 200 \text{ mm}) = 112 \text{ mm}$,
- randafstand voor sleufgaten $= 0,5 \cdot d_0 = 0,5 \cdot 12 \text{ mm} = 6 \text{ mm}$.

Figuur 3.4 geeft de parameters op de juiste locatie aan.



Figuur 3.4: Aanduiding parameters connector

Op de bovenstaande figuur zijn de vereiste parameters duidelijk zichtbaar. Het is cruciaal om op te merken dat parameter a_2 nog niet bekend is. Het is van belang om deze te bepalen, omdat dit de onbelaste eindafstand van de CircuWallPanel betreft. Het hout heeft hier namelijk een beperkte hoeveelheid materiaal, waardoor deze afstand voldoende groot moet zijn om te voorkomen dat het hout zal falen. Om deze parameter te achterhalen, moet de Eurocode voor hout worden toegepast [5]. Uit deze norm komt Figuur 3.5 en Tabel 3.1 voort.



Figuur 3.5: Tussen-, eind- en randafstanden a) tussenaafstand evenwijdig aan de vezelrichting in een rij en loodrecht op de vezelrichting tussen rijen, b) rand- en eindafstanden [5, p.74]

Tabel 3.1: Minimale tussen-, eind- en randafstanden voor bouten [5, p.81]

Tussen-, eind- randafstanden (zie figuur 3.5)	Hoek	Minimale tussen-, eind- en randafstanden
a_1 (evenwijdig aan de vezelrichting)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 2 \cos \alpha)d$
a_2 (loodrecht op de vezelrichting)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$
$a_{3,t}$ (belast eind)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7d; 80 \text{ mm})$
$a_{3,c}$ (onbelast eind)	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	$\max(a_{3,t}; \sin \alpha d; 3d)$
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	$3d$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$\max(a_{3,t}; \sin \alpha d; 3d)$
$a_{4,l}$ (belaste rand)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max((2 + 2 \sin \alpha)d; 3d)$
$a_{4,c}$ (onbelaste rand)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

Door de bovenstaande figuur en tabel te combineren, resulteert dit in een minimale eindafstand gelijk aan 3 keer de diameter van de bout. Dit leidt tot vergelijking (3.1) voor de minimale eindafstand, zoals aangegeven in Figuur 3.4:

$$a_2 = 3 \cdot d = 3 \cdot 8 \text{ mm} = 24 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Een bijkomende afstand die moet worden bepaald, is de plooihoek. Aangezien de connector wordt geproduceerd door een stalen plaat te plooien, ontstaat er geen hoek van 90° . Om deze plooihoek te bepalen, wordt gebruikgemaakt van richtlijnen volgens [10]. Tabel 3.2 en 3.3 geven de richtlijnen weer voor zowel de inwendige radius (haaks) als de scherpe radius. Met andere woorden, de minimale plooihoek zowel uitwendig (R_1) als inwendig (R_2).

Tabel 3.2: Inwendige radius haaks [10]

Materiaaldikte	Staal	RVS	Aluminium
0,8 mm	1,39	1,56	-
1 mm	1,40	1,58	1,27
1,25 mm	1,42	1,57	-
1,5 mm	1,65	1,9	1,47
2 mm	1,88	2,22	1,67
2,5 mm	2,41	2,94	2,11
3 mm	2,75	3,75	2,50
4 mm	3,02	4,48	3,3
5 mm	3,62	7,82	4,07
6 mm	4,62	11,91	5,34
8 mm	8	11,64	8,12
10 mm*	8	15	-
12 mm*	7,83	-	-

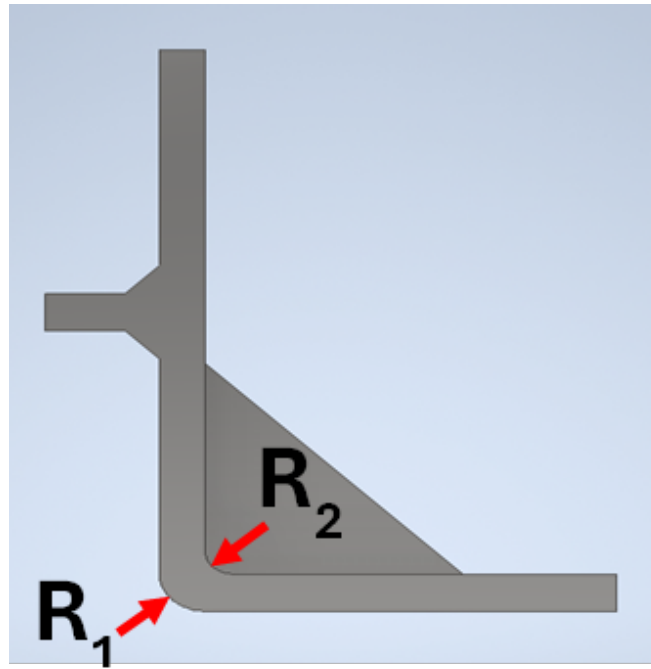
Tabel 3.3: Inwendige radius scherp [10]

Materiaaldikte	Staal	RVS	Aluminium
0,8 mm	1,39	1,56	-
1 mm	1,40	1,58	1,27
1,25 mm	1,42	1,57	-
1,5 mm	1,65	1,9	1,47
2 mm	1,88	2,22	1,67
2,5 mm	2,41	2,94	2,11
3 mm	2,75	3,75	2,50
4 mm	3,02	4,48	3,3
5 mm	3,62	7,82	4,07
6 mm	4,62	11,91	5,34
8 mm	8	11,64	8,12
10 mm*	8	15	-
12 mm*	7,83	-	-

Bovenstaande tabellen geven de volgende waarden voor de plooioeken weer:

- $R_1 = 8 \text{ mm}$,
- $R_2 = 4,74 \text{ mm}$.

Figuur 3.6 illustreert de aanduiding van R_1 en R_2 .



Figuur 3.6: Plooihoeken R_1 en R_2

Hiermee zijn alle dimensies van de connector bepaald en kan er nu met deze gegevens worden gerekend.

3.2.2 Selectie van de randvoorwaarden

In de eerste fase van dit onderzoek moest een definitief ontwerp worden gekozen voor de toepassing van de connector. Aanvankelijk waren er verschillende voorontwerpen beschikbaar. Na overleg met de promotoren werd besloten om een stalen L-profiel te gebruiken, met een initiële afmeting van 150 mm x 150 mm. Dit ontwerp moest verder geoptimaliseerd worden, waarbij het essentieel was om de normen en vereisten voor het ontwerp in acht te nemen. De berekeningen zullen voornamelijk gebaseerd zijn op de volgende Eurocodes NBN EN 1993-1-1 en NBN EN 1993-1-8.

Voordat de berekeningen konden plaatsvinden, moesten de afmetingen van de connector vastgesteld worden. Na een grondige analyse van het initiële voorstel (150 mm x 150 mm) werd geconcludeerd dat deze dimensies ruimschoots voldeden aan de vereisten voor rand- en eindafstanden. In overleg met de promotoren is daarom besloten de berekeningen uit te voeren met een stalen L-profiel waarvan de dimensies reeds gebaseerd zijn op de berekeningen van deel 3.2.1.

Door deze berekeningen samen te voegen en te vergelijken met Figuur 3.4 kunnen de voorwaarden achterhaald worden.

Om deze minimale afmetingen beter te begrijpen worden ze in drie delen opgedeeld:

- breedte van de connector,
- hoogte van de verticale flens,
- lengte van de horizontale flens.

Allereerst wordt de breedte geanalyseerd. Zoals zichtbaar is in Figuur 3.4, moet de breedte minimaal gelijk zijn aan $2 \cdot e_4 + 2 \cdot l_{sleufgat} + p_1$. Het is cruciaal om in gedachten te houden dat de parameters gedeeltelijk hetzelfde gebied innemen, wat leidt tot vergelijking (3.2).

$$\begin{aligned}
 b_{connector} &= 2 \cdot (e_4 - r_{sleufgat}) + 2 \cdot l_{sleufgat} + \left(p_1 - 2 \cdot \frac{l_{sleufgat}}{2} \right) \\
 &= 2 \cdot (18 \text{ mm} - 6 \text{ mm}) + 2 \cdot 26 \text{ mm} + \left(26.4 \text{ mm} - 2 \cdot \frac{26 \text{ mm}}{2} \right) \\
 &= 2 \cdot 12 \text{ mm} + 2 \cdot 26 \text{ mm} + (26.4 \text{ mm} - 26 \text{ mm}) \\
 &= 24 \text{ mm} + 52 \text{ mm} + 0.4 \text{ mm} \\
 &= 76.4 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Echter, hierbij wordt zeer weinig ruimte aangenomen tussen de twee sleufgaten. Om meer marge te hebben, wordt deze afmeting afgerond naar 100 mm. Deze 100 mm zorgt er ook voor dat er gebruik wordt gemaakt van een standaardformaat, wat gunstig is voor de beperking van het afval.

Vervolgens moet de hoogte van de verticale flens worden bepaald. Dit gebeurt op basis van vergelijking (3.3):

$$\begin{aligned}
 h_{\text{verticale flens}} &= 2 \cdot e_3 + 2 \cdot a_2 \\
 &= 2 \cdot 18 \text{ mm} + 2 \cdot 24 \text{ mm} \\
 &= 36 \text{ mm} + 48 \text{ mm} \\
 &= 84 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Voor de hoogte van de verticale flens dient ook een marge in acht genomen te worden. Volgens vergelijking (3.3) zou een hoogte van 100 mm voor de verticale flens voldoende moeten zijn.

Ten slotte moet de minimale lengte van de horizontale flens bepaald worden volgens vergelijking (3.4).

$$\begin{aligned}
 l_{\text{horizontale flens}} &= l_{sleufgat} + 2 \cdot (e_4 - r_{sleufgat}) \\
 &= 26 \text{ mm} + 2 \cdot (18 \text{ mm} - 6 \text{ mm}) \\
 &= 26 \text{ mm} + 24 \text{ mm} \\
 &= 50 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Bij het vaststellen van de minimale afmeting is het belangrijk om herhaaldelijk een marge toe te voegen. Om deze reden is besloten om een afmeting van 60 mm toe te passen.

Niettemin, na overleg met de promotoren en verder onderzoek, is besloten om een meer voorkomend L-profiel te gebruiken. Dit L-profiel heeft de volgende dimensies:

- hoogte verticale flens = 120 mm,
- lengte horizontale flens = 80 mm,
- dikte connector = 8 mm.

Deze dimensies overschrijden ruimschoots de waarden die zijn verkregen uit vergelijkingen (3.3) en (3.4). De breedte van 100 mm kan nog steeds zonder enig probleem worden toegepast. Met dit model als basis kon het onderzoek daadwerkelijk van start gaan.

3.2.3 Selectie van bouten

Het is van essentieel belang om te bepalen welke bouten worden gebruikt om de wandpanelen te bevestigen, aangezien dit invloed heeft op verdere dimensionering van andere componenten. Tabel 2.6 geeft een overzicht van verschillende bouten met bijhorende bouteigenschappen.

Op verzoek van het bedrijf WoodInc is besloten om een standaard boutafmeting te gebruiken, waarbij de voorkeur uitging naar een nominale boutdiameter van M8. Deze M8-bout is beschikbaar in verschillende klassen, variërend van M8 4.6 tot en met 10.9. Om te voldoen aan de wens voor een veelvoorkomende bout, is uiteindelijk gekozen voor een M8 8.8 bout.

Nadat de boutklasse is gekozen, moesten de eigenschappen ervan worden vastgesteld. Met behulp van Tabel 2.7 kunnen de vloeigrens en treksterkte voor de gekozen bout worden bepaald.

De eigenschappen van de gekozen bout zijn als volgt:

- de vloeigrens $f_{yb} = 640 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$,
- de treksterkte $f_{ub} = 800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.

3.2.4 Selectie materiaal connector

Om het type staal te bepalen van de connector, wordt Tabel 3.4 geraadpleegd. Deze tabel bevat verschillende metaalsoorten met hun belangrijkste eigenschappen.

Tabel 3.4: Mechanische eigenschappen bij kamertemperatuur voor platte en lange producten van staalsoorten en staalkwaliteiten [11, p. 24]

Aanduiding		Minimale vloeigrens Re (MPa)									Treksterkte Rm (MPa)				
Volgens EN 10027-1 en CR 10260	Volgens EN 10027-2	Nominale dikte (mm)									Nominale dikte (mm)				
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	> 250 ≤ 400	< 3	≥ 3 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250	> 250 ≤ 400
S235JR	1.0038	235	225	215	215	215	195	185	175	-	360-510	360-510	350-500	340-490	-
S235J0	1.0114	235	225	215	215	215	195	185	175	-	360-510	360-510	350-500	340-490	-
S235J2	1.0117	235	225	215	215	215	195	185	175	165	360-510	360-510	350-500	340-490	330 tot 480
S275JR	1.0044	275	265	255	245	235	225	215	205	-	430-580	410-560	400-540	380-540	-
S275J0	1.0143	275	265	255	245	235	225	215	205	-	430-580	410-560	400-540	380-540	-
S275J2	1.0145	275	265	255	245	235	225	215	205	195	430-580	410-560	400-540	380-540	380 tot 540
S355JR	1.0045	355	345	335	325	315	295	285	275	-	510-680	470-630	450-600	450-600	-
S355J0	1.0553	355	345	335	325	315	295	285	275	-	510-680	470-630	450-600	450-600	-
S355J2	1.0045	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510-680	470-630	450-600	450-600	450-600
S355K2	1.0045	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510-680	470-630	450-600	450-600	450-600
S450J0	1.0590	450	430	410	390	380	380	-	-	-	-	550-720	530-700	-	-

In Tabel 3.4 worden zowel de minimale vloeigrens als de treksterkte bepaald op basis van de dikte van het gekozen materiaal. Voor deze toepassing wordt staalsoort S235JR gebruikt. Dit materiaal is warmgewalst ongelegeerd constructiestaal, variërend van S235JR tot en met S355J2G volgens EN 10025-2. Het wordt veel gebruikt in de productie van onderdelen voor transportmiddelen, gebouwen, bruggen en andere staalconstructies. S235JR heeft een relatief laag koolstofgehalte en biedt toch aanzienlijke treksterkte en rek. Het is goed bewerkbaar en lasbaar, maar kan gevoelig zijn voor corrosie. De aanduiding 'JR' in S235JR geeft de brosheid van het metaal aan, zoals vastgesteld tijdens de Charpy- of kerfslagtest. 'JR' betekent dat het materiaal breekt bij een energie van 27 joule (J) bij kamertemperatuur ($20^\circ\text{C} = \text{R}$) [12].

Bij staalsoort S235JR zal de vloeigrens bij een plaatdikte kleiner dan 16 mm gelijk zijn aan 235 MPa. De rekenwaarde van de vloeigrens wordt bepaald aan de hand van vergelijking 3.5.

$$f_{yd} = \frac{R_e}{1,15} = \frac{235 \text{ MPa}}{1,15} = 204 \text{ MPa of } \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (3.5)$$

Met de waarde voor de ontwerpwaarde van de staalspanning f_{yd} en de stijfheidsmodulus E gelijk aan 210 GPa, kan de vloeirek volgens vergelijking (3.6) worden bepaald .

$$e_{vl} = \frac{f_{yd}}{E} = \frac{204 \text{ MPa}}{210 \text{ GPa}} = 0,97 \text{ ‰} \quad (3.6)$$

Op soortgelijke wijze kan de rekenwaarde van de treksterkte vastgesteld worden. De treksterkte bij een plaatdikte tussen de 3 en 100 mm is 360 MPa tot 510 MPa.

3.2.5 Categorieën van boutverbindingen

De boutverbindingen moeten voldoende weerstand bieden tegen verschillende vormen van bezwijken. De vereisten waaraan de bouten moeten voldoen, zijn afgeleid uit Tabel 2.4.

Voor het gekozen ontwerp zullen de bouten zowel op afschuiving als op trek worden belast. Bij het analyseren van de afschuiving moet categorie A worden toegepast, omdat deze verbinding wordt belast op stuik. Hierdoor moeten zowel de afschuifweerstand $F_{v,Rd}$ als de stuikweerstand $F_{b,Rd}$ worden gecontroleerd.

Zoals vermeld in de bovenstaande alinea zullen de boutverbindingen ook worden belast op trek, waardoor de verbinding onder categorie D valt, specifiek: Niet-voorgespannen. Hierdoor moeten ook de trekweerstand $F_{t,Rd}$ en de ponsweerstand $B_{p,Rd}$ worden gecontroleerd [7].

Tabel 2.4 geeft ook de criteria en instructies voor de verschillende categorieën van boutverbindingen weer. Aangezien deze boutverbinding zowel onder categorie A als categorie D valt, leidt dit tot de volgende criteria:

Categorie A

- $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$,
- $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$,

Categorie D

- $F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$,
- $F_{t,Ed} \leq B_{b,Rd}$.

3.3 Optredende belastingen

Om de analyse voort te zetten, moeten de meest kritieke belastingen worden geïdentificeerd die zullen optreden op de connector. Op basis van deze belastingen kunnen vervolgens de juiste controles worden uitgevoerd om te verzekeren dat de connector voldoet aan de vereiste normen.

Belangrijk is op te merken dat deze berekeningen worden uitgevoerd in de meest kritieke situatie, waarbij wordt aangenomen dat de twee bovenste connectoren zullen falen. Hierdoor zal het gevelpaneel volledig steunen op de onderste twee connectoren en slechts nog worden bevestigd met twee bouten.

3.3.1 Horizontale kracht veroorzaakt door de wind

Voordat de controles kunnen beginnen, moet eerst de belasting bepaald worden waaraan de CircuWallPanel zal worden blootgesteld. De belangrijkste belasting voor de CircuWallPanel zal naar verwachting afkomstig zijn van de wind. Daarom zal de windkracht de dominante belasting vormen. Het is essentieel om de omvang van deze belasting te bepalen, aangezien dit nodig is voor het dimensioneren, waarbij rekening moet worden gehouden met de kracht.

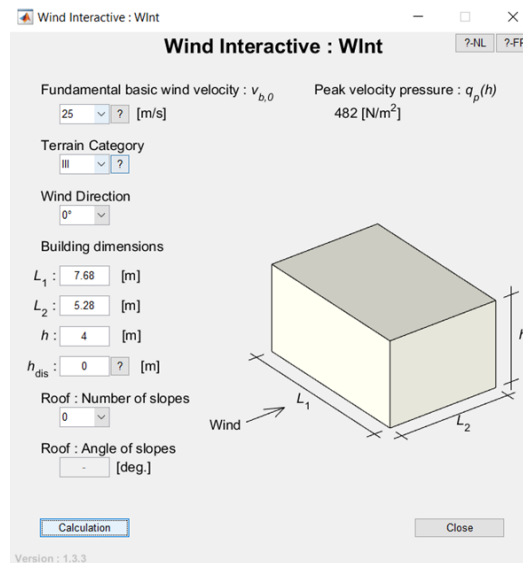
Voor het berekenen van deze waarde wordt een softwaretool gebruikt, genaamd "Wind Interactive", kortweg "WInt" [4]. De Wind Interactive-module is een geavanceerd instrument dat specifiek is ontworpen door Buildwise voor de analyse van windbelastingen op de gevels en het dak van rechthoekige gebouwen. Hierbij volgt het programma steeds de opgelegde eisen van de Eurocode [3]. Deze software biedt de mogelijkheid om gedetailleerde drukberekeningen uit te voeren voor verschillende typen gebouwen, zoals gebouwen met platte daken en met één of twee dakschilden. Het programma geeft een overzicht van de verschillende belaste zones en hun belastingniveaus. Door gebruik te maken van deze module kan men een diepgaand inzicht krijgen in de windbelasting waaraan gebouwen worden blootgesteld, wat van onschatbare waarde is voor het ontwerp en de veiligheid van constructies te garanderen [4].

Hoewel het programma een zeer gebruiksvriendelijke interface heeft, is het belangrijk om te begrijpen dat de software enkele aannames maakt om zijn verdere berekeningen uit te voeren. Deze aannames zijn als volgt:

- de windrichtingsfactor $c_{dir} = 1$,
- de structureelfactor $c_s c_d = 1$,
- de seizoensfactor $c_{season} = 1$,
- de orografiefactor $c_0(z) = 1$.

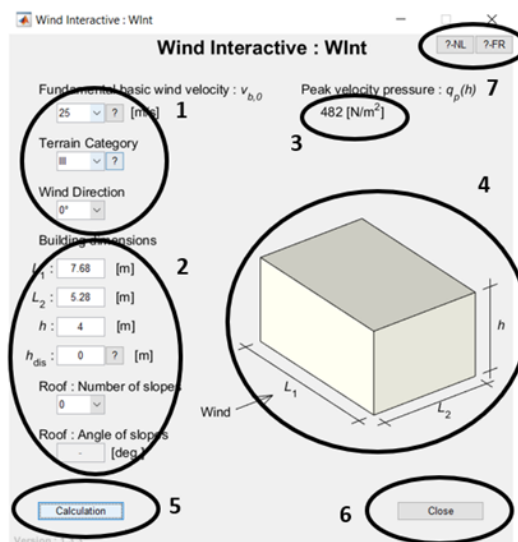
Met deze aannames in het achterhoofd kunnen de berekeningen van start gaan. Volgende delen zijn volledig gebaseerd op [4].

Toepassingsmogelijkheden: Wanneer de applicatie wordt geopend, komt men terecht in het hoofdscherm. Dit hoofdscherm is geïllustreerd op Figuur 3.7.



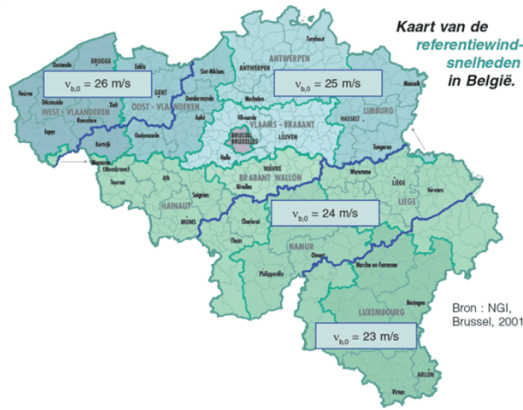
Figuur 3.7: Beginscherm

Om de indeling van dit menu te verduidelijken, wordt het opgedeeld in zeven verschillende zones. Elke zone biedt de mogelijkheid om een verschillend onderdeel te definiëren, zodat het juiste resultaat wordt verkregen. Deze zones worden geïllustreerd in Figuur 3.8.



Figuur 3.8: Controletools in zones

Zone 1: De eerste stap is de omgeving definiëren, dit wordt volledig uitgewerkt in de eerste zone. Het eerste vakje geeft de basiswindsnelheid weer, deze ligt in België tussen 23 en 26 m/s . Deze waarde wordt bepaald aan de hand van het schema, weergegeven in Figuur 3.9.



Figuur 3.9: Referentiewindsnelheden [13]

Op bovenstaande afbeelding is zichtbaar dat voor de provincie Limburg het volgende geldt: $v_{b,0} = 25$ m/s. Het volgende punt is de terreincategorie, deze varieert van 0 tot IV. De definitie van iedere categorie wordt toegelicht aan de hand van Figuur 2.4.

Voor het huidige project, de Bouwcampus te Diepenbeek, wordt terreincategorie III gehanteerd. Deze keuze wordt gemaakt omdat de locatie zich niet in het hart van de stad bevindt (categorie IV), maar wel in een bebouwde omgeving. Voor het laatste onderdeel van de eerste zone moet de windrichting ten opzichte van het gebouw worden bepaald. Er is besloten om de wind loodrecht op het gebouw te laten invallen, met een invalshoek van 0° . In zone 4 wordt deze windrichting aangeduid met een pijl.

Zone 2: In deze zone dient de constructie gedefinieerd te worden. De afmetingen van de constructie worden achtereenvolgens ingevuld:

- $L_1 = 7,68m$,
- $L_2 = 5,28m$,
- $h = 4m$,
- $h_{dis} = 0$.

De verplaatsing van de hoogte, h_{dis} , wordt gelijkgesteld aan 0. Deze is enkel van toepassing voor gebouwen gelegen in terreincategorie IV. De volgende twee parameters hebben te maken met de dakstructuur:

- number of slopes = 0,
- angle of slopes = 0° .

Beide waarden worden op nul gezet, aangezien de constructie een plat dak heeft.

Zone 3: De derde zone geeft de waarde weer van de dynamische piekdruk. Deze wordt door de software zelf berekend met de zogenaamde c_{pe} en c_{pi} factoren. Hierdoor is het mogelijk om de effectieve druk op het gebouw te achterhalen.

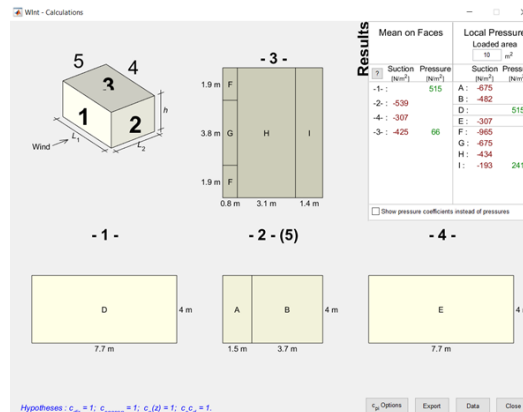
Zone 4: In deze zone wordt het gebouw geïllustreerd. Alle parameters zijn reeds zichtbaar op de illustratie.

Zone 5: Door op deze knop te drukken voert het programma zijn berekeningen uit.

Zone 6: Deze knop biedt een extra functie om de mogelijk openstaande schermen in zijn geheel te sluiten. Om dit te activeren dient op deze knop gedrukt te worden.

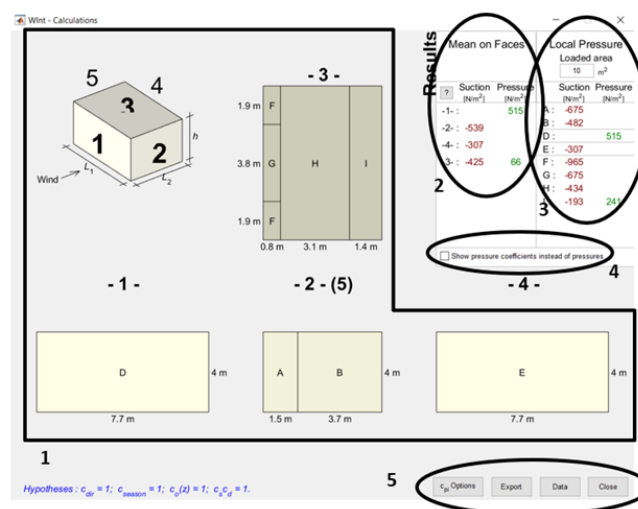
Zone 7: De zevende en laatste zone biedt de mogelijkheid om de handleiding zowel in het Nederlands als in het Frans te verkrijgen.

Resultatenschermb: Wanneer de parameters correct zijn ingevuld en men de knop “Calculation” indrukt, is het resultatenschermb zichtbaar, zoals geïllustreerd op Figuur 3.10.



Figuur 3.10: Resultatenschermb

Om dit scherm beter te begrijpen wordt dezelfde techniek toegepast en wordt het opnieuw opgedeeld in verschillende zones volgens Figuur 3.11.



Figuur 3.11: Resultatenschermb in zones

Zone 1: Deze zone, de grootste, geeft ieder aanzicht van het gebouw weer. Voor ieder aanzicht wordt de drukzone geïllustreerd. De bijkomende informatie, letter van A tot J, tonen de bijbehorende afmeting.

Zone 2: Dit is de eerste zone waarin de resultaten worden weergegeven. Deze kolom bezorgt de gemiddelde druk op iedere zijde. Belangrijk om te weten is dat groen druk betekent en dat rood voor onderdruk staat. Beide worden weergegeven in N/m^2 . Voor de drukken te berekenen maakt de tool gebruik van de eerder vermelde c_{pi} waarde. Wint voert zijn berekeningen uit met

de strengste waarden voor deze factor, namelijk +0,2 en -0,3. Voor dit project zijn deze waarden ook van toepassing.

Zone 3: Deze zone begint met het definiëren van het belaste oppervlak. Dit duidt het oppervlak aan van de gevel waarvan de winddruk verschuift naar het berekende element. Voor dit project is deze waarde hoger dan 10 m², echter zorgt het programma ervoor dat alle waarden die hoger liggen dan 10 m², toch worden berekend met de waarde 10.

In de kolom eronder wordt de druk gegeven die in functie staat van het belaste oppervlak. Meermaals staat de druk in het groen en wordt de onderdruk weergegeven in het rood.

Zone 4: Deze optie biedt de mogelijkheid om, in plaats van de druk, de druk-coëfficiënten weer te geven.

Zone 5: De laatste zone laat toe om verschillende aanpassingen uit te voeren, zoals bijvoorbeeld het aanpassen van de c_{pi} factor. Echter, voor dit project zijn deze functies niet van belang.

Met behulp van deze resultaten is het mogelijk om de grootste kracht op het paneel te berekenen. Deze bevindt zich in zone 3 en heeft een waarde van 675 N/m².

3.3.2 Verticale kracht veroorzaakt door de CircuWallPanels

Uiteraard moet een andere last ook worden meegenomen in de berekeningen: de last die ontstaat door het eigengewicht van de CircuWallPanel. Dit gewicht veroorzaakt een verticale kracht op het gewichtanker. Om deze last te bepalen, moet het gewicht van het gevelpaneel bekend zijn. Uit vooronderzoek blijkt dat de CircuWallPanels een massa hebben van 500 kg, wat overeenkomt met 5,0 kN.

Met deze informatie kunnen in de volgende delen de berekeningen worden uitgevoerd die verband houden met de verticale belasting.

3.3.3 Rekenwaarde horizontale kracht

Met de vastgestelde waarde van de windkracht in sectie 3.3.1, is het noodzakelijk om de rekenwaarde van de trekbelasting per bout, $F_{t,Ed}$, te bepalen. Dit vereist de berekening van de oppervlakte van het gevelpaneel, zoals beschreven in vergelijking (3.7).

$$A_{Gevelpaneel} = b \cdot h = 1200 \text{ mm} \cdot 3300 \text{ mm} = 3960000 \text{ mm}^2 = 3,96 \text{ m}^2 \quad (3.7)$$

Met de wetenschap dat de partiële veiligheidsfactor gelijk is aan 1,5, kan de rekenwaarde van de trekbelasting als volgt worden berekend, zoals weergegeven in vergelijking (3.8).

$$F_{t,Ed} = F_{wind} \cdot 1,5 \cdot \frac{A_{Gevelpaneel}}{n_{Belasten, connectoren}} = 675 \text{ N/m}^2 \cdot 1,5 \cdot \frac{3,96 \text{ m}^2}{2} = 2004,75 \text{ N} = 2,0 \text{ kN} \quad (3.8)$$

3.3.4 Rekenwaarde verticale kracht

In sectie 3.3.2 werd de kracht $F_{G,gevelpaneel}$ achterhaald, waarmee de rekenwaarde van de verticale kracht $F_{v,Ed}$ kan worden bepaald.

Wetende dat de partiële veiligheidsfactor in UGT-B gelijk aan 1,35 is, kan vergelijking (3.9) opgesteld worden.

$$F_{v,Ed} = \frac{F_{G,gevelpaneel} \cdot 1,35}{n_{Belasten,connectoren}} = \frac{5 \text{ kN} \cdot 1,35}{2} = 3,375 \text{ kN} \quad (3.9)$$

Deze waarde vertegenwoordigt de kracht van de helft van één gevelpaneel. Indien enkele connectoren falen of de CircuWallPanels verkeerd worden geïnstalleerd, zal er tweemaal de helft van één gevelpaneel op één gewichtanker steunen. Hierdoor moet elke connector een kracht van 6,75 kN kunnen dragen.

De verdeelde belasting op het gewichtanker door het eigengewicht van de panelen kan worden berekend met behulp van vergelijking (3.10).

$$q_{d,con} = \frac{F}{l \cdot b} = \frac{6,75 \text{ kN}}{20 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm}} = 3375 \text{ kN/m}^2 \quad (3.10)$$

Vereenvoudigd naar een lijnlast geeft dit:

$$q_{d,con,l} = q_{d,con} \cdot b = 3375 \text{ kN/m} \cdot 100 \text{ mm} = 337,5 \text{ kN/m} \quad (3.11)$$

3.4 Controle boutverbindingen

In dit gedeelte wordt de boutverbinding gecontroleerd. De volledige berekening is terug te vinden in Bijlage B. Het gewichtanker wordt tegen het kopstuk van de connector gelast. Deze lasverbinding wordt in dit hoofdstuk ook gecontroleerd.

3.4.1 Weerstanden van de boutverbindingen

In de eerste stap moeten de limietwaarden worden vastgesteld.

Voor het bepalen van de rekenwaarde van de boutweerstand per bezwijkvorm moet Tabel 2.8 worden geraadpleegd. Deze tabel geeft de rekenwaarden voor de weerstand van individuele verbindingsmiddelen die onderhevig zijn aan afschuiving en/of trek [7].

Volgens Tabel 2.8 is de rekenwaarde van de afschuifweerstand voor bouten gelijk aan vergelijking (3.12).

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} \quad (3.12)$$

Tabel 2.8 uit Eurocode 3, [7], geeft weer dat de reductiefactor voor afschuiving α_v gelijk is aan 0,6. Vervolgens moet de waarde van de spanningsdoorsnede van de bout A_s worden bepaald. De waarde van A_s voor een M8-bout is gelijk aan 36,6 mm² [8].

Vervolgens geeft deze tabel de vergelijking (3.13) voor de stuikweerstand weer:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (3.13)$$

Waarin α_b gelijk is aan de kleinste van de volgende waarden: α_d , $\frac{f_{ub}}{f_u}$, 1,0.

In de richting van de krachtsoverdracht geeft dit voor eindbouten:

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{18 \text{ mm}}{3 \cdot 12 \text{ mm}} = 0,5 \text{ mm} \quad (3.14)$$

Om de verhouding $\frac{f_{ub}}{f_u}$ te bepalen, moet de waarde van f_u nog worden achterhaald. Hiervoor moet het type staal bekend zijn. Zoals vermeld in deel 3.2.4, wordt er gebruikgemaakt van een S235JR.

Voor een dikte van 8 mm varieert de treksterkte f_u tussen 360 MPa en 510 MPa. Er wordt gekozen om verder te werken met een waarde van 510 MPa om voldoende veiligheidsmarges in te bouwen. Dit resulteert in $\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800 \text{ MPa}}{510 \text{ MPa}} = 1,57$. Hierdoor wordt α_b gelijk aan de volgende waarde (3.15).

$$\alpha_b = \min(\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0) = \min(0,5; 1,57; 1,0) = 0,5 \text{ mm} \quad (3.15)$$

Verder geeft dit, voor randbouten loodrecht op de richting van de krachtsoverdracht, het volgende:

$$k_1 = \min(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5) = \min(2,8 \cdot \frac{18}{12} - 1,7; 2,5) = \min(2,5; 2,5) = 2,5 \text{ mm} \quad (3.16)$$

De rekenwaarde van de trekweerstand wordt ook bepaald volgens Tabel 3.4, wat overeenkomt met de volgende vergelijking (3.17).

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (3.17)$$

Waarin k_2 gelijk is aan 0,9.

Ten slotte kan de rekenwaarde van de ponsweerstand worden bepaald, wat overeenkomt met de volgende vergelijking (3.18).

$$B_{p,Rd} = 0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u / \gamma_{M2} \quad (3.18)$$

Met al deze vergelijkingen en gegevens kunnen de rekenwaarden voor de weerstanden worden berekend. Dit resulteert in de volgende vergelijkingen (3.19) - (3.22).

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \text{ N/mm}^2 \cdot 36,6 \text{ mm}^2}{1,25} = 14,05 \text{ kN} \quad (3.19)$$

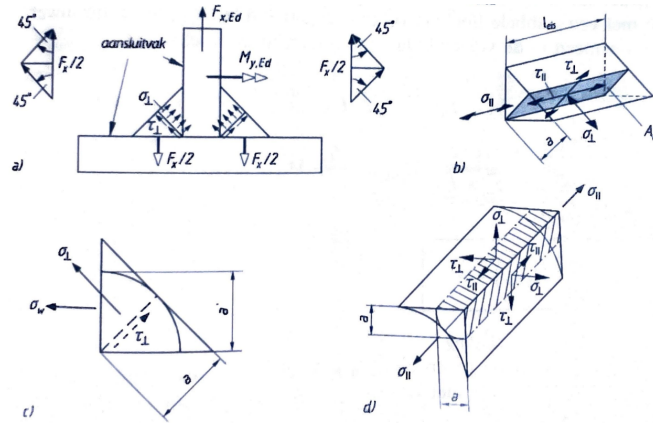
$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,5 \cdot 510 \text{ N/mm}^2 \cdot 12 \text{ mm} \cdot 8 \text{ mm}}{1,25} = 48,96 \text{ kN} \quad (3.20)$$

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \text{ N/mm}^2 \cdot 36,6 \text{ mm}^2}{1,25} = 21,08 \text{ kN} \quad (3.21)$$

$$B_{p,Rd} = 0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u / \gamma_{M2} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 15 \text{ mm} \cdot 8 \text{ mm} \cdot 510 \text{ N/mm}^2}{1,25} = 92,29 \text{ kN} \quad (3.22)$$

3.4.2 Belasting van lasnaad

Zoals eerder vermeld, zal het gewichtanker worden bevestigd aan de rechtopstaande plaat van de connector. Volgens [14] wordt het gewichtanker op de kopplaat van het L-profiel bevestigd met een hoeklas. Figuur 3.12 toont een detail van de doorsnede van de lasverbinding. Hierbij moet wel vermeldt worden dat dit detail 90° geroteerd is getekend ten opzichte van de situatie bij het gewichtanker.



Figuur 3.12: Detail lasverbinding [14, p. 169]

Met:

- a) krachten en lasspanningen in de keeldoorsnede;
- b) spanningen in het effectieve vlak van de keeldoorsnede $A_w (= a \cdot l_{eff})$;
- c) spanningen in de keeldoorsnede $\sigma_{\perp}$ en $\tau_{\perp}$ met een op het rechthoekige lasaansluitingvlak afgeleide spanning van σ_w : $\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \sigma_w / \sqrt{2}$;
- d) op het rechthoekige lasaansluitvlak betrokken hoeklasspanningen.

Bovenstaande figuur toont alle parameters die in rekening worden gebracht bij het berekenen van de hoeklas. Zoals te zien op de figuur, wordt de plaat met 2 lassen aan weerszijde verbonden. In tegenstelling tot het voorgestelde lasdetail, zal hier geen externe kracht $F_{x,Ed}$ werken. Het gewicht van de CircuWallPanels zal zorgen voor moment $M_{y,Ed}$.

Afmetingen van de lasverbinding:

Volgens [14] moet de lasbreedte of keelhoogte a liggen tussen 2 mm en $0,7 \cdot t_{min}$, waarbij t_{min} de dikte van het gewichtanker is. Bij een gewichtanker van 8 mm dik komt dit neer op een maximale lasdikte van 5,6 mm. In de praktijk wordt de lasbreedte geschat op 4 mm bij manuele uitvoering. Dit resulteert in een totale lashoogte t gelijk aan $\sqrt{4^2 + 4^2} = 5,66$ mm. Het is aanbevolen om het gewichtanker zowel aan de boven- als onderzijde te lassen, zodat de haakse positie van het gewichtanker behouden blijft.

Belasting:

Het optredend moment wordt bepaald aan de hand van vergelijking (3.23). Hierbij is x de lengte van het gewichtanker.

$$M_{y,Ed} = q_{d,con,l} \cdot x^2 / 2 = 337,5 \text{ kN/m} \cdot (20 \text{ mm})^2 / 2 = 67500 \text{ Nmm} \quad (3.23)$$

De spanningen moeten bepaald worden op basis van de belastingen in de doorsnede van een constructiestaaldeel, zoals de normaal- en dwarskracht en het buig- en torsiemoment. Bij de gecombineerde spanningsmethode zal men voor de hoeklasspanningen uitgaan van een hoek $\alpha = 90^\circ$. De spanning $\sigma_{\perp}$ en $\tau_{\perp}$ kan dan bepaald worden met vergelijking (3.24) [14].

$$\sigma_{\perp} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{1}{a \cdot l_{eff}} \cdot (F_{x,Ed} + \frac{6}{l_{eff}} \cdot M_{y,Ed}) = \tau_{\perp} \quad (3.24)$$

Ingevuld geeft dit dus 5,06 N/mm² of MPa.

3.4.3 Draagvermogen lasnaad

Het maximale draagvermogen van de lasnaad wordt bepaald aan de hand van de methode van de gecombineerde momenten volgens [14]. Hierbij moet voldaan worden aan vergelijking (3.25).

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2} \leq \frac{\alpha_w \cdot R_e}{1,1} = \frac{0,95 \cdot 235 \text{ MPa}}{1,1} = 203 \text{ MPa} \quad (3.25)$$

Met:

- α_w : correctiefactor,
- R_e : rekgrens.

De correctiefactor is hierbij 0,95 [15]. Zoals eerder beschreven, is de rekgrens gelijk aan 235 MPa.

De maximale lasspanning bedraagt dus 203 MPa.

3.4.4 Controle

Nu zowel de grenswaarden als de rekenwaarden zijn bepaald, kunnen in dit deel de vereiste controles worden uitgevoerd.

Vanuit sectie 3.4.1 is bekend dat de volgende controles met betrekking tot de boutverbinding moeten worden uitgevoerd:

Categorie A

- $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$,
- $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$,

Categorie D

- $F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$,
- $F_{t,Ed} \leq B_{b,Rd}$.

Dit leidt tot volgende controles (3.26 - 3.29):

$$\begin{aligned} F_{v,Ed} &\leq F_{v,Rd} \\ 3,38 \text{ kN} &\leq 14,1 \text{ kN} \quad \text{OK!} \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} F_{v,Ed} &\leq F_{b,Rd} \\ 3,38 \text{ kN} &\leq 48,96 \text{ kN} \quad \text{OK!} \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$$

$$2,01 \text{ kN} \leq 21,1 \text{ kN} \quad \text{OK!} \quad (3.28)$$

$$F_{t,Ed} \leq B_{b,Rd}$$

$$2,01 \text{ kN} \leq 92,3 \text{ kN} \quad \text{OK!} \quad (3.29)$$

De bovenstaande vergelijkingen laten zien dat de boutverbindingen voldoen aan zowel categorie A als categorie D.

Vanuit sectie 3.4.3 is bekend dat voldaan moet worden aan vergelijking (3.25).

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2} \leq \frac{\alpha_w \cdot R_e}{1,1}$$

$$\sqrt{5,06^2 + 5,06^2 + 0^2} \leq \frac{0,95 \cdot 235 \text{ MPa}}{1,1} \quad (3.30)$$

$$7,16 \text{ MPa} \leq 203 \text{ MPa} \quad \text{OK!}$$

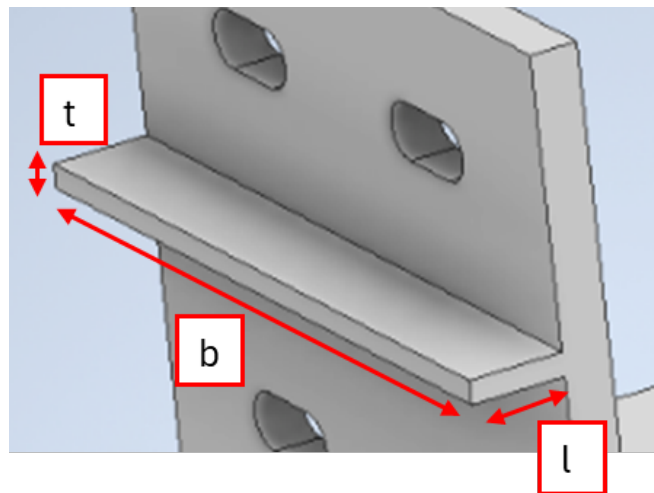
De lasnaad zal dus ook voldoen voor deze belastingssituatie.

3.5 Spanningsanalyse via berekeningen

Met de momenteel beschikbare materiaaleigenschappen kunnen in de volgende secties de spanningscontroles worden uitgevoerd. Dit omvat zowel de verticale kracht veroorzaakt door de CircuWallPanel als de horizontale kracht veroorzaakt door de wind.

3.5.1 Verticale kracht

De verticale kracht ontstaat door de belasting van de CircuWallPanels en wordt uitgeoefend op het gewichtanker. Het gewichtanker bestaat uit een stalen strook die moet worden gelast aan de kopplaat van de connector. Het biedt een eenvoudige en gebruiksvriendelijke bevestiging van de CircuWallPanels aan de connectoren. Figuur 3.13 illustreert de bijbehorende parameters.



Figuur 3.13: Parameters gewichtstanker

Op bovenstaande figuur worden volgende parameters aangeduid:

- dikte gewichtstanker t ,
- breedte gewichtstanker b ,
- lengte gewichtstanker l .

Deze waarden werden in voorgaand deel 3.2.2 als volgt aangenomen:

- $t = 8 \text{ mm}$,
- $b = 100 \text{ mm}$,
- $l = 20 \text{ mm}$.

Met deze waarden kan het traagheidsmoment achterhaald worden. Dit gebeurt aan de hand van vergelijking (3.31).

$$\text{Traagheidsmoment } I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{100 \text{ mm} \cdot (8 \text{ mm})^3}{12} = 4266,7 \text{ mm}^4 \quad (3.31)$$

Deze gegevens dienen meegenomen te worden in de berekeningen. Verder is bekend uit het vooronderzoek van de bezorgde data vanuit WoodInc dat een gevelpaneel beschikt over een massa van 500 kg en dat vier connectoren één enkel paneel op zijn plaats houden. Hierbij is het belangrijk om op te merken dat de verticale kracht enkel zal optreden op de onderste twee connectoren, maar iedere connector draagt eigenlijk de helft van twee panelen. Hierdoor komt er in totaal de complete kracht van een volledig gevelpaneel op één enkele connector te staan.

Met de kennis van de massa van het paneel en het aantal connectoren dat één CircuWallPanel draagt, kan de kracht op één enkele connector worden berekend met behulp van vergelijking (3.32). Hierbij wordt de massa van het paneel vermenigvuldigd met 10 N/kg voor de kracht te bekomen. Dit is een veiligere aanname dan de werkelijke gravitatie constante van 9,81 N/kg of m/s^2 .

$$F_{d,connector} = G_{Gevelpaneel} \cdot 10 \frac{N}{kg} \cdot \gamma_G = 500 \text{ kg} \cdot 10 \frac{N}{kg} \cdot 1,35 = 6,75 \text{ kN} \quad (3.32)$$

Deze waarde voor de optredende puntlast kan ook worden omgezet naar een verdeelde belasting en een lijnlast, die beide zullen optreden op het dagvlak van het gewichtanker, zoals beschreven in vergelijkingen (3.33) en (3.34).

$$q_{d,connector} = \frac{F_{d,connector}}{b} \cdot \frac{1000}{l} \cdot 1000 = \frac{6,75 \text{ kN}}{100 \text{ mm}} \cdot \frac{1000}{20 \text{ mm}} \cdot 1000 = 3375 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 3,375 \text{ MPa} \quad (3.33)$$

$$q_{d,connector,l} = q_{d,connector} \cdot \frac{b}{1000} = 3375 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{100 \text{ mm}}{1000} = 337,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,3375 \text{ MPa} \quad (3.34)$$

Met de verkregen waarden kunnen de optredende reactiekracht, het moment en de spanning op het gewichtanker worden berekend. Deze waarden zijn noodzakelijk voor het uitvoeren van latere controles. De berekeningen verlopen als volgt:

Om de reactiekracht F_y op het gewichtsanker te bepalen, wordt gekeken naar de optredende kracht op een connector. Deze twee parameters zijn namelijk identiek, aangezien de reactiekracht de volledige optredende puntlast zal tegenwerken. Dit resulteert in vergelijking (3.35).

$$F_y = q_{d,connector,l} \cdot \frac{l}{1000} = 337,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{20 \text{ mm}}{1000} = 6,75 \text{ kN} \quad (3.35)$$

Deze verticale belasting zal namelijk ook zorgen voor een reactiemoment M_1 . Deze wordt als volgt berekend (3.36).

$$M_1 = F_y \cdot \frac{\frac{l}{1000}}{2} = 6,75 \text{ kN} \cdot \frac{\frac{20}{1000}}{2} = 0,0675 \text{ kNm} \quad (3.36)$$

Met deze waarden worden vergelijkingen (3.37) en (3.38) opgesteld, om ervoor te zorgen dat alle optredende belastingen, spanningen en momenten op het gewichtanker bekend zijn.

- Optredende spanning veroorzaakt door het moment M_1 :

$$\sigma_{M_1} = \frac{M_1 \cdot \frac{t}{2}}{I} = \frac{0,0675 \text{ kNm} \cdot 10^6 \cdot \frac{8 \text{ mm}}{2}}{4266,7 \text{ mm}^4} = 63,28 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (3.37)$$

- Optredende spanning veroorzaakt door de dwarskracht V_1 :

$$\sigma_{V_1} = \frac{F_y}{A} = \frac{F_y}{b \cdot t} = \frac{6,75 \text{ kN} \cdot 10^3}{100 \text{ mm} \cdot 8 \text{ mm}} = 8,438 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (3.38)$$

Hieruit volgt:

- Optredende staalrek veroorzaakt door het moment M_1 :

$$e_{M_1} = \frac{\sigma_{M_1}}{E} = \frac{63,281 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{210 \text{ GPa}} = 0,30 \text{ ‰} \quad (3.39)$$

- Optredende staalrek veroorzaakt door de dwarskracht V_1 :

$$e_{V_1} = \frac{\sigma_{V_1}}{E} = \frac{8,438 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{210 \text{ GPa}} = 0,04 \text{ ‰} \quad (3.40)$$

- Weerstand tegen de dwarskracht V_1 :

$$V_{pl, Rd} = b \cdot t \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} = 100 \text{ mm} \cdot 8 \text{ mm} \cdot \frac{204 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3}} = 94000 \text{ N} = 94 \text{ kN} \quad (3.41)$$

Controle met betrekking tot de verticale kracht op de connector:

Nadat alle waarden voor zowel de optredende acties als hun maximale waarden bekend zijn, dienen de controles uitgevoerd te worden.

- Staalspanning σ_{M_1} :

$$\begin{aligned} \sigma_{M_1} &\leq E \\ 63,28 \text{ MPa} &\leq 204 \text{ MPa OK!} \end{aligned} \quad (3.42)$$

- Staalrek e_{M_1} :

$$\begin{aligned} e_{M_1} &\leq e_{vl} \\ 0,30 \text{ ‰} &\leq 0,97 \text{ ‰ OK!} \end{aligned} \quad (3.43)$$

- Staalspanning σ_{V_1} :

$$\begin{aligned} \sigma_{V_1} &\leq E \\ 8,438 \text{ MPa} &\leq 204 \text{ MPa OK!} \end{aligned} \quad (3.44)$$

- Staalrek e_{V_1} :

$$\begin{aligned} e_{V_1} &\leq e_{vl} \\ 0,04 \text{ ‰} &\leq 0,97 \text{ ‰ OK!} \end{aligned} \tag{3.45}$$

Uit vergelijkingen (3.42) - (3.45) blijkt dat alle controles in orde zijn. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de gekozen afmetingen en materiaaleigenschappen voor het gewichtanker voldoen.

3.5.2 Horizontale kracht

De volgende fase omvat het uitvoeren van een controle op de optredende spanningen als gevolg van de horizontale windkracht. Deze spanningen zullen cruciaal zijn vanwege de geometrie van de connector, aangezien ze waarschijnlijk hoger zullen zijn dan de spanningen die ontstaan door de verticale belasting van het gevelpaneel.

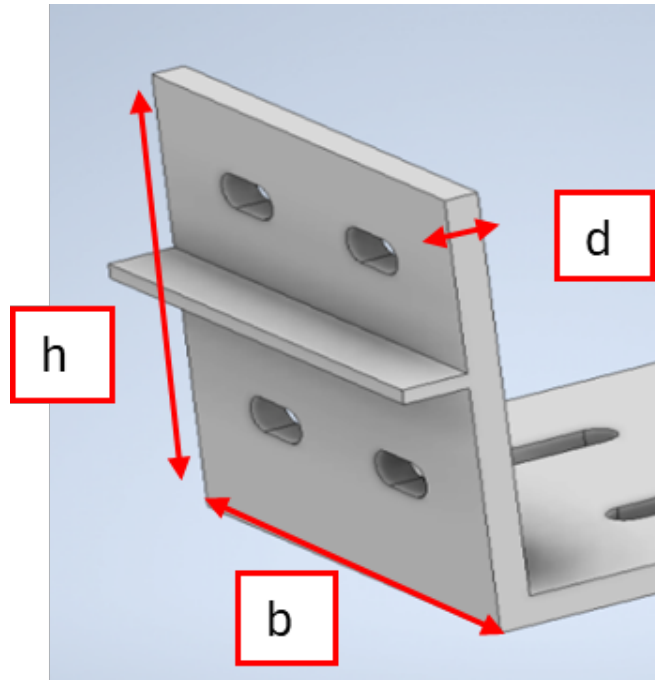
Als eerste stap is het essentieel om diverse gegevens te verzamelen, die voornamelijk voortkomen uit eerdere berekeningen en uitgebreid vooronderzoek. De gegevens bevatten informatie over de volgende parameters:

- de windbelasting op het gevelpaneel $F_{wind} = 675 \text{ N/m}^2$,
- de veiligheidsfactor $\gamma = 1,5$,
- de hoogte van de CircuwallPanel $h = 3300 \text{ mm}$,
- de breedte van de CircuWallPanel $b = 1200 \text{ mm}$.

Bovendien moeten de dimensies als volgt worden aangevuld:

- $d = 8 \text{ mm}$,
- $b = 100 \text{ mm}$,
- $h = 120 \text{ mm}$.

Dit is cruciaal omdat de windkracht een ander aangrijpingspunt heeft. In Figuur 3.14 worden de dimensies aangegeven op de connector.



Figuur 3.14: Dimensies van verticaal element van de connector

Met deze waarden kan het traagheidsmoment achterhaald worden. Dit gebeurt aan de hand van vergelijking (3.46).

$$\text{Traagheidsmoment } I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{100 \text{ mm} \cdot (8 \text{ mm})^3}{12} = 4266,7 \text{ mm}^4 \quad (3.46)$$

De volgende stap omvat het berekenen van de kracht op de connectoren met behulp van de opgegeven parameters. Dit proces wordt uitgevoerd aan de hand van vergelijkingen (3.47)-(3.50).

- Het aantal connectoren per paneel waarop de windkracht optreedt:

$$n = 4 \quad (3.47)$$

- De totale windkracht per paneel:

$$F_{Wind, \text{paneel}} = (F_{Wind} \cdot \gamma) \cdot h_{\text{paneel}} \cdot b_{\text{paneel}} = (675 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 1,5) \cdot 3,3 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m} = 4 \text{ kN} \quad (3.48)$$

- De horizontale kracht die ontstaat door de winddruk per connector:

$$F_{Wind, \text{connector}} = \frac{F_{Wind, \text{paneel}}}{h_{\text{connector}} \cdot b_{\text{connector}}} \cdot \frac{2}{n} = \frac{4 \text{ kN}}{0,120 \text{ m} \cdot 0,100 \text{ m}} \cdot \frac{2}{4} = 0,1671 \text{ MPa} \quad (3.49)$$

- De lijnlast die ontstaat door de winddruk op de connector:

$$q_{d, \text{connector}, l} = F_{Wind, \text{connector}} \cdot b_{\text{connector}} = 167,1 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,100 \text{ m} = 16,7 \text{ kN/m} \quad (3.50)$$

Met behulp van de verkregen waarden is het mogelijk om de reactiekracht, het moment, de spanningen en rekken op de connector te berekenen. Deze berekeningen zijn cruciaal voor latere controles en analyses. De procedure verloopt als volgt:

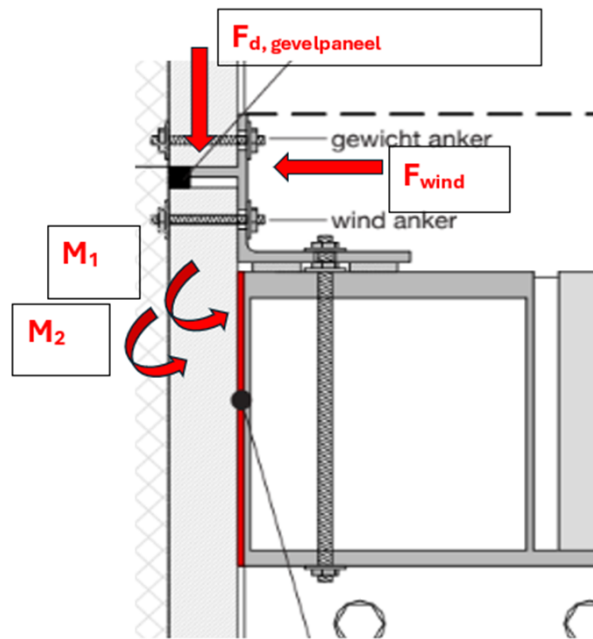
Om de reactiekracht F_y op de connector te bepalen, onderzoeken we de krachten die op de connector inwerken. Aangezien de reactiekracht de volledige optredende puntlast tegenwerkt, zijn deze twee parameters identiek. Dit leidt tot de volgende vergelijking (3.51).

$$F_y = q_{d,connector,l} \cdot \frac{h}{1000} = 16,7 \frac{kN}{m} \cdot \frac{120 \text{ mm}}{1000} = 2,00 \text{ kN} \quad (3.51)$$

Deze horizontale belasting zal namelijk ook zorgen voor een reactiemoment M_2 . Deze wordt als volgt berekend (3.52).

$$M_2 = F_y \cdot \frac{l}{2} = 2,00 \text{ kN} \cdot \frac{120}{2} = 0,1203 \text{ kNm} \quad (3.52)$$

Het reactiemoment dat voortkomt uit vergelijking (3.36) verschilt van het reactiemoment dat voortkomt uit vergelijking (3.52). Het moment M_1 ontstaat namelijk door de verticale kracht van het gevelpaneel, terwijl M_2 ontstaat door de horizontale kracht veroorzaakt door de wind. Deze situatie wordt verduidelijkt in Figuur 3.15.



Figuur 3.15: Optredende momenten M_1 en M_2

Met deze waarden worden vergelijkingen (3.53) en (3.54) afgeleid, zodat alle belastingen, spanningen en momenten op de connector bekend zijn.

- Optredende spanning veroorzaakt door het moment M_2 :

$$\sigma_{M_2} = \frac{M_2 \cdot \frac{t}{2}}{I} = \frac{0,1203 \text{ kNm} \cdot 10^6 \cdot \frac{8 \text{ mm}}{2}}{4266,7 \text{ mm}^4} = 112,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (3.53)$$

- Optredende spanning veroorzaakt door de dwarskracht V_2 :

$$\sigma_{V_2} = \frac{F_y}{A} = \frac{F_y}{b \cdot t} = \frac{2,00 \text{ kN} \cdot 10^3}{100 \text{ mm} \cdot 8 \text{ mm}} = 2,506 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (3.54)$$

Hieruit volgt:

- Optredende staalrek veroorzaakt door het moment M_2 :

$$e_{M_2} = \frac{\sigma_{M_2}}{E} = \frac{112,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{210 \text{ GPa}} = 0,54 \text{ ‰} \quad (3.55)$$

- Optredende staalrek veroorzaakt door de dwarskracht V_2 :

$$e_{V_2} = \frac{\sigma_{V_2}}{E} = \frac{2,506 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{210 \text{ GPa}} = 0,01 \text{ ‰} \quad (3.56)$$

- Weerstand tegen de dwarskracht V_2 :

$$V_{pl, Rd} = b \cdot t \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} = 100 \text{ mm} \cdot 8 \text{ mm} \cdot \frac{204 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{3}} = 94000 \text{ N} = 94 \text{ kN} \quad (3.57)$$

Controle met betrekking tot de horizontale kracht op de connector:

Nu de waarden voor zowel de optredende acties als hun maximale waarden bekend zijn, moeten de controles worden uitgevoerd.

- Staalspanning σ_{M_2} :

$$\begin{aligned} \sigma_{M_2} &\leq E \\ 112,8 \text{ MPa} &\leq 204 \text{ MPa OK!} \end{aligned} \quad (3.58)$$

- Staalrek e_{M_2} :

$$\begin{aligned} e_{M_2} &\leq e_{vl} \\ 0,54 \text{ ‰} &\leq 0,97 \text{ ‰ OK!} \end{aligned} \quad (3.59)$$

- Staalspanning σ_{V_2} :

$$\begin{aligned} \sigma_{V_2} &\leq E \\ 2,506 \text{ MPa} &\leq 204 \text{ MPa OK!} \end{aligned} \quad (3.60)$$

- Staalrek e_{V_2} :

$$\begin{aligned} e_{V_2} &\leq e_{vl} \\ 0,01 \text{ ‰} &\leq 0,97 \text{ ‰ OK!} \end{aligned} \quad (3.61)$$

Uit de vergelijkingen (3.58) - (3.61) blijkt dat alle controles aan de vereisten voldoen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de gekozen afmetingen en materiaaleigenschappen voor het profiel geschikt zijn.

3.5.3 Controle van de gecombineerde momenten

De laatste en meest cruciale controle betreft de spanningsanalyse van de gecombineerde momenten. Om te verzekeren dat de connector aan de vereisten voldoet, moeten de momenten M_1 en M_2 worden samengevoegd, zoals weergegeven in vergelijking (3.62).

$$M_{Totaal} = M_1 + M_2 = 0,0675 \text{ kNm} + 0,1203 \text{ kNm} = 0,1878 \text{ kNm} \quad (3.62)$$

Voor het uitvoeren van een controle om te bepalen of de connector versterkt moet worden, is het noodzakelijk om de spanning te berekenen die wordt veroorzaakt door het gecombineerde moment. Deze gecombineerde waarde wordt bepaald door middel van de volgende vergelijking (3.63). Deze stap is essentieel voor het uitvoeren van de controle en het beoordelen van de structurele integriteit van de connector.

$$\sigma_{Totaal} = M_{Totaal} \cdot \frac{t}{I} = 0,1878 \cdot 10^6 \text{ Nmm} \cdot \frac{\frac{8 \text{ mm}}{2}}{4266,7 \text{ mm}^4} = 176,06 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (3.63)$$

De vraag is of de connector verstevigd dient te worden of niet, gegeven een dikte van 8 mm. De spanning, ontstaan door het gecombineerde moment ($=\sigma_{Totaal}$), dient namelijk kleiner te zijn dan de maximale spanning ($=f_{yd}$). Vergelijking (3.64) toont dit aan.

$$\begin{aligned} \sigma_{Totaal} &\leq f_{yd} \\ 176,06 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} &\leq 204 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ OK!} \end{aligned} \quad (3.64)$$

Zoals weergegeven in bovenstaande vergelijking is de spanningscontrole in orde en dient er geen steundriehoek als versteviging voorzien te worden. Het is cruciaal om op te merken dat er een veronderstelling is gedaan dat het over een vol L-profiel gaat, waarbij geen rekening wordt gehouden met de nodige sleufgaten. In de werkelijkheid zal de connector afwijken van het theoretisch model, waardoor een extra controle vereist is. Om deze spanningsanalyse uit te voeren wordt er gebruikgemaakt van de tool “Inventor”. De volledige analyse wordt uitgelegd in deel 3.6.

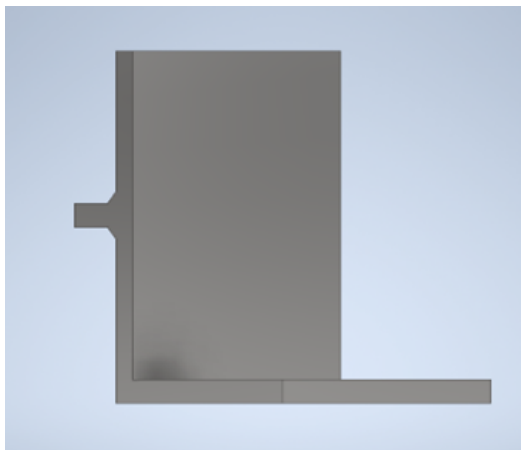
3.6 Spanningsanalyse via software

In dit gedeelte wordt een spanningsanalyse uitgevoerd met behulp van het CAD-programma Autodesk Inventor. Dit softwareprogramma heeft het vermogen om objecten in 3D met een zeer hoog detailniveau te modelleren. Daarnaast biedt de 3D CAD-software diverse geïntegreerde tools voor het ontwerpen van machineonderdelen, waaronder een spanningsanalyse.

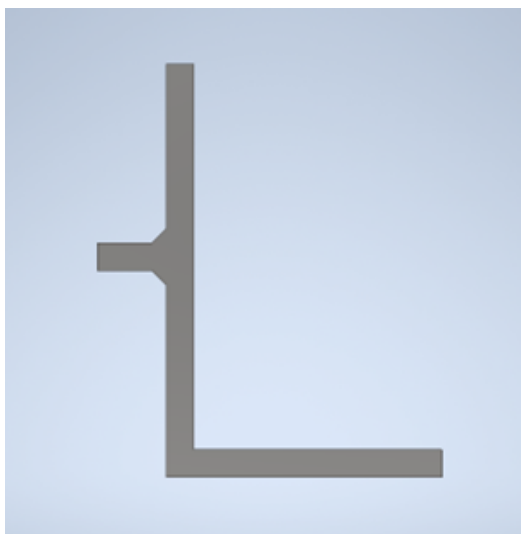
Dit deel zal worden opgesplitst in drie secties. Allereerst wordt de theoretisch berekende spanning vergeleken met de spanningswaarde die wordt gegenereerd door Inventor. Vervolgens worden de sleufgaten toegevoegd aan het model. Aangezien verondersteld wordt dat deze openingen een aanzienlijke invloed zullen hebben op de maximale spanning, zal in een derde deel de versteviging van de connector met behulp van een steundriehoek worden toegelicht.

3.6.1 Spanningscontrole van L-profiel volgens handberekeningen

De eerste stap is het modelleren van de connector. Het is van cruciaal belang om de dimensies nauwkeurig in te voeren. De resultaten in Inventor worden geïllustreerd in de Figuren 3.16 en 3.17.



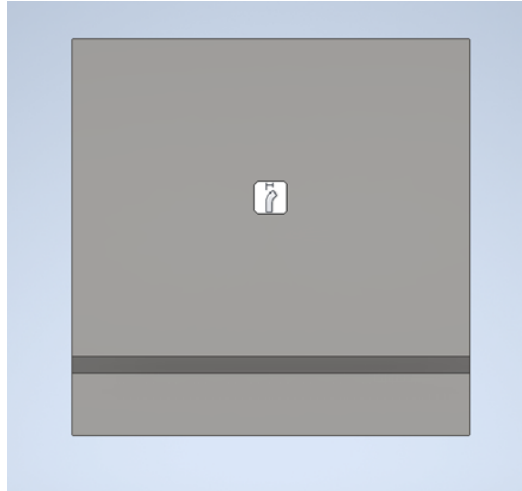
Figuur 3.16: 3D-aanzicht van connector



Figuur 3.17: Zijaanzicht connector

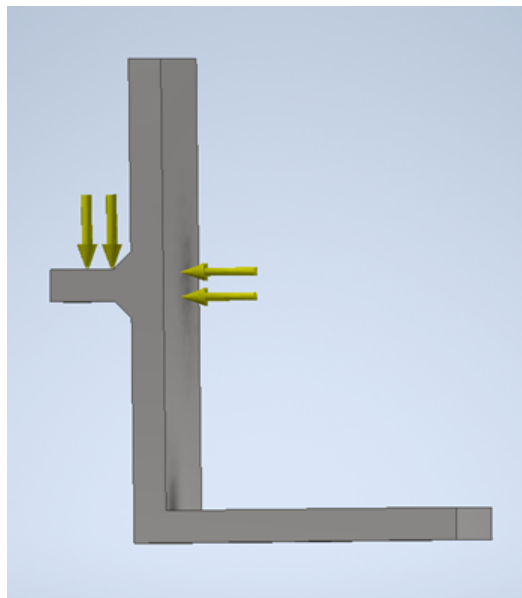
3.6.2 Zonder sleufgaten

Hierna wordt met behulp van de software een spanningsanalyse uitgevoerd. Inventor heeft de mogelijkheid om dit zelfstandig te genereren, mits de juiste randvoorwaarden worden ingesteld. Als eerste stap vraagt het programma of het voorwerp lokaal wordt ingeklemd of ondersteund. In dit geval zal de onderkant van het profiel worden vastgeklemd op de stalen ligger. Dit wordt vervolgens weergegeven in Inventor zoals afgebeeld in Figuur 3.18.



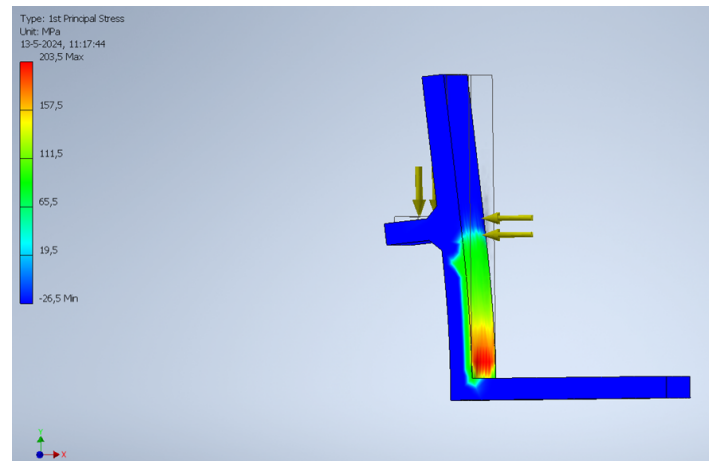
Figuur 3.18: Onderaanzicht connector

Na het instellen van de randvoorwaarden moeten de belastingen worden ingevoerd en correct worden gepositioneerd. Dit omvat zowel de verticale kracht veroorzaakt door de CircuWallPanel als de horizontale kracht door de wind. Figuur 3.19 illustreert deze stappen.



Figuur 3.19: Krachten op de connector

Met de juiste randvoorwaarden ingevoerd, kon de spanningsanalyse worden uitgevoerd. Het resultaat, zoals weergegeven in Figuur 3.20, toont de concentratie van spanning en geeft zelfs inzicht in het verwachte gedrag van de verbinding.



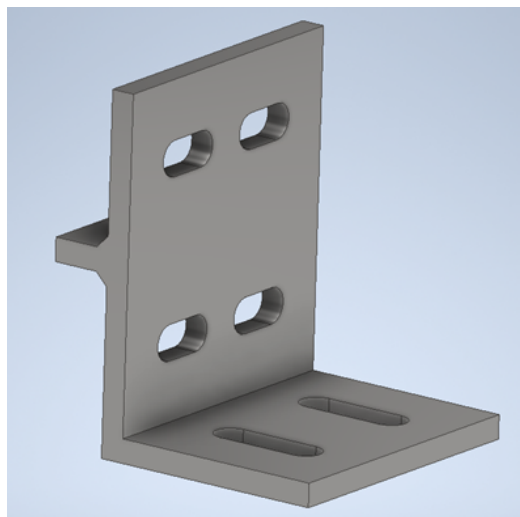
Figuur 3.20: Spanningsanalyse van de connector

Zoals verwacht zal de spanning zich concentreren in de hoek tussen de twee platen van de verbinding. Op de bovenstaande figuur is te zien dat de maximale spanning een waarde van 203,5 MPa bereikt. Dit verschilt van de theoretisch berekende waarde uit vergelijking (3.63), waarbij een spanning van 176 MPa werd verkregen. Dit verschil was echter te verwachten, omdat het handberekeningsmodel zeer vereenvoudigd was. Het belangrijkste is dat de waarde berekend door Inventor nog steeds onder de maximale toegestane waarde van 204 MPa ligt.

Het verschil tussen de theoretische waarde en de gesimuleerde waarden in Inventor geeft aan dat een extra controle nodig is, waarbij rekening wordt gehouden met de aanwezigheid van sleufgaten.

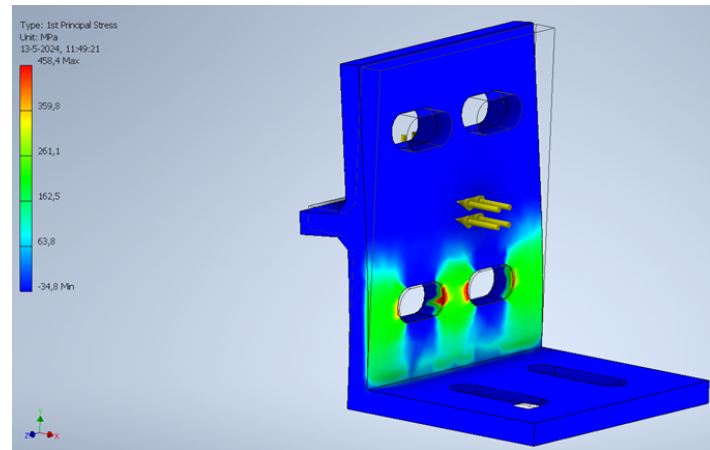
3.6.3 Spanningscontrole van L-profiel met sleufgaten

In de eerste fase worden de sleufgaten op de juiste posities toegevoegd, wat resulteert in een realistisch model van de uiteindelijke versie van de connector. Figuur 3.21 toont de connector zoals weergegeven in Inventor, inclusief de sleufgaten.



Figuur 3.21: 3D-aanzicht van de connector met sleufgaten

De randvoorwaarden van het vorige deel blijven van kracht en de analyse kan direct worden uitgevoerd. Het resultaat wordt weergegeven in Figuur 3.22.



Figuur 3.22: Spanningsanalyse van de connector met sleufgaten

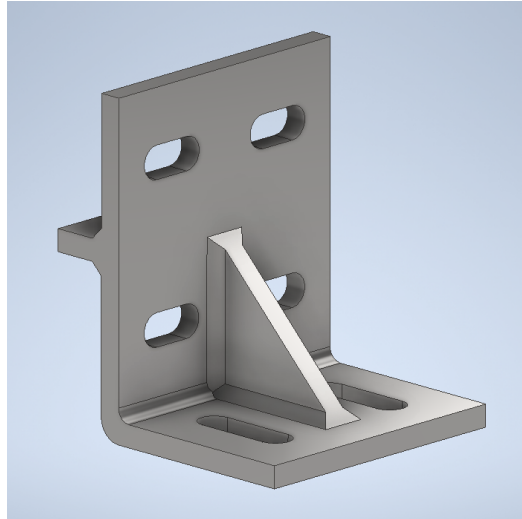
Op de bovenstaande figuur is duidelijk te zien dat er zeer hoge spanningsconcentraties zullen ontstaan rondom de sleufgaten. De maximale spanning bereikt een waarde van 458,4 MPa, wat aanzienlijk hoger is dan de toegestane spanning van 204 MPa.

Deze wijziging was voorspelbaar, en er waren reeds mogelijke oplossingen overwogen om de connector te verstevigen. Een optie zou zijn om het plaatmateriaal dikker te maken, bijvoorbeeld naar 10 à 12 mm in plaats van de huidige 8 mm. Dit is echter minder wenselijk voor de toekomst, omdat een dikte van 8 mm gebruikelijk is voor dit type profiel, wat de beschikbaarheid verhoogt en de kosten verlaagt. Het negeren van dit voordeel zou niet verstandig zijn.

Daarom is ervoor gekozen om een steundriehoek toe te passen. Deze versteviging zorgt ervoor dat niet alleen de optredende spanningen binnen acceptabele grenzen blijven, maar biedt ook het voordeel van structurele veiligheid. Dit betekent dat de connector intact zal blijven, zelfs als er fouten optreden op de bouwplaats.

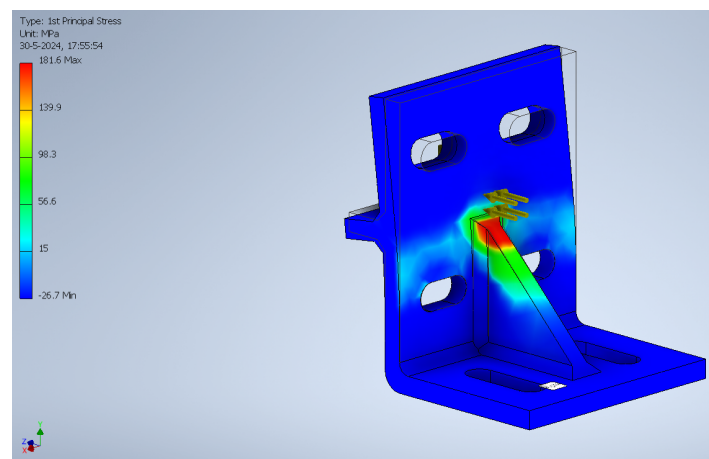
3.6.4 Spanningscontrole van L-profiel met sleufgaten en steundriehoek

De steundriehoek bestaat uit een driehoekig stalen plaatje dat aan de verbinding wordt gelast. Om praktische redenen zal het dezelfde dikte hebben als de rest van de connector ($t = 8$ mm). In Inventor wordt deze versteviging ingetekend, resulterend in de uiteindelijke connector zoals te zien is in Figuur 3.23.



Figuur 3.23: 3D-aanzicht van de connector met steundriehoek

Om de dimensies van deze driehoek te bepalen, moest een iteratief proces van trial-and-error worden uitgevoerd in de spanningsanalyse. De resulterende spanning moest onder de maximale waarde van 204 MPa blijven. Na meerdere pogingen bleek dat de gelijkbenige driehoek bestaat uit twee zijden van 55 mm. De volledige afmetingen zijn terug te vinden in Bijlage C. Deze afmetingen resulteren in de volgende spanningsanalyse, weergegeven in Figuur 3.24.



Figuur 3.24: Spanningsanalyse van de connector met steundriehoek

Deze spanningsanalyse resulteert in de volgende vergelijking (3.65):

$$\sigma_{Inventor} = 181,6 \text{ MPa} \leq f_{yd} = 204 \text{ MPa OK!} \quad (3.65)$$

Deze vergelijking bevestigt dat het laatste ontwerp voldoet aan de vereisten op het gebied van spanningen.

Hoofdstuk 4

Gerelateerd onderzoek

De focus van WoodInc en ShellterWood lag oorspronkelijk op het ontwikkelen en analyseren van de connector voor het bevestigen van de CircuWallPanels. Tijdens het onderzoeksproces bleek echter dat er aanvullend onderzoek nodig was met betrekking tot de omringende elementen. Dit aanvullende onderzoek is cruciaal om de stabiliteit en sterkte van het geheel te waarborgen. In dit gedeelte van de masterthesis zullen de noodzakelijke aanvullende onderzoeken in volgorde worden beschreven.

4.1 Dikte dragend wandpaneel (Doorbuiging paneel uit het vlak)

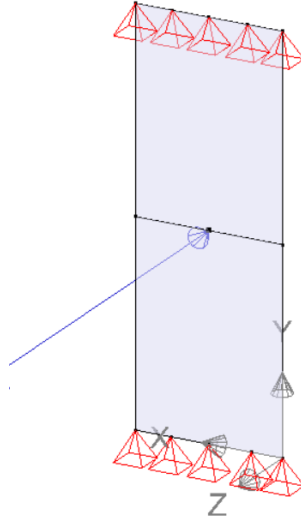
WoodInc verzocht om de draagkracht van de CircuWallPanel te evalueren. De huidige dikte van de dragende plaat (40 mm) werd in twijfel getrokken en een verhoging naar 50 mm werd overwogen. Voor het maken van proefopstellingen was het cruciaal om te bevestigen of de huidige dikte voldeed. De volgende secties zullen de berekeningen stap voor stap uitleggen.

4.1.1 Controle doorbuiging veroorzaakt door de wind

Om de structurele integriteit van het paneel te waarborgen, was het noodzakelijk om een analyse uit te voeren met betrekking tot doorbuiging. In de aanvangsfase was het essentieel om alle relevante gegevens te verzamelen om de berekeningen nauwkeurig uit te voeren. De dragende plaat werd gekenmerkt door de volgende gegevens:

- de lengte $L = 3300$ mm,
- de hoogte $h = 50$ mm,
- de breedte $b = 1200$ mm.

Bij deze analyse was het tevens noodzakelijk om het traagheidsmoment I en de oppervlakte A te berekenen. Het is echter van cruciaal belang op te merken dat tijdens deze controle de doorbuiging werd geëvalueerd als reactie op de windbelasting. Deze windkracht zou aangrijpen op het paneel langs de lange zijde, zoals geïllustreerd in Figuur 4.1.



Figuur 4.1: Aangrijpende windbelasting

De bovenstaande afbeelding illustreert duidelijk dat een aanname wordt gemaakt: voor verdere handberekeningen wordt het wandpaneel beschouwd als een balk die aan twee zijden is opgelegd. Deze veronderstelling vormt een essentieel uitgangspunt voor de volgende berekeningen. Met deze opstelling in gedachten zullen nu de waarden van het traagheidsmoment en de oppervlakte worden berekend.

$$\text{Het traagheidsmoment } I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{3300 \text{ mm} \cdot (50 \text{ mm})^3}{12} = 3,4375 \cdot 10^3 \text{ mm}^4 \quad (4.1)$$

$$\text{De oppervlakte } A = b \cdot h = 3300 \text{ mm} \cdot 50 \text{ mm} = 165 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \quad (4.2)$$

Daarnaast is het noodzakelijk om zowel de elasticiteitsmodulus E als de afschuifmodulus G van het gebruikte houtsoort te achterhalen. Deze waarden worden ontleend aan de technische fiche van het houten paneel, zoals weergegeven in Figuur 4.2.

Thickness in mm														
S - values related to the current standard EN 12369-3, SD - individual, declared values (Multistat)														
Thickness (mm) L3, L5/SD	12 - 20		> 20 - 30			> 30 - 42						> 42 - 60		
		19		22	27		32	40	42	35	42		50	60
		L3		L3	L3		L3	L3	L3	L5	L5		L3	L3
	S	SD	S	SD	SD	S	SD	SD	SD	SD	SD	S	SD	SD
Characteristic strength [N/mm²] Panel loads														
Bending strength $f_{m,0}$	35	40	30	40	37	16	33	26	25	31	36	12	32	28
Bending strength $f_{m,90}$	5	12	5	10	9	9	13	18	18	21	19	9	14	16
Share $f_{v,0}$	4		4					3,5				2,5		
Share $f_{v,90}$	5		3,5					2,5				2		
Characteristic strength [N/mm²] Disc loads														
Bending strength $f_{d,0}$	25		14					12				10		
Bending strength $f_{d,90}$	12		12					12				12		
Tensile $f_{t,0}$	16		9					6				6		
Tensile $f_{t,90}$	6		6					6				6		
Compressive $f_{c,0}$	16		16					10				10		
Compressive $f_{c,90}$	10		10					16				16		
Share $f_{t,0}$	1,6		1,6					1,2				1,2		
Share $f_{t,90}$	1,4		1,4					1,4				1,4		
Medium stiffness [N/mm²] Panel loads														
Bending strength $E_{m,0}$	10000	11000	8200	11100	11500	7600	10400	9000	9000	9400	9600	7100	10800	9800
Bending strength $E_{m,90}$	550	1500	550	1100	700	1500	1800	3100	3400	4200	3500	1500	2100	2800
Share $G_{v,0}$	470		470					470				470		
Share $G_{v,90}$	470		470					470				470		
Medium stiffness [N/mm²] Disc loads														
Bending stiffness $E_{d,0}$	4700		2900					2400				1800		
Bending stiffness $E_{d,90}$	3500		3500					4700				4700		
Tensile $E_{t,0}$	4700		3500					2400				2400		
Tensile $E_{t,90}$	2900		2900					2900				2900		
Share $G_{d,0}$	41		41					41				41		
Share $G_{d,90}$	41		41					41				41		

Figuur 4.2: Technische fiche houten wandpaneel [16]

Vanuit de bovenstaande afbeelding kunnen voor een 3-laags paneel met een dikte van 50 mm de volgende waarden worden afgeleid:

- de elasticiteitsmodulus $E = 10800 \text{ N}/(\text{mm})^2$;
- de afschuifmodulus $G = 470 \text{ N}/(\text{mm})^2$.

Nu alle gegevens zijn verzameld, kunnen de berekeningen uitgevoerd worden.

In de volgende stap worden de grenswaarden bepaald, zowel voor de elastische of ogenblikkelijke doorbuiging w_{inst} als voor de uiteindelijke doorbuiging w_{fin} .

$$w_{inst} = \frac{L}{400} = \frac{3300 \text{ mm}}{400} = 8,25 \text{ mm} \quad (4.3)$$

$$w_{fin} = \frac{L}{250} = \frac{3300 \text{ mm}}{250} = 13,2 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Vervolgens worden de randvoorwaarden bepaald. Deze zullen achterhaald worden aan de hand van Eurocode 5, zoals beschreven in [5]. Echter, er dient weer een aanname gemaakt te worden om de randvoorwaarden te kunnen bepalen. Hiervoor wordt verondersteld dat de dragende plaat een LVL-plaat is. In werkelijkheid is dit niet volledig correct, maar de eigenschappen van een LVL-plaat leunen het dichtst aan bij die van het werkelijke hout.

Belastingsduurklassen:

De belastingsduurklassen houden rekening met het effect van een constante belasting gedurende een bepaalde periode van de levensduur van de constructie. In het geval van een variabele belasting moet de juiste klasse worden bepaald door te kijken naar de geschatte variatie van de belasting in de tijd, zoals beschreven in [5].

In deze berekeningen wordt rekening gehouden met een variabele belasting, veroorzaakt door fluctuaties in de windbelasting op de wandpanelen. Het is geschat dat deze belasting minder dan een week zal duren, waardoor aan de hand van Tabel 4.1 geconcludeerd kan worden dat dit valt onder de categorie van korte belastingsduurklassen.

In deze berekeningen is er sprake van een veranderlijke belasting. Dit komt doordat de optredende wind niet voortdurend de wandpanelen zal belasten, maar dat deze fluctueert. Een schatting is dat de belasting minder dan een week zal duren, waardoor via Tabel 4.1 kan besloten worden dat het hier gaat om een korte belastingsduurklasse.

Tabel 4.1: Belastingsduurklassen [5, p.26]

Belastingsduurklassen	Grootteorde van de cumulatieve duur van de karakteristieke belasting
Blijvend	Langer dan 10 jaar
Lang	6 maanden - 10 jaar
Middellang	1 week - 6 maanden
Kort	Minder dan 1 week
Zeer kort	

Tabel 4.2 bevestigt de geschatte variatie van de belasting in de tijd.

Tabel 4.2: Voorbeelden van toewijzing aan een belastingsduurklassen [5, p.27]

Belastingsduurklassen	Belastingsvoorbeelden
Blijvend	Eigengewicht
Lang	Opslag
Middellang	Opgelegde vloerbelasting sneeuw
Kort	Sneeuw, wind
Zeer kort	Wind, bijzondere belasting

Klimaatklassen: Het systeem van klimaatklassen is hoofdzakelijk ontwikkeld om de sterkte-eigenschappen vast te stellen en om de berekening van vervormingen mogelijk te maken onder specifieke klimatologische omstandigheden, zoals beschreven in [5].

De volgende klimaatklasse is van toepassing: *Klimaatklasse 1* wordt gekenmerkt door een vochtgehalte in de materialen dat overeenkomt met een temperatuur van 20 °C en een relatieve vochtigheid van de omringende lucht die slechts gedurende enkele weken per jaar hoger is dan 65 % [5].

Partiële factor γ_M : De partiële factor γ_M voor materiaaleigenschappen en weerstanden wordt vermeld in Tabel 4.3.

Tabel 4.3: Partiële factor γ_M [5, p.29]

Fundamentele combinaties	
Gezaagd hout	1,3
Gelijmd gelamineerd hout	1,25
LVL, multiplex, OSB	1,2
Spaanplaten	1,3
Vezelplaten, hard	1,3
Vezelplaten, medium	1,3
Vezelplaten, MDF	1,3
Vezelplaten, zacht	1,3
Verbindingen	1,3
Bijzondere combinaties	1,0

Met de aanname dat een LVL-plaat wordt gebruikt, heeft γ_M een waarde van 1,2.

Modificatiefactor k_{mod} : De modificatiefactor k_{mod} voor belastingduur en vochtgehalte wordt voor elk geval vermeld in Tabel 4.4.

Tabel 4.4: Waarden van k_{mod} [5, p.33]

Materiaal	Norm	klimaat- klasse	Belastingsduurklasse				
			Blijvend	Lang	Middellang	Kort	Zeer kort
Gezaagd hout	14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Gelijmd gelamineerd hout	14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
LVL	EN 14374, EN 14279	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Multiplex	EN 636						
	Type EN 636-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	Type EN 636-2	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
OSB	Type EN 636-3	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
	EN 300						
	OSB/2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
OSB	OSB/3, OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	OSB/3, OSB/4	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Spaanbeton	EN 313						
	Type P4, Type P5	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	Type P5	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
	Type P6, Type P7	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
Vezelplaat, hard	Type P7	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
	EN 622-2						
	HB.LA, HB.HLA 1 of 2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
Vezelplaat, medium	HB.HLA 1 of 2	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
	EN 622-3						
	MBH.LA 1 of 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
Vezelplaat, MDF	MBH.HLS 1 of 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	MBH.HLS 1 of 2	2	-	-	-	0,45	0,80
	EN 622-5						
Vezelplaat, MDF	MDF.LA, MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	MDF.HLS	2	-	-	-	0,45	0,80

Op basis van de bovenstaande gegevens en Tabel 4.5 wordt de waarde van k_{mod} bepaald op 0,90.

Vervormingsfactor k_{def} : De vervormingsfactor k_{def} voor verschillende combinaties is vermeld in Tabel 4.5.

Tabel 4.5: Waarden van k_{def} [5, p.34]

Materiaal	Norm	Klimaatklasse		
		1	2	3
Gezaagd hout	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Gelijmd gelamineerd hout	EN 14080	0,60	0,80	2,00
LVL	EN 14374, EN 14279	0,60	0,80	2,00
multirow44cmMultiplex	EN 636			
	Type EN 636-1	0,80	-	-
	Type EN 636-2	0,80	1,00	-
	Type EN 636-3	0,80	1,00	2,50
OSB	EN 300			
	OSB/2	2,25	-	-
	OSB/3, OSB/4	1,50	2,25	-
Spaanplaat	EN 312			
	Type P4	2,25	-	-
	Type P5	2,25	3,00	-
	Type P6	1,50	-	-
	Type P7	1,50	2,25	-
Vezelplaat, hard	EN 622-2			
	HB.LA	2,25	-	-
	HB.HLA1, HB.HLA2	2,25	3,00	-
Vezelplaat, medium	EN 622-3			
	MBH.LA1, MBH.LA2	3,00	-	-
	MBH.HLS1, MBH.HLS2	3,00	4,00	-
Vezelplaat, MDF	EN 622-5			
	MDF.LA	2,25	-	-
	MDF.HLS	2,25	3,00	-

Door Tabel 4.5 te combineren met de voorgaande informatie, wordt een waarde van 0,60 voor k_{def} verkregen.

Vervolgens moet de initiële doorbuiging worden berekend. Hierbij wordt uitgegaan van de drukkracht die door de wind wordt veroorzaakt. Deze kracht werd besproken in *Deel 1: Optredende windbelasting* en bedraagt 675 N/m^2 .

Echter moet deze drukkracht worden omgerekend naar een belasting in GGT. Voor GGT is de partiële veiligheidsfactor gelijk aan 1,0. De volgende berekening zet de drukkracht om naar een belasting.

$$q_N = F_N \cdot b = 675 \text{ N/m}^2 \cdot 1,2 \text{ m} = 810 \text{ N/m} = 0,810 \text{ kN/m} \quad (4.5)$$

Met deze belasting kan de initiële doorbuiging w_{int} worden berekend volgens vergelijking 4.6.

$$w_{inst} = w_{m,inst} + w_{v,inst} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{5}{384} \cdot \frac{q_N \cdot L^4}{E \cdot I} + \frac{q_N \cdot L^2}{8 \cdot G \cdot \frac{5}{6} \cdot A} \\
 &= \frac{5}{384} \cdot \frac{0,810 \text{ kN/m} \cdot 10^{-3} \cdot (3300 \text{ mm})^4}{10800 \text{ N/(mm)}^2 \cdot 34375000(\text{mm})^4} + \frac{0,810 \text{ kN/m} \cdot 10^{-3} \cdot (3300 \text{ mm})^2}{8 \cdot 470 \text{ N/(mm)}^2 \cdot \frac{5}{6} \cdot 165000(\text{mm})^2}
 \end{aligned}$$

$$= 3,39 \text{ mm}$$

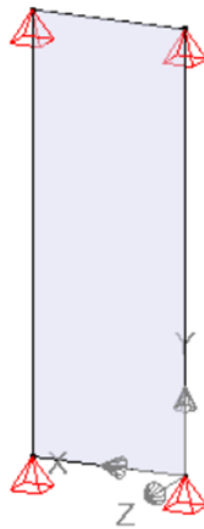
In de laatste stap moet worden gecontroleerd of de optredende doorbuiging daadwerkelijk kleiner is dan de toegestane waarde.

$$w_{inst} < w_{inst,GGT} \quad (4.7)$$

$$3,39 \text{ mm} < 8,25 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

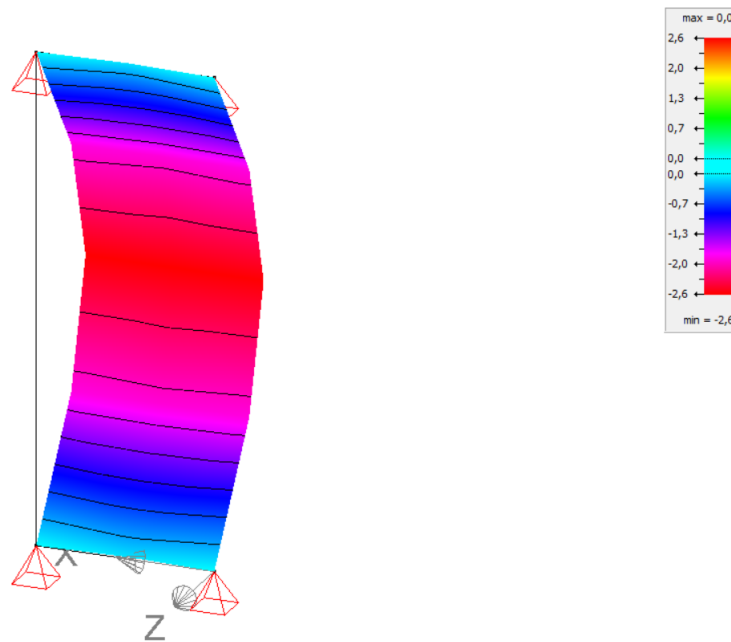
De voorwaarden worden nageleefd en er wordt geconcludeerd dat de dragende plaat voldoet aan de optredende windbelasting.

Voor een extra controle werd gebruikgemaakt van het softwareprogramma Buildsoft Diamonds. Met deze tool kon een verdere schatting van de initiële doorbuiging worden bekomen. Om deze berekeningen uit te voeren, moest het paneel in het programma worden ingetekend. Belangrijk om op te merken is dat voor de calculaties in Diamonds het paneel scharnierend is bevestigd aan de vier hoeken. Hoewel er theoretisch gesproken kan worden van een inklemming, leert de praktijk ons dat een zuivere inklemming vrijwel onmogelijk te realiseren is. Dit geldt vooral voor deze constructie, waarbij de wind aanzienlijk fluctueert in kracht en zowel trekkende als zuigende krachten uitoefent. Verder werd in Diamonds aangenomen dat de plaat is samengesteld uit LVL-Glulam I. Hoewel deze eigenschappen zeer dicht bij de werkelijke waarden liggen, zullen de uiteindelijke doorbuigingswaarden enigszins afwijken vanwege het materiaaltype. Figuur 4.3 toont de ingetekende structuur in Buildsoft Diamonds.



Figuur 4.3: Dragende plaat in Buildsoft Diamonds

Hierna moet de windbelasting op het paneel worden aangebracht, waarna de berekeningen in het programma kunnen starten. Na de calculatie is het mogelijk om de doorbuiging te genereren. Figuur 4.4 toont het resultaat.



Figuur 4.4: Doorbuiging in Buildsoft Diamonds

In de bovenstaande afbeelding is te zien dat Diamonds een waarde van 2,6 mm weergeeft voor de doorbuiging. Deze waarde ligt dicht bij de handberekende waarde ($w_{inst} = 3,39$ mm). De eerder geformuleerde verklaring voor deze afwijking blijft van kracht, maar het belangrijkste is dat de door Diamonds berekende waarde ook onder de grenswaarde van 8,25 mm ligt. Dit biedt extra zekerheid over de veiligheid van de constructie.

4.1.2 Controle doorbuiging veroorzaakt door eigengewicht

Een tweede controle voor de doorbuiging heeft betrekking op het eigengewicht van de CircuWallPanel. Hierbij is het belangrijk dat de doorbuiging op lange termijn, inclusief kruip, wordt gecontroleerd. Deze berekening wordt weer opgedeeld in verschillende fasen.

In Fase 1 wordt de grenswaarde bepaald, die identiek is aan vergelijking (4.4).

In de volgende fasen staan de randvoorwaarden centraal. Deze zijn opnieuw identiek aan de berekeningen in deel 4.1.1. Het enige verschil is dat de belastingsduurklasse verandert van kort naar blijvend, omdat we te maken hebben met het eigen gewicht. Deze redenering wordt ondersteund door Tabel 4.1 en 4.2.

Deze verandering resulteert in een wijziging van de waarde van de modificatiefactor k_{mod} naar 0,60, zoals weergegeven in Tabel 4.4.

Vervolgens moet de initiële doorbuiging w_{int} worden berekend. Deze keer wordt de berekening uitgevoerd op basis van het eigengewicht en niet op basis van de windbelasting. Daarom moet het eigengewicht, dat gelijk is aan 500 kg, worden omgerekend naar een belasting in GGT. Dit kan

worden berekend met behulp van de zwaartekrachtsversnelling $g = 9,81 \text{ N/kg}$, zoals weergegeven in vergelijking (4.8).

$$q_G = \frac{m}{b} \cdot g = \frac{500 \text{ kg}}{1,2 \text{ m}} \cdot 9,81 \text{ N/kg} = 4087,5 \text{ N/m} = 4,09 \text{ kN/m} \quad (4.8)$$

Met deze waarde kan de initiële doorbuiging berekend worden, zoals weergegeven in vergelijking (4.9).

$$w_{inst,G} = w_{m,inst} + w_{v,inst} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{5}{384} \cdot \frac{q_G \cdot L^4}{E \cdot I} + \frac{q_G \cdot L^2}{8 \cdot G \cdot \frac{5}{6} \cdot A} \\ &= \frac{5}{384} \cdot \frac{4,09 \text{ kN/m} \cdot 10^{-3} \cdot (1200 \text{ mm})^4}{10800 \text{ N/(mm)}^2 \cdot 34375000(\text{mm})^4} + \frac{4,09 \text{ kN/m} \cdot 10^{-3} \cdot (1200 \text{ mm})^2}{8 \cdot 470 \text{ N/(mm)}^2 \cdot \frac{5}{6} \cdot 165000(\text{mm})^2} \\ &= 0,31 \text{ mm} \end{aligned}$$

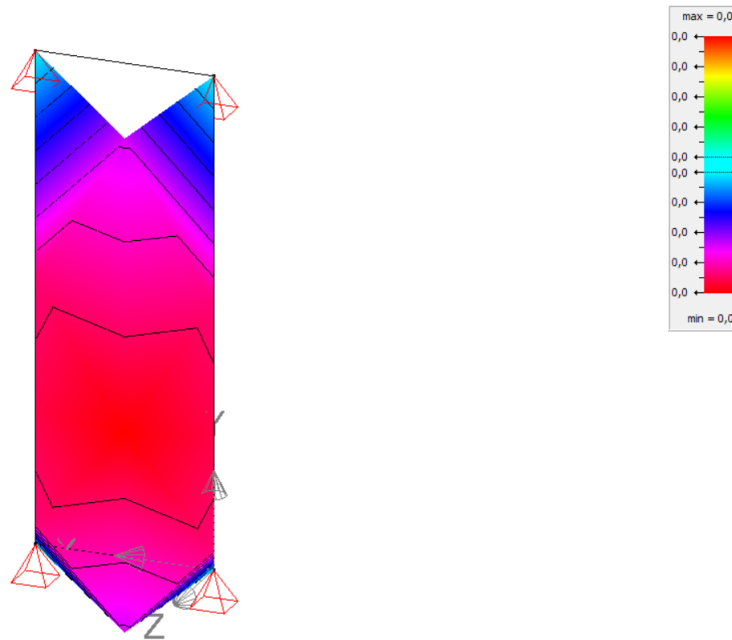
Hierna moet rekening worden gehouden met het kruipeffect, een fenomeen dat zich op lange termijn voordoet. De uiteindelijke doorbuiging $w_{fin,G}$ wordt als volgt bepaald.

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) = 0,31 \text{ mm} \cdot (1 + 0,60) = 0,49 \text{ mm} \quad (4.10)$$

In de laatste fase moet de controle worden uitgevoerd, waarbij de berekende waarde voor de uiteindelijke doorbuiging kleiner moet zijn dan de grenswaarde.

$$\begin{aligned} w_{fin,G} &< w_{fin,GGT} \\ 0,49 \text{ mm} &< 13,2 \text{ mm} \quad \text{OK!} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Vervolgens kan een extra controle worden uitgevoerd met behulp van het softwarepakket Buildsoft Diamonds, waarbij dezelfde aannames worden gehandhaafd. Figuur 4.5 toont het resultaat.



Figuur 4.5: Resultatenscherf Buildsoft Diamonds

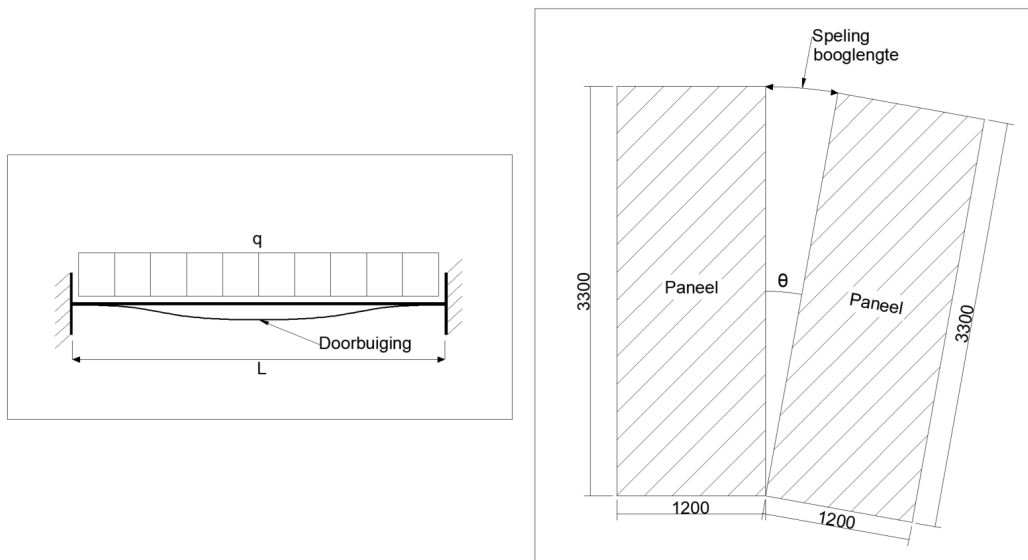
Bovenstaande afbeelding toont dat Diamonds een doorbuiging van nul weergeeft. Deze kleine waarden voor zowel de handberekening als het resultaat van Diamonds waren beide op voorhand te verwachten. De doorbuiging die ontstaat door het eigengewicht is bijna verwaarloosbaar vanwege de relatief grote hoogte van de structuur ($L = 3300$ mm). Niettemin bevestigt de controle het vermoeden.

Al deze berekeningen werden herhaald voor een drielaagse plaat met een dikte van 40 mm. Hieruit bleek dat een plaat met deze dimensies ook ruimschoots voldoet. De gedetailleerde berekeningen zijn te vinden in Bijlage D.

4.2 Doorbuiging paneel in het vlak

Binnen het kader van de implementatie van de Bouwcampus waren er specifieke uitdagingen die geanalyseerd en aangepakt moesten worden. Een cruciaal aspect hiervan was de aanpassing van de gebruikelijke bevestiging van de CircuWallPanels aan een houtskeletstructuur naar de bevestiging aan een stalen THQ-ligger. Deze ligger zal een bepaalde doorbuiging ervaren, wat mogelijke bewegingen tussen de wandpanelen tot gevolg heeft. Het onderzoek richtte zich op het bepalen van de omvang van deze verplaatsing door de hoekverdraaiing van ieder paneel.

Ten eerste wordt de doorbuiging van de THQ-ligger onderzocht. De ligger is gemonteerd aan de kolommen van het gebouw en wordt geacht aan beide uiteinden te zijn ingeklemd. Op deze THQ-ligger met een lengte van 9600 mm zullen verschillende connectoren bevestigd worden, zoals beschreven in hoofdstuk 3. Aan deze connectoren worden daarna diverse wandpanelen bevestigd. De doorbuiging van de ligger, ten gevolge van de belasting, zal resulteren in openingen tussen de gemonteerde panelen. Om de resulterende opening te bepalen, is het noodzakelijk om de hoekverdraaiing θ te berekenen. Figuur 4.6 toont aan de linkerkant een schematische voorstelling van de configuratie en aan de rechterkant de aanduiding van de hoekverdraaiing θ .



Figuur 4.6: Ingekleemde THQ-ligger en paneelspeling t.g.v. rotatie

Alvorens de berekeningen uit te voeren, dienen de randvoorwaarden te worden gedefinieerd. De THQ-ligger van de Bouwcampus betreft een stalen balk met de volgende eigenschappen:

- de lengte $L = 9600$ mm;
- het traagheidsmoment $I = 3,6617 \cdot 10^8$ mm⁴;
- de stijfheid $E = 205000$ MPa.

Niettemin zijn zowel de waarden van het traagheidsmoment I als de stijfheid E onbekend, waarvoor bovenstaande aannames zijn gemaakt.

De ligger wordt onderworpen aan een gelijkmatige belasting van $\omega = 50 \text{ kN/m}$. Deze belasting omvat een veiligheidsmarge die rekening houdt met het eigengewicht van de ligger, de belasting van de panelen, de langetermijneffecten van kruip en de vervormingen door temperatuurschommelingen.

De bepaling van de maximale hoekverdraaiing komt voort uit de formule van de doorbuiging, aangezien de hoekverdraaiing de afgeleide is van de doorbuiging. De volgende vergelijkingen (4.12 - 4.13) illustreren de berekeningsmethode volgens [17].

$$\text{Doorbuiging } \delta = \frac{\omega \cdot x^2}{24 \cdot E \cdot I} \cdot (L - x)^2 \quad (4.12)$$

$$\text{Hoekverdraaiing } \theta = \frac{d\delta}{dx} = \frac{\omega \cdot x \cdot (x - L) \cdot (2 \cdot x - L)}{12 \cdot E \cdot I} \quad (4.13)$$

Met behulp van vergelijking (4.13) kan de hoekverdraaiing worden beschreven voor elke positie. De waarde van x varieert van 0 tot 9600 mm. Om de maximale waarden van de hoekverdraaiing te bepalen, is het noodzakelijk de nulpunten van de afgeleide van de hoekverdraaiingsformule te vinden. Deze berekening kan worden uitgevoerd met behulp van vergelijking (4.14).

$$\frac{d\theta}{dx} = 0 \quad (4.14)$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{\omega \cdot (6 \cdot x^2 - 6 \cdot L \cdot x + L^2)}{12 \cdot E \cdot I} = 0$$

$$x = 2029 \text{ mm of } x = 7571 \text{ mm}$$

Door de verkregen waarden voor x terug te substitueren in de hoekverdraaiingsvergelijking (4.13), resulteert dit in een maximale hoekverdraaiing van 0,00472557 rad. Vermits de paneelhoogte 3300 mm bedraagt, kan de booglengte (opening) worden bepaald met behulp van vergelijking (4.15):

$$\text{Booglengte} = \theta \cdot h = 0,00472557 \text{ rad} \cdot 3300 \text{ mm} = 15,6 \text{ mm} \quad (4.15)$$

De bovenstaande berekening resulteert in een maximale opening van 15,6 mm. Deze speling moet worden opgevangen met behulp van een luchtdichtingsstrip. Indien deze strip de juiste afmetingen heeft en correct wordt bevestigd, garandeert het de luchtdichtheid van de constructie. Voor de gedetailleerde berekening kan men verwijzen naar Bijlage E. In deze bijlage is de positie van de maximale hoekverdraaiing, hier afgerond $x = 2030 \text{ mm}$, aangeduid in oranje markering.

De maximale doorbuiging van de ligger wordt berekend met dezelfde methode. De positie waar de maximale doorbuiging optreedt, is het punt waar de afgeleide van de doorbuigingsfunctie gelijk is aan nul. Dit punt wordt ook wel het "nulpunt van de hoekverdraaiing" genoemd. Voor deze ligger bevindt de maximale doorbuiging zich op $L/2$, wat overeenkomt met 4800 mm. De waarde van de maximale doorbuiging op dit punt bedraagt 14,7 mm.

Hoofdstuk 5

Besluit

Deze masterproef richtte zich op het ontwerp en de ontwikkeling van een circulaire connector voor het verbinden van CircuWallPanels aan de vloer volgens het WoodInc-systeem voor het Bouwcampusproject. De connector moest voldoende weerstand bieden tegen zowel het gewicht van de gevelpanelen als de windbelastingen. De panelen hebben een massa van 500 kg en de windbelasting werd bepaald met behulp van Wind Interactive, een softwaretool die de regels van het onderzoeksinstituut Buildwise voor windbelasting volgt. De maximale winddruk op een paneel werd vastgesteld op 675 N/m².

Het uiteindelijke ontwerp is een L-vormige connector gemaakt van S235JR staal met afmetingen van 120 mm x 80 mm x 100 mm en een dikte van 8 mm. De connector maakt het mogelijk om vier CircuWallPanels in de hoeken te verbinden met behulp van M8 8.8 bouten. Er is ook een gewichtanker met afmetingen van 20 mm x 100 mm om de verticale belasting van het gewicht van de gevelpanelen op te vangen. De verdeelde belasting op het anker bedraagt 3,375 MPa. De connector heeft tevens een praktische functie: het vereenvoudigt de installatie van de panelen op de bouwplaats met behulp van kranen. De panelen kunnen rusten op de reeds geïnstalleerde gewichtankers voordat ze worden vastgeschroefd.

De boutverbindingen werden gecontroleerd met de toepasselijke Eurocodes, inclusief controles op schuifweerstand, drukweerstand, treksterkte en ponsweerstand per bout. Deze controles bevestigden de ontwerpanalyse meerdere malen. Het draagvermogen van de lasnaad werd eveneens gecontroleerd.

Het L-profiel werd voorzien van een extra steundriehoek om de hoge spanningsconcentraties rond de sleufgaten te verminderen. Dit werd bevestigd door middel van een spanningsanalyse in Inventor, die de handberekeningen verifieerde.

De Excel-module en Autodesk Inventor leverden vergelijkbare resultaten voor de maximale spanning in een L-profiel zonder gaten of steundriehoek. Dit maakt de Excel-module een handig hulpmiddel voor het bepalen van de initiële afmetingen van het profiel. Echter, om de juiste afmetingen van de steundriehoek te bepalen, is een spanningsanalyse met geavanceerde software zoals Autodesk Inventor vereist, die rekening houdt met de extra spanningen die door de sleufopeningen worden veroorzaakt.

WoodInc en zijn partner ShellterWood stelden nog enkele aanvullende vragen. Deze vragen waren niet direct verbonden aan de connector, maar zorgden voor enige bezorgdheid binnen het project. De dikte van de dragende plaat in de CircuWallPanel, die fungeert als verbinding tussen de twee panelen, werd gecontroleerd. Het paneel werd gecontroleerd op zowel een 3-laagse plaat van 50 mm dik als één van 40 mm dik, dit vanwege onzekerheden over de sterkte van de plaat. Beide bleken voldoende sterkte te bieden voor de verbinding tussen de CircuWallPanel en de ontworpen connector.

Het Bouwcampusproject week af van de normale houtskeletbouw waarmee het bedrijf al enige tijd werkt, wat leidde tot verdere vragen. Bij het project van de Bouwcampus wordt gebruikgemaakt van een stalen THQ-ligger, die door blijvende belasting zal doorbuigen. Dit betekent dat de wandpanelen ten opzichte van elkaar zullen bewegen. De waarde van de opening veroorzaakt door de rotatie van de panelen werd berekend en de hoekverdraaiing zal resulteren in een maximale opening van 15,6 mm. Deze wordt in de praktijk opgevuld met luchtdichte strips. De ligger zal bovendien maximaal 14,7 mm doorbuigen in het middelpunt van de ligger.

De bovengenoemde berekeningen werden allemaal uitgevoerd in een geautomatiseerde Microsoft Excel-module. Deze ontwikkeling maakt het mogelijk om parameters snel en eenvoudig aan te passen, waardoor diverse connectoren kunnen worden ontwikkeld voor verschillende belastingsituaties. Deze ontwikkeling zal een meerwaarde zijn voor de toekomstige projecten die WoodInc en ShellterWood zullen uitvoeren, waarin ze circulariteit steeds centraal zetten.

De ruime marges die in de berekeningen zijn gehanteerd, garanderen dat de connector over voldoende weerstand en sterkte beschikt voor de beoogde toepassing binnen de projecten. De keuze voor eenvoudige boutverbindingen maakt demontage mogelijk zonder structurele schade. Dit voordeel stelt WoodInc en ShellterWood in staat om de connector te hergebruiken in toekomstige projecten, waardoor de circulariteit gegarandeerd wordt.

Hoewel de haalbaarheid van het ontwerp op theoretische basis is aangetoond, is het uitvoeren van praktische testen tijdens de looptijd van deze thesis niet mogelijk gebleken. Desondanks wordt het aanbevolen om dergelijke testen in de toekomst uit te voeren.

Praktische testen bieden een cruciale opportuniteit om de prestaties van de connector in realistische omstandigheden te evalueren. Door de connector te testen onder belasting en in verschillende gebruiksomgevingen, kunnen waardevolle inzichten worden verkregen.

Referentielijst

- [1] WoodInc, “Woodinc,” [online]. Available: <https://woodinc.be/> [geopend 22 oktober 2023].
- [2] ShellterWood, “Shellterwood,” [online]. Available: <https://www.shellterwood.com/nl/> [geopend 22 oktober 2023].
- [3] NBN, *NBN EN 1991-1-4, Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-4: Algemene belastingen - Windbelasting (+ AC:2010)*. Bureau voor Normalisatie, 2005.
- [4] Buildwise, “Wind interactive(wint) tool,” [online]. Available: <https://www.buildwise.be/nl/expertise-ondersteuning/buildwise-tools/wind-interactive/> [geopend 4 november 2023].
- [5] NBN, *NBN EN 1995-1-1 +A1 NL, Eurocode 5: Ontwerp van houtconstructies - Deel 1-1: Algemeen - Gemeenschappelijke regels en regels voor gebouwen (Geconsolideerde versie, inclusief AC:2006 en A1:2008)*. Bureau voor Normalisatie, 2015.
- [6] NBN, *NBN EN 1993-1-1, Eurocode 3: Ontwerp en berekeningen van staalconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen (+ AC:2009)*. Bureau voor Normalisatie, 2005.
- [7] NBN, *NBN EN 1993-1-8, Eurocode 3: Ontwerp en berekeningen van staalconstructies - Deel 1-8: Algemene regels - Ontwerp en berekening van verbindingen (+ AC:2009)*. Bureau voor Normalisatie, 2005.
- [8] Kloeze, “Bouten,” [online]. Available: <https://www.kloeze-bv.nl/technische-informatie/bout-eigenschappen/> [geopend 8 december 2023].
- [9] NBN, *NBN EN 1990 ANB, Eurocode 0: Grondslagen van het constructief ontwerp*. Bureau voor Normalisatie, 2007.
- [10] 247TailorSteel, “Op maat gesneden metalen platen, buizen en kantdelen,” [online]. Available: <https://www.247tailorsteel.com/nl/richtlijnen-voor-kanten> [geopend 29 maart 2024].
- [11] NBN, *Warmgewalste producten van constructiestaal - Deel 2: Technische leveringsvoorwaarden voor ongelegeerd constructiestaal (+AC:2005)*. Bureau voor Normalisatie, 2005.
- [12] Meka Steel, “S235jr t/m s355j2, warmgewalst ongelegeerd constructiestaal volgens en 10025-2,” [online]. Available: <https://mekasteel.nl/nl/producten/s235jr-tm-s355j2> [geopend 21 februari 2024].
- [13] NGI, “Kaart van de referentiewindsnelheden in België,” (Brussel), 2001.
- [14] H. Wittel, D. Jannasch, J. Voßiek, and C. Spura, *Roloff/Matek Machineonderdelen [Theorieboek] 5^{de} editie*. Amsterdam : Boom, 2013.

- [15] H. Wittel, D. Jannasch, J. Voßiek, and C. Spura, *Roloff/Matek Machineonderdelen [Tabel-lenboek] 5^{de} editie*. Amsterdam : Boom, 2013.
- [16] Binderholz, “Nachwachsender rohstoff, intelligente und vielseitige lösungen aus massivholz,” [online]. Available: <https://www.binderholz.com/> [geopend 20 maart 2024].
- [17] B. Vandoren and K. De Prof, *2840 Cursus Structuurmechanica 1*. Diepenbeek: UHasselt, 2021.

Bijlagen

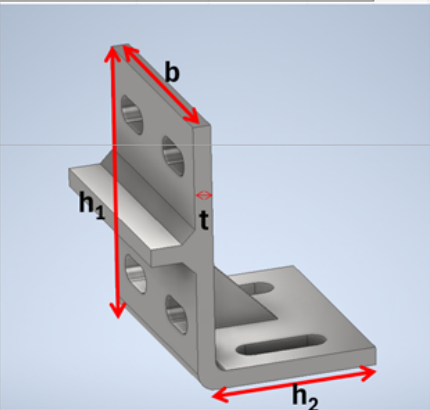
Bijlage A - Excel Tool: Dimensionering connector

87

Masterproef IiW 2023-2024
Woodinc, Shellterwood
Pieter Gielkens
Jente Jans

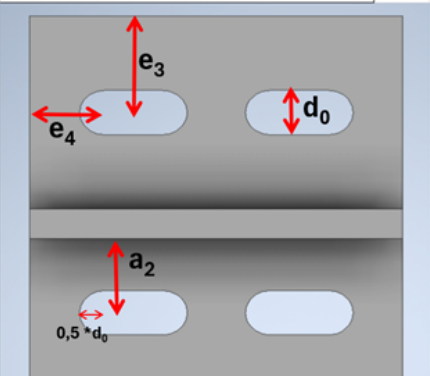
Dimensioneren connector			
NBN EN 1993-1-8 & 1995-1-1 +A1 NL			

Gegevens			
Betekenis	Symbol	Hoeveelheid	Eenheid
Dikte	t	8	mm
Hoogte 1	h_1	120	mm
Hoogte 2	h_2	80	mm
Breedte	b	100	mm
Diameter gat	d_0 plaat	12	mm
Boutklasse	M8	8	mm



Volgens Tabel 3.3 en figuur 3.1 [EN 1993]			
Minimale afstanden			
Betekenis	Symbol	Hoeveelheid	Eenheid
Hart-op-hartafstand	p_1	26,4	mm
Eindafstand	e_3	18	mm
Randafstand	e_4	18	mm
Afstand opening	$0,5 \cdot d_0$	6	

Volgens Tabel 8.5 en figuur 8.7 [EN 1995]			
Minimale afstanden			
Betekenis	Symbol	Hoeveelheid	Eenheid
Onbelaste eindafstand	a_2	24	mm



UIMTRADE
Powered by IMC Group

Waar ben je naar op zoek?

Adres: nodig! Tel: +31(0)475 - 470 280

Home Metaal Hout Tuin Afbouw Bevestigingsmateriaal Gereedschappen Glas Units

Aanname: Gebruik maken van GWG hoek 120 x 80 x 8 mm, omdat dit een standaard afmeting is

GWG Hoek 120 X 80 X 8 MM

Artikelnummer 30856

Op voorraad
Levertijd: Afhalen binnen 3 tot 5 werkdagen, Bezorgen 5 tot 10 werkdagen

Omschrijving GWG Hoek 120 x 80

Afmetingen 120 X 80 X 8 MM

Gewicht/m 12,4

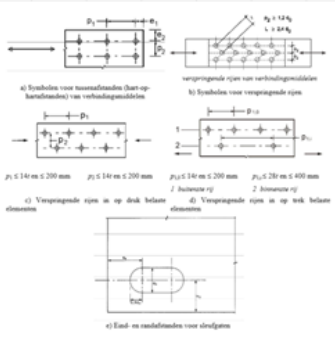
Gewicht 12,40 kg/m

Tabel 3.3: Minimale en maximale hart-op-hartafstanden, eind- en randafstanden			
afstanden en randafstanden, zie figuur 3.1	maximale afstand		
	constructies vervaardigd van staalconstructie overeenkomstig EN 1993-1-1 met uitzondering van staalconstructie overeenkomstig EN 1993-1-1		
standaard a_1	1,2b	4e + 40 mm	minimale waarde van 8e of 127 mm
afstand a_2 op eindafstand	1,5e	4e + 40 mm	minimale waarde van 8e of 127 mm
hart-op-hartafstand p_1	2,5e	Minimale waarde van 12e of 200 mm	Minimale waarde van 12e of 200 mm
hart-op-hartafstand p_2	2,5e	Minimale waarde van 12e of 200 mm	Minimale waarde van 12e of 200 mm
hart-op-hartafstand p_3	2,5e	Minimale waarde van 12e of 200 mm	Minimale waarde van 12e of 200 mm
hart-op-hartafstand p_4	2,5e	Minimale waarde van 12e of 200 mm	Minimale waarde van 12e of 200 mm

De waarden voor a_1 en a_2 zijn de maximale afstanden, en lokaal gelaste plassen in combinatie met een continue of verbanden in een (na het bruisen) lokaal gelaste constructie, en

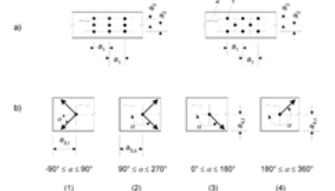
De waarden voor p_1 en p_2 zijn de maximale afstanden, en lokaal gelaste plassen tussen de verbandingsgaten

Lokaal gelaste plassen in verbandingsgaten moeten niet naar buiten of naar binnen van de lussen of de plassen a_1 en a_2 worden toegevoegd. Het is toegestaan om lokaal gelaste plassen toe te voegen aan de lussen of de plassen a_1 en a_2 die de afstanden tussen verbandingsgaten p_1 en p_2 zijn. De afstand tussen een lussen of een plassen en een verbandingsgat moet niet minder zijn dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder dan $2e$ of de dikte van het lussen of plassen, en anderszels niet minder



Figuur 3.1: Symbolen voor eind- en randafstanden en hart-op-hartafstanden van verbindingen

Tabel 8.5 — Minimale tussen-, eind- en randafstanden voor stiften		
Tussen-, eind- en randafstanden (zie figuur 8.7)	Hoek	Minimale tussen-, eind- en randafstanden
a_1 (evenwijdig aan de vezelrichting)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 \cdot 2) \cdot \cos(\alpha) \cdot d$
a_2 (loodrecht op de vezelrichting)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	3d
$a_{2,1}$ (belast eind)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	max (7d, 60 mm)
$a_{2,2}$ (onbelast eind)	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$ $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	max($a_{2,1}$ sine d), 3d



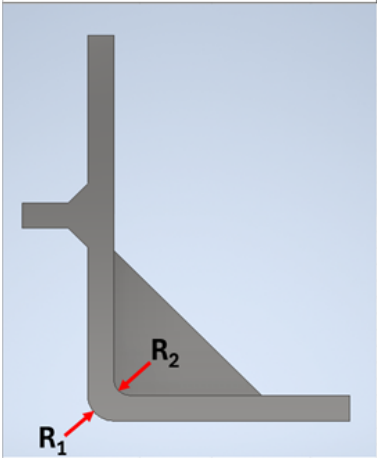
α_{b1} (belaste rand)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max(2\alpha + 2 \sin \alpha) / 3$
α_{b2} (onbelaste rand)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3\alpha / 2$

Verklaring

- (1) belaste eindafstand
- (2) onbelaste eindafstand
- (3) belaste randafstand
- (4) onbelaste randafstand
- 1 verbindingsranden
- 2

Figuur 8.7 — Tussen-, eind- en randafstanden
a) tussenafstand evenwijdig aan de verbindingslijn in een rij en loodrecht op de verbindingslijn tussen rijen, b) rand- en eindafstanden

Minimale afstanden			
Betekenis	Symbool	Hoeveelheid	Eenheid
Uitwendige plooiohoek	R_1		8 mm
Inwendige plooiohoek	R_2		4,74 mm



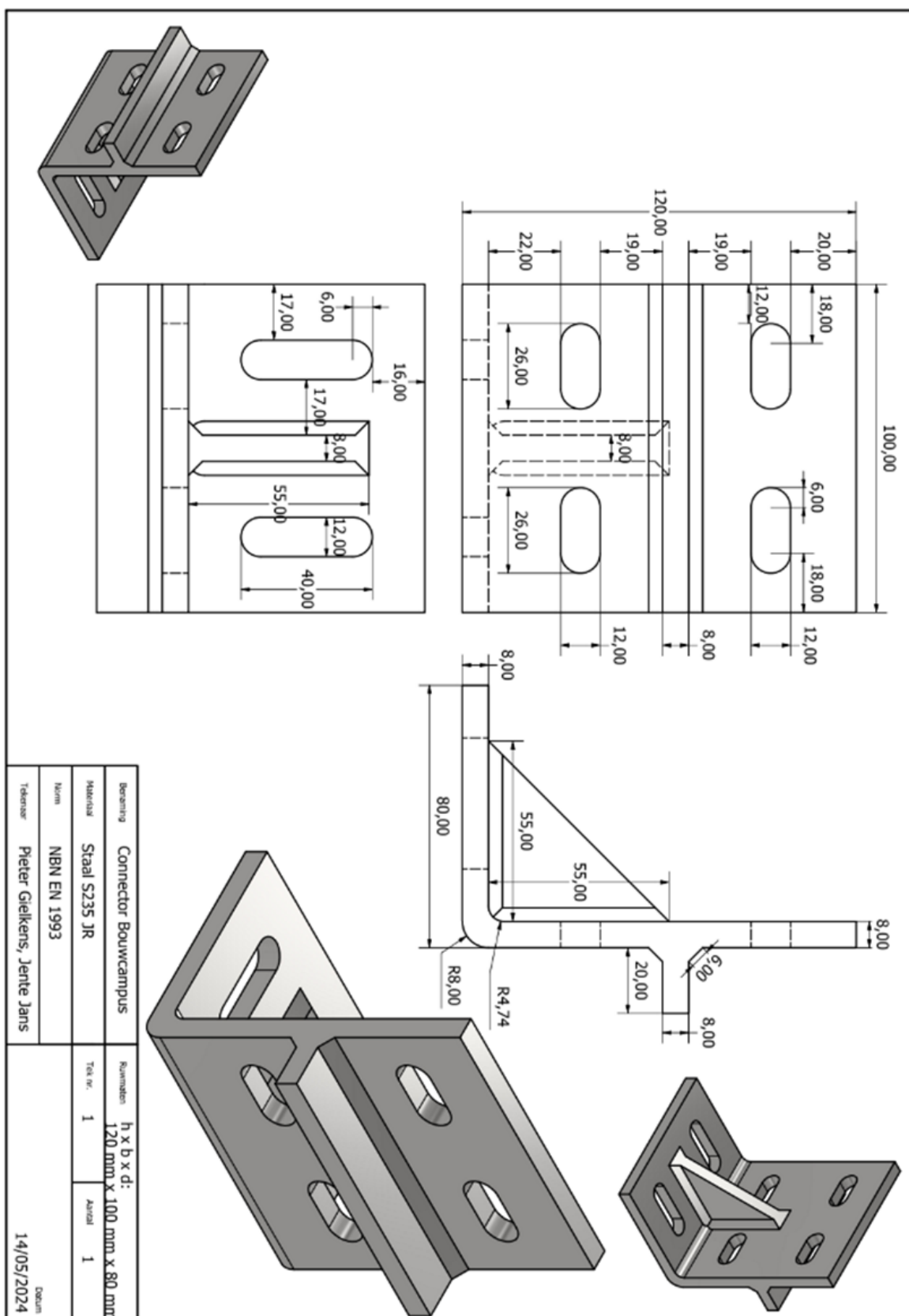
Inwendige Radius Haaks

Materialdikte	Staal	RVS	Aluminium	Hout Staal
0,8 mm	1,39	1,56	-	
1 mm	1,40	1,58	1,27	
1,25 mm	1,62	1,57	-	
1,5 mm	1,65	1,9	1,47	
2 mm	1,88	2,22	1,67	
2,5 mm	2,41	2,94	2,11	
3 mm	2,75	3,75	2,50	
4 mm	3,02	4,48	3,3	
5 mm	3,62	7,82	4,07	
6 mm	4,62	11,91	5,34	
8 mm	8	11,64	8,12	8
10 mm *	8	15	-	8,23
12 mm *	7,83	-	-	7,02

Inwendige Radius Scherp

Materialdikte	Staal	RVS	Aluminium
0,8 mm	1,41	1,72	-
1 mm	1,35	1,62	1,28
1,25 mm	1,27	1,52	-
1,5 mm	1,19	1,42	1,12
2 mm	1,3	1,59	1,22
2,5 mm	1,73	2,17	1,61
3 mm	2,51	3,73	2,86
4 mm	2,24	3,28	2,48
5 mm	2,45	5,44	2,7
6 mm	3,08	8,78	3,53
8 mm	4,74	-	4,33

[illegible]



Berekening	Connector Bouwcampus		Ruimtematen	h x b x d: 120 mm x 100 mm x 80 mm		
Material	Staal S235 JR		Totaal nr.	1	Aantal	1
Norm	NBN EN 1993					
Tekenaar	Pieter Gielkens, Jente Jans		14/05/2024			

Microsoft Excel-bestand, controle doorbuiging, 3 layer 50 mm

Masterproef BW 2023-2024

Wouda, Bouchard

Pieter Gielens

Jeroen Jans

Centrale Dicht Dragspel plaat (CintraWapPanel)

NEN EN 1995-1-1 + A1+N

Gegevens

Betekenis	Symbol	Hoofteenhed	Eenheden
lengte	l	m	3300 mm
hoogte	h	mm	40 mm
breedte	b	mm	2200 mm
Traagheidsmoment	I	mm^4	17600000
Oppervlakte	A	mm^2	132000

Uit Technische fiche

Elastischiteitmodulus	E	N/mm^2	9000
Achttrekmodulus	G	N/mm^2	4700

Doorbuigingscontrole veroorzaakt door de wind

Step 1: Bepalen grenswaarde

Grootste overspanning	l	3300 mm
de elastische of ogenblikkelijke doorbuiging	w_{elast}	8,29 mm
de uiteindelelijke doorbuiging	w_{ult}	15,2 mm

Step 2: Bepalen randvoorwaarden

Aanname: voor het achterhalen van de randvoorwaarden wordt er verondersteld dat er met VLV gerekend wordt

Belastinggrediente	k_{cat}	Kort
Kleinvalklasse	K_{cat}	1
Partiële veiligheidsfactor	γ_{M}	1,2
Modificatiefactor voor belastingduur en vochtgehalte	ψ_{M}	0,90
Versterkingsfactor	ψ_{M}	0,90

Step 3: Bepalen initiële doorbuiging

Kracht (wind - draagkracht)	F_{wind}	539 N/m
-----------------------------	-------------------	---------

Kracht dient omgezet te worden naar belasting (GG)

Belasting (wind - draagkracht)	q_{wind}	0,648 N/m
initiële doorbuiging ($w_{\text{init}} = w_{\text{elast}}$)	w_{init}	6,32 mm

Step 4: Controle

$w_{\text{init}} < w_{\text{max}}$	WAAR
------------------------------------	------

Step 5: vergelijken met Bultsch Diamonds

Aanname: voor het achterhalen van de randvoorwaarden wordt er verondersteld dat er met VLV-ULTRALAM gerekend wordt

Doorbuiging handrekening	w_{hand}	6,32 mm
Doorbuiging Bultsch Diamonds	w_{BD}	4,10 mm

Waarde ligt verder uit elkaar, dit valt te verklaren doordat de materiaaleigenschappen van elkaar afwijken. Maar het belang is dat beide kleiner dan w_{max}

Doorbuigingscontrole veroorzaakt door het eigengewicht

Step 1: Bepalen grenswaarde

Densiteit (Aanname: VL 25c)	ρ	440 kg/m ³
Grootste overspanning	l	3300 mm
de elastische of ogenblikkelijke doorbuiging	w_{elast}	6,32 mm
de uiteindelelijke doorbuiging	w_{ult}	13,2 mm

Step 2: Bepalen randvoorwaarden

Aanname: voor het achterhalen van de randvoorwaarden wordt er verondersteld dat er met VLV gerekend wordt

Belastinggrediente	k_{cat}	Kort
Kleinvalklasse	K_{cat}	1
Partiële veiligheidsfactor	γ_{M}	1,2
Modificatiefactor voor belastingduur en vochtgehalte	ψ_{M}	0,90
Versterkingsfactor	ψ_{M}	0,90

Step 3: Bepalen initiële doorbuiging

Eigengewicht (met draagpel 50 mm)	G	500 N/m
Eigengewicht	G	430,30 N/m

Kracht dient omgezet te worden naar belasting (GG)

Zwaarteveldsterkte	q	0,63 N/m
Belasting (eigengewicht)	q_{eig}	0,52 N/m
initiële doorbuiging ($w_{\text{init}} = w_{\text{elast}}$)	w_{init}	0,63 mm

Step 4: Bepalen van de uiteindelelijke doorbuiging

Uiteindelelijke doorbuiging (naar eindgepunt)	w_{ult}	0,98 mm
---	------------------	---------

Step 5: Controle

$w_{\text{ult}} < w_{\text{max}}$	WAAR
-----------------------------------	------

Step 6: vergelijken met Bultsch Diamonds

Aanname: voor het achterhalen van de randvoorwaarden wordt er verondersteld dat er met VLV-ULTRALAM gerekend wordt

Doorbuiging handrekening	w_{hand}	1,2 mm
Doorbuiging Bultsch Diamonds	w_{BD}	0,60 mm

Waarde ligt kort bij elkaar. Bultsch Diamonds geeft een waarde gelijk aan nul. Dit komt doordat de plaat een grote hoogte heeft, waardoor de doorbuiging op lange termijn zo goed als verwaarloosbaar is. Maar beide waarden zijn kleiner dan w_{max}

Aanname: 3 layer paneel van 40 mm, bestaat uit 3 layer van 40 mm

1. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

2. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

3. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

4. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

5. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

6. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

7. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

8. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

9. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

10. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

11. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

12. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

13. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

14. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

15. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

16. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

17. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

18. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

19. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

20. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

21. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

22. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

23. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

24. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

25. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

26. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

27. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

28. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

29. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

30. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

31. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

32. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

33. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

34. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

35. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

36. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

37. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	mm
Width	2200	mm
Moment of Inertia	17600000	mm ⁴
Area	132000	mm ²
Elastic Modulus	9000	N/mm ²
Shear Modulus	4700	N/mm ²

38. Bepalen van de randvoorwaarden

Parameter	Value	Unit
Length	3300	mm
Height	40	

Masterproef IIW 2023-2024

WoodInc, Shellterwood

Pieter Gielkens

Jente Jans

Controle differentieële zetting THQ-lijger (Bouwcampus)

Gegevens			
Betekenis	Symbool	Hoeveelheid	Eenheid
Elasticiteitsmodulus	E	205000	MPa
Traagheidsmoment	I	366170000	mm ⁴
Verdeelde belasting	q	50	N/mm
Lengte	L	9600	mm

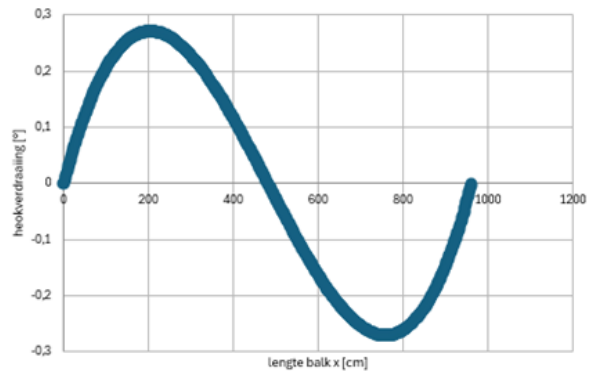
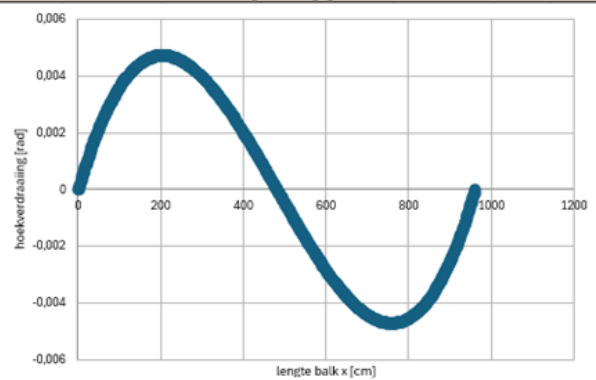
Maximale booglengte

Stap 1: Bepalen hoekverdraaiing voor iedere waarde van x			
x [mm]	θ [rad]	θ [°]	
0	0	0	0
10	5,0996E-05	0,002921857	
20	0,000101673	0,005825432	
30	0,000152032	0,008710766	
40	0,000202072	0,011577895	
50	0,000251796	0,014426858	
60	0,000301204	0,017257693	
70	0,000350295	0,020070438	
80	0,000399072	0,022865131	
90	0,000447534	0,025641811	
100	0,000495683	0,028400516	
110	0,000543518	0,031141283	
120	0,000591041	0,033864152	
130	0,000638252	0,036569159	
140	0,000685152	0,039256344	
150	0,000731742	0,041925745	
160	0,000778022	0,044577399	
170	0,000823993	0,047211345	
180	0,000869656	0,049827621	
190	0,000915011	0,052426265	
200	0,000960059	0,055007315	
210	0,0010048	0,05757081	
220	0,001049236	0,060116787	
230	0,001093366	0,062645285	
240	0,001137193	0,065156343	
250	0,001180715	0,067649997	
260	0,001223935	0,070126287	
270	0,001266852	0,07258525	
280	0,001309467	0,075026924	
290	0,001351781	0,077451349	
300	0,001393795	0,079858561	
310	0,001435509	0,0822486	
320	0,001476924	0,084621503	
330	0,00151804	0,086977308	
340	0,001558859	0,089316054	
350	0,001599381	0,091637779	
360	0,001639606	0,09394252	
370	0,001679536	0,096230317	
380	0,00171917	0,098501207	
390	0,00175851	0,100755228	
400	0,001797557	0,102992419	
410	0,00183631	0,105212818	
420	0,001874771	0,107416463	
430	0,00191294	0,109603392	
440	0,001950818	0,111773643	
450	0,001988406	0,113927254	
460	0,002025704	0,116064264	
470	0,002062712	0,118184711	
480	0,002099433	0,120288633	
490	0,002135865	0,122376067	
500	0,002172011	0,124447053	
510	0,00220787	0,126501629	
520	0,002243443	0,128539832	
530	0,002278732	0,1305617	
540	0,002313735	0,132567273	
550	0,002348455	0,134556587	
560	0,002382892	0,136529682	
570	0,002417047	0,138486595	
580	0,00245092	0,140427365	
590	0,002484512	0,14235203	
600	0,002517823	0,144260627	
610	0,002550854	0,146153195	
620	0,002583607	0,148029773	
630	0,002616081	0,149890398	
640	0,002648277	0,151735108	

Stap 2: Bepalen maximale hoekverdraaiing

x [mm]	θ [rad]	θ [°]	Paneelhoogte [m]	Booglengte [m]
2030	0,004725566	0,270754979	3,3	0,015594367
7570	-0,004725566	-0,270754979	3,3	-0,015594367

In grafieken gegoten



650	0,002680196	0,153563943							
660	0,002711839	0,155376939							
670	0,002743206	0,157174135							
680	0,002774298	0,158955569							
690	0,002805116	0,16072128							
700	0,002835659	0,162471305							
710	0,00286593	0,164205683							
720	0,002895928	0,165924451							
730	0,002925654	0,167627649							
740	0,00295511	0,169315314							
750	0,002984295	0,170987484							
760	0,00301321	0,172644198							
770	0,003041856	0,174285493							
780	0,003070233	0,175911409							
790	0,003098343	0,177521982							
800	0,003126186	0,179117251							
810	0,003153762	0,180697255							
820	0,003181073	0,182262031							
830	0,003208118	0,183811618							
840	0,003234899	0,185346054							
850	0,003261416	0,186865376							
860	0,00328767	0,188369624							
870	0,003313662	0,189858835							
880	0,003339392	0,191333048							
890	0,00336486	0,1927923							
900	0,003390069	0,19423663							
910	0,003415017	0,195666076							
920	0,003439707	0,197080676							
930	0,003464138	0,198480468							
940	0,003488311	0,199865491							
950	0,003512227	0,201235783							
960	0,003535887	0,202591381							
970	0,003559291	0,203932324							
980	0,003582439	0,205258651							
990	0,003605334	0,206570398							
1000	0,003627974	0,207867605							
1010	0,003650362	0,20915031							
1020	0,003672497	0,210418551							
1030	0,00369438	0,211672365							
1040	0,003716012	0,212911791							
1050	0,003737393	0,214136868							
1060	0,003758525	0,215347633							
1070	0,003779408	0,216544125							
1080	0,003800042	0,217726382							
1090	0,003820429	0,218894441							
1100	0,003840568	0,220048342							
1110	0,003860461	0,221188122							
1120	0,003880108	0,222313819							
1130	0,00389951	0,223425472							
1140	0,003918668	0,224523118							
1150	0,003937581	0,225606797							
1160	0,003956252	0,226676545							
1170	0,00397468	0,227732402							
1180	0,003992867	0,228774405							
1190	0,004010812	0,229802593							
1200	0,004028517	0,230817003							
1210	0,004045982	0,231817675							
1220	0,004063208	0,232804645							
1230	0,004080195	0,233777953							
1240	0,004096945	0,234737636							
1250	0,004113457	0,235683732							
1260	0,004129733	0,23661628							
1270	0,004145773	0,237535319							
1280	0,004161579	0,238440885							
1290	0,004177149	0,239333017							
1300	0,004192486	0,240211754							
1310	0,00420759	0,241077133							
1320	0,004222461	0,241929193							
1330	0,0042371	0,242767972							
1340	0,004251509	0,243593508							
1350	0,004265687	0,244405839							
1360	0,004279635	0,245205004							
1370	0,004293354	0,245991039							
1380	0,004306844	0,246763985							
1390	0,004320107	0,247523879							
1400	0,004333142	0,248270758							
1410	0,004345951	0,249004662							
1420	0,004358534	0,249725628							
1430	0,004370893	0,250433694							
1440	0,004383026	0,2511289							
1450	0,004394936	0,251811282							
1460	0,004406623	0,252480879							
1470	0,004418087	0,253137729							

1480	0,004429329	0,25378187								
1490	0,00444035	0,254413341								
1500	0,004451151	0,25503218								
1510	0,004461732	0,255638424								
1520	0,004472094	0,256232113								
1530	0,004482237	0,256813283								
1540	0,004492163	0,257381974								
1550	0,004501871	0,257938224								
1560	0,004511363	0,25848207								
1570	0,004520639	0,259013551								
1580	0,0045297	0,259532704								
1590	0,004538547	0,260039569								
1600	0,004547179	0,260534184								
1610	0,004555599	0,261016585								
1620	0,004563806	0,261486813								
1630	0,004571801	0,261944904								
1640	0,004579585	0,262390897								
1650	0,004587159	0,26282483								
1660	0,004594522	0,263246741								
1670	0,004601677	0,263656669								
1680	0,004608623	0,264054652								
1690	0,004615361	0,264440727								
1700	0,004621892	0,264814933								
1710	0,004628217	0,265177309								
1720	0,004634336	0,265527891								
1730	0,00464025	0,265866719								
1740	0,004645959	0,266193831								
1750	0,004651464	0,266509264								
1760	0,004656766	0,266813057								
1770	0,004661866	0,267105249								
1780	0,004666764	0,267385876								
1790	0,004671461	0,267654978								
1800	0,004675957	0,267912593								
1810	0,004680253	0,268158758								
1820	0,00468435	0,268393513								
1830	0,004688249	0,268616894								
1840	0,00469195	0,268828941								
1850	0,004695454	0,269029691								
1860	0,004698761	0,269219182								
1870	0,004701873	0,269397453								
1880	0,004704789	0,269564543								
1890	0,004707511	0,269720488								
1900	0,004710038	0,269865327								
1910	0,004712373	0,269999099								
1920	0,004714516	0,270121841								
1930	0,004716466	0,270233593								
1940	0,004718225	0,270334391								
1950	0,004719794	0,270424274								
1960	0,004721173	0,27050328								
1970	0,004722363	0,270571447								
1980	0,004723364	0,270628815								
1990	0,004724177	0,270675419								
2000	0,004724804	0,2707113								
2010	0,004725243	0,270736495								
2020	0,004725497	0,270751042								
2030	0,004725566	0,270754979								
2040	0,00472545	0,270748345								
2050	0,00472515	0,270731177								
2060	0,004724668	0,270703515								
2070	0,004724002	0,270665395								
2080	0,004723155	0,270616856								
2090	0,004722127	0,270557937								
2100	0,004720918	0,270488676								
2110	0,004719529	0,27040911								
2120	0,004717961	0,270319278								
2130	0,004716215	0,270219217								
2140	0,004714291	0,270108967								
2150	0,004712189	0,269988566								
2160	0,004709911	0,269858051								