

2014•2015  
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN  
*master in de industriële wetenschappen: bouwkunde*

## Masterproef

Schrankweerstand van houtskeletwanden: invloed van raam- en deuropeningen

Promotor :  
Prof.dr.ir Kurt DE PROFT  
prof. dr. Herve DEGEE

Kenny Reweghs

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

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2014•2015  
Faculteit Industriële  
ingenieurswetenschappen  
*master in de industriële wetenschappen: bouwkunde*

## Masterproef

Schrankweerstand van houtskeletwanden: invloed van raam-  
en deuropeningen

Promotor :  
Prof.dr.ir Kurt DE PROFT  
prof. dr. Herve DEGEE

Kenny Reweghs

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

## **Woord vooraf**

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn opleiding tot Master in de industriële wetenschappen: Bouwkunde, aan de Universiteit van Hasselt. Via dit dankwoord wil ik iedereen die betrokken was bij het tot stand komen van deze masterproef bedanken.

In de eerste plaats wil ik mijn promotor, tevens ook gastprofessor aan de Universiteit van Hasselt, prof. dr. ir. Kurt De Proft bedanken voor zijn flexibele houding, het vrijmaken van zijn tijd, het beantwoorden van vragen, zijn begeleiding en de meegedeelde kennis en ervaring.

Mijn dank gaat ook uit naar het Technisch Centrum der Houtnijverheid (TCHN), met in het bijzonder dhr. Kris Hardies (Verantwoordelijke speeltuigen) en dhr. Frans Van Bellingen (Verantwoordelijke schrijnwerkerij), voor hun warme ontvangst, het produceren van de proefstukken, het ter beschikking stellen en opbouwen van de proefstanden, ... en veel meer.

Tot slot wil ik iedereen in mijn naaste omgeving bedanken voor hun steun doorheen mijn studieloopbaan.

Kenny Reweghs



## **Inhoudsopgave**

Woord vooraf .....	1
Inhoudsopgave .....	3
Lijst van tabellen .....	5
Lijst met figuren .....	7
Abstract .....	13
Abstract in English .....	15
1 Inleiding .....	17
1.1 Probleemstelling .....	17
1.2 Doelstellingen en methode .....	17
2 Horizontale stabiliteit van een houtskeletstructuur .....	19
2.1 Schrankweerstand .....	19
2.2 Opbouw stabiliteitswand .....	21
2.3 Bestaande rekenmethodes voor de bepaling van de schrankweerstand .....	22
2.3.1 Eurocode 5 .....	22
2.3.2 Schrankweerstand volgens BSI [6] .....	26
2.3.3 Opmerkingen in verband met de bestaande rekenmethodes .....	30
3 Literatuurstudie .....	33
3.1 Inleiding .....	33
3.2 Voorgaand onderzoek .....	33
4 Invloed raam- en deuropeningen: experimentele resultaten .....	43
4.1 Inleiding .....	43
4.2 Testprogramma .....	43
4.3 Bepaling schrankweerstand volgens EN 594 .....	44
4.4 Bepaling schrankweerstand in dit onderzoek .....	46
4.4.1 Proefopstelling .....	46
4.4.2 Bepaling schrankweerstand en stijfheid .....	48
4.5 Materiaaleigenschappen wand .....	49
4.5.1 Hout .....	49
4.5.2 Plaatmateriaal .....	49
4.5.3 Nietten .....	50
4.6 Experimentele resultaten .....	51
4.6.1 Overzicht experimentele resultaten .....	51
4.6.2 Overzicht bezwijkmode .....	53
4.6.3 Invloed van het contact tussen de platen op de schrankweerstand .....	55
4.6.4 Invloed verwaarlozing panelen boven en onder een opening op de schrankweerstand .....	57
4.6.5 Invloed verticale belasting op de stijfheid en schrankweerstand .....	59
4.6.6 Invloed openingen op de stijfheid en schrankweerstand .....	62
5 Invloed raam- en deuropeningen: rekenmethode .....	69
5.1 Inleiding .....	69
5.2 Rekenmethode Källsner en Girhammar .....	69

5.2.1	Beperkingen.....	69
5.2.2	Eigenschappen plaat-houtverbindingen.....	69
5.2.3	Aannames rekenmethode .....	70
5.2.4	Bepaling capaciteit per eenheidslengte .....	71
5.2.5	Principe rekenmethode .....	71
5.2.6	Berekening wand zonder openingen .....	71
5.2.7	Berekening wand met openingen .....	74
5.3	Bepaling sterkte en stijfheid van de plaat-houtverbinding .....	79
5.3.1	Experimentele bepaling van sterkte en stijfheid van de verbinding .....	79
5.3.2	Analytische bepaling van sterkte en stijfheid van de plaat-houtverbinding .....	92
5.3.3	Vergelijking experimentele en analytische sterkte en stijfheid van de plaat-houtverbinding .....	97
5.4	Capaciteit per eenheidslengte .....	100
5.4.1	Capaciteit per eenheidslengte in dit onderzoek .....	102
5.4.2	Invloed tussenafstand en aantal verbindingen op de onderregel .....	103
5.5	Berekende resultaten .....	104
5.5.1	Overzicht berekende resultaten .....	104
5.5.2	Invloed openingen op de schrankweerstand .....	106
6	Experimentele en berekende resultaten .....	109
6.1	Vergelijking experimentele en berekende schrankweerstand .....	109
6.2	Vergelijking invloed openingen .....	110
6.3	Vergelijking met de Britse methode .....	112
7	Inrekenen van raam- en deuropeningen .....	115
7.1	Inleiding.....	115
7.2	Schrankweerstand volgens De Proft .....	115
7.3	Sugiyama's empirische vergelijking .....	119
7.4	Combinatie rekenmodel De Proft en Sugiyama's empirische vergelijking .....	122
8	Conclusie .....	125
9	Bronnen.....	127
10	Bijlage .....	131
	Bijlage A: Afmetingen wanden testprogramma .....	131
	Bijlage B: Berekeningen volgens Källsner en Girhammar.....	142
	Bijlage C: Gedetailleerde berekeningen volgens De Proft .....	150
	Bijlage D: Vereenvoudigde berekeningen volgens De Proft.....	153

## **Lijst van tabellen**

Tabel 1: Combinatiefactor van de beplating. [6] .....	29
Tabel 2: Gemiddelde resultaten van testen uitgevoerd door De Proft.[1] .....	39
Tabel 3: Mechanische eigenschappen en densiteiten van het hout volgens NBN EN 338.[28].....	49
Tabel 4: Mechanische eigenschappen en densiteiten van het plaatmateriaal volgens NBN EN 12369-1.[31] .....	50
Tabel 5: Overzicht schrankweerstand en stijfheden van de wanden van het testprogramma. ....	51
Tabel 6: Overzicht bezwijkmode wanden testprogramma.....	54
Tabel 7: Overzicht schrankweerstand wanden met en zonder opening. (zonder verticale belasting) .....	57
Tabel 8: Overzicht schrankweerstand wanden met en zonder verticale belasting. .	60
Tabel 9: Overzicht schrankweerstand wanden zonder verticale belasting. ....	62
Tabel 10: Overzicht schrankweerstand wanden met verticale belasting. ....	66
Tabel 11: Overzicht resultaten verbinding. Belasting evenwijdig met de vezelrichting. ....	85
Tabel 12: Experimentele karakteristieke sterkte van de verbinding. ....	85
Tabel 13: Overzicht resultaten verbinding. Belasting loodrecht met de vezelrichting .....	89
Tabel 14: Experimentele karakteristieke sterkte van de verbinding. ....	89
Tabel 15: Overzicht resultaten verbinding. Koordeffect.....	91
Tabel 16: Experimenteel karakteristiek koordeffect van de verbinding.....	92
Tabel 17: Berekende stijfheid van de verbinding.....	93
Tabel 18: Berekende karakteristieke sterkte van de verbinding. ....	96
Tabel 19: Overzicht experimentele en berekende resultaten van de verbinding. ...	97
Tabel 20: Vergelijking experimentele en berekende schrankweerstand. Schrankweerstand wordt berekend met een tussenafstand van 150 mm. ....	100
Tabel 21 geeft de vergelijking tussen de experimentele en berekende schrankweerstand. De schrankweerstand wordt berekend met een tussenafstand van 120 mm. ....	102
Tabel 22: Invloed aantal plaat-houtverbindingen op de schrankweerstand. ....	103
Tabel 23: Overzicht berekende schrankweerstand en de effectieve lengte.....	105
Tabel 24: Overzicht berekende schrankweerstand en effectieve lengte van de wanden zonder verticale belasting. ....	106
Tabel 25: Overzicht berekende schrankweerstand en effectieve lengte van de wanden met verticale belasting. ....	108
Tabel 26: Vergelijking tussen de experimentele en berekende schrankweerstand van de wanden van het testprogramma.....	109
Tabel 27: Reductie schrankweerstand wand met raamopening. ....	114
Tabel 28: Vergelijking van de werkelijke, berekende en voorspelde schrankweerstandratio van de wanden van het testprogramma. ....	120
Tabel 29: Vergelijking berekende en experimentele resultaten. ....	123

Tabel 30: Schrankweerstand volle wanden zonder verticale belasting volgens De Proft. ....	150
Tabel 31: Schrankweerstand volle wanden met verticale belasting volgens De Proft. ....	151
Tabel 32: Bepaling schrankweerstand wanden met opening aan de hand van de gedetailleerde berekeningen. ....	152
Tabel 33: Vereenvoudigde schrankweerstand volle wanden zonder verticale belasting volgens De Proft. ....	153
Tabel 34: Vereenvoudigde schrankweerstand volle wanden met verticale belasting volgens De Proft. ....	153
Tabel 35: Bepaling schrankweerstand wanden met opening aan de hand van de vereenvoudigde berekeningen. ....	154



## Lijst met figuren

Figuur 1: Schijfwerking: afdracht horizontale windbelasting naar de stabiliteitswanden in een structuur.[3] .....	19
Figuur 2: Schuiven, kantelen en schranken van een stabiliteitswand.[5].....	20
Figuur 3: (a) het overbrengen van de horizontale windbelasting via de verdiepingvloeren, (b) voldoende optilweerstand, (c) onvoldoende optilweerstand, (d) voldoende schuifweerstand, (e) onvoldoende schuifweerstand.[3] .....	20
Figuur 4: Simplistische voorstelling van een stabiliteitswand. ....	21
Figuur 5: Krachten werkend op: a) het wandpaneel; b) het skelet c) het plaatmateriaal.[EC5].....	23
Figuur 6: Afdracht van kracht $F_{i,c,Ed}$ en $F_{i,t,Ed}$ .[EC5] .....	23
Figuur 7: Samengestelde wand. [EC5] .....	24
Figuur 8: Onderverdeling stabiliteitswand in verschillende wanden volgens de Britse methode.[6] .....	27
Figuur 9: Krachtsverdeling naar de onderliggende structuur via de onderregel. [6] .....	28
Figuur 10: Krachtsverdeling plastisch ondergrens model.[7] .....	30
Figuur 11: Krachtsverdeling volgens de Britse methode.[6] .....	31
Figuur 12: Krachtsverdeling volgens CSA-086.[9].....	31
Figuur 13: Verankering eindstijl: tie-down.[4].....	32
Figuur 14: Verankering onderregel .....	32
Figuur 15: Bepaling paneelratio $r$ .[13].....	33
Figuur 16: Resultaten van de testen uitgevoerd door Yasamura en Sugiyama.[12] .....	34
Figuur 17: Resultaten van het onderzoek van Uchida's en Waktsuki's.[12].....	35
Figuur 18: Resultaten van het onderzoek uitgevoerd door APA.[12] .....	35
Figuur 19: Wandconfiguraties getest door Yasamura (a) verankering van alle stijlen, (b) enkel verankering eindstijlen.[22].....	35
Figuur 20: Schrankweerstandsratio voor een wand waarbij zowel de eindstijlen als de stijlen naast de opening verankerd zijn.[22] .....	36
Figuur 21: Schrankweerstandsratio voor een wand waarbij enkel de eindstijlen verankerd zijn.[22] .....	36
Figuur 22: Schrankweerstandsratio voor een wand waarbij enkel de eindstijlen verankerd zijn en met verticale belasting.[22].....	36
Figuur 23: (a) schrankweerstandsratio en (b) stijfheidsratio in functie van de paneelratio $r$ voor KLH wanden.[13].....	36
Figuur 24: Vergelijking schrankweerstandsratio in functie van de paneelratio $r$ .[23] .....	37
Figuur 25: Vergelijking stijfheidsratio in functie van de paneelratio $r$ .[23].....	37
Figuur 26: Testprogramma uitgevoerd door Källsner en Girhammar.[24].....	37
Figuur 27. Gemiddelde waardes van de wanden van testserie 1.[24] .....	38
Figuur 28: Bezwijkmodes: (a) volledig verankerde wand, (b) gedeeltelijke verankerde wand.[24].....	38

Figuur 29: Gemiddelde waarden van de wanden met een hardboard beplating en met verschillend aantal panelen en verticale belasting.[24] .....	39
Figuur 30: Contactkrachten tussen de platen.[25] .....	40
Figuur 31: Kracht-verplaatsingsdiagram voor een volledige en gedeeltelijke verankerde wand bestaande uit één, twee en drie platen. En dit met (streepjeslijn) en zonder (volle lijn) contact tussen de beplating.[25] .....	40
Figuur 32: Kracht-verplaatsingslijnen die het gedrag van de plaat-houtverbindingen voorstellen.[25] .....	41
Figuur 33: Verschillende kracht-verplaatsingsdiagrammen van een gedeeltelijk verankerde wand opgebouwd uit drie platen.[25] .....	41
Figuur 34: Testopstelling plaat-houtverbindingen met een belasting (a) evenwijdig en (b) loodrecht aan de vezelrichting van het hout.[26] .....	42
Figuur 35: Kracht-verplaatsingsdiagram voor spaanplaat: belasting (a) evenwijdig en (b) loodrecht aan de vezelrichting.[26] .....	42
Figuur 36: Verschillende wand- en belastingsconfiguraties.....	43
Figuur 37: Proefopstelling voor het bepalen van de schrankweerstand volgens EN 594.[27].....	45
Figuur 38: Proefopstelling voor het bepalen van de schrankweerstand. ....	46
Figuur 39: Proefopstelling voor het bepalen van de schrankweerstand met verticale belasting. ....	47
Figuur 40: Bepaling van de maximale kracht en de stijfheid.....	48
Figuur 41: Spaanplaat - Naturspan HS.[29] .....	49
Figuur 42: Nietten – Senco. ....	50
Figuur 43: Overzicht schrankweerstand wanden testprogramma in functie van de horizontale verplaatsing. ....	52
Figuur 44: Bezwijkmode ST1-1 & ST1-2. ....	53
Figuur 45: Bezwijkmode ST1-1 & ST1-2. Nietten vervormen loodrecht op de onderregel.....	53
Figuur 46: Bezwijkmode ST2. Combinatie van (a) doorscheuren plaatmateriaal, (b) buiging en doorponsing nieten, (c) uittrekken nieten.....	53
Figuur 47: Bezwijkmode ST3. Uittrekken nieten. ....	53
Figuur 48: Bezwijkmode ST4. Buiging en doorponsing nieten. ....	53
Figuur 49: Schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing voor de wanden met en zonder voeg. ....	55
Figuur 50: Vergelijking schrankweerstand wanden met en zonder voeg.....	55
Figuur 51: Bezwijkmode 3DM.....	56
Figuur 52: Bezwijkmode 3DM-V.....	56
Figuur 53: Schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing voor de wanden met en zonder opening. (zonder verticale belasting) .....	57
Figuur 54: Rekenwijze voor de bepaling van de schrankweerstand volgens Methode B in Eurocode 5.[EC5] .....	58
Figuur 55: Principe rekenmethode Eurocode 5. Schrankweerstand 3RM = ST1 + ST2. ....	58
Figuur 56: Vergelijking schrankweerstand volgens rekenwijze Methode B van Eurocode 5 en de experimentele schrankweerstand van de wanden met opening..	58

Figuur 57: Schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing voor de wanden met en zonder verticale belasting. ....	59
Figuur 58: Vergelijking schrankweerstand wanden met en zonder verticale belasting. ....	60
Figuur 59: Vergelijking stijfheden wanden met en zonder belasting. ....	61
Figuur 60: Schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing voor de wanden zonder verticale belasting. ....	62
Figuur 61: Vergelijking schrankweerstand wanden met opening en zonder opening. (zonder verticale belasting) ....	63
Figuur 62: Vergelijking stijfheid wanden met en zonder openingen. (zonder verticale belasting) ....	63
Figuur 63: Schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing voor de wanden met verticale belasting. ....	66
Figuur 64: Vergelijking schrankweerstand wanden met en zonder opening. (met verticale belasting) ....	67
Figuur 65: Vergelijking stijfheden wanden met en zonder opening. (met verticale belasting) ....	67
Figuur 66: Kracht-verplaatsingsdiagram van een hardboard-houtverbinding. Belasting evenwijdig aan de vezelrichting.[26] ....	69
Figuur 67: Kracht-verplaatsingsdiagram van een hardboard-houtverbinding. Belasting loodrecht op de vezelrichting.[26].....	69
Figuur 68: Elasto-plastisch model. ....	70
Figuur 69: Plastisch model.....	70
Figuur 70: Krachtsverdeling plastische rekenmethode.[32] .....	71
Figuur 71: Krachtswerking gedeeltelijk verankerde wand.[32].....	72
Figuur 72: Opdelen wand in twee delen.[31].....	74
Figuur 73: Krachten werkend op een gedeeltelijk verankerde wand.[32] .....	74
Figuur 74: Krachtsverdeling wand. Plastische capaciteit wordt bereikt ter hoogte van de opening.[31] .....	76
Figuur 75: Krachtsverdeling deel rechts van de opening.[31] .....	77
Figuur 76: Enkelvoudige afschuiving. Belasting evenwijdig op de vezelrichting.[33] .....	79
Figuur 77: Enkelvoudige afschuiving. Belasting loodrecht op de vezelrichting.[33] 79	
Figuur 78: Hoek tussen de nietrug en de vezelrichting van het hout.[33].....	79
Figuur 79: Belastingprocedure NBN ISO 6891.[34].....	80
Figuur 80: Kracht-verplaatsingsdiagram.[34] .....	80
Figuur 81: Bepaling van de maximale kracht en de stijfheid van de verbinding.....	81
Figuur 82: Afmetingen proefstuk. Belasting evenwijdig met de vezelrichting. ....	82
Figuur 83: Proefopstelling belasting evenwijdig met de vezelrichting. ....	82
Figuur 84: Proefopstelling belasting evenwijdig met de vezelrichting. ....	82
Figuur 85: Kracht per niet in functie van de gemiddelde verplaatsing. ....	83
Figuur 86: Buiging nieten. ....	83
Figuur 87: Uittrekken nieten. ....	83
Figuur 88: Pons nieten. ....	83

Figuur 89: Uittrekken nieten. ....	84
Figuur 90: Uittrekken nieten. ....	84
Figuur 91: Pons nieten. ....	84
Figuur 92: Kracht-verplaatsingsdiagram voor spaanplaat. Belasting evenwijdig aan de vezelrichting.[26].....	84
Figuur 93: Afmetingen proefstuk. Belasting loodrecht aan de vezelrichting. ....	86
Figuur 94: Splijten hout. ....	86
Figuur 95: Proefopstelling enkelvoudige afschuiving.....	87
Figuur 96: Proefopstelling enkelvoudige afschuiving.....	87
Figuur 97: Kracht per niet in functie van de gemiddelde verplaatsing voor de verbinding. ....	87
Figuur 98: Buiging nieten. ....	88
Figuur 99: Uittrekken nieten. ....	88
Figuur 100: Pons nieten. ....	88
Figuur 101: Uittrekken nieten. ....	88
Figuur 102: Uittrekken nieten. ....	88
Figuur 103: Doorponsing nieten. ....	88
Figuur 104: Kracht-verplaatsingsdiagram voor spaanplaat. Belasting loodrecht op de vezelrichting.[26].....	89
Figuur 105: Proefopstelling koordeffect. ....	90
Figuur 106: Proefopstelling koordeffect. ....	90
Figuur 107: Afmetingen proefstuk. Koordeffect. ....	90
Figuur 108: Kracht per niet in functie van de gemiddelde verplaatsing van de verbinding. ....	91
Figuur 109: Bezwijkmodes voor het berekenen van een enkelsnede verbinding.[EC5] .....	93
Figuur 110: Koordeffect, nageling loodrecht op de vezelrichting.[EC5] .....	95
Figuur 111: Vergelijking tussen de berekende (nieuw vloeimoment) en experimentele sterkte van de verbinding. ....	97
Figuur 112: Vergelijking tussen de berekende (oud vloeimoment) en experimentele sterkte van de verbinding. ....	97
Figuur 113: Vergelijking tussen het berekend en experimenteel koordeffect. ....	98
Figuur 114: Vergelijking tussen de berekende stijfheid en de experimentele stijfheid.....	98
Figuur 115: Faalmode: oud vloeimoment.[EC5].....	98
Figuur 116: Faalmode: nieuw vloeimoment.[EC5].....	98
Figuur 117: Faalmode nieten: belasting evenwijdig met de vezelrichting. ....	99
Figuur 118: Faalmode nieten: belasting loodrecht met de vezelrichting. ....	99
Figuur 119: Rand- en tussenafstanden van de plaat-houtverbindingen. ....	101
Figuur 120: Schuifsterkte verbindingen (a) = schuifsterkte verbindingen (b) = 5 Fp. ....	102
Figuur 121: Effectieve lengte van een volle wand.[32] .....	104
Figuur 122: Effectieve lengte van een wand met opening.[32][31] .....	104

Figuur 123: Vergelijking berekende schrankweerstand wanden met en zonder opening. (zonder verticale belasting) .....	106
Figuur 124: Vergelijking berekende schrankweerstand wanden met en zonder opening. (met verticale belasting) .....	108
Figuur 125: Overzicht experimentele resultaten. ....	111
Figuur 126: Overzicht berekende resultaten.....	111
Figuur 127: Vergelijking schrankweerstand volgens rekenwijze Methode B van Eurocode 5 en de experimentele schrankweerstand van de wanden met opening. ....	113
Figuur 128: Rekenmodel voor het bepalen van de schrankweerstand van een niet-verankerde wand (gedeeltelijk verankerde wand).[1].....	115
Figuur 129: Krachtswerking bij meerdere panelen.[1] .....	117
Figuur 130: Krachtsverdeling onderregel waarbij niet alle verbindingen vloeien.[1] .....	118
Figuur 131: Schrankweerstandsratio van de experimentele resultaten in functie van de paneelratio.....	120
Figuur 132: Schrankweerstandsratio van de berekende resultaten in functie van de paneelratio. ....	121
Figuur 133: Voorstelling wand ST3 volgens de gedetailleerde manier. ....	122
Figuur 134: Voorstelling wand ST3 volgens de vereenvoudigde manier. ....	122



## **Abstract**

### ***Schrankweerstand van houtskeletwanden: invloed van raam- en deuropeningen***

Bedrijf: Technisch Centrum der Houtnijverheid (TCHN)

Promotor: prof. dr. ir. Kurt de Proft (TCHN, UHasselt)

Trefwoorden: houtskeletbouw, schrankweerstand, horizontale stabiliteit, stabiliteitswand, invloed openingen, plaat-houtverbinding.

---

In 2012 werd het prenormatief onderzoek 'Stabiliteit van houten constructies' afgerond door het Technisch Centrum der Houtnijverheid (TCHN). Speciaal voor dit onderzoek werd door De Proft een rekenmodel ontwikkeld voor gedeeltelijk verankerde houtskeletwanden zonder openingen. De doelstellingen van deze masterproef zijn om te onderzoeken welke invloed raam- en deuropeningen hebben op de schrankweerstand van een gedeeltelijk verankerde houtskeletwand en om te onderzoeken hoe deze openingen in rekening kunnen gebracht worden.

De invloed wordt in eerste instantie onderzocht aan de hand van experimentele resultaten bekomen uit een testprogramma. Het testprogramma bestaat enkel uit gedeeltelijk verankerde wanden met verschillende wand- en belastingsconfiguraties. Ten tweede wordt de invloed onderzocht aan de hand van resultaten bekomen met een plastische rekenmethode ontwikkeld door Källsner en Girhammar. Tot slot worden raam- en deuropeningen in rekening gebracht aan de hand van een methode die gebruik maakt van de paneelratio.

Uit de onderzoeken blijkt dat raam- en deuropeningen leiden tot vermindering van de schrankweerstand van een houtskeletwand. De vermindering hangt af van de grootte en de positie van de openingen. De combinatie van de methode waarbij de paneelratio wordt berekend en het rekenmodel ontwikkeld door De Proft geeft een goede voorspelling van de schrankweerstand van een wand met openingen. De ratio's tussen de experimentele resultaten en de resultaten bekomen door de combinatie liggen tussen 0,85 en 1,23.





## **Abstract in English**

### ***Racking resistance of timber frame walls: influence of window- and door openings***

Company: Belgian Institute for Wood Technology (CTIB-TCHN)

Promotor: prof. dr. ir. Kurt de Proft (TCHN, UHasselt)

Keywords: timber frame construction, racking resistance, lateral resistance, shear wall, influence of openings, sheathing-to-timber joints.

---

In 2012 the research 'Stability of timber structures' was completed by the Belgian Institute for Wood Technology (CTIB-TCHN). Specially for this research a design model was developed by De Proft for partially anchored timber frame walls without openings. The objectives of this thesis are to investigate which influence window- and door openings have on the racking resistance of a partially anchored timber frame wall and to investigate how these openings can be taken in to account.

First, the influence is studied by experimental results received out of a testing program. The testing program consists only out of partially anchored walls with different wall- and loading configurations. Secondly, the influence is studied by results received with a plastic design method developed by Källsner and Girhammar. Finally, window- and door openings are taken in to account by a method which uses the sheathing area ratio.

The studies show that window- and door openings lead to reduction of the racking resistance of a timber frame wall. The reduction depends on the size and the location of the openings. The combination of the method which uses the sheathing area ratio and the design model developed by De Proft gives a good prediction of the racking resistance of a wall without openings. The ratio's between the experimental results and the results achieved by the combination are in the range between 0,85 and 1,23.



## **1 Inleiding**

### **1.1 Probleemstelling**

In 2012 werd het prenormatief onderzoek 'Stabiliteit van houten constructies' afgerond door het Technisch Centrum der Houtnijverheid (TCHN). Het twee jaar durende onderzoek had als doel type-oplossingen te vinden die de verticale en horizontale stabiliteit van houten constructies garanderen. Een eerste deel van het onderzoek omvat: type-oplossingen voor de horizontale stabiliteit van houtskeletwanden. Speciaal voor dit deelonderzoek werd door De Proft een rekenmodel ontwikkeld voor gedeeltelijk verankerde houtskeletwanden. Op basis van dit rekenmodel werd een type-oplossing opgesteld op basis van een handige grafiek. De toepassing van deze type-oplossingen zal het producenten van houten huizen mogelijk maken te besparen op stabiliteitsonderzoeken die gevel per gevel moeten uitgevoerd worden.

Het rekenmodel dat ontwikkeld werd kan enkel worden toegepast op gedeeltelijk verankerde wanden zonder openingen. Een belangrijke conclusie van het onderzoek was dat het model uitgebreid dient te worden door de eventuele invloed van openingen in rekening te brengen.

### **1.2 Doelstellingen en methode**

Het TCHN is met de vraag naar voorgekomen om te onderzoeken welke invloed raam- en deuropeningen hebben op de schrankweerstand van een gedeeltelijk verankerde houtskeletwand en hoe deze openingen in rekening kunnen gebracht worden.

De invloed van raam- en deuropeningen wordt in eerste instantie onderzocht aan de hand van experimentele resultaten bekomen uit een testprogramma. Het testprogramma bestaat enkel uit gedeeltelijk verankerde wanden met verschillende wand- en belastingsconfiguraties. De breedte van de wanden varieert van één paneelbreedte tot vier paneelbreedtes. De wanden worden gemaakt op een schaal 1:2. Dit om de productie- en montagetijd te beperken. Naast de invloed van de openingen wordt ook de invloed van het contact tussen de platen op de schrankweerstand, de invloed van de verwaarlozing van de panelen met opening op de schrankweerstand en de invloed van een verticale belasting op de stijfheid en schrankweerstand onderzocht.

Als tweede wordt de invloed van raam- en deuropeningen onderzocht aan de hand van een zogenaamde plastische rekenmethode ontwikkeld door Källsner en Girhammar. De rekenmethode zal worden toegepast op de wanden van het testprogramma. Het voordeel van deze rekenmethode is dat ze rekening houdt met de sterkte van de wandpanelen boven en onder een opening en dat ze een goed zicht geeft op de krachtswerking binnenin een houtskeletwand.

Om tot de analytische resultaten te komen wordt eerst de sterkte van de plaat-houtverbinding van de wanden van het testprogramma bepaald. Het bezwijken van een gedeeltelijk verankerde wand onder horizontale belasting is namelijk te wijten aan het falen van deze verbinding. De verbinding wordt getest op afschuiving waarbij er enerzijds een belasting evenwijdig aan en anderzijds loodrecht aan de vezelrichting van het hout wordt aangebracht. De sterkte en stijfheid van de verbinding zal ook berekend worden aan de hand van de rekenregels opgenomen in Eurocode 5 (NBN EN 1995-1-1). De experimentele en berekende sterkte en stijfheid wordt vergeleken. De gemiddelde experimentele sterkte van de verbinding zal gebruikt worden om tot de analytische resultaten te komen.

De analytische resultaten bekomen met de rekenmethode van Källsner en Girhammar zullen worden vergeleken met de experimentele resultaten en er zal worden nagegaan of dezelfde invloed van de raam- en deuropeningen is terug te vinden.

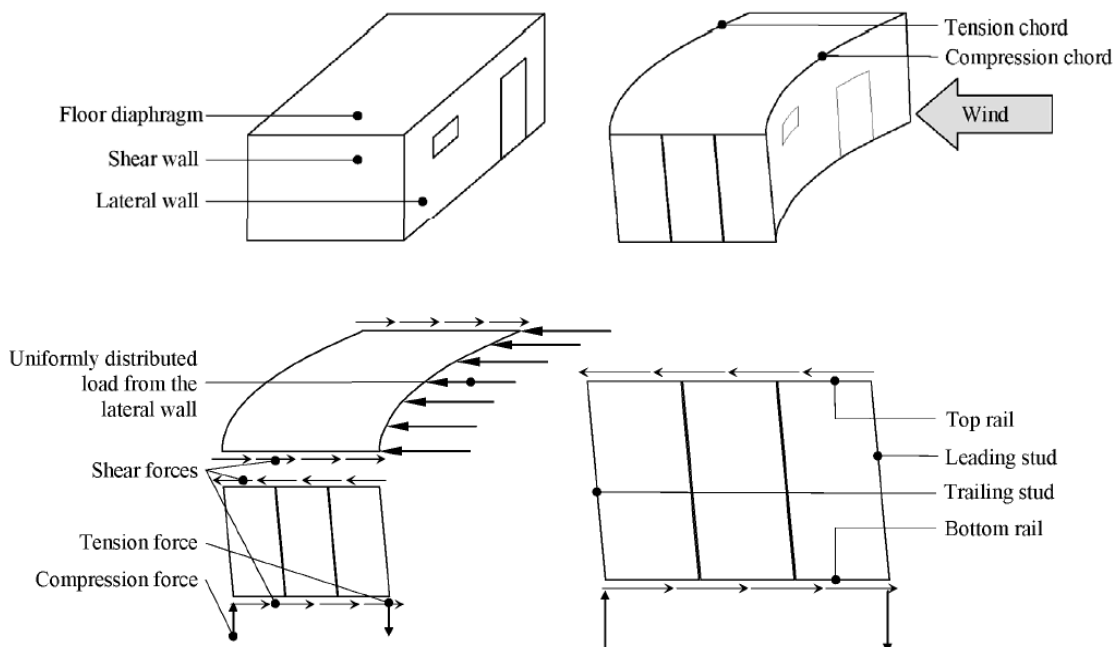
Tot slot wordt er nagegaan of er een verband is terug te vinden tussen de schrankweerstand van een gedeeltelijk verankerde wand met opening en zonder opening. Dit gebeurt aan de hand van een methode waarbij er gebruik wordt gemaakt van de paneelratio.

## 2 Horizontale stabiliteit van een houtskeletstructuur

### 2.1 Schrankweerstand

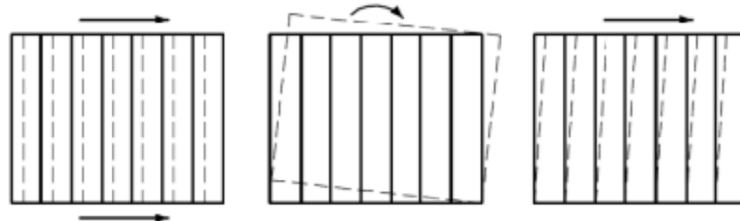
Een gebouw wordt onderworpen aan zowel verticale als horizontale belastingen. De verticale belastingen zijn te wijten aan het eigen gewicht, de sneeuw en aan opgelegde belastingen. De horizontale belastingen zijn te wijten aan de wind of aan de krachten die optreden bij een aardbeving. Bij een klassiek gebouw worden alle onderdelen gedimensioneerd op basis van een verticale lastendaling. Bij een gebouw uit houtskelet is dit grotendeels hetzelfde. Een belangrijk verschilpunt in de stabiliteitsstudie is echter de horizontale stabiliteit. [1]

Figuur 1 toont de krachtwerking van een gebouw bestaande uit één bouwlaag. Indien op zulk gebouw een windbelasting aangrijpt op één van de gevels, zal deze belasting worden afgeleid naar de ondergrond en naar de dakvloer. Door schijfwerking van de dakvloer wordt de windbelasting overgebracht naar de stabiliteitswanden (ook wel schrankende wanden genaamd) in de structuur. Deze wanden leiden de windbelasting af naar de fundering. Bij de stabiliteitsstudie dient er gecontroleerd te worden of er voldoende stabiliteitswanden aanwezig zijn en dus voldoende horizontale weerstand aanwezig is. De horizontale weerstand wordt ook wel de schrankweerstand genoemd. Volgende definitie wordt aan de schrankweerstand gegeven: "Een houtskeletwand die wordt blootgesteld aan een kracht in zijn vlak, en berekend is om aan deze kracht weerstand te bieden, wordt een schrankende wand of stabiliteitswand genoemd. De weerstand die deze wand heeft ten opzichte van deze last noemen we de schrankweerstand (racking resistance)." [1][2][3][4]



Figuur 1: Schijfwerking: afdracht horizontale windbelasting naar de stabiliteitswanden in een structuur.[3]

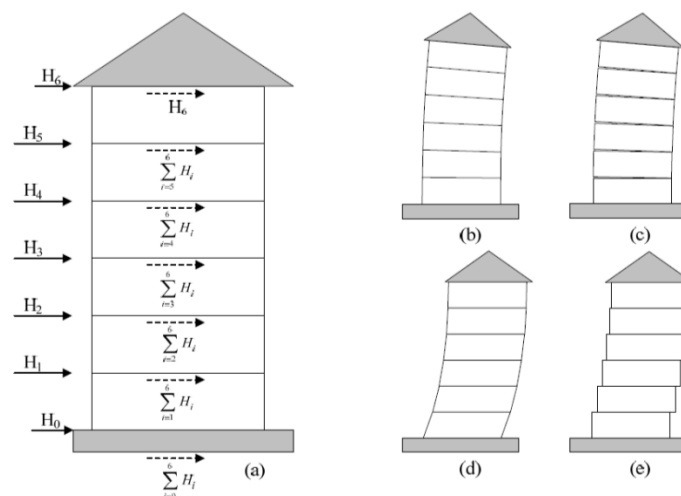
De stabiliteitswanden worden door de schijfwerking onderworpen aan een schuifkracht ter hoogte van de bovenregel. De schuifkracht zal ervoor zorgen dat de stabiliteitswanden een zekere vervorming zullen ondergaan. Een stabiliteitswand kan op drie verschillende manieren vervormen: schuiven, kantelen en schranken. De vervorming moet beperkt worden, anders voldoet het gebouw niet meer aan de gebruiksgrenstoestand (GGT). De stijfheid alsook het type verankering speelt hierbij een belangrijke rol.[2][3]



Figuur 2: Schuiven, kantelen en schranken van een stabiliteitswand.[5]

Het structureel gedrag van het gebouw met één bouwlaag, zoals getoond in Figuur 1, geldt ook voor een bouwlaag uit een gebouw met meerdere bouwlagen. Het enige verschil is dat de schuifkrachten ter hoogte van de onderregel worden overgebracht naar de bouwlaag eronder en niet rechtstreeks naar de fundering, zie Figuur 3 (a).[3]

De trekkrachten die ontstaan ter hoogte van de leidende stijlen kunnen ervoor zorgen dat de verschillende bouwlagen van elkaar worden gescheiden (Figuur 3 (b) en (c)). De grootste oorzaak van het optillen en scheiden van de bouwlagen is het relatief lage gewicht van een houtskeletstructuur in vergelijking met een betonnen structuur. Het optillen en scheiden van de bouwlagen kan worden tegengegaan door de uiterste stijlen volledig te verankeren en zo de verticale verplaatsing tegen te gaan. Het overbrengen van de schuifkrachten is veel gemakkelijker en kan door de onderregel te verankeren in de onderliggende structuur. Deze verankering zorgt ervoor dat de verschillende bouwlagen niet over elkaar schuiven (Figuur 3 (d) en (e)).[2][3]

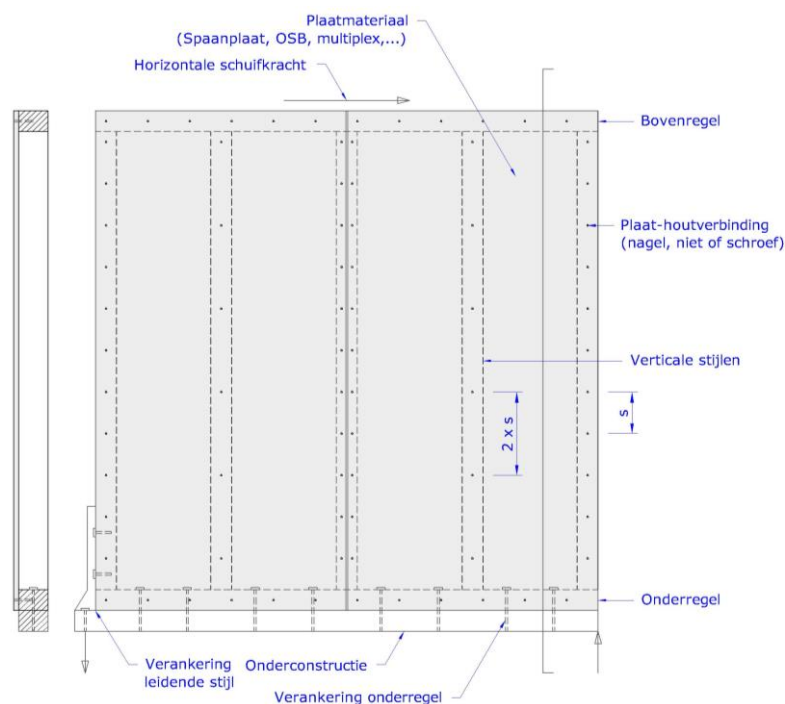


Figuur 3: (a) het overbrengen van de horizontale windbelasting via de verdiepingvloeren, (b) voldoende optilweerstand, (c) onvoldoende optilweerstand, (d) voldoende schuifweerstand, (e) onvoldoende schuifweerstand.[3]

## 2.2 Opbouw stabiliteitswand

Een stabiliteitswand wordt opgebouwd uit een houten skelet dat meestal aan één kant voorzien is van een houten plaatmateriaal. Dit kan bijvoorbeeld een spaanplaat, OSB- of multiplexbeplating zijn. Het plaatmateriaal wordt meestal mechanisch bevestigd aan het houten skelet door middel van nieten, nagels of schroeven. Het houten plaatmateriaal zal als een schoor werken voor de houtskeletdelen. Het plaatmateriaal zorgt dan ook voor de schrankweerstand en brengt de horizontale belasting over naar de verticale stijlen en naar de onderregel via de plaat-houtverbindingen rondom de omtrek van het plaatmateriaal.

Het houten skelet bestaat uit verschillende onderdelen: een onderregel, een bovenregel en een reeks verticale stijlen. De stijlen worden standaard met een tussenafstand van 600 mm geplaatst. De onder- en bovenregel wordt meestal door middel van nagels verbonden met de verticale stijlen. Indien enkel de onderregel verankerd is in de ondergrond wordt er gesproken van een gedeeltelijke- of niet-verankerde wand. Indien er een combinatie is van verankering van de onderregel en van de verticale eindstijlen, wordt er gesproken van een volledig verankerde wand.



Figuur 4: Simplistische voorstelling van een stabiliteitswand.

Aan de binnenkant wordt meestal een gipskartonnen plaatmateriaal voorzien. Deze kan zowel een structurele, brandwerende of akoestische functie hebben. Het plaatmateriaal kan ofwel rechtstreeks tegen het houten skelet ofwel via een houten regelwerk (voorzetwand) tegen het houten plaatmateriaal worden aangebracht. De manier van aanbrengen speelt een rol op de plaatsing van het houten plaatmateriaal.

Buitenwanden worden ook voorzien van een damp- en regenscherm of een dampopen regenscherm afhankelijk van de plaatsing van de plaatmaterialen.

## **2.3 Bestaande rekenmethodes voor de bepaling van de schrankweerstand**

### 2.3.1 Eurocode 5

In de Europese norm voor het ontwerpen en berekenen van houtconstructies, Eurocode 5 (NBN EN 1995-1-1) [EC5], worden twee berekeningsmethodes beschreven voor de berekening van de schrankweerstand van een houtskeletwand. Deze zijn methode A en methode B.

#### 2.3.1.1 Methode A [EC5]

Voorwaarden om methode A toe te passen:

- De verticale eindstijlen moeten direct verbonden zijn met de ondergrond of onderconstructie.
- De tussenafstand van de verbindingen rondom de omtrek van de beplating moet constant zijn.
- De breedte van elke plaat moet ten minste gelijk zijn aan  $h/4$ .
- Om het plooiën van het plaatmateriaal tegen te gaan moet de dikte ervan groter zijn dan  $b_{net}/100$ .
- De tussenafstand van de verbindingsmiddelen op de tussenstijlen mag niet groter zijn dan tweemaal de tussenafstand van de verbindingsmiddelen rondom de omtrek van de plaat.

Voor een wand die uit meerdere wandpanelen bestaat, wordt de sterkte gegeven als de som van de afzonderlijke wandpanelen:

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd} \quad (2-1)$$

De sterkte van een wandpaneel, met aan één kant een beplating, wordt gegeven door:

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd} b_i c_i}{s} \quad (2-2)$$

waarin:

- $F_{f,Rd}$  is de sterkte van een individueel op afschuiving belast verbindingsmiddel;  
 $b_i$  is de breedte van het wandpaneel;  
 $s$  is de tussenafstand van de verbindingsmiddelen.

en

$$c_i = \begin{cases} 1 & \text{voor } b_i \geq b_0 \\ \frac{b_i}{b_0} & \text{voor } b_i \leq b_0 \end{cases}$$

waarin:

$$b_0 = \frac{h}{2}$$



$h$  is de hoogte van de wand.

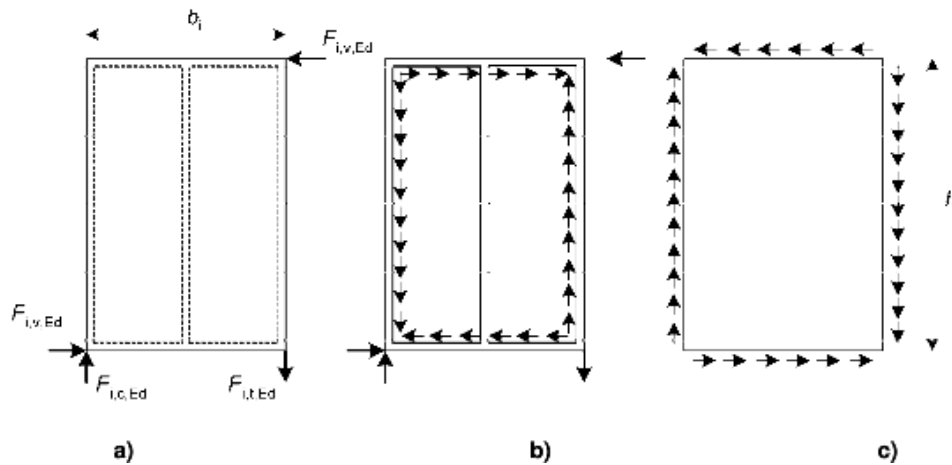
Daarnaast vermeldt de norm dat de rekenwaarde van de sterkte op afschuiving verhoogd mag worden met een factor 1,2. De uiteindelijke sterkte van één wandpaneel bedraagt dan:

$$F_{i,v,Rd} = \frac{1,2 F_{f,Rd} b_i c_i}{s} \quad (2-3)$$

De uitwendige krachten  $F_{i,c,Ed}$  en  $F_{i,t,Ed}$  worden als volgt berekend:

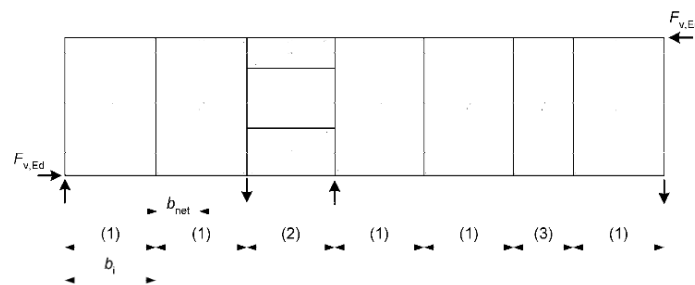
$$F_{i,c,Ed} = F_{i,t,Ed} = \frac{F_{i,v,Ed} h}{b_i} \quad (2-4)$$

Figuur 5 geeft een overzicht van de krachten werkend op het wandpaneel, het skelet en het plaatmateriaal.



Figuur 5: Krachten werkend op: a) het wandpaneel; b) het skelet c) het plaatmateriaal.[EC5]

Wandpanelen met deur- en vensteropeningen dragen niet bij tot de sterkte van een wand. Hun zijstijlen dienen wel de kracht  $F_{i,c,Ed}$  en  $F_{i,t,Ed}$  door te geven.



**Verklaring**

- (1) wandpaneel (normale breedte)
- (2) wandpaneel met raam
- (3) wandpaneel (kleine breedte)

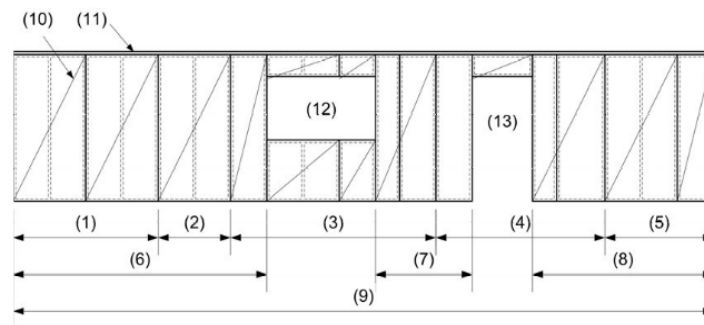
Figuur 6: Afdracht van kracht  $F_{i,c,Ed}$  en  $F_{i,t,Ed}$ . [EC5]

Indien er verticale belastingen aangrijpen op de wand, dienen de verticale stijlen gecontroleerd te worden op knik. Daarnaast dient ook de drukspanning loodrecht op de vezelrichting in het contactoppervlak tussen de verticale stijlen en de onderregel gecontroleerd te worden.

### 2.3.1.2 Methode B [EC5]

Eisen in verband met de opbouw van de wanden en de panelen om Methode B toe te passen.

- Een samengestelde wand kan bestaan uit één of meerdere wanden waarbij elke wand is opgebouwd uit één of meerdere wandpanelen.



#### Verklaring

(1)	wandpaneel 1	(2)	wandpaneel 2
(3)	wandpaneel 3	(4)	wandpaneel 4
(5)	wandpaneel 5	(6)	wand 1
(7)	wand 2	(8)	wand 3
(9)	samengestelde wand	(10)	plaat
(11)	bovenregel	(12)	raam
(13)	deur		

Figuur 7: Samengestelde wand. [EC5]

- Het plaatmateriaal moet een houtachtig materiaal zijn.
- De verbindingen tussen de beplating en het houtskelet behoort te bestaan uit nagels of schroeven.
- De tussenafstand van de verbindingen rondom de omtrek van de beplating dient constant te zijn.
- De breedte van elke plaat moet ten minste gelijk zijn aan  $h/4$ .
- Om het plooiën van het plaatmateriaal tegen te gaan moet de dikte ervan groter zijn dan  $b_{net}/100$ .
- De tussenafstand van de verbindingsmiddelen op de tussenstijlen mag niet groter zijn dan tweemaal de tussenafstand van de verbindingsmiddelen rondom de omtrek van de plaat.
- De bovenzijde van de individuele wandpanelen dienen doorlopend te zijn verbonden indien de wand bestaat uit meerdere gecombineerde wandpanelen. Daarnaast moet de verticale verbindingsterkte tussen twee panelen worden getoetst en dient deze een rekensterkte van ten minste 2,5 kN/m te hebben.
- Als wandpanelen samen een wand vormen dan moet deze instaat zijn om kantel- en glijkrachten op te nemen te weerstaan door verankering van de eindstijlen of door blijvende belastingen op de wand of door een combinatie van beide.

Indien er een opening in een wandpaneel bevindt, moeten de lengtes van de wanddelen naast de opening beschouwd worden als afzonderlijke panelen.

Voor een samengestelde wand die bestaat uit meerdere wandpanelen, wordt de sterkte gegeven als de som van de afzonderlijke wanden:

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd} \quad (2-5)$$

De sterkte van een wand  $i$  met aan één kant een beplating, wordt gegeven door:

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd} b_i}{s_0} k_d k_{i,q} k_s k_n \quad (2-6)$$

waarin:

$F_{f,Rd}$  is de sterkte van een individueel op afschuiving belast verbindingsmiddel;

$b_i$  is de wandlengte;

$s_0$  is de basisafstand tussen de verbindingsmiddelen;

$k_d$  is de dimensiefactor;

$k_{i,q}$  is de belastingsfactor;

$k_s$  is de factor voor de tussenafstand van de verbindingsmiddelen;

$k_n$  is de plaatmateriaalfactor.

De factoren  $s_0$ ,  $k_d$ ,  $k_{i,q}$ ,  $k_s$ ,  $k_n$  worden als volgt berekend:

$$s_0 = \frac{9700d}{\rho_k} \quad (2-7)$$

met

$d$  is de diameter van het verbindingsmiddel, in mm;

$\rho_k$  is de karakteristieke dichtheid van het hout;

$$k_d = \begin{cases} \frac{b_i}{h} & \text{voor } \frac{b_i}{h} \leq 1 \\ \left(\frac{b_i}{h}\right)^{0,4} & \text{voor } \frac{b_i}{h} > 1 \text{ en } b_i \leq 4,8m \\ \left(\frac{4,8}{h}\right)^{0,4} & \text{voor } \frac{b_i}{h} > 1 \text{ en } b_i > 4,8m \end{cases} \quad (2-8)$$

met

$h$  is de wandhoogte, in m;

$$k_{i,q} = 1 + (0,083q_i - 0,0008q_i^2) \left(\frac{2,4}{h}\right)^{0,4} \quad (2-9)$$

$q_i$  is de gelijkmatig verdeelde verticale belasting op de wand, in kN/m;

$$k_s = \frac{1}{0,86 \frac{s}{s_0} + 0,57} \quad (2-10)$$

met

s is de tussenafstand van de verbindingsmiddelen rondom de omtrek;

$$k_n = \begin{cases} 1 & \text{voor plaatmateriaal aan een zijde} \\ \frac{F_{i,v,Rd,max} + 0,75 F_{i,v,Rd,min}}{F_{i,v,Rd,max}} & \text{voor plaatmateriaal aan twee zijden} \end{cases} \quad (2-11)$$

met

$F_{i,v,Rd,max}$  is de sterkte van de sterkste plaat;

$F_{i,v,Rd,min}$  is de sterkte van de zwakste plaat.

Ook bij deze methode dienen de verticale stijlen gecontroleerd te worden op knik. Daarnaast dient ook de drukspanning loodrecht op de vezelrichting in het contactoppervlak tussen de verticale stijlen en de onderregel gecontroleerd te worden.

### 2.3.2 Schrankweerstand volgens BSI [6]

Het British Standards Institution (BSI) bracht in 2012 het document 'Recommendations for the design of timber structures to Eurocode 5' uit. Dit document bevat allerlei aanbevelingen voor Eurocode 5. Eén van die aanbevelingen is een vereenvoudigde Britse methode voor het bepalen van de schrankweerstand van een houtskeletwand. De methode kan worden toegepast voor zowel gedeeltelijk als volledig verankerde wanden.

Net zoals als de methodes beschreven in Eurocode 5 worden er een aantal voorwaarden opgelegd:

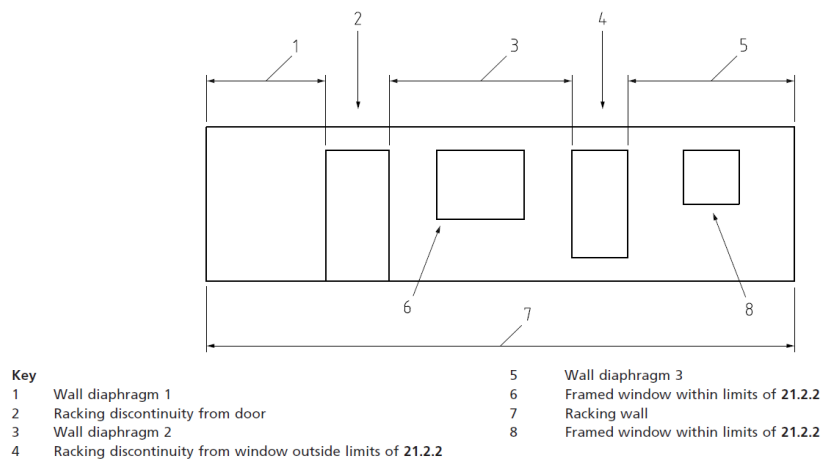
- De hart op hart afstand tussen de verticale stijlen mag niet meer dan 610 mm bedragen.
- Het hout moet een minimum dikte hebben van 38 mm, een breedte van minimum 72 mm en een minimum sterkteklasse van C16.
- De verbinding tussen de horizontale regels en de verticale stijlen moet bestaan uit minimum twee nagels met een diameter van minimum 3,1 mm en de hecht lengte in de verticale stijlen moet minimum 45 mm bedragen.
- De diameter van de plaat-houtverbinding mag niet groter zijn dan 0,09 keer de dikte van de verticale stijlen. Daar waar twee platen bevestigd worden op dezelfde stijl, moet de randafstand tot zowel de plaat als het hout minimum drie keer de diameter van het verbindingsmiddel bedragen.
- Net zoals bij Eurocode 5 dient de dikte van het plaatmateriaal groter te zijn dan  $b_{net}/100$  om het plooien ervan tegen te gaan.
- De tussenafstand van de verbindingsmiddelen op de tussenstijlen mag niet groter zijn dan tweemaal de tussenafstand van de verbindingsmiddelen rondom de omtrek van de plaat.
- In een wand mogen niet meer dan twee platen met een lengte kleiner dan 600 mm voorkomen.

Bij de Britse methode wordt er gesproken van een onderbreking indien een stabiliteitswand een deur- of raamopening bevat waarvan de verticale afmeting groter is dan 0,65 keer de hoogte van de wand of indien de hoogte onder de opening kleiner is dan 0,25 keer de hoogte van de wand (opening 2 en 4 in Figuur 8). Een onderbreking deelt de wand op in meerdere wanden. De sterkte van de onderbreking wordt niet opgenomen in de berekening.

Een wand dat een deur- of raamopening bevat dat geen onderbreking vormt wordt wel opgenomen in de berekening mits reductie van de sterkte van het wand (opening 6 en 8 in Figuur 8).

Een wand dat een opening bevat dat geen onderbreking vormt moet ook nog voldoen aan onderstaande eis:

- Elke volle plaat aan weerszijde van de opening moet een minimum lengte hebben van 0,25 maal de breedte van de opening of 1/8 van de wandhoogte, welke het grootste is. Zoniet dan moet er een volle plaatbreedte (normaal 1200 mm) binnen een afstand van 1/8 van de wandhoogte van de verticale rand van de opening bevinden.



Figuur 8: Onderverdeling stabiliteitswand in verschillende wanden volgens de Britse methode.[6]

Kleine openingen worden toegestaan zonder de schrankweerstand te verminderen indien de openingen voldoen aan alle onderstaande voorwaarden:

- De lengte en de hoogte van de opening mag niet groter zijn dan 300 mm indien de opening omlijst is.
- De lengte en de hoogte van de opening mag niet groter zijn dan 150 mm of de diameter mag niet groter zijn dan 200 mm indien de opening niet omlijst is.
- De afstand van de rand van de opening tot de rand van de beplating is minimum gelijk aan de maximale afmeting van de opening.
- Maar een van zulke opening is toegestaan in een plaat en de afstand tussen zulke openingen is minimum 1200 mm.

Voor een stabiliteitswand die bestaat uit meerdere wanden wordt de sterkte van de wand gegeven als de som van de afzonderlijke wanden:

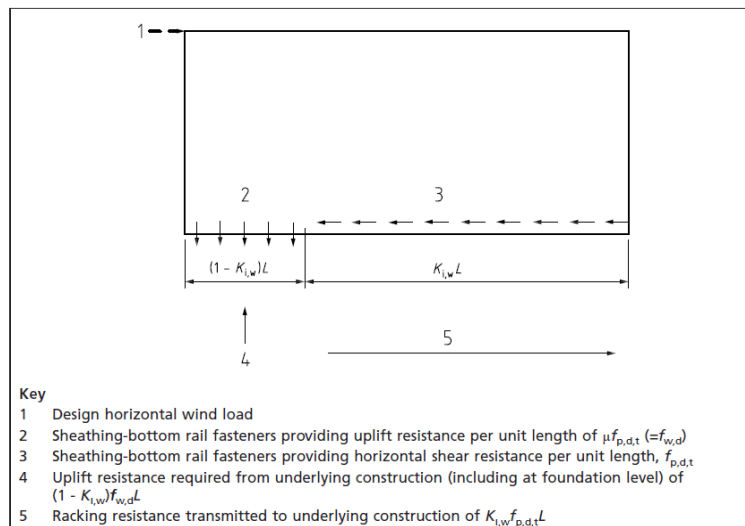
$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd} \quad (2-12)$$

De sterkte van een wand wordt gegeven door:

$$F_{i,v,Rd} = K_{opening} K_{i,w} f_{p,d,t} L \quad (2-13)$$

waarin:

- $K_{opening}$  is een factor, die het effect van de openingen in rekening brengt;
- $K_{i,w}$  is een factor die de lengte van de wand, de verticale belasting en de soort verankering in rekening brengt;
- $f_{p,d,t}$  is de totale afschuivingscapaciteit per eenheidslengte van de verbindingen rondom de omtrek van de beplating, in kN/m;
- $L$  is de lengte van de wand, in m.



Figuur 9: Krachtsverdeling naar de onderliggende structuur via de onderregel. [6]

De totale afschuivingscapaciteit per eenheidslengte van de verbindingen rondom de omtrek van de beplating wordt gegeven door:

$$f_{p,d,t} = f_{p,d,1} + K_{comb} f_{p,d,2} \quad (2-14)$$

met:  $f_{p,d,2} \leq f_{p,d,1}$

waarin:

$f_{p,d,1}$  is de afschuifcapaciteit per eenheidslengte van de verbindingen rondom de omtrek van de eerste beplating;

$f_{p,d,2}$  is de afschuifcapaciteit per eenheidslengte van de verbindingen rondom de omtrek van de tweede beplating;

$K_{comb}$  is de combinatiefactor van de beplating.

De factoren  $f_{p,d,1}$ ,  $f_{p,d,2}$  en  $K_{comb}$  worden als volgt berekend:

$$f_{p,d} = \frac{F_{f,Rd}(1,15 + s)}{s} \quad (2-15)$$

waarin:

$F_{f,Rd}$  is de sterkte van een individueel op afschuiving belast verbindingsmiddel, in kN;

$s$  is de tussenafstand van de verbindingsmiddelen rondom de omtrek van de beplating, in m.

De factor  $K_{comb}$  wordt bepaald a.d.h.v. onderstaande tabel:

Tabel 1: Combinatiefactor van de beplating. [6]

Details van de tweede beplating	$K_{comb}$
Indien er geen tweede beplating is.	0
De tweede beplating bevindt zich aan de andere zijde van het houtskelet t.o.v. de eerste beplating. En het plaatmateriaal, type en tussenafstand van het verbindingsmiddel is hetzelfde.	0,75
De tweede beplating bevindt zich aan de andere zijde van het houtskelet t.o.v. de eerste beplating. Maar het plaatmateriaal of het type of de tussenafstand van het verbindingsmiddel is anders.	0,5
De tweede beplating bevindt zich aan dezelfde zijde van het houtskelet als de eerste beplating.	0,5

De factor  $K_{i,w}$  wordt bepaald door onderstaande formule. Indien  $K_{i,w}$  groter is dan 1, moet deze begrensd worden op 1. Indien  $K_{i,w}$  kleiner is dan 0, moet deze begrensd worden op 0.

$$K_{i,w} = \left[ 1 + \left( \frac{H}{\mu L} \right)^2 + \left( \frac{2M_{d,stb,n}}{\mu f_{p,d,t} L^2} \right) \right]^{0,5} - \left( \frac{H}{\mu L} \right) \quad (2-16)$$

met

$$M_{d,stb,n} = M_{d,stb} - M_{d,stb,top} \quad (2-17)$$

$$\mu = \min \left[ 1, \frac{f_{w,d}}{f_{p,d,t}} \right] \quad (2-18)$$

waarbij:

- $M_{d, stb}$  is het stabiliserend moment aan de windvrije zijde van de wand door de permanente belasting op de wand;
- $M_{d, stb, top}$  is het destabiliserend moment aan de top van de wand door de windbelasting;
- $f_{w,d}$  is de uittrekcapaciteit van de verbindingen aan de onderkant van de beplating per eenheidslengte.

De factor  $K_{opening}$  wordt gegeven door:

$$K_{opening} = 1 - 1,19p \quad (2-19)$$

met

$$p = \frac{A}{HL} \quad (2-20)$$

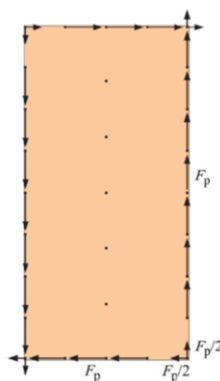
$A$  is de totale oppervlakte van de openingen in de wand, in m<sup>2</sup>. Indien de verticale afmeting van een opening kleiner is dan de 0,5 maal de horizontale afmeting, dan wordt de factor  $A$  berekend als  $0,5(L_{open})^2$ .

### 2.3.3 Opmerkingen in verband met de bestaande rekenmethodes

#### 2.3.3.1 Krachtswerking

Methode A heeft een theoretische achtergrond. De mechanische achtergrond ervan is makkelijk te achterhalen, al rijzen er wel aan aantal vragen bij de berekening zelf. Zo mag de rekenwaarde van de sterkte op afschuiving verhoogd worden met een factor 1,2. Volgens Hoekstra mag deze verhoging worden toegepast vanwege "system-action"[5]. Wat hieronder precies te verstaan is, is onduidelijk.

Aan de basis van deze methode ligt een plastische ondergrens methode (plastic lower bound method). Door het opleggen van een statisch aanvaardbare krachtenverdeling wordt de ondergrens van de schrankweerstand gevonden. De methode geeft een schrankweerstand die lager is dan de werkelijke schrankweerstand.[1]



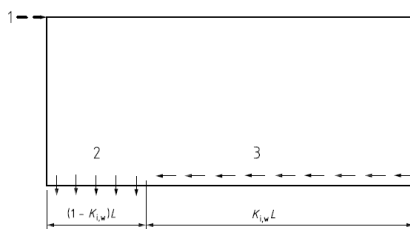
Figuur 10: Krachtverdeling plastisch ondergrens model.[7]



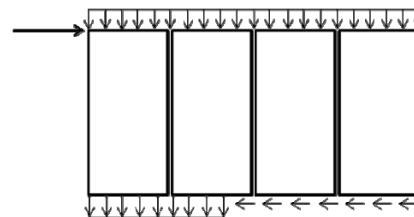
De houtskeletdelen worden verondersteld volledig scharnierend te zijn. Wanneer een volledig verankerde wand onderworpen wordt aan een horizontale belasting, dan zal het achterliggende frame vervormen. De beplating zal deze vervorming tegengaan. Door deze vervorming zal er een kracht in de verbindingen ontstaan die evenwijdig is met de rand van de plaat. Deze kracht zal even groot zijn als de plastische capaciteit van de verbindingen. De verbindingen in de hoeken van de plaat worden hierdoor zowel met een horizontale als verticale kracht belast. Beide krachten zijn even groot. Op basis van de gekozen krachtsverdeling wordt de schrankweerstand van de wand bepaald.[7][8]

Methode B heeft een experimentele achtergrond en bevat heel wat experimenteel bepaalde parameters. De mechanische achtergrond van deze methode is moeilijk te achterhalen.[1]

De krachtsverdeling van de Britse methode komt overeen met deze ontworpen door de Canadian Wood Design Standard (CSA-086). Bij beide methodes worden de plaat-houtverbindingen aan de onderkant van de wand tot een zekere lengte aangesproken tot het kantelevenwicht in orde is. De andere verbindingen dienen om het verschuiven van de wand tegen te gaan.



Figuur 11: Krachtsverdeling volgens de Brits methode.[6]



Figuur 12: Krachtsverdeling volgens CSA-086.[9]

### 2.3.3.2 Verankering

Methode A mag enkel worden toegepast volledig verankerde wanden. Dit wil zeggen dat de wanden verankerd moeten zijn door een combinatie van verankering van de eindstijlen en van de onderregel. Het verankeren van de eindstijlen kan doormiddel van een "tie-down" (Figuur 13). Ook Methode B mag enkel worden toegepast op volledig verankerde wanden. De verankering bij deze methode kan bekomen worden door verankering van de eindstijlen aan de onderliggende constructie of door blijvende belastingen op de wand of door een combinatie van beide. Eurocode 5 beschrijft dus geen methode die kan worden toegepast op gedeeltelijk verankerde wanden.

De Brits methode daarentegen kan zowel voor volledig verankerde wanden als gedeeltelijk verankerde wanden gebruikt worden. De methode werkt met een factor  $K_{i,w}$ . Deze factor brengt de lengte van de wand, de verticale belasting en de soort verankering in rekening.



Figuur 13: Verankering eindstijl: tie-down.[4]



Figuur 14: Verankering onderregel

### 2.3.3.3 Openingen

Bij Methode A wordt de sterkte van de wandpanelen met opening niet meegenomen in de berekening. Bij Methode B worden de lengtes van de wanddelen naast de openingen beschouwd als afzonderlijke wandpanelen. De schrankweerstand wordt bij beide methodes enkel bepaald aan de hand van de volle wanddelen. De weerstand van de delen boven en onder een opening worden verwaarloosd.

De Britse methode houdt wel rekening met eventuele openingen. Een deur- of raamopening die geen onderbreking vormt wordt opgenomen in de berekening mits reductie van de schrankweerstand van het wandpaneel waarin de openingen zich bevinden. De reductie gebeurt aan de hand van de factor  $K_{opening}$ . Deze factor houdt rekening met de totale oppervlakte van de openingen in het wandpaneel. Bepaalde openingen worden toegelaten zonder reductie van de schrankweerstand.

### 3 Literatuurstudie

#### 3.1 Inleiding

Er werden reeds verscheidene onderzoeken uitgevoerd die de invloed van raam- en deuropeningen op de schrankweerstand bestuderen. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van deze voorgaande onderzoeken.

Naast de invloed van raam- en deuropeningen hebben ook enkele andere factoren een invloed op de schrankweerstand van een houtskeletwand, zo blijkt uit de bestaande rekenmethodes. De belangrijkste factoren zijn:

- de sterkte van de plaat-houtverbinding;
- de tussenafstand van de plaat-houtverbinding;
- het type verankering;
- een verticale belasting.

Dit hoofdstuk geeft ook een overzicht van onderzoeken die te maken hebben met deze factoren.

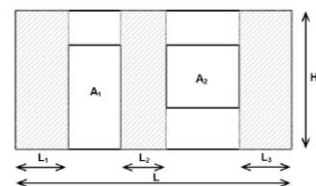
#### 3.2 Voorgaand onderzoek

Sugiyama en Yasamura [10] voerde testen uit op houtskeletwanden met en zonder openingen die voorzien waren van een multiplexbeplating. Zowel wanden op volle schaal als op eens schaal van 1:3 werden getest. De verticale verplaatsing van de eindstijlen werd tegengegaan. De stijlen naast de openingen werden niet verankerd. De horizontale belasting om de wanden een verplaatsing van  $h/60$ ,  $h/75$ ,  $h/100$ ,  $h/150$  en  $h/130$  te laten ondergaan werden geregistreerd. Zowel de stijfheid als de schrankweerstand van de wanden met opening lagen lager dan deze van de wanden zonder opening. Door Yasamura en Sugiyama werd de paneelratio  $r$  bepaald. Deze ratio maakt het mogelijk om wanden te klasseren op basis van de grootte van de openingen in de wanden.[11][12] De paneelratio wordt bepaald door de ratio van de openingen in de wand en de ratio van de volle wandpanelen:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\beta}} = \frac{H \sum l_i}{H \sum l_i + \sum A_i} \quad (3-1)$$

waarbij:

$H$	is de hoogte van de wand;
$L$	is de lengte van de wand;
$\sum l_i$	is de lengte van alle volle wandpanelen;
$\sum A_i$	is de oppervlakte van alle openingen;
$\alpha = \frac{\sum A_i}{HL}$	is de ratio van de openingen in de wand;
$\beta = \frac{\sum l_i}{L}$	is de ratio van de volle wandpanelen.



Figuur 15: Bepaling paneelratio  $r$ . [13]

Aan de hand van de resultaten van het onderzoek van Sugiyama en Yasamura werd door Sugiyama en Matsumoto [14][15] een empirische vergelijking opgesteld die het mogelijk maakt om de stijfheid en schrankweerstand van een wand met opening te bepalen indien de stijfheid en schrankweerstand van een volle wand met dezelfde eigenschappen gekend is. Hierbij wordt er gebruikt gemaakt van de paneelratio  $r$ . De stijfheid en schrankweerstand van een wand met openingen kan als volgt bepaald worden:

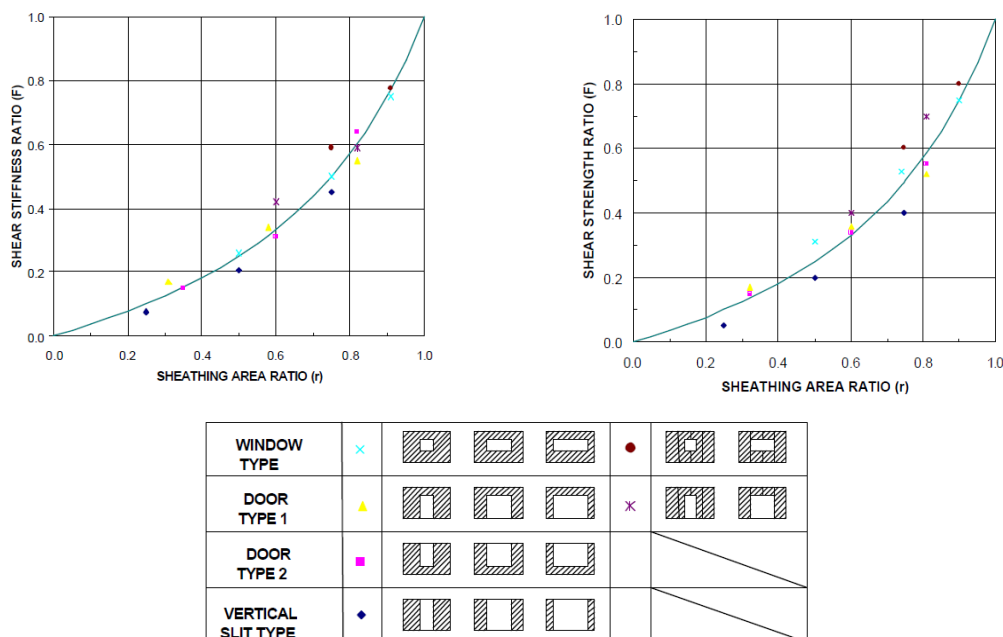
$$F = K = \left( \frac{r}{3 - 2r} \right) \quad (3-2)$$

$$K_o = K'K \quad (3-3)$$

$$F_o = F'F \quad (3-4)$$

waarbij:

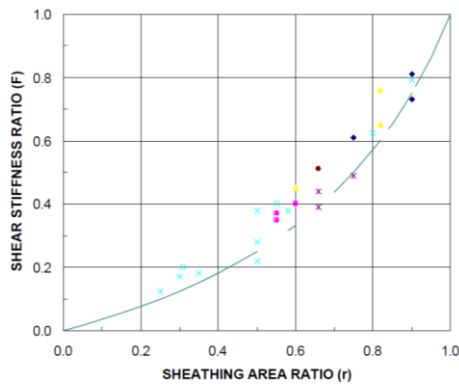
- $F$  is de schrankweerstandratio;
- $K$  is de stijfheidsratio;
- $K'$  is de stijfheid van de wand zonder openingen;
- $K_o$  is de stijfheid van de wand met openingen;
- $F'$  is de schrankweerstand van de wand zonder openingen;
- $F_o$  is de schrankweerstand van de wand met openingen.



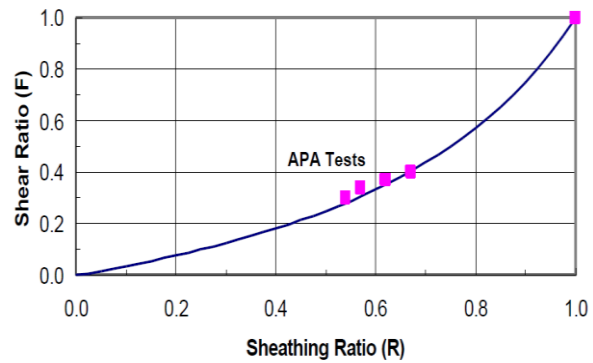
Figuur 16: Resultaten van de testen uitgevoerd door Yasamura en Sugiyama.[12]

Uchida en Wakatsuki [16][17] voerde testen uit op volledig verankerde wanden met een breedte-hoogte ratio van 8 en een paneelratio van 0,25. Deze resultaten werden door Sugiyama en Matsumoto gebruikt om de empirische vergelijking te evalueren. De resultaten toonde aan dat de empirische vergelijking de schrankweerstand licht onderschat.

De empirische vergelijking werd ook door de Amerikaanse Multiplex Associatie (APA) [18] geëvalueerd aan de hand van vier wanden met een symmetrisch geplaatste opening. De resultaten bekomen met de methode van Sugiyama en Matsumoto toonde een goede overeenkomst met de experimentele resultaten. Er was slechts een onderschatting van 10%. Resultaten van een onderzoek uitgevoerd door Dolan en Johnson [19] toonde dezelfde onderschatting aan.



Figuur 17: Resultaten van het onderzoek van Uchida's en Waktsuki's.[12]



Figuur 18: Resultaten van het onderzoek uitgevoerd door APA.[12]

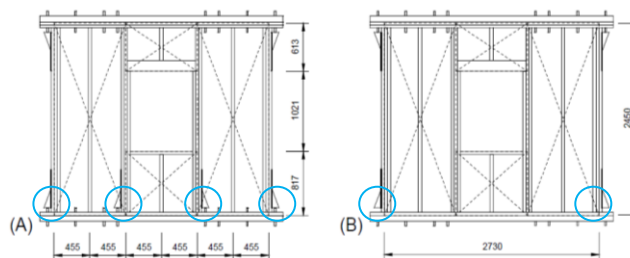
Onderzoek uitgevoerd door Dolan en Heine [20][21] gaf aan dat de onderschatting groter werd indien de ratio van de openingen in de wand,  $\alpha$ , groter werd. Met andere woorden, hoe lager de paneelratio  $r$ , des te groter de onderschatting werd van de schrankweerstand van een wand met opening.

Gezien de onderschatting werd de methode verder onderzocht door Yasamura[22]. Uiteindelijk werd de volgende schrankweerstandratio  $F$  gevonden voor wanden met een opening waarbij enkel de eindstijlen verankerd zijn (Figuur 19 (b)):

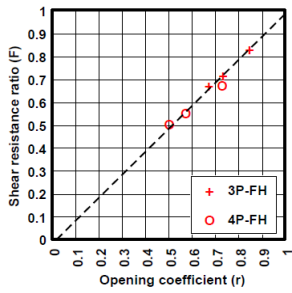
$$F = \left( \frac{r}{2 - r} \right) \quad (3-5)$$

Daarnaast werd er ook een ratio gevonden die gebruikt kan worden om de schrankweerstand te berekenen van wanden met opening waarbij de stijlen naast de opening ook verankerd zijn (Figuur 19 (a)):

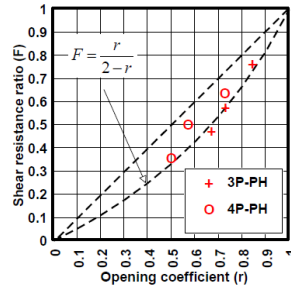
$$F = r \quad (3-6)$$



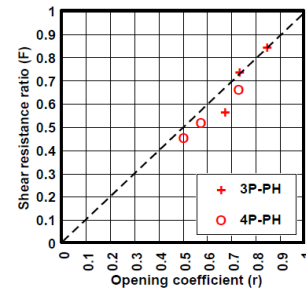
Figuur 19: Wandconfiguraties getest door Yasamura (a) verankering van alle stijlen, (b) enkel verankering eindstijlen.[22]



Figuur 20:  
Schransweerstandratio voor een wand waarbij zowel de eindstijlen als de stijlen naast de opening verankerd zijn.[22]



Figuur 21:  
Schransweerstandratio voor een wand waarbij enkel de eindstijlen verankerd zijn.[22]

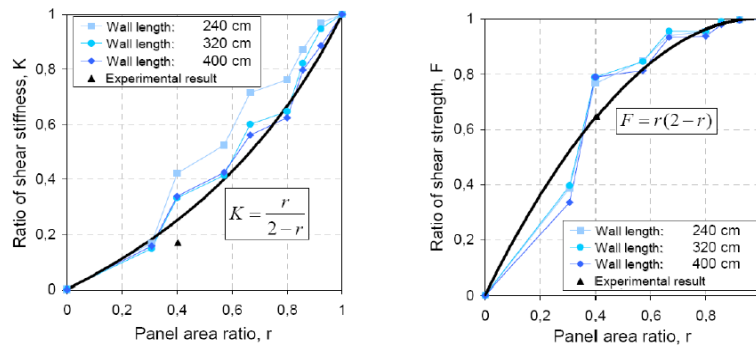


Figuur 22:  
Schransweerstandratio voor een wand waarbij enkel de eindstijlen verankerd zijn en met verticale belasting.[22]

Dujic, Klobcar en Zarnic [13] voerde testen uit op kruislaag houten (KLH) wanden. De resultaten werden gebruikt om een numeriek model te ontwikkelen. Aan de hand van dit model werden 36 wanden gemodelleerd met drie verschillende lengtes (240 cm, 320 cm, 400 cm). De hoogte van de wanden bedroeg 270 cm. De wanden hadden symmetrische openingen die systematisch toenamen in de lengte en in de hoogte met een vierde van de wandafmetingen. Aan de hand van de resultaten werd volgende schransweerstandratio en stijfheidsratio gevonden:

$$F = r(2 - r) \quad (3-7)$$

$$K = \left(\frac{r}{2 - r}\right) \quad (3-8)$$



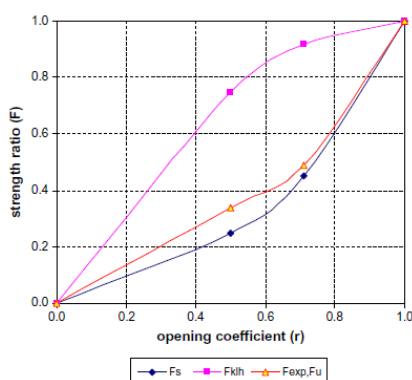
Figuur 23: (a) schransweerstandratio en (b) stijfheidsratio in functie van de paneelratio  $r$  voor KLH wanden.[13]

Kozem Silih en Premrov [23] onderzochten de invloed van openingen op de stijfheid en schransweerstand van wandpanelen die voorzien waren van een gipskarton beplating en die volledig verankerd waren. In het onderzoek werden drie groepen van wandpanelen getest met verschillende groottes van openingen. De eerste groep bestond uit drie enkele wandpanelen met een hoogte van 264 cm en een breedte van 125 cm. De opening in elk wandpaneel had een hoogte van 127,2 cm en een breedte van 84,2 cm. De tweede groep bestond uit wandpanelen met dezelfde afmetingen en eigenschappen als de eerste groep maar met een kleinere opening. De derde groep bestond uit wandpanelen met dezelfde afmetingen en eigenschappen als de eerste groep maar waarbij de opening uit één enkele

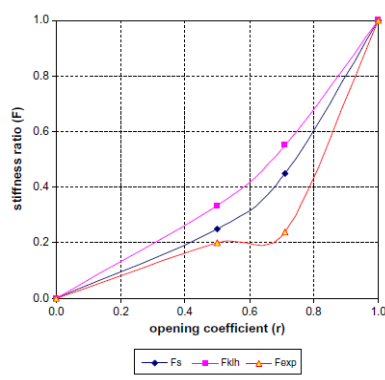
gipskartonplaat werd gesneden. Als laatste werden ook nog wanpanelen zonder opening getest.

Zowel de stijfheid als de schrankweerstand van de wandpanelen met opening lagen lager dan deze van de wandpanelen zonder opening. De stijfheid en schrankweerstand van de wandpanelen van de eerste en derde groep waren vrijwel hetzelfde. De resultaten toonde ook aan dat de grootte van de opening een invloed heeft op de stijfheid en schrankweerstand. De gemiddelde stijfheid van de wandpanelen van groep 1 en 2 bedroeg respectievelijk 20% en 24% van de gemiddelde stijfheid van de wandpanelen zonder opening. Voor de schrankweerstand bedroeg dit 34% en 49%.

De schrankweerstandsratio's en de stijfheidsratio's van de wanden werden vergeleken met deze verkregen met de empirische vergelijking van Sugiyama en Matsumoto ( $r/3-2r$ ). De schrankweerstandsratio's van de experimentele resultaten lagen binnen 10% van de voorspelde schrankweerstandsratio's. De stijfheidsratio's van de experimentele resultaten toonde een maximale afwijking van 40%.



Figuur 24: Vergelijking schrankweerstandsratio in functie van de paneelratio  $r$ . [23]



Figuur 25: Vergelijking stijfheidsratio in functie van de paneelratio  $r$ . [23]

Källsner en Girhammar [24] voerde testen uit op houtskeletwanden met verschillende plaatmaterialen, verankeringen, en belastingen. De eerste testserie bestond uit wanden die met verschillende plaatmaterialen beplaat werden en die zowel horizontaal als diagonaal belast werden. De tweede, derde en vierde testserie bestonden uit wanden met een hardboardbeplating en met en zonder verticale belasting.

Series	Configuration	Load application	Sheathing material
1		Diagonal loading = Fully anchored leading stud Horizontal loading = Partially anchored wall	Hardboard Particleboard Plywood
2		Each type loaded diagonally and horizontally	Hardboard
3		$V = 3.23 \text{ kN}$ $V = 6.46 \text{ kN}$	Hardboard
4		$V = 1.29 \text{ kN}$ $V = 3.23 \text{ kN}$ $V = 6.46 \text{ kN}$	Hardboard

Figuur 26: Testprogramma uitgevoerd door Källsner en Girhammar. [24]

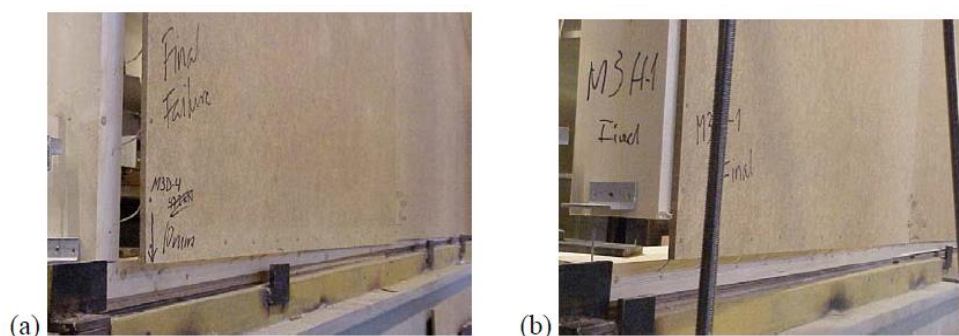
De testresultaten werden aanvankelijk gebruikt om de schrankweerstand en de krachtwerking van een gedeeltelijk verankerde wand te bestuderen en om een plastische ondergrens methode ontwikkeld door Källsner en Girhammar te evalueren. De testresultaten zullen gebruikt worden om de invloed van het type verankering en een verticale belasting op de schrankweerstand na te gaan.

De resultaten van Testserie 1 tonen aan dat de schrankweerstand van de volledig verankerde wanden gevoelig hoger liggen dan deze van de gedeeltelijk verankerde wanden en dat het type beplating een invloed heeft op de schrankweerstand.

Series 1	Maximum horizontal load $H$ [kN]			Displacement [mm]		Dry density [kg/m <sup>3</sup> ]		Moisture Content [%]		Plastic capacity (7)*	Character of overall failure mode	
	(1)	(2)	(1)/(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(5)	(6)			
Hard-board	F	42.0	37.4	1.12	37	>100	398	893	10.3	6.3	10.3	Ductile
	P	25.9	20.1	1.29	22	70	403	920	10.0	7.0	10.5	Semi-ductile
Particle-board	F	40.5	46.8	0.87	60	>100	441	681	12.2	6.4	13.0	Semi-brittle
	P	24.4	25.1	0.97	32	50	-	-	-	-	12.1	Semi-brittle
Ply-wood	F	40.0	47.5	0.84	65	70	415	407	10.6	6.8	13.2	Brittle
	P	22.4	25.5	0.88	35	50	378	442	13.1	4.3	13.9	Semi-brittle

Figuur 27. Gemiddelde waardes van de wanden van testserie 1.[24]

Het falen van de volledig verankerde wanden was te wijten aan het falen van de verbindingen rondom de omtrek van de beplating. Het falen van de gedeeltelijk verankerde wanden was te wijten aan het falen van de verbindingen ter hoogte van de onderregel.



Figuur 28: Bezwijkmodes: (a) volledig verankerde wand, (b) gedeeltelijke verankerde wand.[24]

Naast het verschil in falen van de wanden was er ook een verschil in falen van de plaat-houtverbindingen. Voor de volledig verankerde wanden met hardboardbeplating toonde de plaat-houtverbindingen een ductiel gedrag en werden de nagels uitgetrokken. De nagels werden evenwijdig met de vezelrichting van het hout belast. Bij de gedeeltelijk verankerde wanden toonde de verbindingen ter hoogte van de onderregel ook een ductiel gedrag, maar werden de nagels vooral loodrecht met de vezelrichting van het hout belast.

Spaanplaat is een veel zachter materiaal dan hardboard. De verbindingen doorponsten hierdoor zowel bij de volledig als gedeeltelijk verankerde wanden het plaatmateriaal. Daarnaast scheurde het plaatmateriaal ook in de hoeken door.

Het falen van de verbindingen bij de wanden met een multiplexbeplating was hetzelfde als deze bij de wanden met een spaanplaatbeplating. Het enige verschil was dat het plaatmateriaal ter hoogte van de hoeken niet doorscheurde.



De resultaten uit Testserie 2,3 en 4 tonen aan dat het aantal panelen een positief effect heeft op de schrankweerstand. Dit komt doordat het gedeelte van de lengte van de wand dat weerstand biedt tegen de horizontale belasting (effectieve lengte) verhoogd. Ook hier is duidelijk te zien dat het type verankering een invloed heeft op de schrankweerstand. Daarnaast is duidelijk dat via een verticale belasting de schrankweerstand verhoogd en dat indien deze groot genoeg is, de wand als volledig verankerd beschouwd kan worden.

Series 2, 3, and 4		Maximum load [kN]	Dry density [kg/m <sup>3</sup> ]		Moisture Content [%]		Number of tests
			Timber	Sheet	Timber	Sheet	
One segment	Diagonal load	16.7	404	890	10.3	6.9	4
	$V = 0$	3.8	409	886	9.5	7.7	4
Two segments	Diagonal load	29.9	405	895	12.3	7.4	4
	$V = 0$	13.9	401	873	10.8	6.3	4
Three segments	Diagonal load	42.0	398	893	10.3	6.3	4
	$V = 0$	25.9	403	920	10.0	7.0	4
Four segments	Diagonal load	60.1	470	956	12.7	6.2	4
	$V = 0$	45.2	500	972	13.2	6.0	4
Two segments	$V = 3.23$ kN	19.4	389	896	10.0	6.5	4
	$V = 6.46$ kN	21.9	415	901	10.1	6.6	4
Four segments	$V = 1.29$ kN	55.3	472	989	11.1	5.7	3
	$V = 3.23$ kN	55.5	454	977	11.7	6.1	3
	$V = 6.46$ kN	58.4	480	992	11.3	6.3	3

Figuur 29: Gemiddelde waarden van de wanden met een hardboard beplating en met verschillend aantal panelen en verticale belasting.[24]

De Proft [1] voerde testen uit op verschillende wandconfiguraties. Er werden zowel volledig als gedeeltelijk verankerde wanden getest. In totaal werden zes verschillende plaatmaterialen gebruikt en twee verschillende tussenafstanden voor de verbindingen gebruikt.

Tabel 2 geeft een overzicht van de gemiddelde resultaten van de wanden met een spaanplaat beplating. De invloed van de nietafstanden is duidelijk zichtbaar. Voor de gedeeltelijk verankerde wand is de capaciteit met nietafstand 100 mm 34% hoger dan de capaciteit met nietafstand 150 mm. Voor de verankerde wand is dit 57%.

Tabel 2: Gemiddelde resultaten van testen uitgevoerd door De Proft.[1]

Anker	NV	NV	V	V
s (mm)	150	100	150	100
$F_{max}$ (N)	2626	3508	9697	15235
$k_{ser,1}$ (N/mm)	100	111	233	269
$k_{ser,2}$ (N/mm)	95	110	193	231
$k_{ser,3}$ (N/mm)	84	91	149	175
$d_{max}$ (mm)	31,46	38,86	65,36	87,98

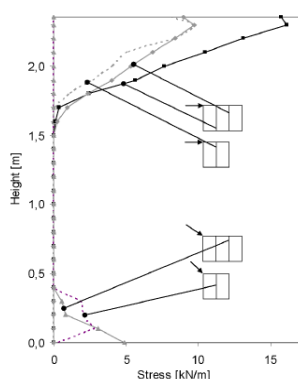
Net zoals bij het onderzoek uitgevoerd door Källsner en Girhammar lag de schrankweerstand van de volledig verankerde wanden hoger dan deze van de gedeeltelijk verankerde wanden en was de bezwijkmode van de volledig en gedeeltelijk verankerde wanden te wijten aan respectievelijk het falen van de plaat-houtverbindingen rondom de omtrek van de beplating en het falen van de plaat-houtverbindingen ter hoogte van de onderregel.

Vessby, Källsner en Girhammar [25] onderzochten de invloed van het contact tussen de platen op de interne krachtwerving en schrankweerstand van een houtskeletwand. De invloed werd onderzocht aan de hand van volledig en gedeeltelijk verankerde wanden die via een eindige elementen model werden gemodelleerd. Hierbij werd het contact tussen de platen voorgesteld als een kracht die loodrecht werkt op de oppervlaktes van de voeg tussen de platen. Daarnaast werd er aangenomen dat de verschillende platen elkaar niet konden doordringen.

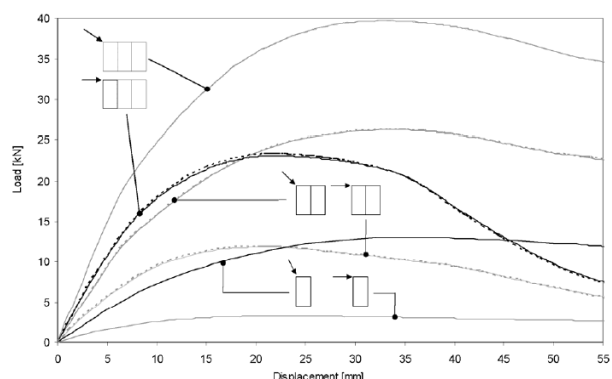
De resultaten toonde aan dat de invloed van het contact tussen de platen op de interne krachtwerving bij een volledig verankerde wand te verwaarlozen is. Dit komt doordat bij een volledig verankerde wand alle platen dezelfde rotatie zullen ondergaan. De afschuifkrachten die werken op de plaat-houtverbindingen lopen evenwijdig met de houtskeletdelen. Er zullen dan ook geen grote contactkrachten optreden. Enkel ter hoogte van de onderregel worden zeer kleine contactkrachten waargenomen. Deze zijn te wijten aan de lokale vervorming van de houtverbindingen. De invloed van het contact tussen de platen heeft geen invloed op de schrankweerstand.

Bij een gedeeltelijk verankerde wand wordt de leidende stijl opgelift. De krachten die werken op de plaat-houtverbindingen ter hoogte van de onderregel werken bijna loodrecht op de onderregel. De verticale verplaatsing is het grootste bij de leidende stijl en neemt af naarmate de lengte van de wand toeneemt. De platen zullen hierdoor niet allemaal dezelfde rotatie ondergaan waardoor er grote contactkrachten optreden bovenaan de platen.

Ondanks de invloed van de contactkrachten op de interne krachtdistributie, is de invloed ten opzichte van de schrankweerstand bij een gedeeltelijk verankerde wand te verwaarlozen. Dit komt doordat de contactkrachten worden overgedragen naar het houten skelet via de plaat-houtverbindingen ter hoogte van de bovenregel en via een gedeelte van de plaat-houtverbindingen op de verticale stijlen. De plaat-houtverbindingen langs de onderregel ondervinden hiervan geen invloed.



Figuur 30: Contactkrachten tussen de platen.[25]

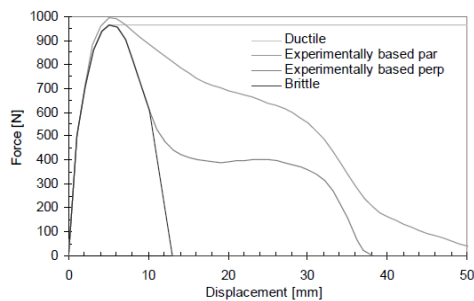


Figuur 31: Kracht-verplaatsingsdiagram voor een volledige en gedeeltelijke verankerde wand bestaande uit één, twee en drie platen. En dit met (streepjeslijn) en zonder (volle lijn) contact tussen de beplating.[25]

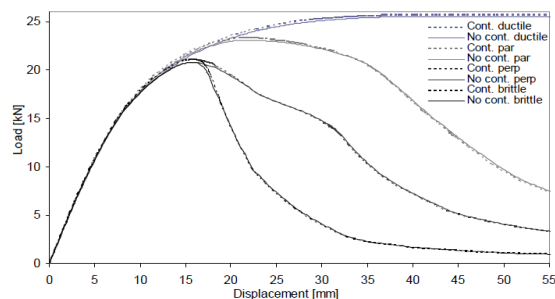
Vessby, Källsner en Girhammar [25] onderzochten de invloed van de eigenschappen van de plaat-houtverbinding op de schrankweerstand van een houtskeletwand. De invloed werd onderzocht aan de hand van een eindig elementen model en vier verschillende kracht-verplaatsingslijnen die de eigenschappen van de plaat-houtverbinding voorstelden. Twee van deze lijnen zijn gebaseerd op experimentele resultaten bekomen uit een onderzoek uitgevoerd door Bovim, Girhammar en Källsner. De twee andere lijnen stelden het uiterste gedrag voor van de verbinding. Namelijk het ductiel en bros gedrag.

De hoogste schrankweerstand werd bereikt indien de plaat-houtverbindingen een ductiel gedrag vertonen. Bij de andere gevallen zullen de verbindingen hun maximale capaciteit nog niet bereikt hebben of zal deze pas bereikt worden nadat de wand zijn maximale schrankweerstand heeft bereikt.

Het kracht-verplaatsingsdiagram en dus ook de schrankweerstand van de houtskeletwand hangt af van de graad van ductiliteit van de plaat-houtverbinding.

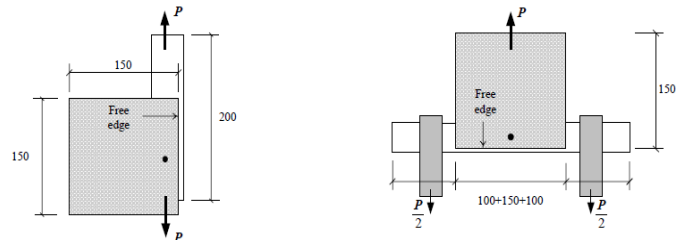


Figuur 32: Kracht-verplaatsingslijnen die het gedrag van de plaat-houtverbindingen voorstellen.[25]



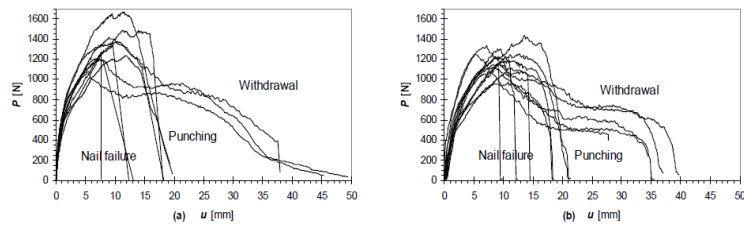
Figuur 33: Verschillende kracht-verplaatsingsdiagrammen van een gedeeltelijk verankerde wand opgebouwd uit drie platen.[25]

Girhammar, Bovim en Källsner [26] voerde testen uit op plaat-houtverbindingen. Aan de hand van de resultaten werd een model ontwikkeld dat het gedrag van een plaat-houtverbinding weergeeft. De plaat-houtverbindingen werden enerzijds met een belasting evenwijdig aan en anderzijds loodrecht aan de vezelrichting getest. Drie verschillende plaatmaterialen (hardboard, spaanplaat en multiplex) werden gebruikt. Deze werden doormiddel van enkele nagel met een lengte van 50 mm en een diameter van 2,1 mm verbonden werden met een houten balkje met een sterkteklasse van C24. De randafstand voor zowel het hout als het plaatmateriaal bedroeg 11,25 mm voor een belasting evenwijdig en 22,5 mm voor een belasting loodrecht aan de vezelrichting van het hout. De randafstand tot het plaatmateriaal bij de verbindingen met multiplex varieerde van 1d tot 5d.



Figuur 34: Testopstelling plaat-houtverbindingen met een belasting (a) evenwijdig en (b) loodrecht aan de vezelrichting van het hout.[26]

De plaat-houtverbindingen met hardboardbeplating toonde allemaal een ductiel faalgedrag. De nagels ondergingen een zekere buiging (vloeien) en werden daarna uitgetrokken. De plaat-houtverbindingen met een spaanbeplating toonde verschillende manieren van falen: uittrekken van de nagels, doorponsen van de nagelkop en falen van de nagel in het hout. Deze soorten falen kwamen ook bij de plaat-houtverbindingen met een multiplexbeplating voor.



Figuur 35: Kracht-verplaatsingsdiagram voor spaanplaat: belasting (a) evenwijdig en (b) loodrecht aan de vezelrichting.[26]

De ratio tussen de maximale schuifsterkte met een belasting evenwijdig aan de vezelrichting en een belasting loodrecht aan de vezelrichting lag tussen 0,95 en 1,07.

Voor de verbindingen met variërende randafstanden werd een minimum randafstand van  $2d$  met een belasting evenwijdig en  $4d$  voor een belasting loodrecht aan de vezelrichting gevonden.

## 4 Involed raam- en deuropeningen: experimentele resultaten

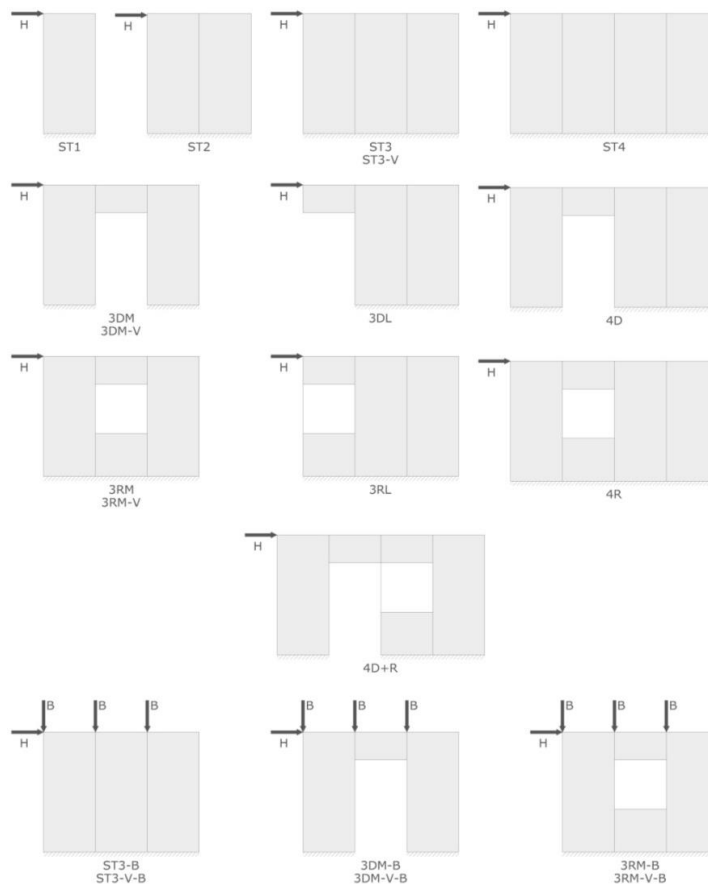
### 4.1 Inleiding

Om de invloed van raam -en deuropeningen op de schrankweerstand te onderzoeken wordt er een testprogramma opgesteld. Het testprogramma bestaat uit wanden met verschillende wand -en belastingsconfiguraties. De wanden worden enkel verankerd via de onderregel. De verticale verplaatsing van de leidende stijl wordt niet tegengegaan. Aan de hand van de experimentele resultaten worden ook volgende invloeden onderzocht:

- invloed van het contact tussen de platen op de schrankweerstand;
- invloed van de verwaarlozing van de panelen boven en onder een opening op de schrankweerstand;
- invloed van de verticale belasting op de stijfheid en schrankweerstand.

### 4.2 Testprogramma

De verschillende wand- en belastingsconfiguraties worden weergegeven in Figuur 36. De notatie V geeft aan dat er een voeg van 2 mm voorzien is tussen de platen. Bij de wanden zonder deze notatie is er geen voeg voorzien. De notatie B geeft aan dat de wanden worden getest met een verticale belasting. De verticale belasting per stijl, zoals aangeduid in Figuur 36, bedraagt 175 kg.



Figuur 36: Verschillende wand- en belastingsconfiguraties.

De wanden worden gemaakt met een schaal 1:2. Dit om de productie- en montagetijd te beperken. De hoogte van de wanden bedraagt 1400 mm. De breedte van de wanden variëren van 600 mm tot 2400 mm afhankelijk van het aantal platen dat wordt gebruikt.

De deuropeningen in dit onderzoek hebben een hoogte van 1075 mm. Dit komt in ware grootte overeen met een standaard deurhoogte van 2015 mm.

De raamopeningen hebben een hoogte van 575 mm. De hoogte onder de raamopeningen bedraagt 500 mm.

De doorsnede van het hout bedraagt 50 mm x 70 mm. De tussenafstand van de tussenstijlen bedraagt 300 mm. De stijlen worden aan de onder- en bovenregel verbonden door middel van 2 nagels met een diameter van 3 mm en een lengte van 80 mm.

De wanden worden aan één zijde voorzien van een beplating. Het plaatmateriaal wordt verbonden met het houten skelet via nieten. Deze worden onder een hoek van 30° met de vezelrichting van het hout aangebracht. De nieten hebben een rechthoekige sectie van 1,70 mm x 1,88 mm en een beenlengte van 50 mm. De maximale tussenafstand van de nieten bedraagt 150 mm. De nominale randafstand bedraagt 12,5 mm voor de tussenstijlen en 25 mm voor de uiterste stijlen en de onder- en bovenregel.

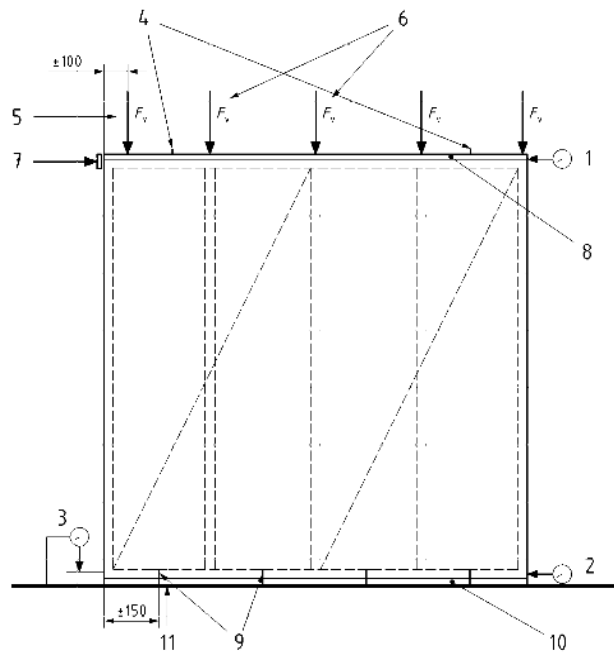
De wanden worden door middel van houtbouwschroeven via de onderregel verankerd aan een houten en hardhouten ligger. De schroeven hebben een diameter van 8 mm en een lengte van 140 mm. De onderregel van elke wand wordt over de eerste 300 mm verankerd door 3 schroeven. Vanaf dan wordt de wand over elke 300 mm verankerd met 2 schroeven.

Bijlage A bevat een reeks tekeningen met de afmetingen van de wanden van het testprogramma.

### **4.3 Bepaling schrankweerstand volgens EN 594**

De schrankweerstand kan worden bepaald volgens de proefopstelling beschreven in EN 594 [27]. De norm raadt aan om wanden te testen met de afmetingen die gebruikt worden in de praktijk. Zoals vermeldt in 4.2, worden in dit onderzoek wanden getest met een schaal 1:2.

Figuur 37 geeft de proefopstelling weer voor het bepalen van de schrankweerstand volgens EN 594. De norm beschrijft een proefopstelling voor een wand met een lengte van 2400 mm en een hoogte van 2400 mm. De tussenafstand van de stijlen bedraagt 600 mm.



- Key**
- 1 measures the racking displacement of the panel at the top rail
  - 2 measures the horizontal displacement of the panel at the bottom rail
  - 3 measures the vertical displacement of the leading stud near the bottom rail from the sole plate
  - 4 lateral restraints arranged so as not to impede movement of panel in its plane
  - 5 leading loading point set back if using fixed loading position so as to allow 100 mm maximum racking deflection
  - 6 vertical load spread equally to each stud and applied so as not to impede racking deflection of panel
  - 7 racking load,  $F_r$ , applied to the top of panel on to a metal plate attached to top rail of panel and head binder
  - 8 head binder
  - 9 holding down bolts or other fixings with equivalent performance, minimum of four evenly spread along the panel
  - 10 timber packer of similar section to bottom rail
  - 11 base of test rig or sole plate

*Figuur 37: Proefopstelling voor het bepalen van de schrankweerstand volgens EN 594.[27]*

De wand wordt verankerd via de onderregel met een houten balk die dezelfde afmetingen heeft als de onderregel. De houten balk wordt op zijn beurt verankerd met de teststand. Volledige verankering van de wand kan door middel van verticale belastingen of door middel van staaldraden ter hoogte van de leidende stijl.

Gedurende de proef wordt de horizontale verplaatsing van de boven- en onderregel en de verticale verplaatsing van de leidende stijl gemeten. De verplaatsing uit het vlak van de wand moet worden tegengegaan.

De norm stelt voor om minstens drie testen per wandconfiguratie uit te voeren.

Volgens EN 594 is de belasting die bereikt wordt voor of bij een verplaatsing van 100 mm de maximale belasting  $F_{max}$  van de verbinding.

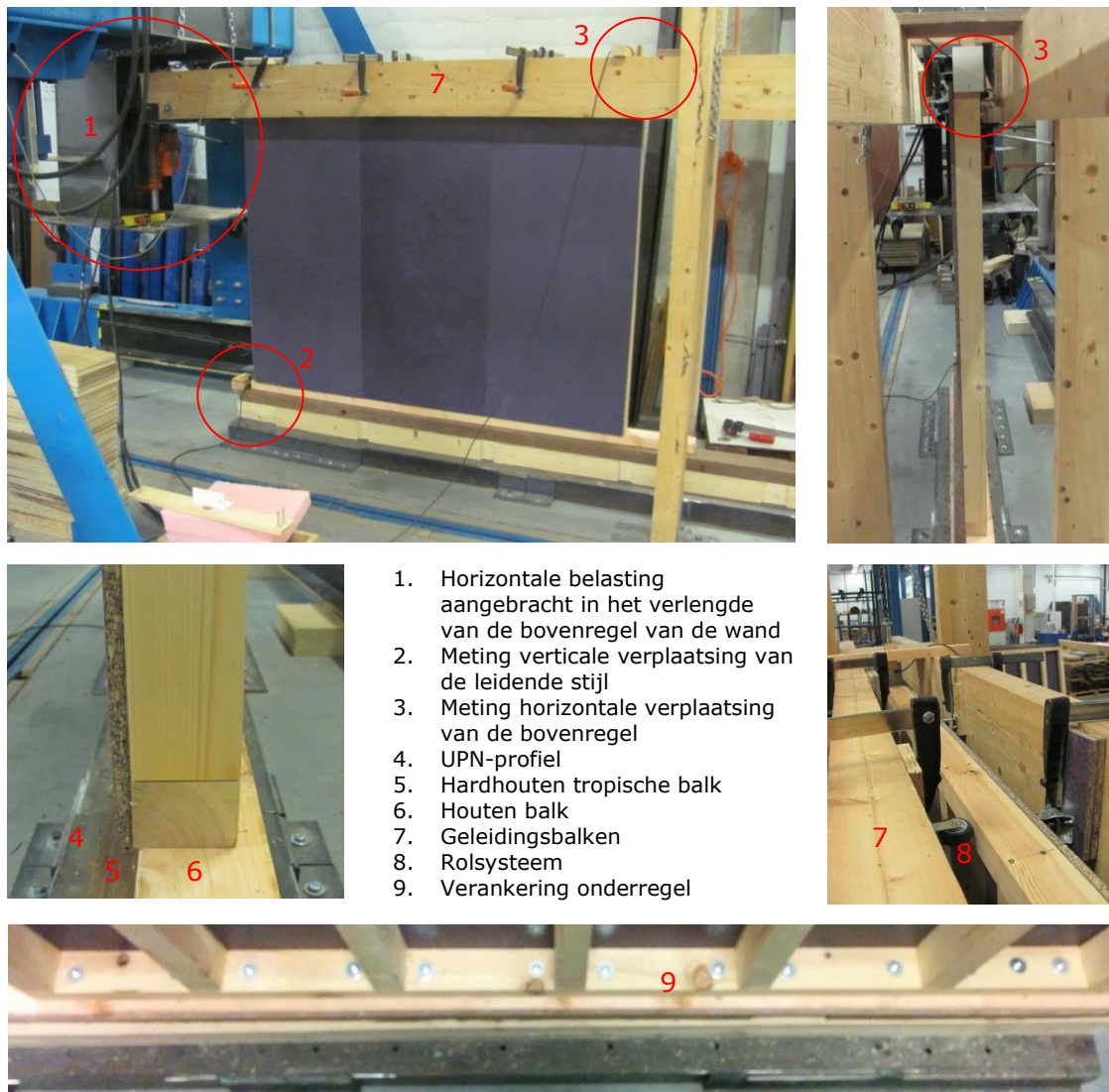
De stijfheid kan volgens de norm bepaald worden aan de hand van de verplaatsingen gemeten bij 20% en 40% van de belasting  $F_{max}$ . [27]

## 4.4 Bepaling schrankweerstand in dit onderzoek

### 4.4.1 Proefopstelling

Speciaal voor het testprogramma wordt er een testopstelling gebouwd. De testopstelling bestaat uit een UPN-profiel dat verankerd is in de vloer. Bovenop dit stalen profiel wordt een tropisch hardhouten balk verankerd. Bovenop deze balk wordt nog een dünnere balk verankerd. Deze dünnere balk zorgt ervoor dat het plaatmateriaal tijdens de proef vrij kan roteren. De bovenzijde van de wand wordt door middel van twee geleidingsbalken en een rolsysteem in het vlak gehouden.

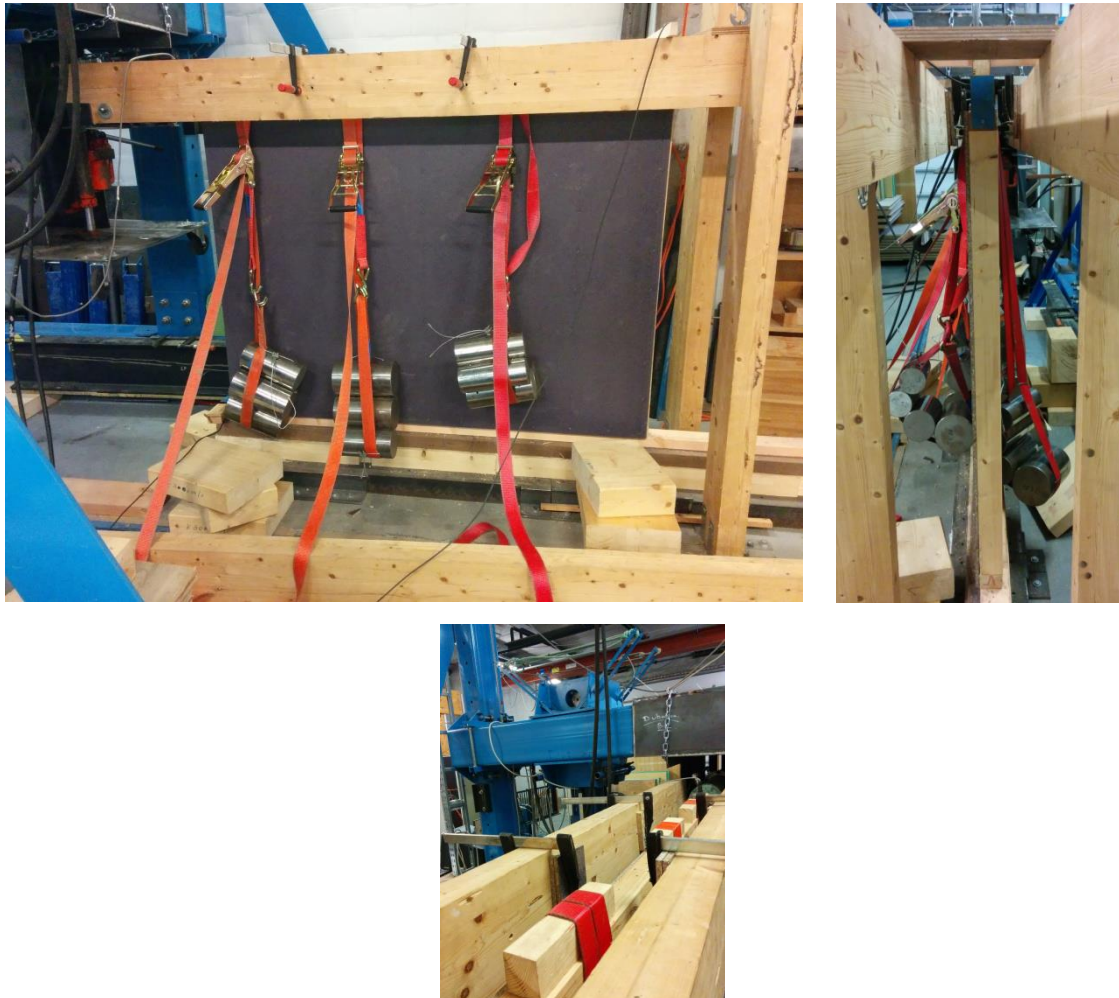
Figuur 38 geeft de proefopstelling weer voor een wand bestaande uit drie platen. De wanden worden door middel van een hydraulische cilinder onderworpen aan een horizontale belasting. De belasting wordt aangebracht in het verlengde van de bovenregel. Tijdens het testen van de wand wordt de horizontale belasting, de horizontale verplaatsing van de bovenregel en de verticale verplaatsing van de leidende stijl gemeten.



Figuur 38: Proefopstelling voor het bepalen van de schrankweerstand.



Figuur 39 geeft de proefopstelling weer voor een wand bestaande uit drie platen en met een verticale belasting ter hoogte van stijlnummer 1, 3 en 5. Via spanriemen wordt een gewicht van 175 kg aan voorgenoemde stijlen gehangen. Bovenop de wand worden houten blokjes gemonteerd. Hierover worden de gewichten gehangen. De houten blokjes zorgen ervoor dat de platen zo weinig mogelijk hinder onder vinden van de spanriemen en zo vrij mogelijk kunnen roteren.



*Figuur 39: Proefopstelling voor het bepalen van de schrankweerstand met verticale belasting.*

#### 4.4.2 Bepaling schrankweerstand en stijfheid

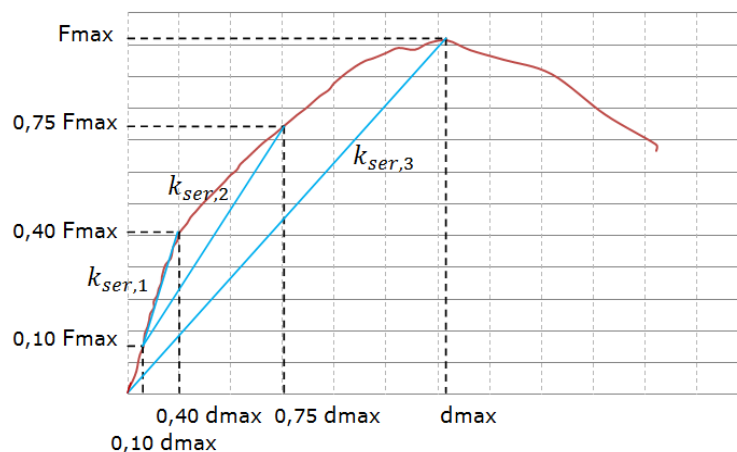
Volgens EN 594 is de belasting die bereikt wordt voor of bij een verplaatsing van 100 mm de maximale belasting  $F_{max}$  van de verbinding. De stijfheid kan volgens de norm bepaald worden aan de hand van de verplaatsingen gemeten bij 20% en 40% van de geschatte belasting  $F_{max}$ . Hiervan wordt afgeweken. In dit onderzoek worden drie stijfheden bepaald. Deze worden bepaald aan de hand van de horizontale verplaatsing gemeten bij bepaalde percentages van de maximale belasting  $F_{max}$ :

$$k_{ser,1} = \frac{F_{0,4} - F_{0,1}}{d_{0,4} - d_{0,1}} \quad (4-1)$$

$$k_{ser,2} = \frac{F_{0,75} - F_{0,1}}{d_{0,75} - d_{0,1}} \quad (4-2)$$

$$k_{ser,3} = \frac{F_{max}}{d_{max}} \quad (4-3)$$

met  $F_{max}$  de maximale kracht en  $d_{max}$  de gemeten horizontale verplaatsing bij de maximale kracht. De krachten  $F_{0,1}$ ,  $F_{0,4}$  en  $F_{0,75}$  zijn de respectievelijke krachten bij 10%, 40% en 75% van de maximale kracht en  $d_{0,1}$ ,  $d_{0,4}$  en  $d_{0,75}$  de horizontale verplaatsingen bij een kracht van respectievelijk 10%, 40% en 75% van de maximale kracht.



Figuur 40: Bepaling van de maximale kracht en de stijfheid.

## 4.5 Materiaaleigenschappen wand

### 4.5.1 Hout

De afmetingen van de doorsnede van het hout zijn 50 mm x 70 mm. De gemiddelde dichtheid van het hout bedraagt 500 kg/m<sup>3</sup>. In Tabel 3 worden de mechanische eigenschappen volgens NBN EN 338 weergegeven van deze dichtheid.

Tabel 3: Mechanische eigenschappen en densiteiten van het hout volgens NBN EN 338.[28]

Sterkte eigenschappen (N/mm <sup>2</sup> )		
Karakteristieke druksterkte loodrecht op de vezel	$f_{c,90,k}$	2,9
Stijfheidseigenschappen (N/mm <sup>2</sup> )		
Gemiddelde E-modulus evenwijdig aan de vezel	$E_{0,mean}$	14000
Gemiddelde E-modulus loodrecht op de vezel	$E_{90,mean}$	470
Densiteit (kg/m <sup>3</sup> )		
Karakteristieke dichtheid	$\rho_k$	420
Gemiddelde dichtheid	$\rho_m$	500

### 4.5.2 Plaatmateriaal

Het plaatmateriaal gebruikt voor de beplating van de wanden is een spaanplaat (Naturspan HS). De dikte van de plaat bedraagt 12 mm. De gemiddelde dichtheid bedraagt 720 kg/m<sup>3</sup>.



Figuur 41: Spaanplaat - Naturspan HS.[29]

Het gekozen plaatmateriaal is van het type P5 volgens NBN EN 312 [30]. Dit wil zeggen dat de plaat gebruikt kan worden voor structurele doeleinden in vochtige omstandigheden.

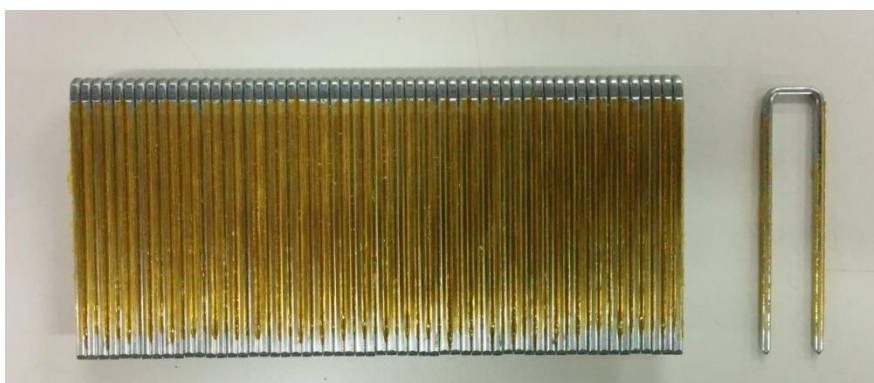
NBN EN 12369-1 geeft de volgende mechanische eigenschappen en densiteiten voor dit type plaat:

Tabel 4: Mechanische eigenschappen en densiteiten van het plaatmateriaal volgens NBN EN 12369-1.[31]

Sterkte eigenschappen (N/mm <sup>2</sup> )		
Karakteristieke druksterkte	$f_c$	12,7
Karakteristieke treksterkte	$f_t$	9,4
Karakteristieke afschuifsterkte	$f_v$	7,0
Stijfheidseigenschappen (N/mm <sup>2</sup> )		
Gemiddelde stijfheid trek	$E_t$	2000
Gemiddelde stijfheid druk	$E_c$	2000
Glijdingsmodulus	$G_v$	960
Densiteit (kg/m <sup>3</sup> )		
Karakteristieke densiteit	$\rho_k$	650
Gemiddelde densiteit	$\rho_m$	720

#### 4.5.3 Nieten

De nieten gebruikt voor het verbinden van het plaatmateriaal met het houtskelet zijn gegalvaniseerde nieten. De nieten hebben een lengte van 50 mm, een breedte van 11,1 mm en een doorsnede van 1,70 x 1,88 mm. De nieten hebben een beitelvormige kop en zijn voorzien van een coating.



Figuur 42: Nieten – Senco.

## 4.6 Experimentele resultaten

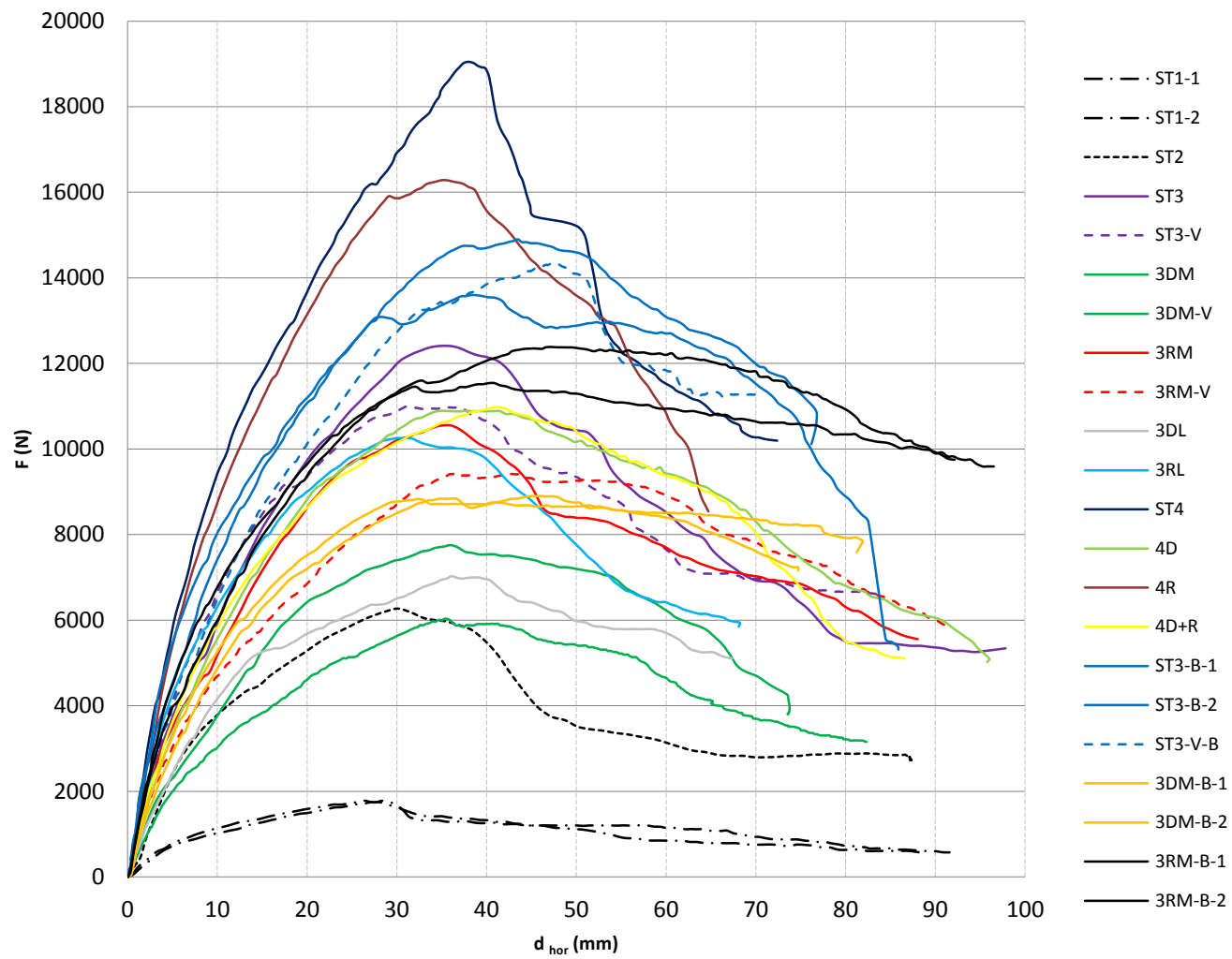
### 4.6.1 Overzicht experimentele resultaten

Tabel 5 geeft een overzicht van de schrankweerstand en stijfheden van de wanden van het testprogramma. In totaal werden 22 wanden getest. Van sommige configuraties werden meerdere testen uitgevoerd.

Tabel 5: Overzicht schrankweerstand en stijfheden van de wanden van het testprogramma.

	Notatie	$H_{max}$ (N)	$d_{max,hor}$ (mm)	$k_{ser,1}$ (N/mm)	$k_{ser,2}$ (N/mm)	$k_{ser,3}$ (N/mm)
1	ST1-1	1776	28,35	146	78	63
2	ST1-2	1779	26,40	152	87	67
3	ST2	6269	30,16	525	287	208
4	ST3	12407	35,93	596	471	345
5	ST3-V	10994	31,11	739	544	353
6	3DM	7752	35,99	363	324	215
7	3DM-V	6034	35,37	433	229	171
8	3RM	10551	35,98	566	428	293
9	3RM-V	9440	36,49	484	308	259
10	3DL	7026	36,07	450	329	195
11	3RL	10255	30,45	860	502	337
12	ST4	19045	37,81	965	627	504
13	4D	10893	35,21	677	435	309
14	4R	16283	35,03	986	653	465
15	4D+R	10975	40,87	634	418	269
16	ST3-B-1	13597	38,29	1037	564	355
17	ST3-B-2	14901	43,48	732	496	343
18	ST3-V-B	14333	47,88	603	495	299
19	3DM-B-1	8900	46,01	490	372	193
20	3DM-B-2	8833	32,36	494	451	273
21	3RM-B-1	11540	40,86	496	492	282
22	3RM-B-2	12382	47,34	629	451	262

Uitgaande van de literatuur wordt er verwacht dat de schrankweerstand toeneemt met de lengte van wand, de schrankweerstand van een wand met opening lager ligt dan deze van een volle wand zonder opening en met dezelfde eigenschappen, dat de afname van de schrankweerstand van een wand met opening groter wordt naarmate de opening groter wordt en dat een verticale belasting leidt tot een grotere schrankweerstand. Deze verwachtingen zijn allemaal zichtbaar, behalve voor de wanden 4D en 4D+R. De schrankweerstand van de wand 4D+R ligt hoger dan deze van de wand 4D terwijl de oppervlakte van de openingen groter is.

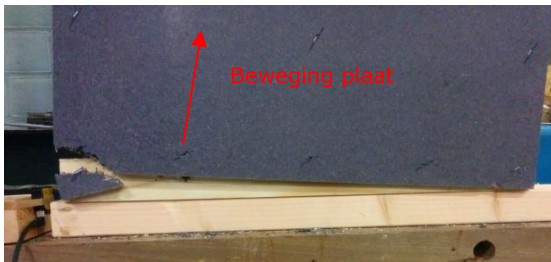


Figuur 43: Overzicht schrankweerstand wanden testprogramma in functie van de horizontale verplaatsing.



#### 4.6.2 Overzicht bezwijkmode

Het bezwijken van de gedeeltelijk verankerde wanden is te wijten aan het falen van de plaat-houtverbindingen ter hoogte van de onderregel. Deze bezwijkmode werd ook vastgesteld in eerdere onderzoeken uitgevoerd door De Proft [1] en door Källsner en Girhammar [24]. De nieten ter hoogte van de onderregel worden zowel horizontaal als verticaal belast. De verticale belasting op de niet is groter dan de horizontale. Hierdoor vervormt de niet loodrecht op de onderregel. Dit wordt weergegeven in Figuur 44 en Figuur 45.

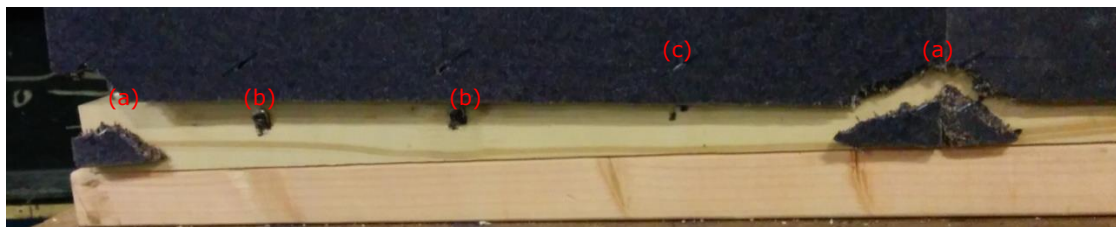


Figuur 44: Bezwijkmode ST1-1 & ST1-2.



Figuur 45: Bezwijkmode ST1-1 & ST1-2. Nieten vervormen loodrecht op de onderregel.

De meeste wanden van het testprogramma falen doormiddel van een combinatie van het uittrekken van de nieten ter hoogte van de onderregel, het buigen en doorponsen van de nieten ter hoogte van de onderregel en het doorscheuren van het plaatmateriaal ter hoogte van de benedenhoeken van de platen. Dit wordt weergegeven in Figuur 46, Figuur 47 en Figuur 48.



Figuur 46: Bezwijkmode ST2. Combinatie van (a) doorscheuren plaatmateriaal, (b) buiging en doorponsing nieten, (c) uittrekken nieten.



Figuur 47: Bezwijkmode ST3. Uittrekken nieten.



Figuur 48: Bezwijkmode ST4. Buiging en doorponsing nieten.

Tabel 6 geeft een overzicht van de bezwijkmodes van de wanden van het testprogramma. De tabel geeft weer in welke benedenhoeken (L = links, R = rechts) van welke platen (1,2,3 en 4) het plaatmateriaal doorscheurt alsook de faalmode (buiging en doorponsing en/of uittrekken) van de nieten ter hoogte van de onderregel van de verschillende platen (1,2,3 en 4).

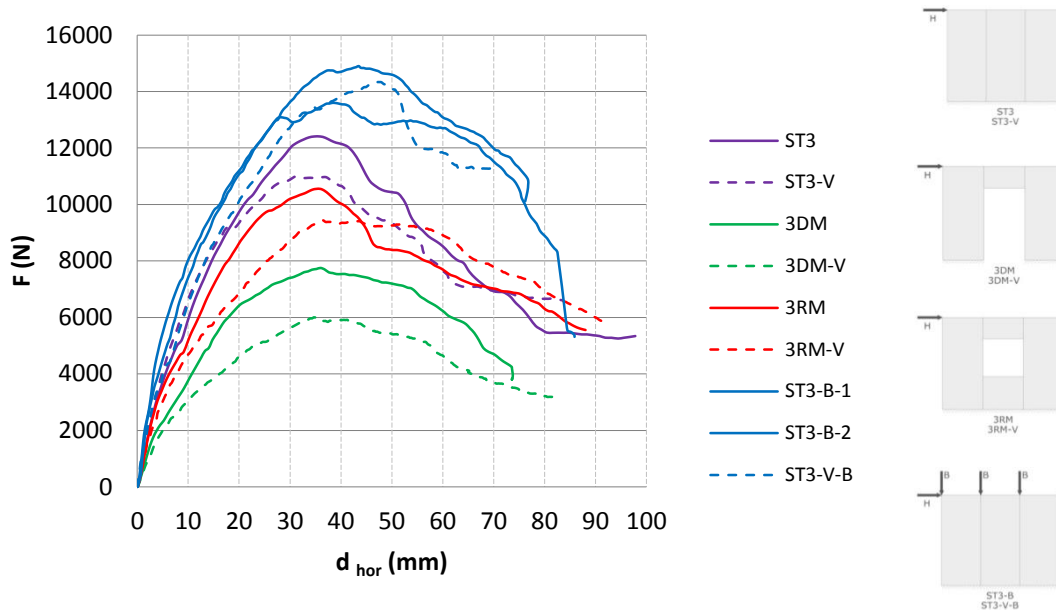
Tabel 6: Overzicht bezwijkmode wanden testprogramma.

Notatie	Bezwijkmode wanden testprogramma															
	Doorscheuren plaatmateriaal benedenhoeken								Buiging en doorponsing nieten onderregel				Uittrekken nieten onderregel			
	1		2		3		4		1	2	3	4	1	2	3	4
	L	R	L	R	L	R	L	R	1	2	3	4	1	2	3	4
ST1-1	x								x							
ST1-2	x								x							
ST2	x	x	x						x	x			x	x		
ST3		x	x	x	x					x	x		x	x		
ST3-V	x	x	x	x	x				x	x	x		x	x		
3DM					x						x		x			
3DM-V	x				x				x		x					
3RM	x	x	x		x				x	x	x					
3RM-V	x	x	x		x				x	x	x		x			
3DL			x	x	x								x	x		
3RL			x	x	x				x	x	x			x		
ST4	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x				
4D	x				x		x				x	x	x		x	x
4R			x		x	x	x			x			x	x	x	
4D+R	x				x	x	x		x	x	x		x	x	x	
ST3-B-1	x	x	x							x	x		x	x	x	
ST3-B-2	x	x	x	x	x				x	x	x		x	x	x	
ST3-V-B	x	x	x		x				x	x	x		x	x		
3DM-B-1	x								x		x		x		x	
3DM-B-2					x				x		x		x		x	
3RM-B-1	x		x		x				x		x		x	x	x	
3RM-B-2	x		x		x				x		x		x	x	x	

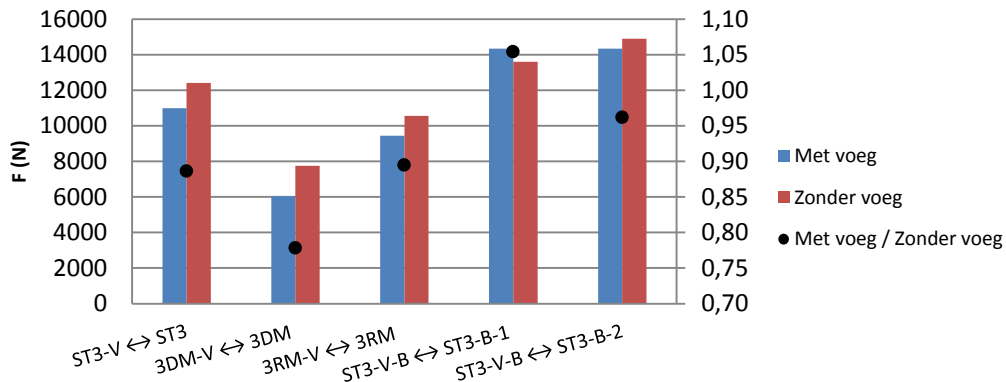


#### 4.6.3 Invloed van het contact tussen de platen op de schrankweerstand

Figuur 49 geeft de schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing weer voor de wanden met en zonder voeg. Figuur 50 geeft de vergelijking weer tussen de schrankweerstand van deze wanden.



Figuur 49: Schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing voor de wanden met en zonder voeg.



Figuur 50: Vergelijking schrankweerstand wanden met en zonder voeg.

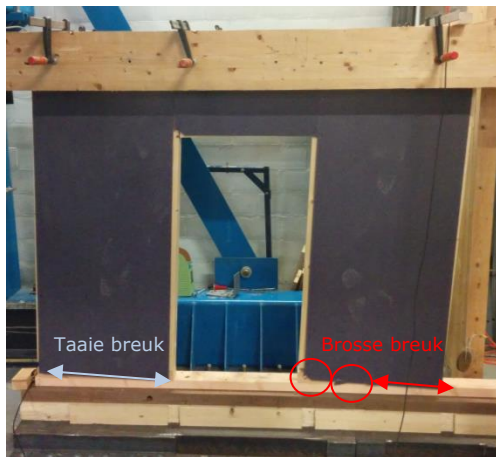
De schrankweerstand van de wanden met voeg liggen 11% tot 22% lager dan deze met voeg, met uitzondering van de wanden met belasting. Hierbij is er is er een goede overeenkomst van de schrankweerstand.

Vessby, Källsner en Girhammar [25] bestudeerden de invloed van het contact tussen de platen aan de hand van een eindig elementen model. De studie toonde aan dat het contact tussen de platen een zekere invloed heeft op krachtswerking binnenin een houtskeletwand maar dat de invloed op de schrankweerstand te verwaarlozen is.

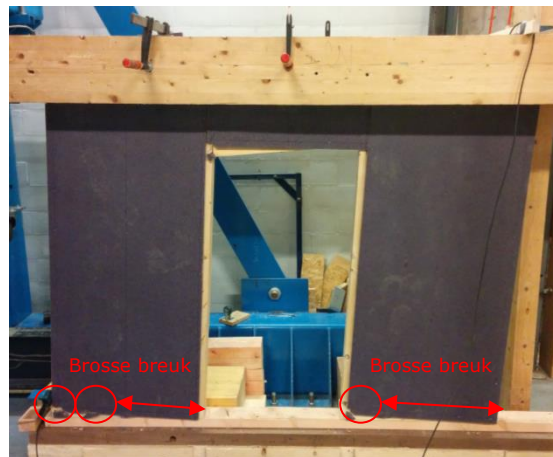
De lagere schrankweerstand van de wanden met voeg kan liggen aan de bezwijkmode, alsook aan de spreiding van de experimentele resultaten.

Vessby, Källsner en Girhammar [25] onderzochten de invloed van de eigenschappen van de plaat-houtverbinding op de schrankweerstand van een houtskeletwand. De studie toonde aan dat de hoogste schrankweerstand wordt bereikt indien de plaat-houtverbindingen een ductiel (taai) gedrag vertonen.

Het verschil in schrankweerstand is het grootste voor de wanden met deur (3DM-V ↔ 3DM). De schrankweerstand van de wand met voeg ligt hier 22% lager dan deze zonder voeg. Bij de wand zonder voeg scheurt het plaatmateriaal in de linkerbenedenhoek alsook in het midden van het derde paneel door. De rest van de nieten van de onderregel van het derde paneel doorpensen het plaatmateriaal (brosse breuk). De nieten van het eerste paneel worden uitgetrokken (taaie breuk). Bij de wand met voeg scheurt het plaatmateriaal in de linkerbenedenhoek van zowel het eerste als derde paneel door, alsook in het midden van het eerste paneel. De rest van de nieten ter hoogte van de onderregel van het eerste en derde paneel doorpensen het plaatmateriaal.



Figuur 51: Bezwijkmode 3DM.



Figuur 52: Bezwijkmode 3DM-V.

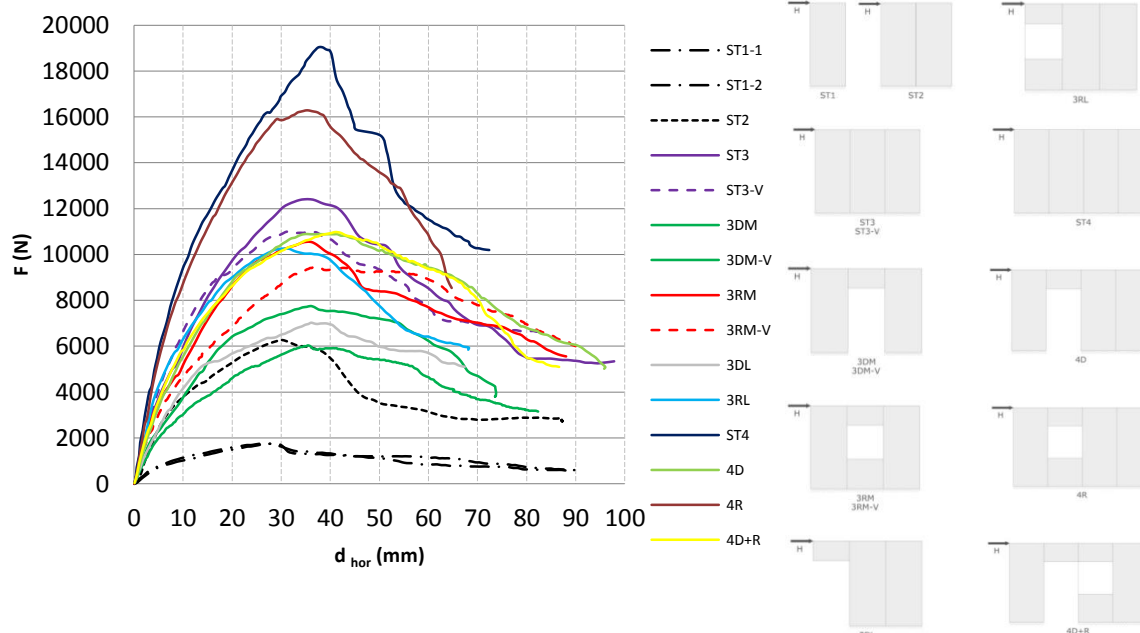
De wand zonder voeg toont een combinatie van taaie en brosse breuk. De wand met voeg vertoont enkel brosse breuk. Dit kan de lagere schrankweerstand verklaren. Dezelfde redenering kan gevonden worden voor de andere wanden.

Daarnaast is het ook zo dat de platen bij de wanden met voeg elkaar door de rotatie toch nog zullen raken net zoals bij de wanden zonder voeg.

Aangezien de invloed van het contact tussen de platen geen invloed heeft op de schrankweerstand, wordt in de volgende paragrafen telkens het gemiddelde genomen van de schrankweerstand van de wanden met en zonder voeg.

#### 4.6.4 Invloed verwaarlozing panelen boven en onder een opening op de schrankweerstand

Figuur 53 geeft de schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing weer voor de wanden met en zonder opening (zonder verticale belasting). Tabel 7 geeft een overzicht van de schrankweerstand en stijfheden van deze wanden.

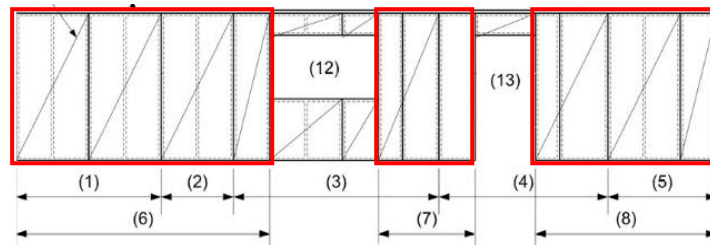


Figuur 53: Schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing voor de wanden met en zonder opening. (zonder verticale belasting)

Tabel 7: Overzicht schrankweerstand wanden met en zonder opening. (zonder verticale belasting)

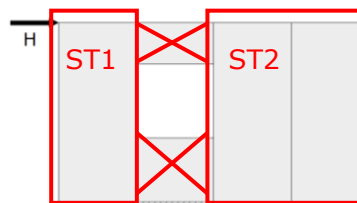
Notatie	$H_{max}$ (N)	$H_{gem}$ (N)	$d_{max,hor}$ (mm)	$d_{max,hor,gem}$ (mm)	$k_{ser,1}$ (N/mm)	$k_{ser,1,gem}$ (N/mm)	$k_{ser,2}$ (N/mm)	$k_{ser,2,gem}$ (N/mm)	$k_{ser,3}$ (N/mm)	$k_{ser,3,gem}$ (N/mm)
ST1-1	1776	1778	28,35	27,38	146	149	78	83	63	65
ST1-2	1779		26,40		87		67			
ST2	6269		30,16		525		287		208	
ST3	12407	11701	35,93	33,52	596	668	471	508	345	349
ST3-V	10994		31,11		739		544		353	
3DM	7752	6893	35,99	35,68	363	398	324	277	215	193
3DM-V	6034		35,37		433		229		171	
3RM	10551	9996	35,98	36,24	566	525	428	368	293	276
3RM-V	9440		36,49		484		308		259	
3DL	7026		36,07		450		329		195	
3RL	10255		30,45		860		502		337	
ST4	19045		37,81		965		627		504	
4D	10893		35,21		677		435		309	
4R	16283		35,03		986		653		465	
4D+R	10975		40,87		634		418		269	

In Eurocode 5 [EC5] worden twee methodes beschreven voor de bepaling van de schrankweerstand van een volledig verankerde wand. Bij methode B wordt de schrankweerstand van een samengestelde wand die bestaat uit meerdere wandpanelen berekend als de som van de schrankweerstand van de afzonderlijke wanden. De schrankweerstand wordt dus enkel bepaald aan de hand van de volle wanddelen. De wandpanelen boven en/of onder een opening worden verwaarloosd.



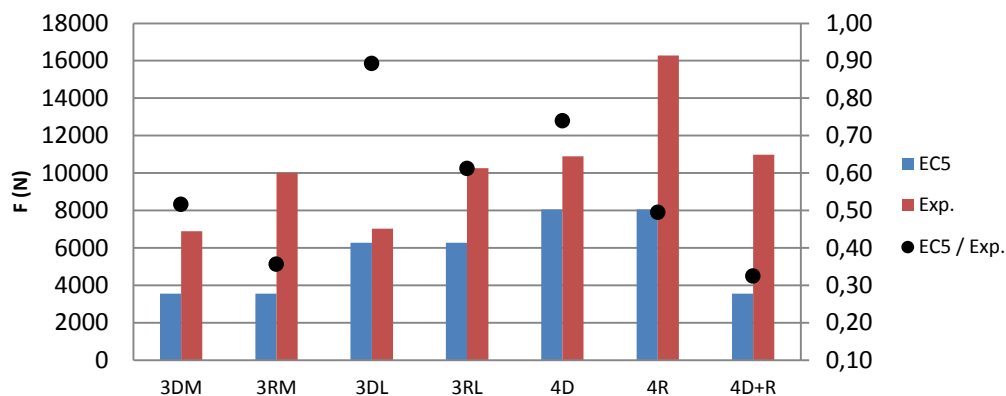
Figuur 54: Rekenwijze voor de bepaling van de schrankweerstand volgens Methode B in Eurocode 5.[EC5]

De rekenwijze wordt nu ook toegepast op de gedeeltelijk verankerde wanden van het testprogramma. Als voorbeeld kan de schrankweerstand van de onderstaande wand (4R) worden berekend als de som van de schrankweerstand van een wand bestaand uit één wandpaneel (ST1) en een wand bestaande uit twee wandpanelen (ST2).



Figuur 55: Principe rekenmethode Eurocode 5. Schrankweerstand  $3RM = ST1 + ST2$ .

Figuur 56 geeft de vergelijking weer tussen de schrankweerstand van de wanden met opening volgens de rekenwijze beschreven in Eurocode 5 en de werkelijke gemiddelde schrankweerstand van deze wanden. De schrankweerstand van de wanden volgens de rekenwijze in Eurocode 5 worden berekend met de experimentele resultaten van de wanden ST1 en ST2.

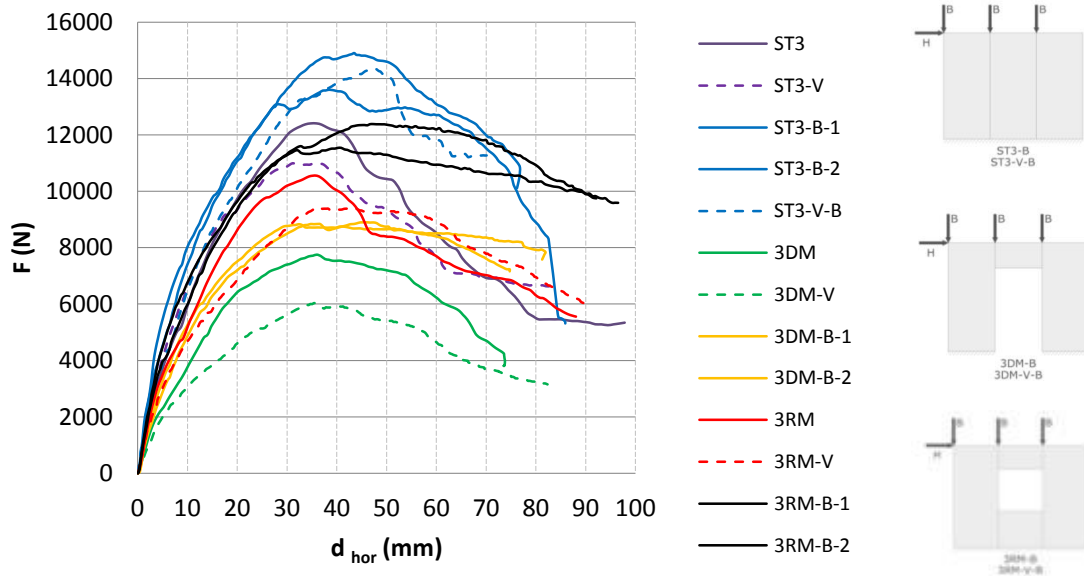


Figuur 56: Vergelijking schrankweerstand volgens rekenwijze Methode B van Eurocode 5 en de experimentele schrankweerstand van de wanden met opening.

Uit Figuur 56 kan worden besloten dat indien de rekenwijze van Methode B in Eurocode 5 gevolgd wordt, dit leidt tot grote onderschatting van de schrankweerstand. Zo bedraagt de schrankweerstand van de wand 4D+R nog slechts 32% van de werkelijke schrankweerstand. Enkel bij de wand 3DL is er een goede overeenkomst en bedraagt de schrankweerstand 89% van de werkelijke schrankweerstand. Het paneel boven de deuropening heeft bij deze wand weinig invloed en zal enkel de horizontale belasting doorgeven.

#### 4.6.5 Invloed verticale belasting op de stijfheid en schrankweerstand

Figuur 57 geeft de schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing weer voor de wanden met en zonder verticale belasting. Tabel 8 geeft een overzicht van de schrankweerstand en stijfheden van deze wanden. De verticale belasting op stijlnummer 1, 3 en 5 bedraagt 175 kg.

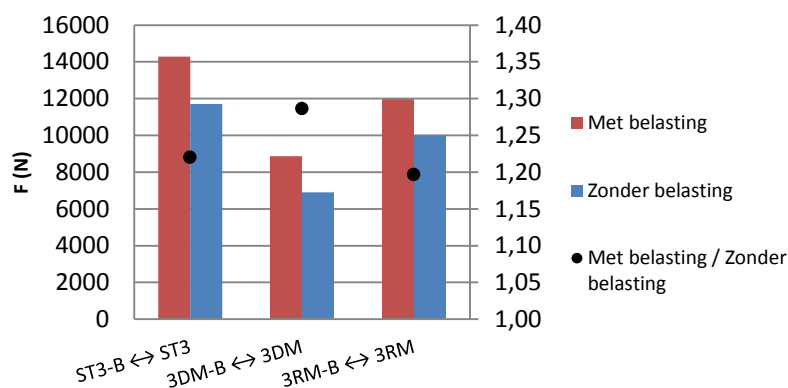


Figuur 57: Schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing voor de wanden met en zonder verticale belasting.

Tabel 8: Overzicht schrankweerstand wanden met en zonder verticale belasting.

Notatie	$H_{max}$ (N)	$H_{gem}$ (N)	$d_{max,hor}$ (mm)	$d_{hor,gem}^{max}$ (mm)	$k_{ser,1}$ (N/mm)	$k_{ser,1,gem}$ (N/mm)	$k_{ser,2}$ (N/mm)	$k_{ser,2,gem}$ (N/mm)	$k_{ser,3}$ (N/mm)	$k_{ser,3,gem}$ (N/mm)
ST3	12407	11701	35,93	33,52	596	668	471	508	345	349
ST3-V	10994		31,11		739		544		353	
ST3-B-1	13597	14277	38,29	43,22	1037	791	564	518	355	332
ST3-B-2	14901		43,48		732		496		343	
ST3-V-B	14333		47,88		603		495		299	
3DM	7752	6893	35,99	35,68	363	398	324	277	215	193
3DM-V	6034		35,37		433		229		171	
3DM-B-1	8900	8867	46,01	39,19	490	492	372	412	193	233
3DM-B-2	8833		32,36		494		451		273	
3RM	10551	9996	35,98	36,24	566	525	428	368	293	276
3RM-V	9440		36,49		484		308		259	
3RM-B-1	11540	11961	40,86	44,10	496	563	492	472	282	272
3RM-B-2	12382		47,34		629		451		262	

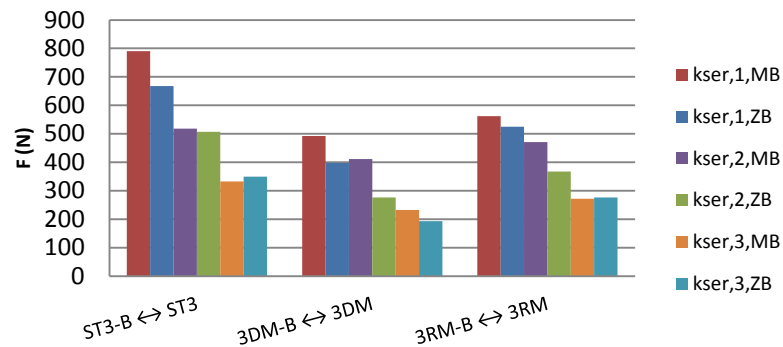
Figuur 58 geeft de vergelijking weer tussen de gemiddelde schrankweerstand van de wanden met en zonder verticale belasting. De invloed van de verticale belasting op de schrankweerstand is duidelijk zichtbaar.



Figuur 58: Vergelijking schrankweerstand wanden met en zonder verticale belasting.

De gemiddelde schrankweerstand van de volle wand met verticale belasting ligt 22% hoger dan de gemiddelde schrankweerstand van de volle wand zonder verticale belasting. Voor de wand met deuropening is dit 29%. Voor de wand met raamopening is dit 20%. De verhoging van de schrankweerstand is te verklaren doordat de verticale belasting werkt als een soort verankering die het kantelen en optillen van de wand tegengaat.

Figuur 59 geeft de vergelijking weer tussen de gemiddelde stijfheden van de wanden met en zonder verticale belasting.



Figuur 59: Vergelijking stijfheden wanden met en zonder belasting.

De gemiddelde stijfheden  $k_{ser,1,MB}$  en  $k_{ser,2,MB}$  van de volle wand met verticale belasting liggen respectievelijk 18% en 2% hoger dan deze zonder verticale belasting. De stijfheid  $k_{ser,3,MB}$  ligt daarentegen 5% lager.

De gemiddelde stijfheden  $k_{ser,1,MB}$ ,  $k_{ser,2,MB}$  en  $k_{ser,3,MB}$  van de wand met deuropening en met verticale belasting liggen respectievelijk 24%, 49% en 21% hoger dan deze zonder verticale belasting.

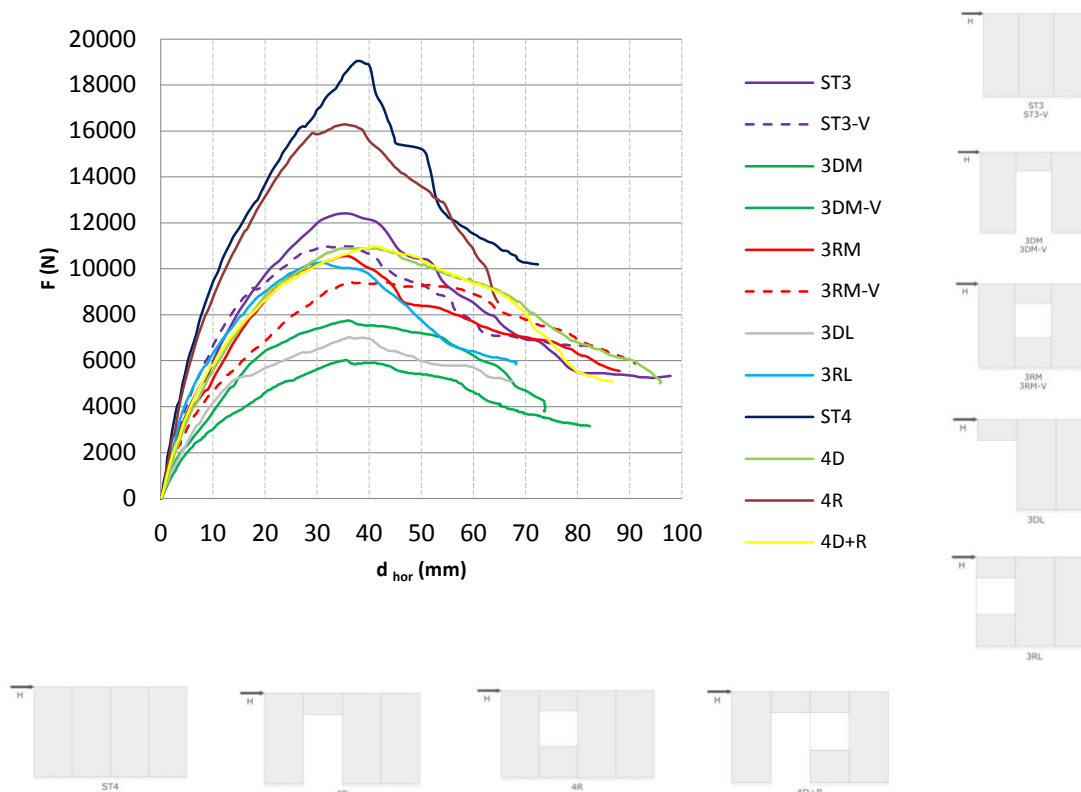
De gemiddelde stijfheden  $k_{ser,1,MB}$  en  $k_{ser,2,MB}$  van de wand met raamopening en met verticale belasting liggen respectievelijk 7% en 18% hoger dan deze zonder verticale belasting. De stijfheid  $k_{ser,3,MB}$  ligt daarentegen 1% lager.

De stijfheden van de wanden met verticale belasting liggen in het algemeen allemaal hoger dan deze van de wanden zonder verticale belasting. Een verticale belasting leidt dus niet alleen tot een verhoging van de schrankweerstand maar ook van de stijfheid.

#### 4.6.6 Invloed openingen op de stijfheid en schrankweerstand

##### 4.6.6.1 Wanden zonder verticale belasting

Figuur 60 geeft de schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing weer voor de wanden zonder verticale belasting. Tabel 9 geeft een overzicht van de schrankweerstand en stijfheden van deze wanden.



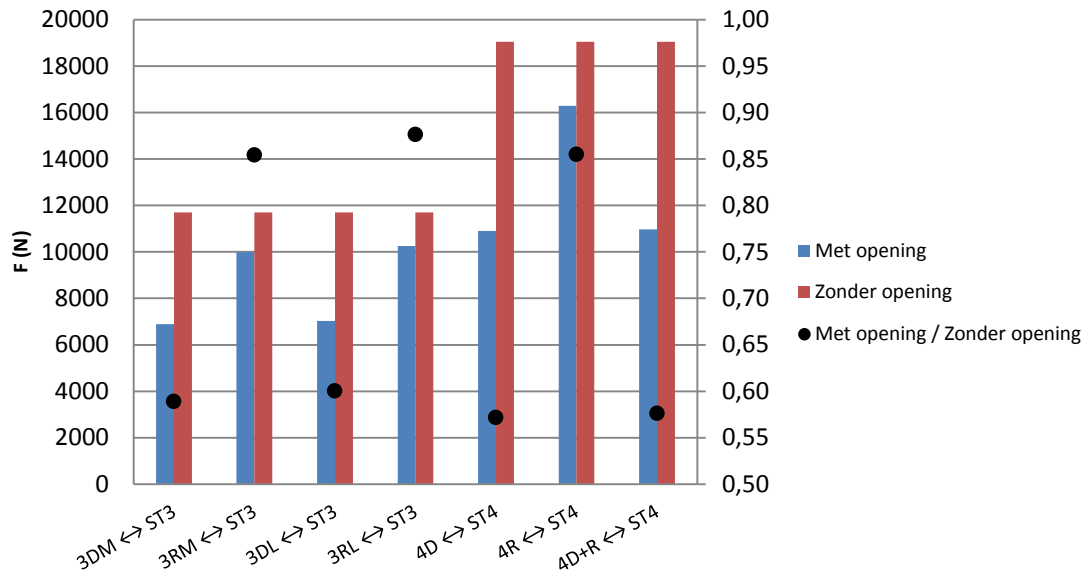
Figuur 60: Schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing voor de wanden zonder verticale belasting.

Tabel 9: Overzicht schrankweerstand wanden zonder verticale belasting.

Notatie	$H_{max}$ (N)	$H_{gem}$ (N)	$d_{max,hor}$ (mm)	$d_{max,hor,gem}$ (mm)	$k_{ser,1}$ (N/mm)	$k_{ser,1,gem}$ (N/mm)	$k_{ser,2}$ (N/mm)	$k_{ser,2,gem}$ (N/mm)	$k_{ser,3}$ (N/mm)	$k_{ser,3,gem}$ (N/mm)
ST3	12407	11701	35,93	33,52	596	668	471	508	345	349
ST3-V	10994		31,11		739		544		353	
3DM	7752	6893	35,99	35,68	363	398	324	277	215	193
3DM-V	6034		35,37		433		229		171	
3RM	10551	9996	35,98	36,24	566	525	428	368	293	276
3RM-V	9440		36,49		484		308		259	
3DL	7026		36,07		450		329		195	
3RL	10255		30,45		860		502		337	
ST4	19045		37,81		965		627		504	
4D	10893		35,21		677		435		309	
4R	16283		35,03		986		653		465	
4D+R	10975		40,87		634		418		269	

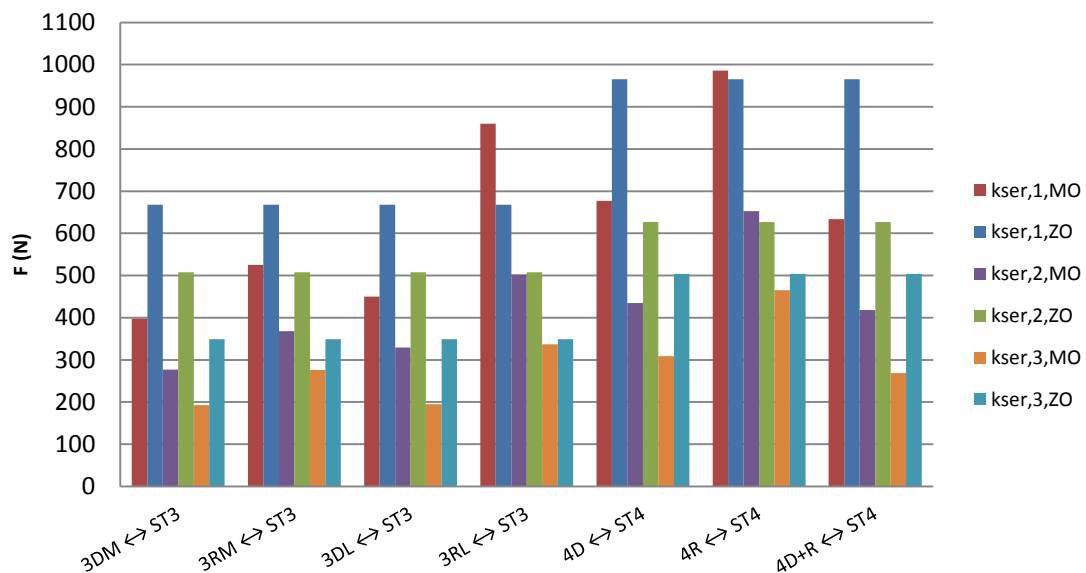


Figuur 61 geeft de vergelijking weer tussen de gemiddelde schrankweerstand van de wanden met en zonder openingen. De afmetingen van de deuropening bedragen 600 mm x 1075 mm. De afmetingen van de raamopening bedragen 600 mm x 575 mm. De invloed van zowel de deur- als raamopening is duidelijk zichtbaar.



Figuur 61: Vergelijking schrankweerstand wanden met opening en zonder opening. (zonder verticale belasting)

Figuur 62 geeft de vergelijking weer tussen de gemiddelde stijfheden van de wanden met en zonder openingen.



Figuur 62: Vergelijking stijfheid wanden met en zonder openingen. (zonder verticale belasting)

#### 4.6.6.1.1 Evaluatie wanden met een lengte van 1800 mm

De invloed van zowel de deur- als raamopening is duidelijk zichtbaar. In alle vier gevallen leidt de opening tot reductie van de schrankweerstand.

De gemiddelde schrankweerstand van de wand met in het midden een deuropening bedraagt 59% van de gemiddelde schrankweerstand van de wand zonder opening. Voor de wand met deuropening aan de leidende stijl is dit 60%. Er is geen opmerkelijk verschil tussen beide schrankweerstand. De invloed van de positie van een deuropening op de schrankweerstand is dus te verwaarlozen.

De gemiddelde schrankweerstand van de wand met in het midden een raamopening bedraagt 85% van de gemiddelde schrankweerstand van de wand zonder opening. Voor de wand met raamopening aan de leidende stijl is dit 88%. Ook hier is er geen opmerkelijk verschil tussen beide schrankweerstand. De invloed van de positie van een raamopening op de schrankweerstand is dus te verwaarlozen.

Indien de schrankweerstand van de wanden met raamopening vergeleken worden met deze van de wand met deuropening kan er besloten worden dat de grootte van de opening een invloed heeft op de schrankweerstand. Des te groter de opening, des te groter de reductie van de schrankweerstand ten opzichte van een wand zonder opening.

De gemiddelde stijfheden  $k_{ser,1,MO}$ ,  $k_{ser,2,MO}$  en  $k_{ser,3,MO}$  van de wand met in het midden een deuropening bedragen respectievelijk 60%, 55% en 55% van de stijfheden van de wand zonder opening. Voor de wand met aan de leidende stijl een deuropening is dit 67%, 65% en 56%. De deuropeningen leiden dus niet alleen tot een lagere schrankweerstand, maar zorgen er ook voor dat de stijfheid afneemt.

De gemiddelde stijfheden  $k_{ser,1,MO}$ ,  $k_{ser,2,MO}$  en  $k_{ser,3,MO}$  van de wand met in het midden een raamopening bedragen respectievelijk 79%, 72% en 79% van de stijfheden van de wand zonder opening. Net als bij de wand met in het midden een deuropening, is ook hier een afname van de stijfheid zichtbaar. De afname is minder dan deze bij de wanden met deuropening. Een raamopening heeft dus een andere invloed op de stijfheid.

Voor de wand met aan de leidende stijl een raamopening ligt de gemiddelde stijfheid  $k_{ser,1,MO}$  29% hoger dan de stijfheid  $k_{ser,1,ZO}$ . De gemiddelde stijfheden  $k_{ser,2,MO}$  en  $k_{ser,3,MO}$  liggen respectievelijk 1% en 3% lager dan de gemiddelde stijfheden  $k_{ser,1,ZO}$  en  $k_{ser,2,ZO}$  van de wand zonder opening. Deze waarden zijn eigenaardig. We verwachten namelijk dat de stijfheden ook van deze wand een stuk lager liggen dan deze van de wand zonder opening.

#### 4.6.6.1.2 Evaluatie wanden met een lengte van 2400 mm

Net als bij de wanden met een lengte van 1800 mm, is ook hier de invloed van de openingen zichtbaar. In alle drie de gevallen leiden de openingen tot reductie van de schrankweerstand.

De gemiddelde schrankweerstand van de wand met deuropening bedraagt slechts 57% van de gemiddelde schrankweerstand van de wand zonder opening. Voor de wand met raamopening is dit 85%. Een raamopening heeft dus een verschillende invloed dan een deuropening. Indien er gekeken wordt naar de grootte van de openingen kan er besloten worden dat des te groter de opening, des te groter de reductie van de schrankweerstand ten opzichte van een wand zonder opening. Dit werd ook vastgesteld bij de wanden met een lengte van 1800 mm.

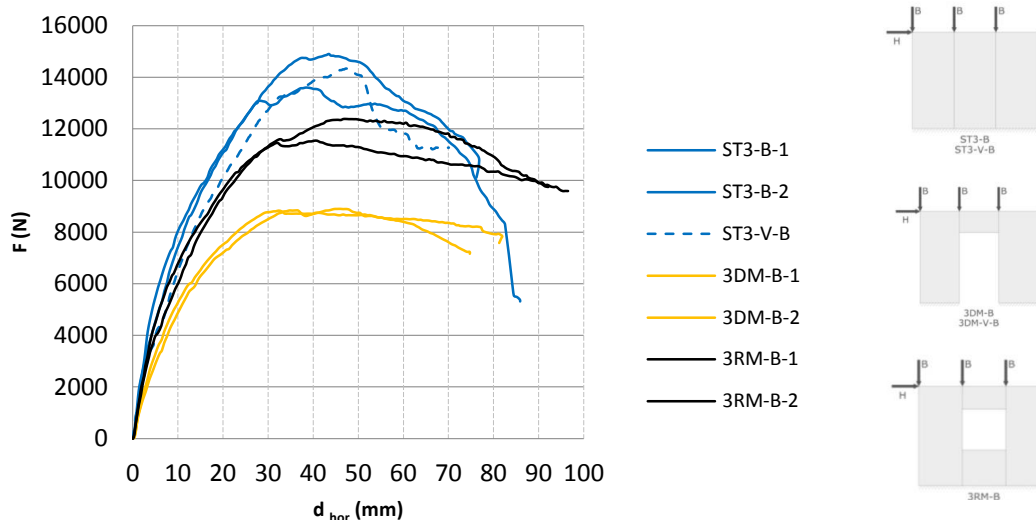
De gemiddelde schrankweerstand van de wand met raam- en deuropening bedraagt 58% van de gemiddelde schrankweerstand van de wand zonder opening. De schrankweerstand van deze wand ligt dus iets hoger dan deze met deuropening. Dit is eigenaardig aangezien de oppervlakte van de raam- en deuropeningen groter is dan deze van enkel de deuropening.

De gemiddelde stijfheden  $k_{ser,1,MO}$ ,  $k_{ser,2,MO}$ ,  $k_{ser,3,MO}$  van de wand met deuropening bedragen respectievelijk 70%, 69% en 61% van de gemiddelde stijfheden de wand zonder opening. Voor de wand met raam- en deuropening is dit 66%, 67% en 53%. De stijfheid van de wanden met opening liggen dus lager dan deze van de wand zonder opening.

Voor de wand met raamopening liggen de gemiddelde stijfheden  $k_{ser,1,MO}$ ,  $k_{ser,2,MO}$  respectievelijk 2% en 4% hoger dan de gemiddelde stijfheden  $k_{ser,1,ZO}$  en  $k_{ser,2,ZO}$  van de wand zonder opening. De gemiddelde stijfheid  $k_{ser,3,MO}$  ligt daarentegen 8% lager dan de gemiddelde stijfheid  $k_{ser,2,ZO}$  van de wand zonder opening. Deze waardes zijn eigenaardig. We verwachten namelijk dat de stijfheden ook van deze wand een stuk lager liggen dan deze van de wand zonder opening.

#### 4.6.6.2 Wanden met verticale belasting

Figuur 63 geeft de schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing weer voor de wanden met verticale belasting. Tabel 10 geeft een overzicht van de schrankweerstand en stijfheden van deze wanden.

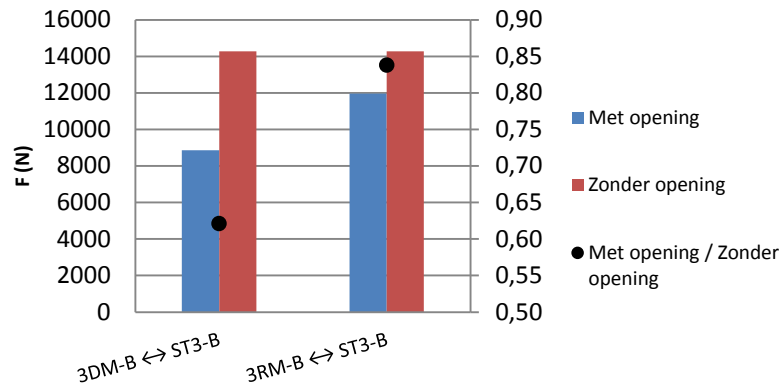


Figuur 63: Schrankweerstand in functie van de horizontale verplaatsing voor de wanden met verticale belasting.

Tabel 10: Overzicht schrankweerstand wanden met verticale belasting.

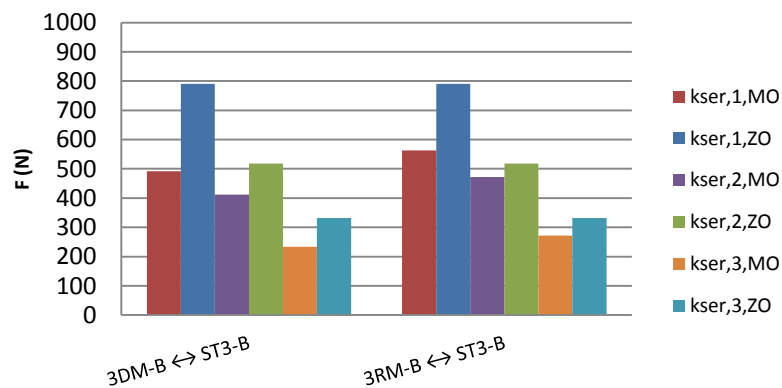
Notatie	$H_{max}$ (N)	$H_{gem}$ (N)	$d_{max,hor}$ (mm)	$d_{max,hor,gem}$ (mm)	$k_{ser,1}$ (N/mm)	$k_{ser,1,gem}$ (N/mm)	$k_{ser,2}$ (N/mm)	$k_{ser,2,gem}$ (N/mm)	$k_{ser,3}$ (N/mm)	$k_{ser,3,gem}$ (N/mm)
ST3-B-1	13597	14277	38,29	43,22	1037	791	564	518	355	332
ST3-B-2	14901		43,48		732		496		343	
ST3-V-B	14333		47,88		603		495		299	
3DM-B-1	8900	8867	46,01	39,19	490	492	372	412	193	233
3DM-B-2	8833		32,36		494		451		273	
3RM-B-1	11540	11961	40,86	44,10	496	563	492	472	282	272
3RM-B-2	12382		47,34		629		451		262	

Figuur 64 geeft de vergelijking weer tussen de gemiddelde schrankweerstand van de wanden met opening en zonder opening. De afmetingen van de deuropening bedragen 600 mm x 1075 mm. De afmetingen van de raamopening bedragen 600 mm x 575 mm. De invloed van zowel de deur- als raamopening is duidelijk zichtbaar.



Figuur 64: Vergelijking schrankweerstand wanden met en zonder opening. (met verticale belasting)

Figuur 65 geeft de vergelijking weer tussen de gemiddelde stijfheden van de wanden met en zonder opening.



Figuur 65: Vergelijking stijfheden wanden met en zonder opening. (met verticale belasting)

#### 4.6.6.2.1 Evaluatie wanden met een lengte van 1800 mm

De gemiddelde schrankweerstand van de wand met deuropening bedraagt 62% van de gemiddelde schrankweerstand van de wand zonder opening. Voor de wand met raamopening bedraagt dit 84%. Net zoals bij de wanden zonder verticale belasting leiden de openingen tot reductie van de schrankweerstand en is deze reductie het grootst voor de deuropening.

Daarnaast is ook zichtbaar dat de openingen leiden tot afname van de stijfheid en dat de afname afhangt van de grootte van de opening. De gemiddelde stijfheden  $k_{ser,1,MO}$ ,  $k_{ser,2,MO}$ ,  $k_{ser,3,MO}$  van de wand met deuropening bedragen respectievelijk 62%, 79% en 70% van de gemiddelde stijfheden de wand zonder opening. Voor de wand met raamopening is dit 71%, 91% en 82%.



## 5 Invloed raam- en deuropeningen: rekenmethode

### 5.1 Inleiding

De invloed van raam –en deuropeningen op de schrankweerstand wordt ook onderzocht aan de hand van analytische resultaten bekomen met een zogenaamde plastische rekenmethode ontwikkeld door Källsner en Girhammar [31]. Deze rekenmethode is in staat om verschillende verankeringen na te bootsen en houdt ook rekening met de sterkte van de wandpanelen met opening. Bij de methode wordt de volledige afschuifcapaciteit van de wand benut, ongeacht of de evenwichtsvoorwaarden vervuld zijn.

Om de berekeningen uit te voeren wordt eerst de sterkte van de plaat-houtverbinding bepaald. Deze sterkte wordt op twee manieren bepaald. Enerzijds experimenteel en anderzijds aan de hand van de rekenregels opgenomen in Eurocode 5 (NBN EN 1995-1-1) [EC5]. De experimentele en de berekende sterkte en stijfheden zullen vergeleken worden. De gemiddelde experimentele sterkte van de verbinding zal gebruikt worden voor de berekeningen.

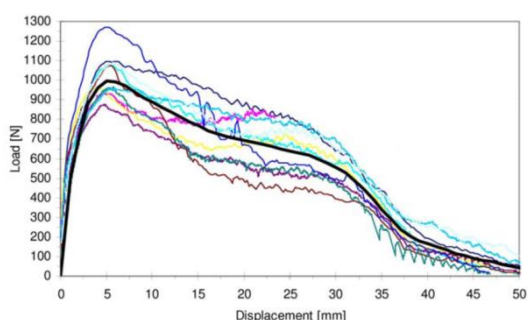
### 5.2 Rekenmethode Källsner en Girhammar

#### 5.2.1 Beperkingen

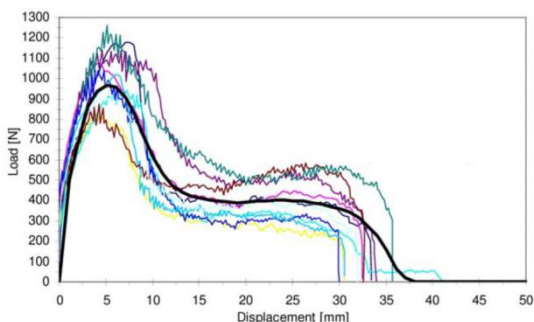
De rekenmethode kan enkel worden toegepast op houtskeletwanden waarbij het plaatmateriaal mechanisch bevestigd is met het houten skelet en waarbij deze verbindingen een plastisch gedrag vertonen.

#### 5.2.2 Eigenschappen plaat-houtverbindingen

Bij houtskeletbouw wordt het plaatmateriaal meestal bevestigd aan het houten skelet door middel van schroeven, nagels of nieten. Deze verbindingen worden meestal gekenmerkt door een betrekkelijk hoge stijfheid bij een lage belasting. Nadat de verbindingen hun maximale belasting tonen deze een grote plasticiteit. Figuur 66 en Figuur 67 geeft hiervan een voorbeeld.

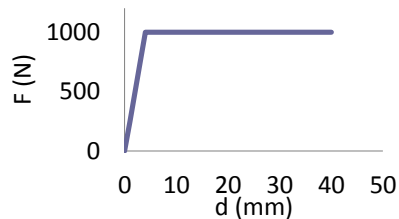


Figuur 66: Kracht-verplaatsingsdiagram van een hardboard-houtverbinding. Belasting evenwijdig aan de vezelrichting.[26]



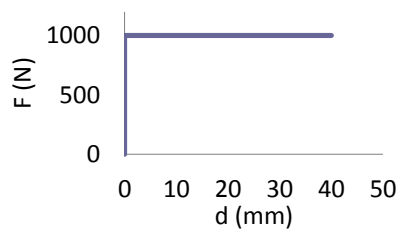
Figuur 67: Kracht-verplaatsingsdiagram van een hardboard-houtverbinding. Belasting loodrecht op de vezelrichting.[26]

Zolang de verplaatsing klein is, kan de relatie tussen de kracht en verplaatsing als elastisch omschreven worden. Dit komt overeen met de verplaatsing van een muur in uiterste grenstoestand. Indien de verplaatsing groter begint te worden, kan het gedrag van de verbinding als plastisch omschreven worden. Dit gedrag komt in werkelijkheid overeen met een wand in gebruiksgrenstoestand (GGT). Het gedrag van de verbindingen kan worden voorgesteld door een elasto-plastisch model.



Figuur 68: Elasto-plastisch model.

De ontwerpmethode van Källsner en Girhammar gaat er vanuit dat het gedrag van de verbindingen tussen het plaatmateriaal en het houten frame overeenkomt met het ideale plastische model.



Figuur 69: Plastisch model.

Een voorwaarde om de methode toe te passen, is dan ook dat de verbindingen hun volledige plastische capaciteit bereiken en dat ze een voldoende grote rek vertonen vooraleer de weerstand aanzienlijk daalt. Voor de verbindingen die geplaatst worden rondom de randen van het plaatmateriaal, is er het risico dat het plaatmateriaal scheurt of de verbinding door het plaatmateriaal wordt getrokken (pons). Deze soorten falen hebben een bros karakter en moeten vermeden worden.

### 5.2.3 Aannames rekenmethode

De volgende aannames worden gemaakt in de rekenmethode:

- de plaat-houtverbindingen van de verticale stijlen brengen enkel schuifkrachten over evenwijdig aan deze stijlen;
- de plaat-houtverbindingen van de onderregel brengen zowel krachten evenwijdig als loodrecht aan deze regel over;
- de houtverbindingen worden verondersteld geen krachten over te brengen;
- drukkrachten kunnen worden overgebracht via contact tussen de verschillende platen en via de houtverbindingen.
- om de schrankweerstand te bepalen aan de hand van eenvoudige uitdrukkingen wordt er aangenomen dat de tussenafstand van de plaat-houtverbindingen constant is.



#### 5.2.4 Bepaling capaciteit per eenheidslengte

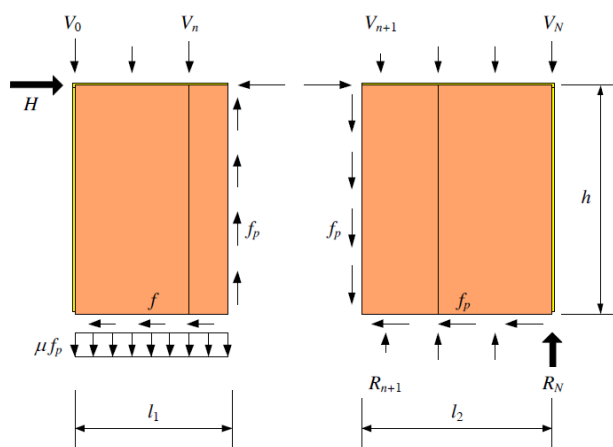
De relatie tussen de maximale capaciteit van een verbinding,  $F_p$ , en de capaciteit van een rij verbindingen hangt af van de tussenafstand van de verbindingen,  $s$ . Met deze gegevens kan de capaciteit per eenheidslengte (N/mm) bepaald worden.

$$f_p = \frac{F_p}{s} \quad (5-1)$$

#### 5.2.5 Principe rekenmethode

Bij de rekenmethode wordt er aangenomen dat de plastische schuifcapaciteit bereikt wordt in een verticale snede na de stijl met het nummer  $n$ . Deze snede deelt de wand op in twee fictieve wandelementen. De verticale krachten op het eerste wandelement worden via de verbindingen overgebracht van het skelet naar het plaatmateriaal en zo afgeleid naar de onderregel. De verticale krachten op het tweede wandelement worden rechtstreeks via het skelet naar de onderregel overgebracht aangezien de verbindingen in dit wandelement hun volledig plastische afschuifcapaciteit hebben bereikt.

Het idee achter deze methode is dat de volledige schuifcapaciteit van de wand zo dicht mogelijk bij de leidende stijl bereikt wordt, ervan uitgaande dat het verticaal evenwicht altijd vervuld is maar dat het horizontale evenwicht van het eerste wandelement niet altijd vervuld is.

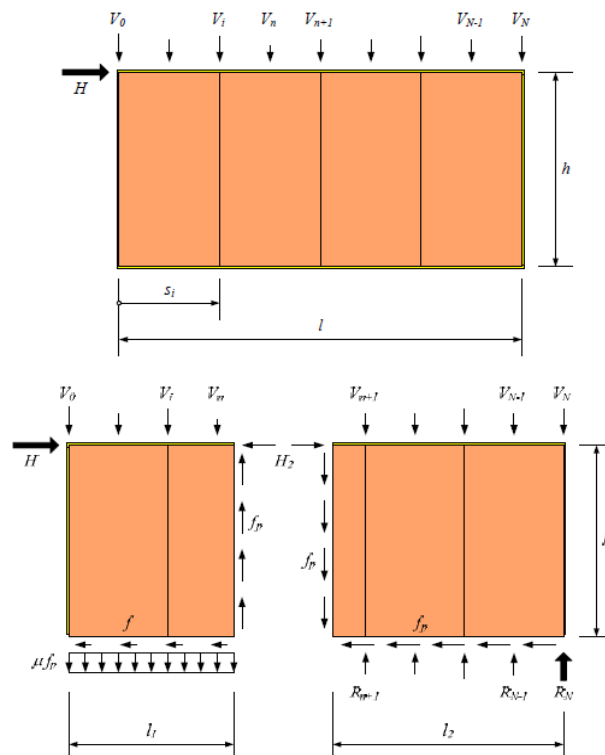


Figuur 70: Krachtsverdeling plastische rekenmethode.[32]

#### 5.2.6 Berekening wand zonder openingen

De rekenmethode wordt uitgelegd aan de hand van Figuur 71. De wand wordt belast met een horizontale belasting  $H$  en een reeks verticale belastingen  $V_i$  die aangrijpen in het verlengde van elke stijl. De lengte van de wand is  $l$  en de tussenafstand van de stijlen is  $x$ . De wand heeft een hoogte  $h$ . De wand wordt verondersteld te zijn verankerd in de ondergrond via de onderregel. De leidende stijl is dus niet verankerd. De verankering van de leidende stijl kan worden ingerekend door deze voor te stellen als een externe belasting.

De krachten werkend op de wand worden verdeeld zoals in Figuur 71. De krachten werkend langs de bodem van de wand worden getoond in een snede net boven de onderregel en stellen de krachten voor in de plaat-houtverbindingen. Deze krachten werken loodrecht of evenwijdig aan de onderregel. De plastische capaciteit per eenheidslengte wordt gegeven door  $f_p$  en er wordt aangenomen dat plasticiteit bereikt is over de hele onderregel. De factor  $\mu$  kan gebruikt worden voor het reduceren van de sterkte eigenschappen wanneer de verbindingskrachten loodrecht op de rand van het plaatmateriaal en hout werken.



Figuur 71: Krachtswerking gedeeltelijk verankerde wand.[32]

De wand wordt verdeeld in twee fictieve wandelementen. De lengte  $l_1$  wordt bepaald aan de hand van de voorwaarde dat de plastische schuifcapaciteit  $f_p$  bereikt is in deze verticale sectie van de wand. Het verticaal evenwicht van het eerste wandelement wordt dan weergegeven door:

$$\sum_{i=0}^n V_i + \mu f_p l_1 = f_p h \quad (5-2)$$

$$l_1 = h \left( 1 - \frac{\sum_{i=0}^n V_i}{f_p h} \right) \quad (5-3)$$

De krachten  $\sum_{i=0}^n V_i$  op het eerste wandelement kunnen het makkelijkst gevonden worden door het dwarskrachtendiagram te tekenen.

De lengte  $l_2$  van het tweede wandelement wordt bepaald door:

$$l_2 = l - l_1 \quad (5-4)$$

Het eerste wandelement dient hoofdzakelijk om het kantelen van de wand tegen te gaan. Het tweede wandelement wordt gebruikt voor het overbrengen van de schuifkrachten naar de ondergrond. In het eerste wandelement treedt er ook een schuifkracht  $f$  op. De plaat-houtverbindingen op de onderregel en de houtverbindingen kunnen namelijk ook een zekere schuifkracht overbrengen.

Indien de verticale kracht op de leidende stijl  $V_0 \geq f_p h$  dan is  $l_1 = 0$ . Dit komt overeen met een volledig verankerde wand. Indien de lengte van de wand klein is dan kan het zijn dat de volledige verticale plastische capaciteit nog niet bereikt is. In dat geval is  $l_1 = l$ .

Voor het rechtergedeelte van de wand is de volledige plastische capaciteit  $f_p$  langs alle randen van het plaatmateriaal bereikt. Dit betekent dat de plaat-houtverbindingen niet meer krachten kan overbrengen en dat de uitwendige verticale krachten door de verticale regels worden overgebracht naar de onderregel en zo naar de ondergrond.

Het totaal horizontaal draagvermogen  $H$  van de wand bestaat uit de horizontale stabiliteit van beide wanddelen. Het totale draagvermogen wordt als volgt berekend:

$$H = f_p l_{eff} \quad (5-5)$$

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2 \quad (5-6)$$

$$V_{ekv} = \sum_{i=0}^n \left( \frac{l_1 - x_i}{l_1} V_i \right) \quad (5-7)$$

Waarbij  $V_{ekv}$  de equivalente kracht voorstelt die op de eerste regel van de wand werkt. Hierbij wordt de wand voorgesteld als een ligger op twee steunpunten. De variabele  $x_i$  stelt de lengte van stijlnummer  $i$  tot de allereerste stijl voor.

De optredende reactiekrachten aan de onderregel van het tweede wandelement zijn gelijk aan de uitwendige belasting bovenop dit deel.

$$R_i = V_i \text{ voor } n + 1 \leq i \leq N - 1 \quad (5-8)$$

De reactiekracht op de laatste stijl van het tweede wandelement wordt gegeven door:

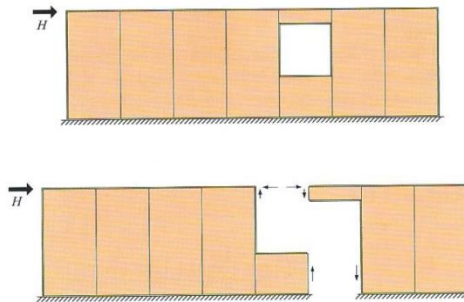
$$R_N = V_N + f_p h \quad (5-9)$$

Indien  $l_1 = l$  dan wordt de vergelijking vervangen door:

$$R_N = f_p l_1 + \sum_{i=0}^N V_i \quad (5-10)$$

### 5.2.7 Berekening wand met openingen

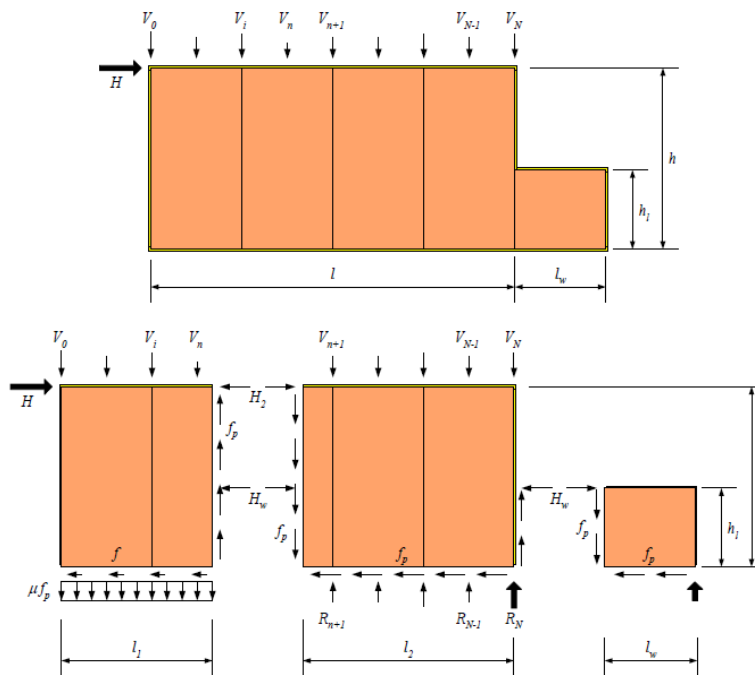
Een wand met opening kan worden opgesplitst zoals Figuur 72 weergeeft. De schrankweerstand kan bepaald worden door beide delen afzonderlijk te analyseren.



Figuur 72: Opdelen wand in twee delen.[31]

De schrankweerstand van het eerste deel kan worden bepaald zoals beschreven in 5.2.6. Er komt nu echter nog een bijdrage bij van het plaatmateriaal onder de opening.

Het eerste deel van de wand kan ook nu weer worden opgesplitst in twee fictieve wandelementen. Het eerste wandelement kan beschouwd worden als gedeeltelijk verankerd, het tweede element als volledig verankerd.



Figuur 73: Krachten werkend op een gedeeltelijk verankerde wand.[32]

De contactkracht  $H_w$  wordt overgebracht van het lage wandelement via element twee naar element één. De contactkracht geeft aanleiding tot afschuifkrachten die verdeeld zijn over de boven- en onderregel. De contactkracht kan gevonden worden door het momentenevenwicht van het kleine wandelement.

Hierbij wordt er aangenomen dat de plastische capaciteit  $f_p$  bereikt is. De contactkracht wordt gegeven door ( $h_{onder} = h_1$ ,  $l_3 = l_w$ ,  $H_c = H_w$ ):

$$H_c = f_p l_3 \quad (5-11)$$

De effectieve lengte van de wand wordt nu gegeven door:

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2 + \frac{h_{onder}}{h} l_3 \quad (5-12)$$

De factoren  $l_1$ ,  $l_2$  en  $V_{ekv}$  kunnen worden bepaald zoals beschreven in 5.2.6.

In sommige gevallen is het noodzakelijk om de schuifkracht van de plaat onder de opening te verminderen met een dimensieloze factor  $\lambda$ . Vergelijking (5-12) wordt dan weergegeven als:

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2 + \frac{h_{onder}}{h} \lambda l_3 \quad (5-13)$$

Er zijn drie gevallen waarbij de contactkracht  $H_c$  vermindert moet worden met de factor  $\lambda$  :

1. de contactkracht  $H_c$  zorgt voor overdreven schuifkrachten ter hoogte van de bovenregel ( $\lambda = \lambda_1$ );
2. de contactkracht  $H_c$  zorgt voor overdreven schuifkrachten ter hoogte van de onderregel ( $\lambda = \lambda_2$ );
3. de contactkracht  $H_c$  is te groot en kan ervoor zorgen dat het plaatmateriaal breekt ( $\lambda = \lambda_3$ ).

Geval 1 en 2 komt voor indien de lengte  $l_1 + l_2$ , links van de opening, zeer klein is. Meer bepaald wanneer de wandlengte minder is dan de helft van de wandhoogte. Geval 3 komt voor indien de tussenafstand van de plaat-houtverbindingen zeer klein is en/of wanneer de lengte  $l_3$  groter is dan één paneelbreedte.

Om de overdreven schuifkrachten ter hoogte van de bovenregel tegen te gaan, moet de resulterende schuifkracht  $f_p l_{eff}$  kleiner of gelijk zijn aan  $f_p(l_1 + l_2) + n_{knoop} F_{knoop}$ . De laatste term geeft de schuifkracht weer van de houtverbindingen van de verticale regels en de bovenregel. Deze verbindingen kunnen ook worden gebruikt om schuifkrachten over te brengen. Enkel de middenstijlen kunnen gebruikt worden voor deze overdracht. Voor de term  $\lambda_1$  geldt dan:

$$\lambda_1 \leq \frac{h}{l_3 h_{onder}} \left[ \left( 1 - \frac{l_1}{2h} - \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + \frac{n_{knoop} F_{knoop}}{f_p} \right] \quad (5-14)$$

Bij geval 2 bestaat er het risico dat de contactkracht  $H_c$  leidt tot een te grote tegengestelde schuifkracht langs de onderkant van de platen. De term  $\lambda_1$  wordt dan weergegeven door:

$$\lambda_2 \leq \frac{2h}{l_3(h - h_{onder})} \left[ \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2 \right] \quad (5-15)$$

Bij geval 3 is de contactkracht tussen de plaat met opening en de plaat links ervan te groot. De contactkracht kan niet groter zijn dan  $f_p b_{vol}$ . Waarbij  $b_{vol}$  de breedte voorstelt van een volle plaat. Dit leidt tot de volgende voorwaarde:

$$\lambda_3 \leq \frac{b_{vol}}{l_3} \quad (5-16)$$

De factor  $\lambda$  is altijd kleiner of gelijk aan 1.

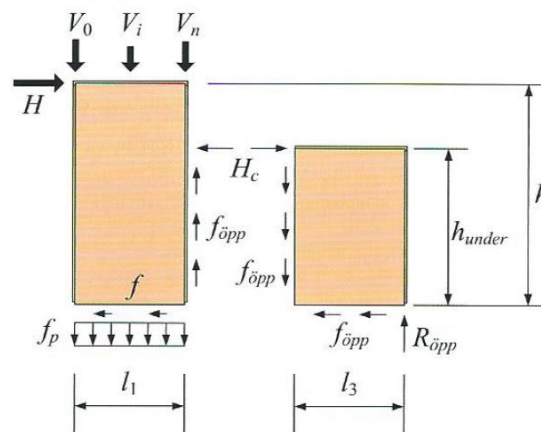
De reactiekracht  $R_N$  kan als volgt worden berekend:

$$R_N = \begin{cases} f_p(l_1 - \lambda h_{onder}) + \sum_{i=0}^N V_i & \text{voor } l_2 = 0 \\ f_p(h - \lambda h_{onder}) + V_N & \text{voor } l_2 > 0 \end{cases} \quad (5-17)$$

De reactiekracht rechts van de opening kan berekend worden door:

$$R_{open} = f_p \lambda h_{onder} \quad (5-18)$$

Bij Figuur 73 wordt de plastische capaciteit bereikt in de snede op een afstand  $l_1$  van de leidende stijl. Het kan ook voorkomen dat deze snede aan de linkerkant van de raamopening voorkomt.



Figuur 74: Krachtsverdeling wand. Plastische capaciteit wordt bereikt ter hoogte van de opening.[31]

De plastische capaciteit per eenheidslengte  $f_{opening}$  van het lage wandgedeelte wordt berekend uit het verticaal evenwicht van het wanddeel links van de opening:

$$f_{opening} = \frac{f_p l_1 + \sum_{i=0}^N V_i}{h_{onder}} \quad (5-19)$$

De effectieve lengte,  $l_{eff}$ , wordt nu als volg berekend:

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2 + \frac{f_{open}}{f_p} \frac{h_{onder}}{h} \lambda l_3 \quad (5-20)$$

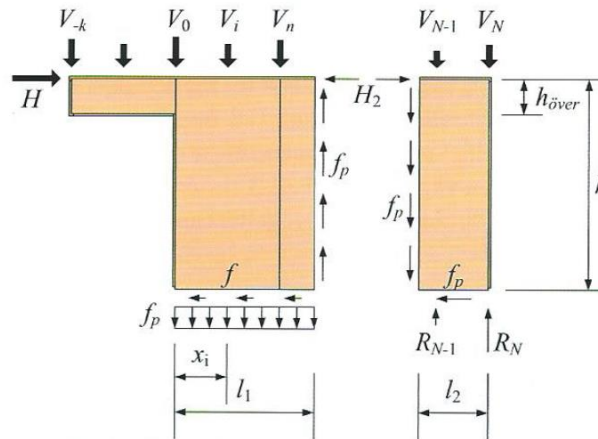
met

$$\lambda = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{open}}{f_p} \frac{h}{l_3 h_{onder}} \left[ \left( 1 - \frac{l_1}{2h} - \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + \frac{n_{knoop} F_{knoop}}{f_p} \right] \\ \frac{f_{opening}}{f_p} \frac{2h}{l_3 (h - h_w)} \left[ \left( \frac{l_1}{2h} - \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2 \right] \\ \frac{f_{open} b_{vol}}{f_p l_3} \end{array} \right. \quad (5-21)$$

De reactiekracht rechts van de opening kan berekend worden door:

$$R_{open} = f_{opening} \lambda h_{onder} \quad (5-22)$$

Een analyse van het wanddeel rechts van de opening, zoals getoond in Figuur 72, kan door het wanddeel te analyseren als een wand zonder openingen, maar met het enige verschil dat de belastingen op de console moeten worden meegerekend. Dit wordt weergegeven in Figuur 75.



Figuur 75: Krachtsverdeling deel rechts van de opening.[31]

Als eerste moet er gecontroleerd worden of de som van de verticale belastingen op de console niet groter is dan de schuifcapaciteit van de console:

$$\sum_{i=-k}^{-1} V_i \leq f_p h_{boven} \quad (5-23)$$

De effectieve lengte van de wand wordt gegeven door:

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2 \quad (5-24)$$

met

$$l_1 = h \left( 1 - \frac{\sum_{i=-k}^n V_i}{f_p h} \right) \quad (5-25)$$

$$V_{ekv} = \sum_{i=-k}^n \left( \frac{l_1 - x_i}{l_1} V_i \right) \quad (5-26)$$

De reactiekracht  $R_N$  kan als volgt worden berekend:

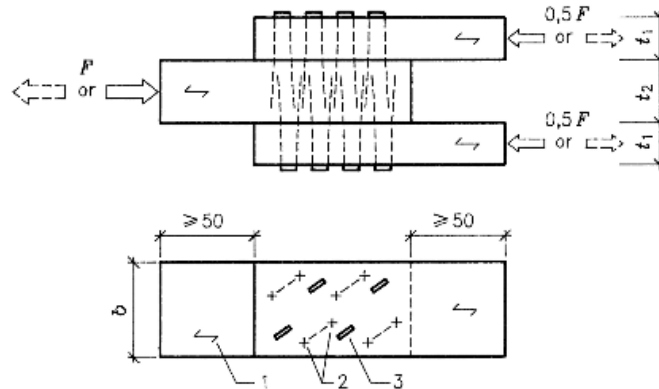
$$R_N = \begin{cases} f_p l_1 + \sum_{i=-k}^N V_i & \text{voor } l_2 = 0 \\ f_p h + V_N & \text{voor } l_2 > 0 \end{cases} \quad (5-27)$$



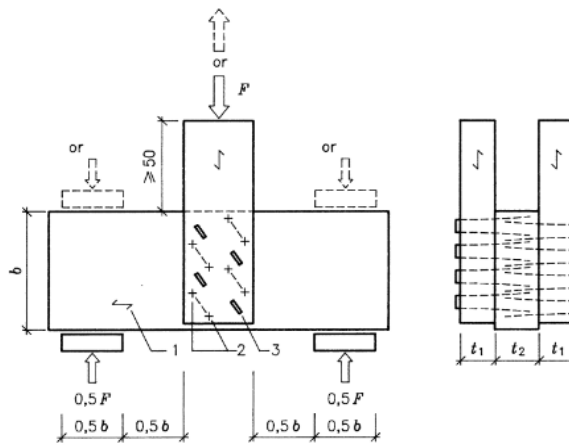
### 5.3 Bepaling sterkte en stijfheid van de plaat-houtverbinding

#### 5.3.1 Experimentele bepaling van sterkte en stijfheid van de verbinding

De sterkte en stijfheid van de geniete verbinding wordt bepaald aan de hand van de beproevingswijzen die beschreven staan in NBN EN 1381 [33]. De norm beschrijft twee beproevingswijzen waarbij er enerzijds een belasting evenwijdig aan de vezelrichting en anderzijds haaks op de vezelrichting wordt aangebracht. In dit onderzoek wordt de sterkte en stijfheid van de geniete verbinding bepaald via beide beproevingswijzen. Figuur 76 en Figuur 77 geven beide beproevingswijzen weer.

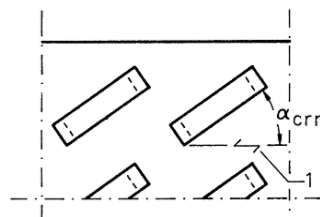


Figuur 76: Enkelvoudige afschuiving. Belasting evenwijdig op de vezelrichting.[33]



Figuur 77: Enkelvoudige afschuiving. Belasting loodrecht op de vezelrichting.[33]

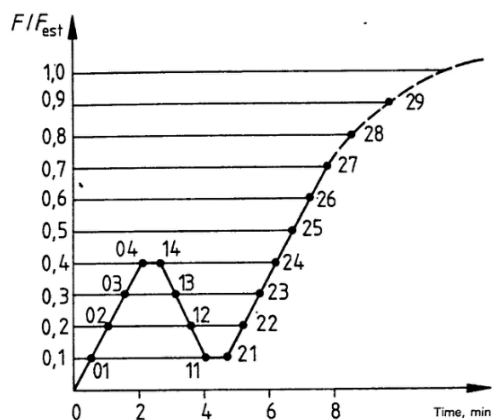
De nieten worden aangebracht onder een hoek  $\alpha = 30^\circ$ , waarbij  $\alpha$  de hoek tussen de richting van een nietrug en de vezelrichting van het hout is.



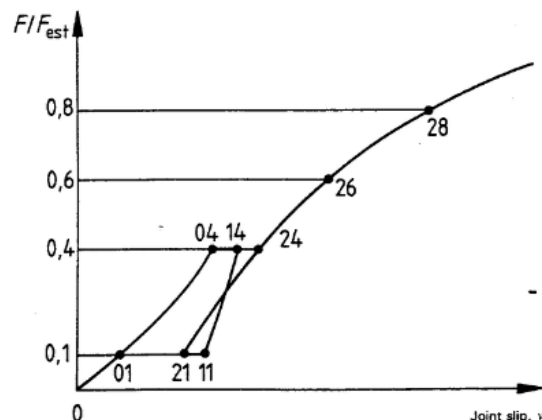
Figuur 78: Hoek tussen de nietrug en de vezelrichting van het hout.[33]

In de norm NBN ISO 6981 [34] wordt de belastingsprocedure voor het testen van de verbinding besproken. De testbank die gebruikt wordt voor het testen van de verbinding beschikt echter niet over de nodige software om deze belastingsprocedure uit te voeren. De verbindingen worden dan ook getest met een constante drukbelasting (N/s). De belasting wordt uitgezet in functie van het gemiddelde van de verplaatsingen  $d_1$  en  $d_2$ . In sectie 5.3.1.1 en 0 wordt duidelijk weergegeven welke deze verplaatsingen zijn.

Figuur 79 en Figuur 80 geven respectievelijk de belastingsprocedure en het bijhorende kracht-verplaatsingsdiagram weer zoals beschreven in NBN ISO 6891. Hierbij is  $F_{est}$  de geschatte maximale belasting voor het type verbinding. Deze kan bepaald worden aan de hand van een berekening of eerder uitgevoerde testen.



Figuur 79: Belastingsprocedure NBN ISO 6891.[34]



Figuur 80: Kracht-verplaatsingsdiagram.[34]

Volgens NBN ISO 6981 is de belasting die bereikt wordt voor of bij een verplaatsing van 15 mm de maximale belasting  $F_{max}$  van de verbinding.

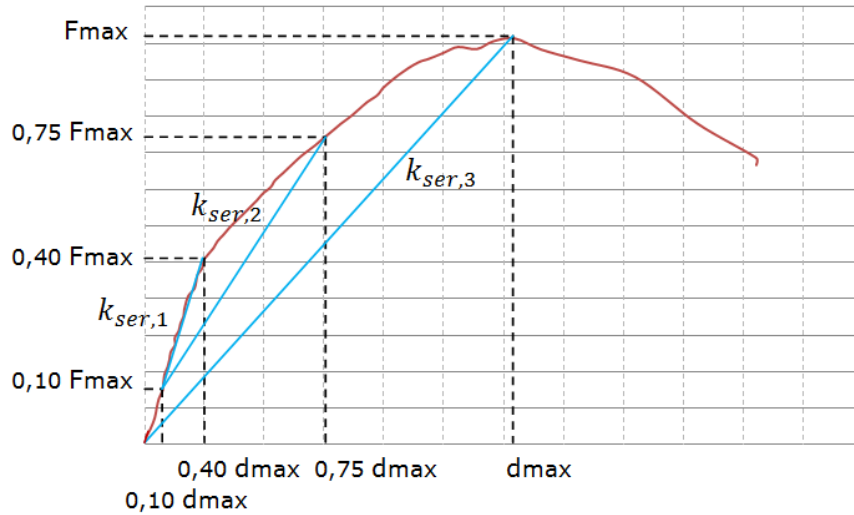
De stijfheid kan volgens NBN EN 26891 bepaald worden aan de hand van de verplaatsingen gemeten bij 10% en 40% van de geschatte belasting  $F_{est}$ . In dit onderzoek worden drie stijfheden bepaald. Deze worden bepaald aan de hand van gemiddelde verplaatsingen gemeten bij bepaalde percentages van de maximale belasting  $F_{max}$ :

$$k_{ser,1} = \frac{F_{0,4} - F_{0,1}}{d_{0,4} - d_{0,1}} \quad (5-28)$$

$$k_{ser,2} = \frac{F_{0,75} - F_{0,1}}{d_{0,75} - d_{0,1}} \quad (5-29)$$

$$k_{ser,3} = \frac{F_{max}}{d_{max}} \quad (5-30)$$

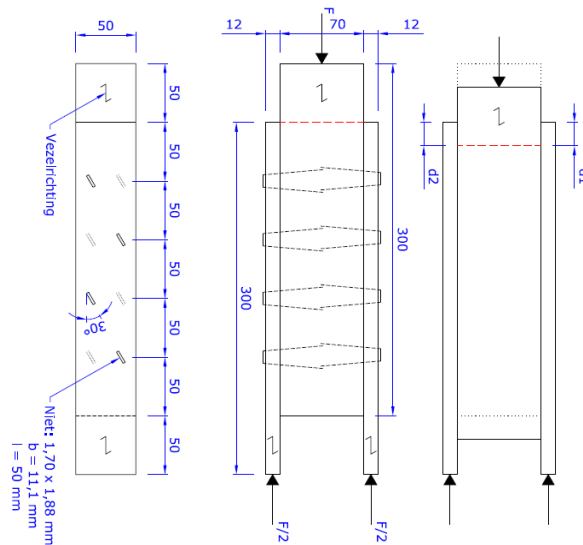
met  $F_{max}$  de maximale kracht en  $d_{max}$  de gemiddelde gemeten verplaatsing bij de maximale kracht. De krachten  $F_{0,1}$ ,  $F_{0,4}$  en  $F_{0,75}$  zijn de respectievelijke krachten bij 10%, 40% en 75% van de maximale kracht en  $d_{0,1}$ ,  $d_{0,4}$  en  $d_{0,75}$  de gemiddelde verplaatsingen bij een kracht van respectievelijk 10%, 40% en 75% van de maximale kracht.



Figuur 81: Bepaling van de maximale kracht en de stijfheid van de verbinding.

### 5.3.1.1 Proefopstelling belasting evenwijdig met de vezelrichting

Twee stukken plaatmateriaal van 300 mm x 50 mm x 12 mm worden elk mechanisch verbonden door vier geschrankte nieten met een houten balkje van 300 mm x 70 mm x 50 mm. De tussenafstand van de nieten bedraagt 50 mm. De randafstand bedraagt 12,5 mm. De eigenschappen van het hout, het plaatmateriaal en de nieten zijn terug te vinden in 4.5.



Figuur 82: Afmetingen proefstuk. Belasting evenwijdig met de vezelrichting.

De proef wordt uitgevoerd onder een drukbelasting. Hierbij wordt het proefstuk via het plaatmateriaal op een stabiele ondergrond geplaatst. Twee lasers worden bevestigd op de proefstand. Deze lasers meten gedurende de proef de afstand tot de verschillende plaatdelen. Door de drukbelasting zal er enkelvoudige afschuiving optreden en zullen de gemeten afstanden kleiner worden. Aan de hand van deze afstanden kunnen de verplaatsingen  $d_1$  en  $d_2$  bepaald worden. Op basis van de metingen wordt de maximale kracht en de stijfheid van de verbinding bepaald.



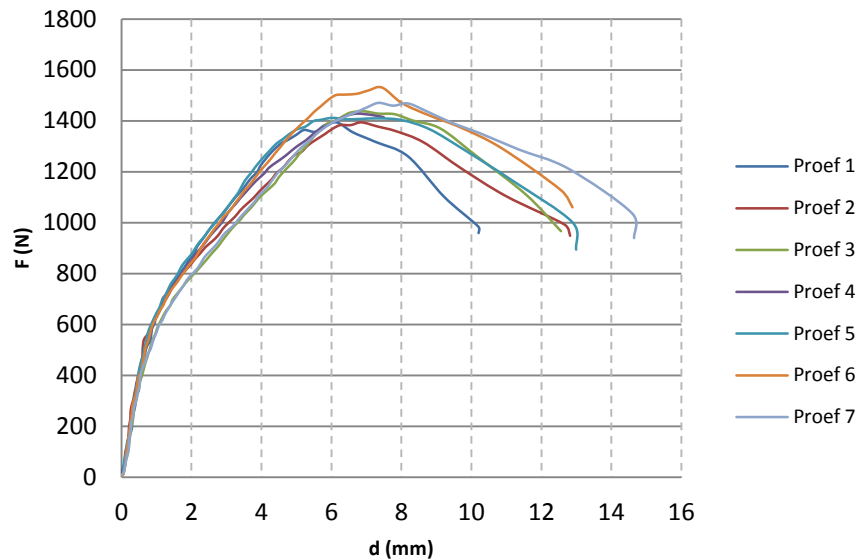
Figuur 83: Proefopstelling belasting evenwijdig met de vezelrichting.



Figuur 84: Proefopstelling belasting evenwijdig met de vezelrichting.

### 5.3.1.2 Resultaten belasting evenwijdig aan de vezelrichting

In totaal worden zeven proefstukken getest. Figuur 85 geeft de kracht per niet in functie van de gemiddelde verplaatsing.



Figuur 85: Kracht per niet in functie van de gemiddelde verplaatsing.

Door de toenemende drukbelasting treedt er afschuiving op. Deze zorgt ervoor dat de nieten beginnen te buigen. De nieten ondergaan deze vervorming tot dat de maximale belasting bereikt is. Vanaf dan ontstaat er een spatie tussen het plaatmateriaal en het hout. Deze spatie is te wijten aan het uittrekken en doorponsen van de nieten. Figuur 86, Figuur 87 en Figuur 88 stelt de eindvervorming voor horende bij het kracht-verplaatsingsdiagram dat wordt weergegeven in Figuur 85. De curve van het kracht-verplaatsingsdiagram ondergaat een sterke stijging tot ongeveer 600 N. Vanaf dan neemt de helling af tot ongeveer 1450 N en treedt er breuk op (uittrekken of pons nieten).



Figuur 86: Buiging nieten.



Figuur 87: Uittrekken nieten.



Figuur 88: Pons nieten.

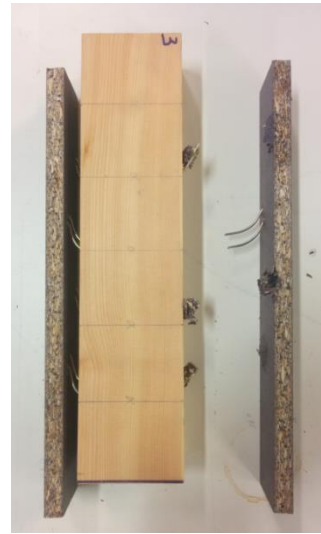
Figuur 89, Figuur 90 en Figuur 91 geeft de uiteindelijke breuk weer indien de proefstukken verder worden belast. Bij sommige proefstukken worden alle nieten uitgetrokken. Bij andere proefstukken wordt er bij meerdere nieten pons vastgesteld.



Figuur 89: Uittrekken nieten.

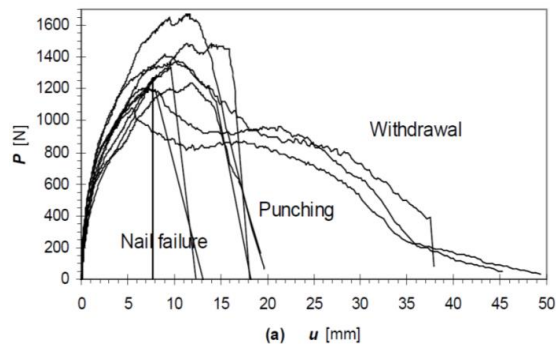


Figuur 90: Uittrekken nieten.



Figuur 91: Pons nieten.

Uit Figuur 86 tot en met Figuur 91 kan worden afgeleid dat indien een enkele niet op afschuiving belast wordt, deze een kracht-verplaatsingscurve zal hebben zoals Figuur 92. Deze figuur toont het kracht-verplaatsingsdiagram van een enkele nagelverbinding met spaanplaat getest door Bovim, Girhammar en Källsner. Hierbij trad er ook falen van de nagel op. Dit soort falen zal niet voorkomen bij de nieten.



Figuur 92: Kracht-verplaatsingsdiagram voor spaanplaat. Belasting evenwijdig aan de vezelrichting.[26]

Tabel 11 geeft een overzicht van de resultaten.

Tabel 11: Overzicht resultaten verbinding. Belasting evenwijdig met de vezelrichting.

Nr.	$\rho_{m,hout}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$F_{max}$ (N)	$d_{max}$ (mm)	$k_{ser,1}$ (N/mm)	$k_{ser,2}$ (N/mm)	$k_{ser,3}$ (N/mm)
1	491	1393	6,17	651	331	226
2	513	1394	6,86	758	283	203
3	493	1438	6,93	561	260	207
4	488	1428	6,73	666	305	212
5	489	1412	6,02	727	328	235
6	511	1531	7,45	623	288	205
7	518	1471	7,36	535	260	200
<b>Gem.</b>	<b>501</b>	<b>1438</b>	<b>6,79</b>	<b>646</b>	<b>294</b>	<b>213</b>

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 [35] op basis van zeven proefstukken. De verhouding tussen de karakteristieke waarde en de gemiddelde waarde bedraagt 0,89.

Tabel 12: Experimentele karakteristieke sterkte van de verbinding.

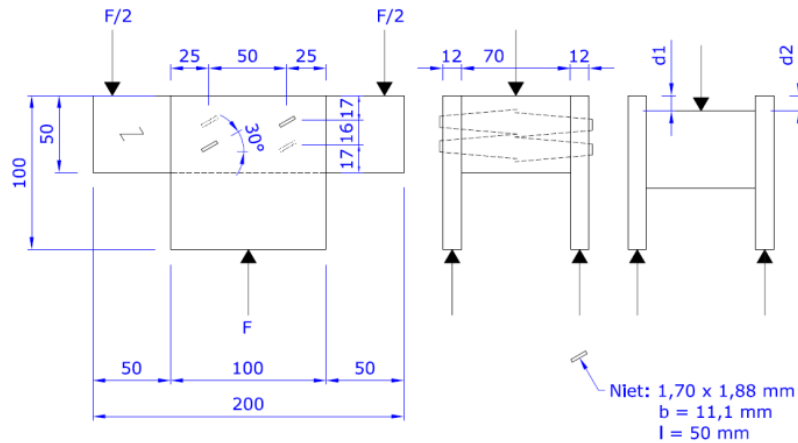
Nr.	$F_{max}$ (N)	$\ln(mi)$
1	1393	7,239
2	1394	7,240
3	1438	7,271
4	1428	7,264
5	1412	7,252
6	1531	7,333
7	1471	7,294
<b><math>F_{gem}</math> (N)</b>	<b>1438</b>	

$n$	7
$\bar{y}$	7,27
$s_y$	0,05
$k_s$	2,32
<b><math>F_{k,max}</math> (N)</b>	<b>1280</b>

$\frac{F_{k,niet}}{F_{gem,niet}}$	0,89
-----------------------------------	------

### 5.3.1.3 Proefopstelling belasting loodrecht op de vezelrichting

Twee stukken plaatmateriaal van 100 mm x 100 mm x 12 mm worden elk mechanisch verbonden door twee geschrankte nieten met een houten balkje van 200 mm x 70 mm x 50 mm. De tussenafstand van de nieten bedraagt 50 mm. De randafstand tot de belaste rand bedraagt 17 mm. De eigenschappen van het hout, het plaatmateriaal en de nieten zijn terug te vinden in 4.5.



Figuur 93: Afmetingen proefstuk. Belasting loodrecht aan de vezelrichting.

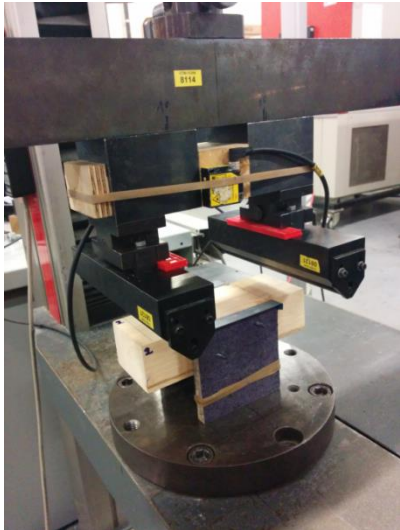
Voor deze test wordt er afgeweken van de eigenschappen van het proefstuk beschreven in NBN EN 1381. Volgens deze norm moeten de plaatdelen elk door vier geschrankte nieten worden verbonden met het hout. Indien zulk proefstuk getest wordt splijt het hout tijdens de beproeving (Figuur 94). Dit omwille van een te kleine randafstand (10 mm). Daarom worden de plaatdelen elk maar met twee nieten verbonden met hout.



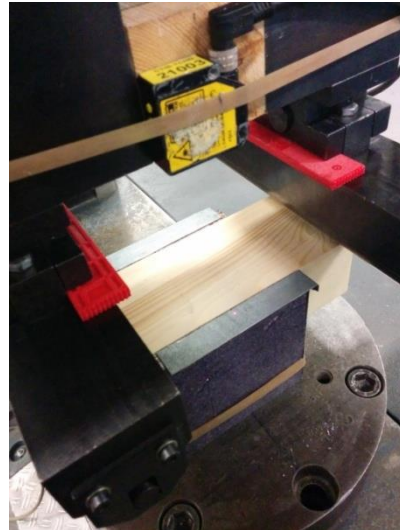
Figuur 94: Splijten hout.

De proef wordt uitgevoerd onder een drukbelasting. Hierbij wordt het proefstuk via het plaatmateriaal op een stabiele ondergrond geplaatst. Twee lasers worden bevestigd op de proefstand. Deze lasers meten gedurende de proef de afstand tot de verschillende plaatdelen. Door de drukbelasting zal er enkelvoudige afschuiving optreden en zullen de gemeten afstanden kleiner worden. Aan de hand van deze afstanden kunnen de verplaatsingen  $d_1$  en  $d_2$  bepaald worden. Op basis van de metingen wordt de maximale kracht en de stijfheid van de verbinding bepaald.





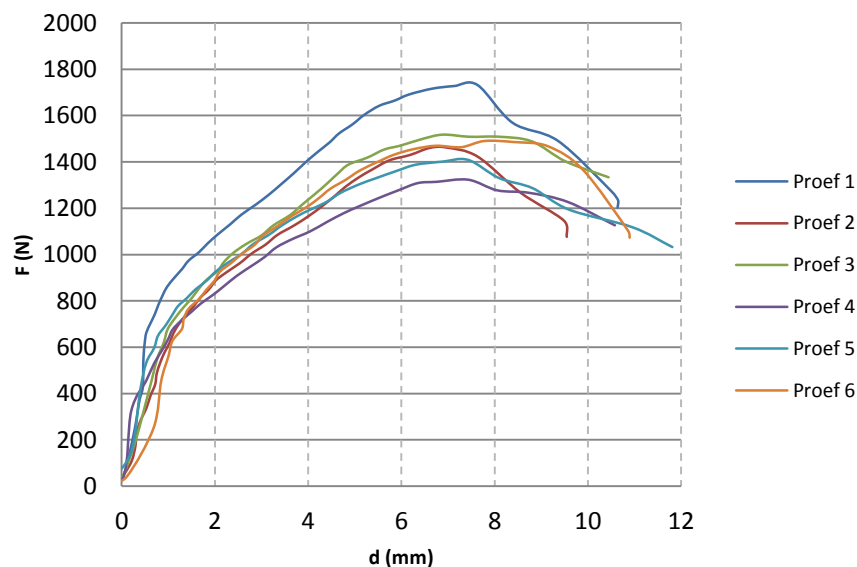
Figuur 95: Proefopstelling enkelvoudige afschuiving.



Figuur 96: Proefopstelling enkelvoudige afschuiving.

#### 5.3.1.4 Resultaten belasting loodrecht met de vezelrichting

In totaal werden zes proefstukken getest. Figuur 97 geeft de kracht per niet in functie van de gemiddelde verplaatsing.



Figuur 97: Kracht per niet in functie van de gemiddelde verplaatsing voor de verbinding.

Het faalgedrag van de verbinding met een belasting loodrecht met de vezelrichting is identiek aan deze met een belasting evenwijdig aan de vezelrichting. Door de toenemende drukbelasting treedt er afschuiving op. Deze zorgt ervoor dat de nieten beginnen te buigen. De nieten ondergaan deze vervorming tot dat de maximale belasting bereikt is. Vanaf dan ontstaat er een spatie tussen het plaatmateriaal en het hout. Deze spatie is te wijten aan het uittrekken en doorponsen van de nieten.

Figuur 98, Figuur 99 en Figuur 100 stelt de eindvervorming voor horende bij het kracht-verplaatsingsdiagram dat wordt weergegeven in Figuur 97. De curve van het kracht-verplaatsingsdiagram ondergaat een sterke stijging tot ongeveer 700 N. Vanaf dan neemt de helling af tot ongeveer 1500 N en treedt er breuk op (uittrekken of pons nieten).



*Figuur 98: Buiging nieten.*



*Figuur 99: Uittrekken nieten.*



*Figuur 100: Pons nieten.*

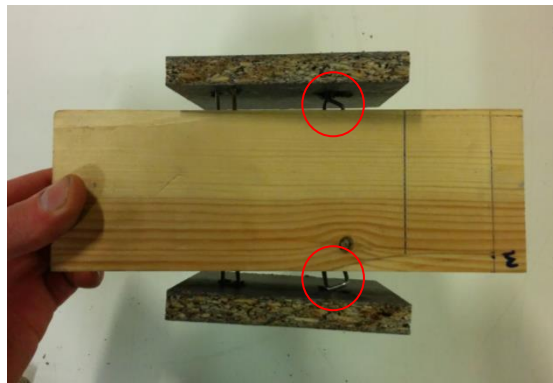
Figuur 101, Figuur 102 en Figuur 103 geeft de uiteindelijke breuk weer indien de proefstukken verder worden belast. Bij sommige proefstukken worden alle nieten uitgetrokken. Bij andere proefstukken wordt er bij meerdere nieten pons vastgesteld.



*Figuur 101:  
Uittrekken  
nieten.*

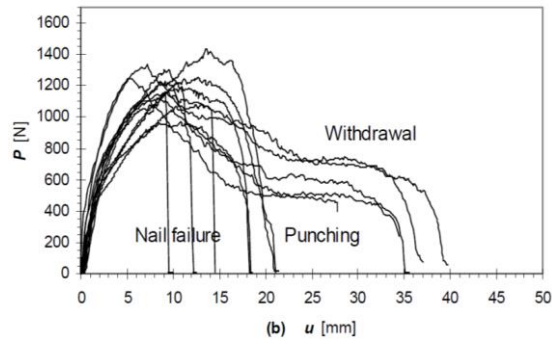


*Figuur 102: Uittrekken  
nieten.*



*Figuur 103: Doorponsing nieten.*

Uit Figuur 98 tot en met Figuur 103 kan worden afgeleid dat indien een enkele niet op afschuiving belast wordt, deze een kracht-verplaatsingscurve zal tonen zoals Figuur 104. Deze figuur toont het kracht-verplaatsingsdiagram van een enkele nagelverbinding met spaanplaat getest door Bovim, Girhammar en Källsner. Hierbij trad er ook falen van de nagel op. Dit soort falen zal niet voorkomen bij de nieten.



Figuur 104: Kracht-verplaatsingsdiagram voor spaanplaat. Belasting loodrecht op de vezelrichting.[26]

Tabel 13 geeft een overzicht van de resultaten.

Tabel 13: Overzicht resultaten verbinding. Belasting loodrecht met de vezelrichting

Nr.	$\rho_{m,hout}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$F_{max}$ (N)	$d_{max}$ (mm)	$k_{ser,1}$ (N/mm)	$k_{ser,2}$ (N/mm)	$k_{ser,3}$ (N/mm)
1	529	1732	7,63	1328	353	227
2	509	1462	6,97	649	299	210
3	476	1518	6,89	694	315	220
4	475	1323	7,43	649	287	178
5	469	1409	7,43	989	335	190
6	532	1490	7,78	695	334	191
<b>Gem.</b>	<b>498</b>	<b>1489</b>	<b>7,36</b>	<b>834</b>	<b>320</b>	<b>203</b>

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 [35] op basis van zes proefstukken. De verhouding tussen de karakteristieke waarde en de gemiddelde waarde bedraagt 0,80.

Tabel 14: Experimentele karakteristieke sterkte van de verbinding.

Nr.	$F_{max}$ (N)	$\ln(mi)$
1	1732	7,239
2	1462	7,240
3	1518	7,271
4	1323	7,264
5	1409	7,252
6	1490	7,333
<b><math>F_{gem}</math> (N)</b>	<b>1489</b>	

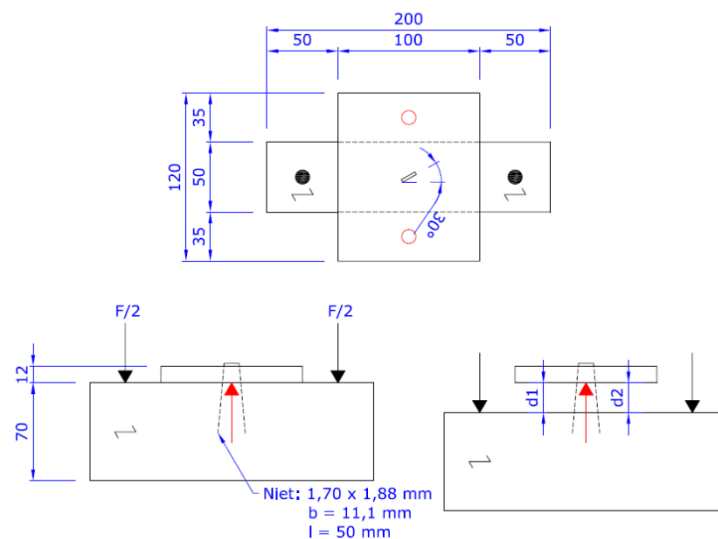
$n$	6
$\bar{y}$	8,69
$s_y$	0,09
$k_s$	2,39
<b><math>F_{k,max}</math> (N)</b>	<b>1197</b>

$\frac{F_{k,niet}}{F_{gem,niet}}$	0,80
-----------------------------------	------

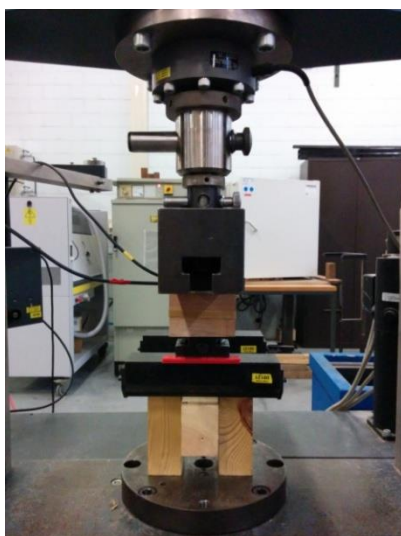
### 5.3.1.5 Experimentele bepaling van het koordeffect van de verbinding

Het koordeffect is een bijkomende capaciteit van de verbinding te wijten aan het uittrekken van het verbindingsmiddel uit het hout of het doortrekken van het verbindingsmiddel door het plaatmateriaal.

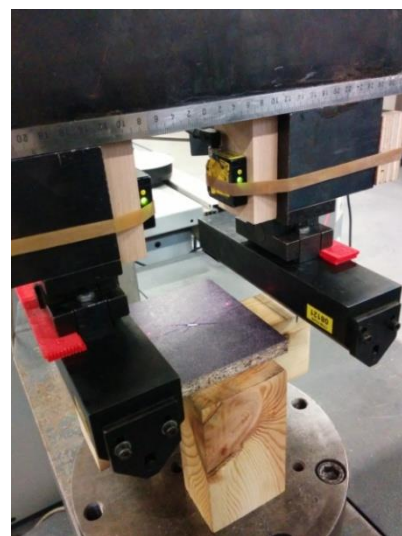
Een stukje plaatmateriaal van 120 mm x 100 mm x 12 mm wordt mechanisch verbonden door een niet met een houten balkje van 200 mm x 70 mm x 50 mm. De eigenschappen van het hout, het plaatmateriaal en de niet zijn terug te vinden in 4.5. Het plaatmateriaal wordt ondersteund door twee houten blokjes. Door de toenemende drukbelasting op het hout zal de niet uit het hout of door het plaatmateriaal worden getrokken. Ook nu weer worden twee lasers bevestigd op de proefstand. Deze lasers meten gedurende de proef de afstand tot het plaatmateriaal. Op basis van de metingen wordt de maximale kracht en de stijfheid bepaald. De stijfheid wordt bepaald zoals beschreven in 0.



Figuur 107: Afmetingen proefstuk. Koordeffect.



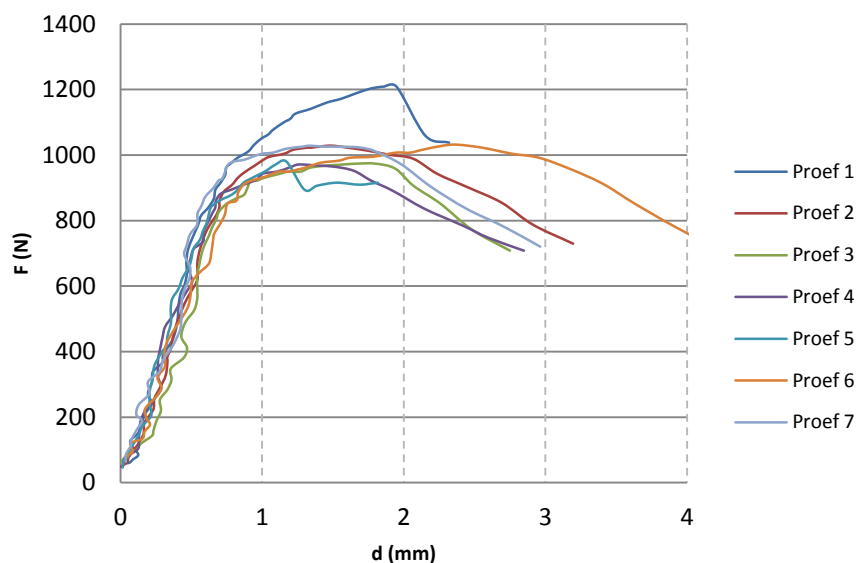
Figuur 105: Proefopstelling koordeffect.



Figuur 106: Proefopstelling koordeffect.

### 5.3.1.6 Resultaten koordeffect van de verbinding

In totaal werden zeven proefstukken getest. Figuur 108 geeft de kracht per niet in functie van de gemiddelde verplaatsing.



Figuur 108: Kracht per niet in functie van de gemiddelde verplaatsing van de verbinding.

Bij proefstuk 1 en 5 wordt de niet uit het hout getrokken. Bij de andere proefstukken wordt de niet door het plaatmateriaal getrokken. Beide soorten falen komen ook voor bij de experimentele bepaling van de sterkte van de verbinding. De gemeten resultaten geven een goeie indicatie van "het koordeffect".

Tabel 15 geeft een overzicht van de resultaten.

Tabel 15: Overzicht resultaten verbinding. Koordeffect.

Nr.	$\rho_{m,hout}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$F_{max}$ (N)	$d_{max}$ (mm)	$k_{ser,1}$ (N/mm)	$k_{ser,2}$ (N/mm)	$k_{ser,3}$ (N/mm)
1	494	1209	1,95	1130	1277	620
2	507	1029	1,49	1202	1305	690
3	471	974	1,80	800	1238	541
4	498	971	1,31	1747	1382	742
5	480	980	1,17	1332	1304	836
6	511	1032	2,38	1302	1115	434
7	515	1029	1,34	1033	1473	768
<b>Gem.</b>	<b>497</b>	<b>1032</b>	<b>1,63</b>	<b>1221</b>	<b>1299</b>	<b>661</b>

De karakteristieke waarde van het koordeffect wordt berekend via NBN EN 14358 [35] op basis van zeven proefstukken. De verhouding tussen de karakteristieke waarde en de gemiddelde waarde bedraagt 0,84.

Tabel 16: Experimenteel karakteristiek koordeffect van de verbinding.

Nr.	$F_{max}$ (N)	$\ln(mi)$	$n$	7
1	1209	7,097	$\bar{y}$	6,94
2	1029	6,936	$s_y$	0,08
3	974	6,881	$k_s$	2,32
4	971	6,878	$F_{k,max}$ (N)	<b>863</b>
5	980	6,887		
6	1032	6,939		
7	1029	6,936		
$F_{gem}$ (N)	<b>1032</b>		$\frac{F_{k,niet}}{F_{gem,niet}}$	0,84

### 5.3.2 Analytische bepaling van sterkte en stijfheid van de plaat-houtverbinding

De berekening van de sterkte en stijfheid van de verbinding gebeurt aan de hand van rekenregels opgegeven in Eurocode 5 [EC5]. Deze rekenregels zijn enkel geldig voor verbindingen tussen hout en houtachtige plaatmaterialen. Voor nieten is er niet onmiddellijk een rekenregel. De rekenregels voor nagels zijn van toepassing op nieten.

#### 5.3.2.1 Stijfheid van de verbinding

De stijfheid van een geniete verbinding wordt in NBN EN 1995-1-1 gegeven door:

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} d^{0,8}}{80} \quad (5-31)$$

met  $\rho_m$  de gemiddelde dichtheid en  $d$  de diameter van de niet. Deze formule is enkel geldig voor verbindingsmiddelen bij een hout-op-houtverbinding en een hout-op-houtachtig-paneelverbinding.

De gemiddelde dichtheid wordt bepaald op basis van de gemiddelde dichtheid van de te verbinden houtachtige elementen. Zij  $\rho_{m,1}$  en  $\rho_{m,2}$  de gemiddelde dichtheid van de twee te verbinden houtachtige materialen, dan is:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1} \rho_{m,2}} \quad (5-32)$$

De gemiddelde dichtheid van het hout bedraagt 500 kg/m<sup>3</sup>. De gemiddelde dichtheid van het plaatmateriaal Naturspan HS bedraagt 720 kg/m<sup>3</sup>.

De diameter van een niet met rechthoekige doorsnede wordt gegeven door:

$$d = \sqrt{b_n h_n} \quad (5-33)$$

met  $b_n$  en  $h_n$  de afmetingen van de niet-doorsnede. Voor de gebruikte nieten bedraagt de diameter  $d = 1,79 \text{ mm}$ .

Volgende tabel geeft een overzicht van de berekende stijfheid.

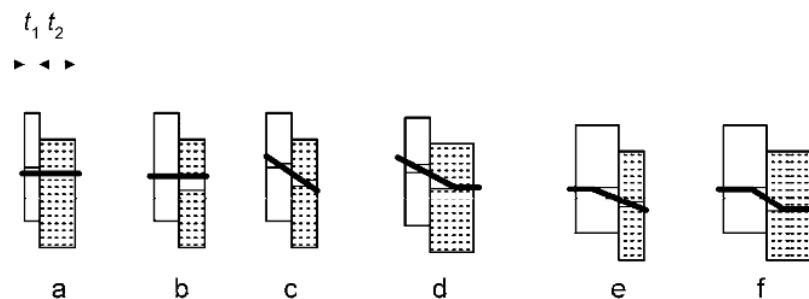
Tabel 17: Berekende stijfheid van de verbinding.

Plaatmateriaal	$\rho_{m,1}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{m,2}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k_{ser,ber}$ (N/mm)
Naturspan HS	720	500	600	293

### 5.3.2.2 Sterkte van de verbinding

De basis van de rekenregels opgenomen in NBN EN 1995-1-1 zijn gebaseerd op het werk van Johansen. De theorie van Johansen gaat er vanuit dat breuk gepaard gaat met een aanzienlijke plastische vervorming (taaie breuk) en veroorzaakt wordt door het vloeien in de verbinding of door het falen van het hout onder druk en niet door brosse breuk zoals het splijten van het hout. Dit wordt normaal verzekerd door de minimum tussen- en randafstanden van de verbinding.

Voor verbindingsmiddelen die enkelsnedig werken zijn er zes mogelijke bezwijkmoden, waarvan telkens de overeenkomstige faalkracht wordt bepaald. Uiteindelijk dient de minimale faalkracht weerhouden te worden.



Figuur 109: Bezwijkmoden voor het berekenen van een enkelsnedige verbinding.[EC5]

Bij bezwijkmoden a, b en c blijft het verbindingsmateriaal recht. Bij faalmoden d en e buigt het verbindingsmateriaal rond één scharnier. Bij faalmode f buigt het verbindingsmateriaal rond twee scharnieren.

De overeenstemmende faalkrachten zijn:

$$F_{v,Rk,a} = f_{h,1,k} t_1 d \quad (5-34)$$

$$F_{v,Rk,b} = f_{h,2,k} t_2 d \quad (5-35)$$

$$F_{v,Rk,c} = \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (5-36)$$

$$F_{v,Rk,d} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (5-37)$$

$$F_{v,Rk,e} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[ \sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_2^2 d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (5-38)$$

$$F_{v,Rk,f} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (5-39)$$

met

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (5-40)$$

waarin:

- $F_{v,Rk}$  is de karakteristieke afschuifsterkte per verbindingsmiddel;
- $t_1$  is de plaatdikte;
- $t_2$  is de hecht lengte;
- $f_{h,1,k}$  is de karakteristieke stuiksterkte van het hout;
- $f_{h,2,k}$  is de karakteristieke stuiksterkte van het plaatmateriaal;
- $d$  is de diameter van het verbindingsmiddel;
- $M_{y,Rk}$  is het karakteristieke vloeimoment van het verbindingsmiddel;
- $F_{ax,Rk}$  is de karakteristieke axiale uittreksterkte van het verbindingsmiddel;
- $\beta$  is de verhouding tussen de karakteristieke stuiksterkte van het hout en van het plaatmateriaal.

De karakteristieke stuiksterkte van het plaatmateriaal wordt gegeven door:

$$f_{h,1,k} = 65d^{-0,7} t^{0,1} \quad (5-41)$$

De karakteristieke stuiksterkte van het hout wordt gegeven door:

$$f_{h,2,k} = 0,082\rho_k d^{-0,3} \quad (5-42)$$



Het karakteristieke vloeimoment voor nieten met een minimale treksterkte van  $f_u = 800 \text{ N/mm}^2$  wordt gegeven door:

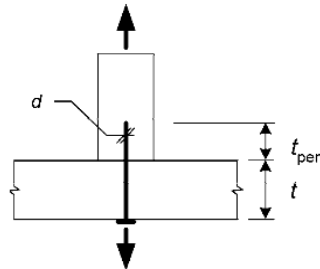
$$M_{y,Rk} = 150d^3 \quad (5-43)$$

Tot februari 2014 werd het karakteristiek vloeimoment nog berekend via onderstaande formule:

$$M_{y,Rk} = 240d^{2,6} \quad (5-44)$$

De nieuwe formule leidt tot een lager vloeimoment. De capaciteit van de verbinding zal dus ook lager liggen dan voorheen.

De eerste term van faalmodes c t.e.m f is de sterkte volgens de theorie van K.W. Johansen. De laatste term is te wijten aan het koordeffect.



Figuur 110: Koordeffect, nageling loodrecht op de vezelrichting.[EC5]

Het koordeffect is een bijkomende capaciteit van de verbinding te wijten aan het uittrekken van het verbindingsmiddel uit het hout of het doortrekken van het verbindingsmiddel door de plaat. De kracht ' $F_{ax,Rk}$ ' kan voor gladde nagels berekend worden door:

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} dt_{pen} \\ f_{ax,k} dt + f_{head,k} d_n^2 \end{cases} \quad (5-45)$$

waarin:

- $f_{ax,k}$  is de karakteristieke uittreksterkte aan de puntzijde;
- $f_{head,k}$  is de karakteristieke doortreksterkte van de nagelkop;
- $d$  is de diameter van het verbindingsmiddel;
- $t_{pen}$  is de hechtlengte in het element die de puntzijde bevat;
- $t$  is de dikte van het element dat de kopzijde bevat;
- $d_n$  is de diameter van de nagelkop.

Voor nieten wordt enkel de uittreksterkte in rekening gebracht. De karakteristieke uittreksterkte en de karakteristieke doortreksterkte kunnen experimenteel bepaald worden via EN 1382, EN 1383 en EN 14358 of kunnen voor gladde nagels met een minimale hechtlengte van  $12d$  berekend worden via:

$$f_{ax,k} = 20 \times 10^{-6} \rho_k^2 \quad (5-46)$$

$$f_{head,k} = 70 \times 10^{-6} \rho_k^2 \quad (5-47)$$

waarin:

$\rho_k$  is de karakteristieke volumieke massa van hout in  $\text{kg/m}^3$ .

De bijdrage van het koordeffect voor ronde nagels moet beperkt worden tot 15% van het Johansen-deel.

Tabel 18 geeft een overzicht van de berekening van de sterkte van de verbinding. Het vloeimoment wordt hierbij berekend met zowel de nieuwe als oude formule.

Tabel 18: Berekende karakteristieke sterkte van de verbinding.

Niet	
$b_n$ (mm)	1,70
$h_n$ (mm)	1,88
$d$ (mm)	1,79
$l$ (mm)	50
$M_{y,Rk}$ (mm)	857   1087

Verhouding karakteristieke stuijsterkte	
$\beta$	0,52

Faalmodes		
a	1190	1190
b	1965	1965
c	732	789
d	425	440
e	779	786
f	393	442
$F_{Joh.}$ (N)	785	880

Plaatmateriaal	Spaanplaat
Type	Naturspan HS
$t_1$ (mm)	12
$\rho_m$ ( $\text{kg/m}^3$ )	720
$f_{h,1,k}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	55,49

Hout	Naaldhout C40
$t_2$ (mm)	38
$\rho_m$ ( $\text{kg/m}^3$ )	500
$\rho_k$ ( $\text{kg/m}^3$ )	420
$f_{h,2,k}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	28,93

Koordeffect	
$f_{ax,k}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	3,53
$F_{ax,k}$ (N)	479
$F_{ax,k}/4$ (N)	120
$0,15 F_{Joh.}$ (N)	118   132

Karakteristieke sterkte verbinding	
$F_{k,ber}$ (N)	903   1000

Indien het vloeimoment wordt berekend met de nieuwe formule, dan zal de berekende karakteristieke sterkte van de verbinding 903 N bedragen. De geniete verbinding zal bezwijken volgens bezwijkmode f.

Indien het vloeimoment wordt berekend met de oude formule, dan zal de berekende karakteristieke sterkte van de verbinding 1000 N bedragen. De geniete verbinding zal bezwijken volgens bezwijkmode d.

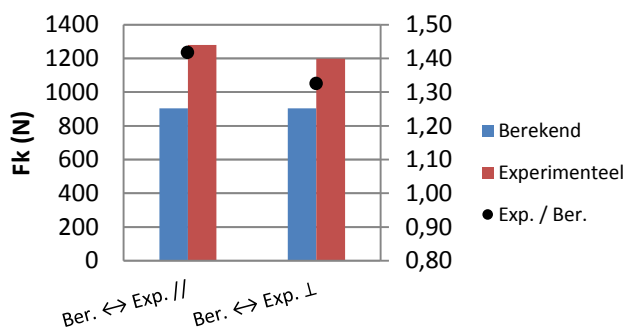
### 5.3.3 Vergelijking experimentele en analytische sterkte en stijfheid van de plaat-houtverbinding

Tabel 19 geeft een overzicht van de experimentele en berekende resultaten.

Tabel 19: Overzicht experimentele en berekende resultaten van de verbinding.

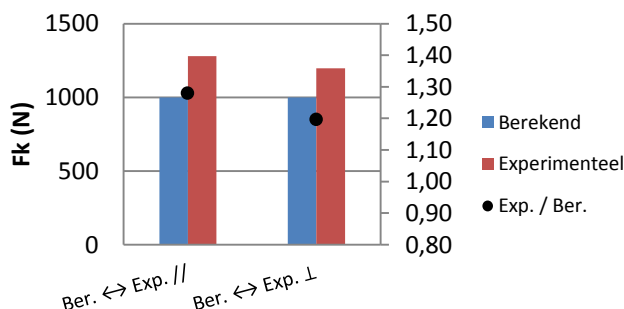
Experimenteel	//	⊥	Koordeffect
$F_k$ (N)	1280	1197	863
$k_{ser,1}$ (N/mm)	646	834	1221
$k_{ser,2}$ (N/mm)	294	320	1299
$k_{ser,3}$ (N/mm)	213	203	661
Berekend	nieuw vloeimoment	oud vloeimoment	Koordeffect
$F_k$ (N)	903	1000	479
$k_{ser,ber}$ (N/mm)	293		

Figuur 111 geeft de vergelijking weer van  $F_{k,nieuw\ vloeimoment}$  met  $F_{k, //}$  en  $F_{k, \perp}$ . De experimentele sterkte ligt 33% tot 42% hoger dan de berekende sterkte.



Figuur 111: Vergelijking tussen de berekende (nieuw vloeimoment) en experimentele sterkte van de verbinding.

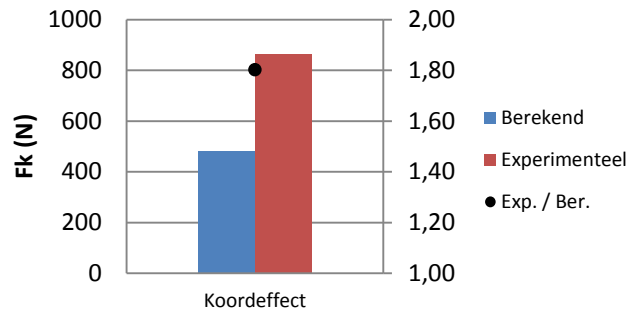
Figuur 112 geeft de vergelijking weer van  $F_{k,oud\ vloeimoment}$  met  $F_{k, //}$  en  $F_{k, \perp}$ . De experimentele sterkte ligt 20% tot 28% hoger dan de berekende sterkte.



Figuur 112: Vergelijking tussen de berekende (oud vloeimoment) en experimentele sterkte van de verbinding.

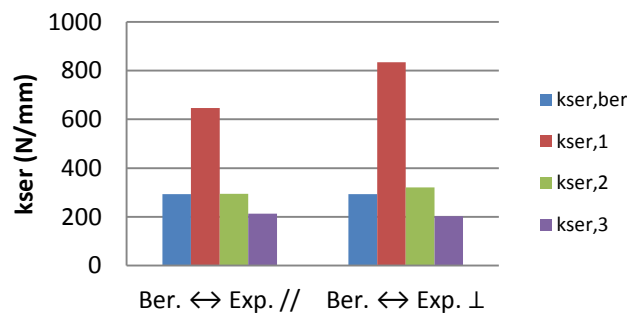
De berekende karakteristieke sterkte op basis van het oude vloeimoment leunt het dichtst aan bij de experimentele waarden. Al blijft er een onderschatting zichtbaar.

Figuur 113 geeft de vergelijking weer tussen het berekend en experimenteel koordeffect. Het experimenteel koordeffect is het karakteristiek gemiddelde van de uittreksterkte en de doortreksterkte. Het experimenteel bepaald koordeffect ligt 80% hoger dan het berekend koordeffect.



Figuur 113: Vergelijking tussen het berekend en experimenteel koordeffect.

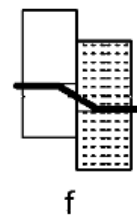
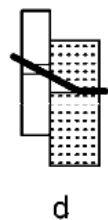
Figuur 114 geeft de vergelijking weer tussen de berekende en experimentele stijfheden.



Figuur 114: Vergelijking tussen de berekende stijfheid en de experimentele stijfheid.

Uit de grafiek blijkt dat  $k_{ser,1}$  berekent tussen 10% en 40% van de maximale kracht, een overschatting geeft van de stijfheid. De stijfheid  $k_{ser,2}$  geeft een goede overeenkomst met de berekende stijfheid  $k_{ser,ber}$ .

Figuur 115 en Figuur 116 geven de faalmodes weer indien de sterkte wordt berekend met respectievelijk het oude en het nieuwe vloeimoment.



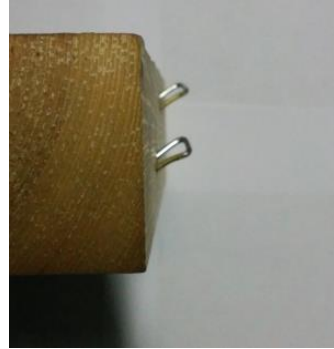
Figuur 115: Faalmode: oud vloeimoment.[EC5]

Figuur 116: Faalmode: nieuw vloeimoment.[EC5]

Figuur 117 en Figuur 118 geven de faalmodes weer indien de verbinding belast wordt met respectievelijk een belasting evenwijdig aan en loodrecht aan de vezelrichting.



*Figuur 117: Faalmode nieten: belasting evenwijdig met de vezelrichting.*



*Figuur 118: Faalmode nieten: belasting loodrecht met de vezelrichting.*

In de nieten zijn twee scharnieren zichtbaar. De faalmodes komen dus overeen met deze van faalmode f.

#### 5.4 Capaciteit per eenheidslengte

De relatie tussen de maximale capaciteit van een verbinding,  $F_p$ , en de capaciteit van een rij verbindingen hangt af van de tussenafstand van de verbindingen,  $s$ . Met deze gegevens kan de capaciteit per eenheidslengte (N/mm) worden bepaald:

$$f_p = \frac{F_p}{s} \quad (5-48)$$

Bij de rekenmethode van Källsner en Girhammar [31] wordt de schrankweerstand bepaald aan de hand van deze capaciteit per eenheidslengte. Er wordt hierbij vanuit gegaan dat de tussenafstand van de verbindingen rondom de omtrek van de beplating constant is.

De schuifcapaciteit van de plaat-houtverbinding in dit onderzoek bedraagt 1438 N en 1489 N, respectievelijk met een belasting evenwijdig en loodrecht aan de vezelrichting van het hout. De maximale tussenafstand van de plaat-houtverbindingen bedraagt 150 mm. Indien de schrankweerstand wordt berekend met vergelijking (5-48), dan is er een groot verschil merkbaar tussen de experimentele en berekende schrankweerstand. Dit wordt weergegeven in Tabel 20. De schrankweerstand wordt zowel via de methode van Källsner en Girhammar als via de methode ontwikkeld door De Proft [1] berekend. De methode van De Proft wordt uitgelegd in 7.2.

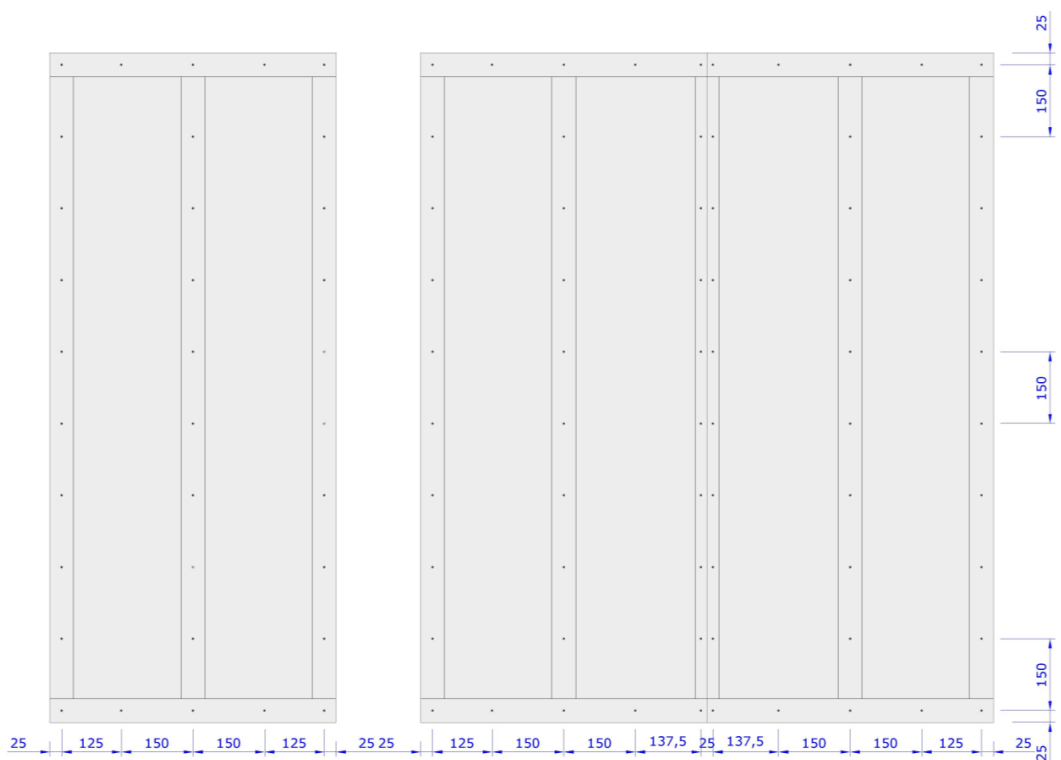
Tabel 20: Vergelijking experimentele en berekende schrankweerstand. Schrankweerstand wordt berekend met een tussenafstand van 150 mm.

	$F_{p1} = 1438 \text{ N}$ $s = 150 \text{ mm}$		$F_{p2} = 1489 \text{ N}$ $s = 150 \text{ mm}$
$f_{p1}$ (N/mm)	9,59	$f_{p2}$ (N/mm)	9,93

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1) (2)	(1) (3)	(1) (4)	(1) (5)
	$H_{exp}$ (N)	$H_{Källsner}$ $f_{p1}$ (N)	$H_{Källsner}$ $f_{p2}$ (N)	$H_{De\ Proft}$ $f_{p1}$ (N)	$H_{De\ Proft}$ $f_{p2}$ (N)				
ST1	1778 (gem.)	1233	1277	1206	1248	1,44	1,39	1,47	1,42
ST2	6269	4932	5107	4611	4774	1,27	1,23	1,36	1,31
ST3	11701 (gem.)	10549	10923	9618	9959	1,11	1,07	1,22	1,17
ST4	19045	16303	16881	15347	15891	1,17	1,13	1,24	1,20

De experimentele schrankweerstand ligt 7% tot 44% hoger dan de schrankweerstand berekend met de rekenmethode van Källsner en Girhammar. Voor de rekenmethode van De Proft ligt de experimentele schrankweerstand 20% tot 47% hoger. Bij de rekenmethode van Källsner en Girhammar wordt er verondersteld dat de verbindingen worden uitgetrokken en dus een taaie breuk vertonen. De verbindingen falen echter door een combinatie van taaie en brosse breuk. De berekende schrankweerstand zou dus groter moeten zijn dan de experimentele waarde. Deze afwijking is te wijten aan de tussenafstand van de plaat-houtverbindingen.

Figuur 119 geeft een weergave van de rand- en tussenafstanden van de plaat-houtverbindingen van een enkel (ST1) en dubbel (ST2) wandpaneel gebruikt in dit onderzoek. Hierbij is duidelijk te zien dat de tussenafstand niet constant is over de omtrek van de beplating. Bij de berekening wordt dit echter wel verondersteld.



Figuur 119: Rand- en tussenafstanden van de plaat-houtverbindingen.

De platen die gebruikt worden in dit onderzoek hebben een breedte van 600 mm. Indien de schuifsterkte van de verbindingen op de onderregel wordt berekend met een tussenafstand van 150 mm, zou dit betekenen dat de schuifsterkte bepaald wordt aan de hand van 4 verbindingen:

$$Bf_p = \frac{BF_p}{s} = \frac{600F_p}{150} = 4F_p$$

In werkelijkheid zijn er 5 verbindingen op de onderregel. Dit betekent een verschil van 25%. Om deze afwijking te minimaliseren kan de relatie tussen de maximale capaciteit van een enkele verbinding en een rij verbindingen worden weergegeven door:

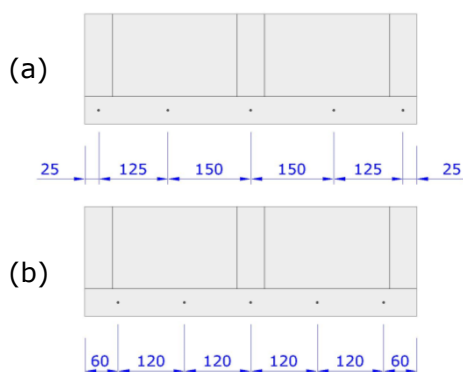
$$f_p = \frac{F_p n_o}{b} \quad (5-49)$$

waarbij:

$$n_o = \frac{b}{s_{max}} + 1 \quad (5-50)$$

met  $n_o$  het aantal verbindingen op de onderregel.

Indien nu de schrankweerstand wordt berekend, zou dit betekenen dat de verbindingen op de onderregel een tussenafstand hebben van gemiddeld 120 mm en een randafstand van 60 mm. Dit wordt weergegeven in Figuur 120.



Figuur 120: Schuifsterkte verbindingen (a) = schuifsterkte verbindingen (b) = 5 Fp.

Tabel 21 geeft de vergelijking tussen de experimentele en berekende schrankweerstand. De schrankweerstand wordt berekend met een tussenafstand van 120 mm.

	$F_{p1} = 1438 N$ $s = 120 mm$		$F_{p2} = 1489 N$ $s = 120 mm$
$f_{p1}$ (N/mm)	11,98	$f_{p2}$ (N/mm)	12,41

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1) (2)	(1) (3)	(1) (4)	(1) (5)
	$H_{exp}$ (N)	$H_{Källsner}$ $f_{p1}$ (N)	$H_{Källsner}$ $f_{p2}$ (N)	$H_{De Profyt}$ $f_{p1}$ (N)	$H_{De Profyt}$ $f_{p2}$ (N)				
ST1	1778 (gem.)	1540	1596	1506	1560	1,15	1,11	1,18	1,14
ST2	6269	6161	6382	5760	5967	1,02	0,98	1,09	1,05
ST3	11701 (gem.)	13178	13651	12014	12446	0,89	0,86	0,97	0,94
ST4	19045	20366	21097	19171	19801	0,94	0,90	0,99	0,96

De berekende waarden in Tabel 21 liggen nu zoals verwacht 25% hoger dan de berekende waarden in Tabel 20. De berekende waarden voor ST2, ST3 en ST4, liggen nu ook iets hoger dan de experimentele waarden.

#### 5.4.1 Capaciteit per eenheidslengte in dit onderzoek

Het bezwijken van een niet-verankerde wand is te wijten aan het falen van de verbindingen ter hoogte van de onderregel. De nieten worden hier zowel horizontaal als verticaal belast. De verticale belasting op de niet is groter dan de horizontale. Hierdoor vervormt de niet loodrecht op de onderregel. De schrankweerstand van de houtskeletwanden zullen daarom worden uitgevoerd met  $f_{p2} = 12,41 N/mm$ .



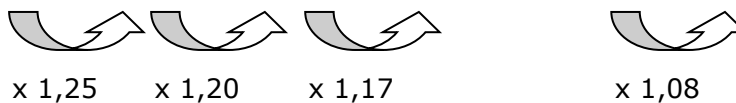
#### 5.4.2 Invloed tussenafstand en aantal verbindingen op de onderregel

Zoals aangetoond in 5.4 heeft het aantal verbindingen op de onderregel een grote invloed op de schrankweerstand van een niet-verankerde wand. Indien de schrankweerstand wordt bepaald aan de hand van 5 verbindingen op de onderregel in plaats van 4 verbindingen, zal de schrankweerstand 25% hoger zijn.

De schrankweerstand wordt nu berekend aan de hand van 6, 7, 12 en 13 verbindingen op de onderregel. Dit betekent dat de tussenafstand zal afnemen van 100 mm tot en met 46 mm. De sterkte van een enkele verbinding bedraagt 1489 N. De schrankweerstand met 4 en 5 verbindingen op de onderregel worden nogmaals weergegeven. De schrankweerstand wordt nu enkel berekend met de rekenmethode van Källsner en Girhammar.

Tabel 22: Invloed aantal plaat-houtverbindingen op de schrankweerstand.

	$F_p = 1489\text{ N}$ $n = 4$ $s = 150\text{ mm}$	$F_p = 1489\text{ N}$ $n = 5$ $s = 120\text{ mm}$	$F_p = 1489\text{ N}$ $n = 6$ $s = 100\text{ mm}$	$F_p = 1489\text{ N}$ $n = 7$ $s = 86\text{ mm}$	$F_p = 1489\text{ N}$ $n = 12$ $s = 50\text{ mm}$	$F_p = 1489\text{ N}$ $n = 13$ $s = 46\text{ mm}$
$f_p$ (N/mm)	9,93	12,41	14,89	17,37	29,78	32,26
ST1	1277	1596	1914	2233	3829	4148
ST2	5107	6382	7658	8933	15315	16592
ST3	10923	13651	16379	19107	32758	35488
ST4	16881	21097	25313	29529	50626	54845



Uit de resultaten kan worden afgeleid het verhogen van het aantal verbindingen op de onderregel leidt tot een verhoging van de schrankweerstand. Des te groter het aantal verbindingen wordt, des te kleiner deze verhoging zal zijn. Dit is zeer logisch. Indien het aantal verbindingen bijvoorbeeld wordt verhoogd van 12 naar 13, zal de invloed van deze enkele verbinding beperkt zijn, met name:  $1/12 = 0,08 = 8\%$ .

## 5.5 Berekende resultaten

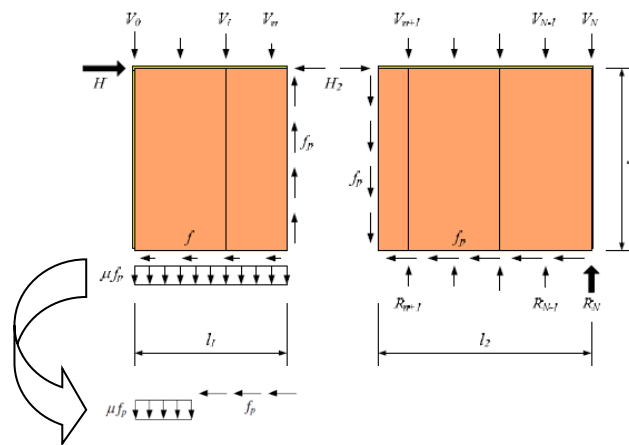
### 5.5.1 Overzicht berekende resultaten

De schrankweerstand van een volle wand wordt volgens de rekenmethode van Källsner en Girhammar bepaald door onderstaande formule:

$$H = f_p l_{eff}$$

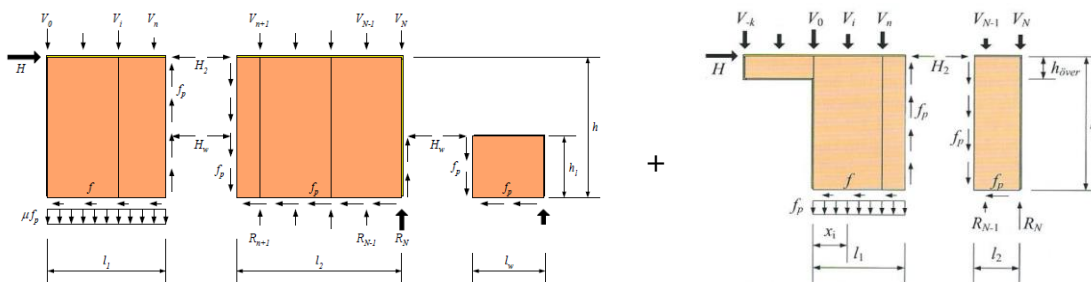
Hierbij is  $f_p$  de capaciteit per eenheidslengte van de plaat-houtverbindingen. De factor  $l_{eff}$  stelt de effectieve lengte voor. Dit is het gedeelte van de totale lengte van de wand dat weerstand biedt tegen een horizontale belasting. Deze effectieve lengte bestaat uit: een gedeelte van de lengte  $l_1$  en de lengte  $l_2$ . De lengte  $l_1$  wordt bepaald aan de hand van de voorwaarde dat de capaciteit  $f_p$  bereikt is in deze verticale sectie van de wand.

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2$$



Figuur 121: Effectieve lengte van een volle wand.[32]

Een wand met opening wordt opgesplitst in twee delen zoals Figuur 122 weergeeft. De totale effectieve lengte bestaat dan uit de som van de effectieve lengte van het eerste deel en het tweede deel. De effectieve lengte van elke deel bestaat uit ook weer uit een gedeelte van de lengte  $l_1$  en de lengte  $l_{2,1}$  en eventueel een gedeelte van de lengte  $l_3$ .



Figuur 122: Effectieve lengte van een wand met opening.[32][31]

Tabel 26 geeft een overzicht van de berekende schrankweerstand alsook de effectieve lengte van de wanden van het testprogramma. De berekeningen werden uitgevoerd met een capaciteit per eenheidslengte,  $f_p$ , van 12,41 N/mm (zie 5.4.2).

Tabel 23: Overzicht berekende schrankweerstand en de effectieve lengte.

	Notatie	$H_{K\ddot{a}llsner}$ (N)	$l_{eff}$ (mm)	$l_{eff}$ $b = 600 \text{ mm}$
1	ST1-1	1601	129	$0,215 \cdot b$
2	ST1-2			
3	ST2	6379	514	$0,86 \cdot b$
4	ST3	13651*	1100	$1,83 \cdot b$
5	ST3-V			
6	3DM	6652*	536	$0,89 \cdot b$
7	3DM-V			
8	3RM	9568*	771	$1,28 \cdot b$
9	3RM-V			
10	3DL	6382	514	$0,86 \cdot b$
11	3RL	12894	1039	$1,73 \cdot b$
12	ST4	21097	1700	$2,83 \cdot b$
13	4D	13105	1056	$1,76 \cdot b$
14	4R	17945	1446	$2,41 \cdot b$
15	4D+R	9047	729	$1,22 \cdot b$
16	ST3-B-1	16121*	1299	$2,17 \cdot b$
17	ST3-B-2			
18	ST3-V-B			
19	3DM-B-1	8154*	657	$1,10 \cdot b$
20	3DM-B-2			
21	3RM-B-1	12398*	999	$1,67 \cdot b$
22	3RM-B-2			

\* Berekeningen terug te vinden in Bijlage B.

### 5.5.2 Invloed openingen op de schrankweerstand

Aan de hand van de effectieve lengte en de schrankweerstand wordt de invloed van de raam- en deuropeningen nagegaan.

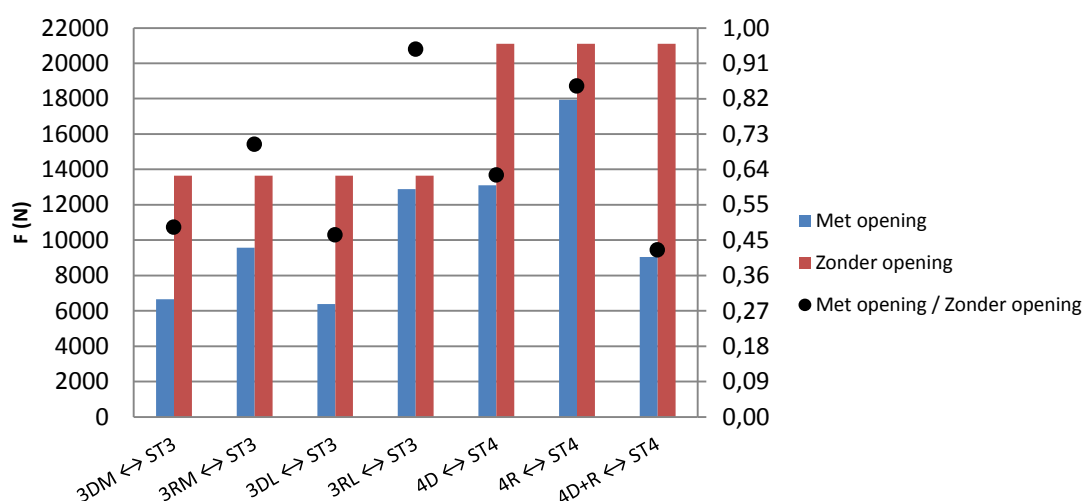
#### 5.5.2.1 Wanden zonder verticale belasting

Tabel 24 geeft een overzicht van: de schrankweerstand, de effectieve lengte, de effectieve lengte in functie van de paneelbreedte en de reductie van de effectieve lengte van de wanden zonder verticale belasting.

Tabel 24: Overzicht berekende schrankweerstand en effectieve lengte van de wanden zonder verticale belasting.

Notatie	$H_{gem}$ (N)	$l_{eff}$ (mm)	$l_{eff}$ $b = 600 \text{ mm}$	Reductie $l_{eff}$
ST3	13651	1100	$1,83 \cdot b$	/
ST3-V				
3DM	6652	536	$0,89 \cdot b$	$0,94 \cdot b$
3DM-V				
3RM	9568	771	$1,28 \cdot b$	$0,55 \cdot b$
3RM-V				
3DL	6382	514	$0,86 \cdot b$	$0,98 \cdot b$
3RL	12894	1039	$1,73 \cdot b$	$0,10 \cdot b$
ST4	21097	1700	$2,83 \cdot b$	/
4D	13105	1056	$1,76 \cdot b$	$1,07 \cdot b$
4R	17945	1446	$2,41 \cdot b$	$0,42 \cdot b$
4D+R	9047	729	$1,22 \cdot b$	$1,62 \cdot b$

Figuur 123 geeft de vergelijking weer tussen de schrankweerstand van de wanden met opening en zonder opening. De afmetingen van de deuropening bedragen 600 mm x 1075 mm. De afmetingen van de raamopening bedragen 600 mm x 575 mm.



Figuur 123: Vergelijking berekende schrankweerstand wanden met en zonder opening. (zonder verticale belasting)

#### 5.5.2.1.1 Evaluatie wanden met een lengte van 1800 mm

De invloed van zowel de deur- als raamopening is duidelijk zichtbaar. In alle vier gevallen leidt de opening tot reductie van de effectieve lengte en dus ook van de schrankweerstand.

De effectieve lengte van de wand 3DM ligt 0,94·b lager dan de effectieve lengte van de wand zonder opening (ST3). De schrankweerstand van de wand 3DM bedraagt hierdoor nog slechts 49% van de schrankweerstand van de wand zonder opening. De schrankweerstand van de wand 3DL bedraagt nog 47% van de schrankweerstand van de wand zonder opening. De effectieve lengte van deze wand ligt 0,98·b lager dan de effectieve lengte van de wand zonder opening. Wat opvalt is dat de effectieve lengte ongeveer met 1 paneelbreedte is afgenomen. Dit komt overeen met de breedte van de deuropening.

Aangezien de resultaten voor deze wanden zeer kort bij elkaar liggen, kan er besloten worden dat de invloed van de positie van een deuropening op de schrankweerstand te verwaarlozen is.

Bij de wanden met raamopening is er wel een zekere invloed van de positie op de schrankweerstand zichtbaar. Voor de wand 3RM bedraagt de schrankweerstand 70% van de wand zonder opening. Voor de wand 3RL is dit 94%. Het verschil in afname van de effectieve lengte ten opzichte van de wand zonder opening is tussen beide 0,45·b.

De effectieve lengte van de wanden 3DM en 3DL bedragen respectievelijk 0,89·b en 0,86·b. De effectieve lengte van deze wanden liggen een stuk lager dan de effectieve lengte van de wanden 3RM en 3RL (1,28·b en 1,73·b). Hieruit kan besloten worden dat een raamopening en een deuropening een verschillende invloed hebben op de schrankweerstand.

#### 5.5.2.1.2 Evaluatie wanden met een lengte van 2400 mm

Net als bij de wanden met een lengte van 1800 mm, is ook hier de invloed van een opening zichtbaar. De effectieve lengte van de wand 4D ligt 1,07·b lager dan deze van de wand zonder opening. De schrankweerstand bedraagt nog 62% van de schrankweerstand van de wand zonder opening.

De effectieve lengte van de wand met raam ligt 0,42·b lager dan de effectieve lengte van de wand zonder opening. De schrankweerstand bedraagt 85% van de wand zonder opening. De afname van de effectieve lengte hangt dus af van de grootte van de opening.

Indien een deur- en raamopening gecombineerd wordt, zal de invloed op de schrankweerstand nog groter zijn. De schrankweerstand van de wand 4D+R bedraagt nog slechts 43% van de schrankweerstand van de wand met opening. Door de combinatie ligt de effectieve lengte 1,62·b lager dan deze van de wand zonder opening. Dit komt goed overeen met de som van de reductie die optreedt door de raamopening en de deuropening apart te bekijken.

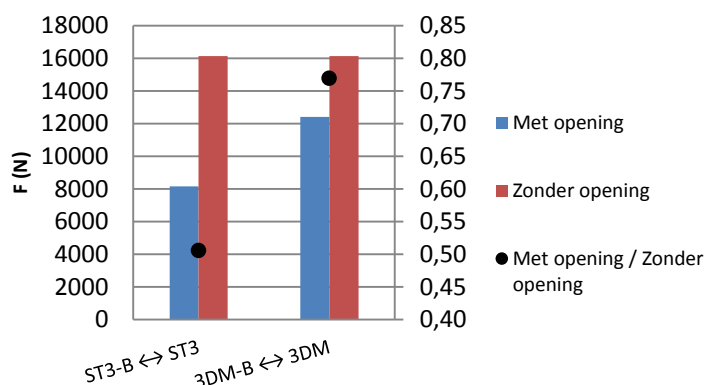
### 5.5.2.2 Wanden met verticale belasting

Tabel 25 geeft een overzicht van: de schrankweerstand, de effectieve lengte, de effectieve lengte in functie van de paneelbreedte en de reductie van de effectieve lengte van de wanden met verticale belasting.

Tabel 25: Overzicht berekende schrankweerstand en effectieve lengte van de wanden met verticale belasting.

Notatie	$H_{gem}$ (N)	$l_{eff}$ (mm)	$l_{eff}$ $b = 600\text{ mm}$	Reductie $l_{eff}$
ST3-B-1	16121	1299	$2,17 \cdot b$	/
ST3-B-2				
ST3-V-B				
3DM-B-1	8154	657	$1,10 \cdot b$	$1,07 \cdot b$
3DM-B-2				
3RM-B-1	12398	999	$1,67 \cdot b$	$0,5 \cdot b$
3RM-B-2				

Figuur 124 geeft de vergelijking weer tussen de schrankweerstand van de wanden met en zonder opening. De afmetingen van de deuropening bedragen 600 mm x 1075 mm. De afmetingen van de raamopening bedragen 600 mm x 575 mm.



Figuur 124: Vergelijking berekende schrankweerstand wanden met en zonder opening. (met verticale belasting)

#### 5.5.2.2.1 Evaluatie wanden met een lengte van 1800 mm

De effectieve lengte van de wand met deuropening ligt  $1,07 \cdot b$  lager dan deze van de wand zonder opening. Deze afname zorgt ervoor dat de schrankweerstand nog slechts 51% bedraagt van deze van de wand zonder opening.

De schrankweerstand van de wand met raamopening bedraagt nog 77% van de schrankweerstand van de wand met opening. De effectieve lengte van deze wand ligt  $0,5 \cdot b$  lager dan deze van de wand zonder opening.

Net zoals bij de wanden zonder verticale belasting leiden de openingen tot een vermindering van de effectieve lengte en van de schrankweerstand en hangt deze vermindering af van de grootte van de opening.

## 6 Experimentele en berekende resultaten

### 6.1 Vergelijking experimentele en berekende schrankweerstand

Tabel 26 geeft de vergelijking weer tussen de experimentele en berekende schrankweerstand van de wanden van het testprogramma.

Tabel 26: Vergelijking tussen de experimentele en berekende schrankweerstand van de wanden van het testprogramma.

			(1)	(2)	
	Notatie	$H_{exp}$ (N)	$H_{exp,gem}$ (N)	$H_{Källsner}$ (N)	$\frac{(1)}{(2)}$
1	ST1-1	1776	1778	1596	1,11
2	ST1-2	1779			
3	ST2	6269		6382	0,98
4	ST3	12407	11701	13651*	0,86
5	ST3-V	10994			
6	3DM	7752	6893	6652*	1,04
7	3DM-V	6034			
8	3RM	10551	9996	9568*	1,04
9	3RM-V	9440			
10	3DL	7026		6382	1,10
11	3RL	10255		12894	0,80
12	ST4	19045		21097	0,90
13	4D	10893		13105	0,83
14	4R	16283		17945	0,91
15	4D+R	10975		9047	1,21
16	ST3-B-1	13597	14277	16121*	0,89
17	ST3-B-2	14901			
18	ST3-V-B	14333			
19	3DM-B-1	8900	8867	8154*	1,09
20	3DM-B-2	8833			
21	3RM-B-1	11540	11961	12398*	0,96
22	3RM-B-2	12382			

\* Berekeningen terug te vinden in Bijlage B.

Een voorwaarde om de methode van Källsner en Girhammar toe te passen, is dat de plaat-houtverbindingen hun volledige plastische capaciteit bereiken en dat de verbindingen een voldoende grote rek vertonen vooraleer de weerstand aanzienlijk daalt (taai faalgedrag, uittrekken verbindingen). De verbindingen mogen geen bros faalgedrag vertonen.

De plaat-houtverbindingen die getest werden in 5.3.1 vertonen zowel een taai als bros faalgedrag. Deze soorten falen komen ook voor bij de wanden van het testprogramma. De meeste wanden faalde doormiddel van een combinatie van: het uittrekken van de nieten ter hoogte van de onderregel, het buigen en doorponzen van de nieten ter hoogte van de onderregel en het doorscheuren van het plaatmateriaal ter hoogte van de benedenhoeken van de platen.

Ondanks het verschil in faalgedrag van de verbindingen beschreven in de rekenmethode en de experimentele resultaten is er een goede overeenkomst van de schrankweerstand. De ratio's van de experimentele en berekende resultaten liggen tussen 0,80 en 1,21.

## **6.2 Vergelijking invloed openingen**

In 4.6.6 werden de experimentele resultaten besproken. De resultaten gaven het volgende aan met betrekking tot de invloed van de openingen op de schrankweerstand:

- De raam- en deuropeningen leiden tot reductie van de schrankweerstand ten opzichte van een wand zonder openingen en met dezelfde eigenschappen. De reductie is afhankelijk van de grootte van de openingen. Des te groter de openingen, des te groter de reductie van de schrankweerstand ten opzichte van de wand zonder opening.
- De invloed van de positie van de deuropening op de schrankweerstand is te verwaarlozen.
- *De invloed van de positie van de raamopening op de schrankweerstand is te verwaarlozen.*

In 5.5.2 werden de berekende resultaten besproken. De resultaten gaven het volgende aan met betrekking tot de invloed van de openingen op de schrankweerstand:

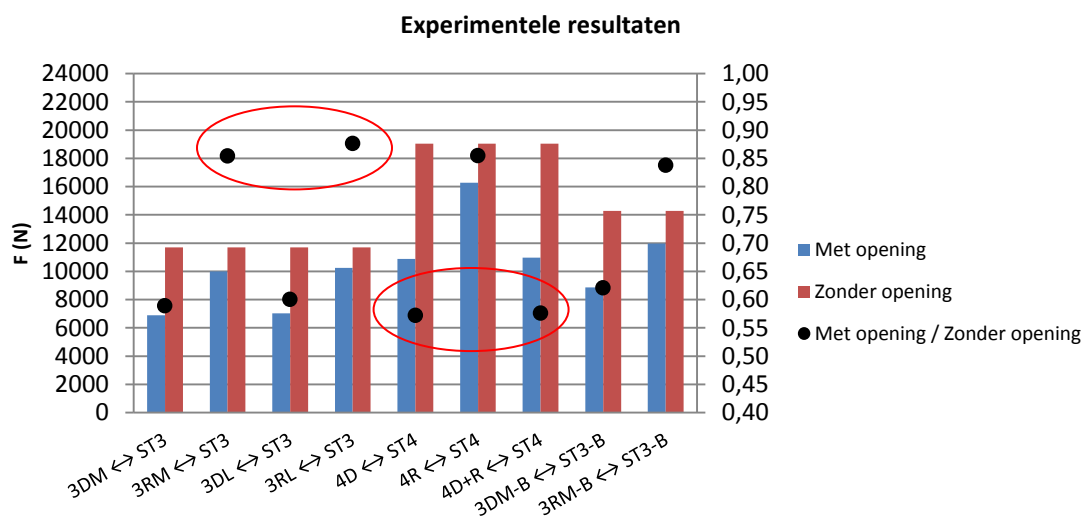
- De raam- en deuropeningen leiden tot reductie van de schrankweerstand ten opzichte van een wand zonder openingen en met dezelfde eigenschappen. De reductie is afhankelijk van de grootte van de openingen. Des te groter de openingen, des te groter de reductie van de schrankweerstand ten opzichte van de wand zonder opening.
- De invloed van de positie van de deuropening op de schrankweerstand is te verwaarlozen.
- *De positie van de raamopening heeft wel een invloed op de schrankweerstand. De effectieve lengte en dus ook de schrankweerstand van de wand waarbij de raamopening zich aan de leidende stijl bevindt, is groter dan deze van de wand waarbij de raamopening zich in het midden bevindt.*

De conclusies die in het cursief worden weergegeven zijn tegenstrijdig.

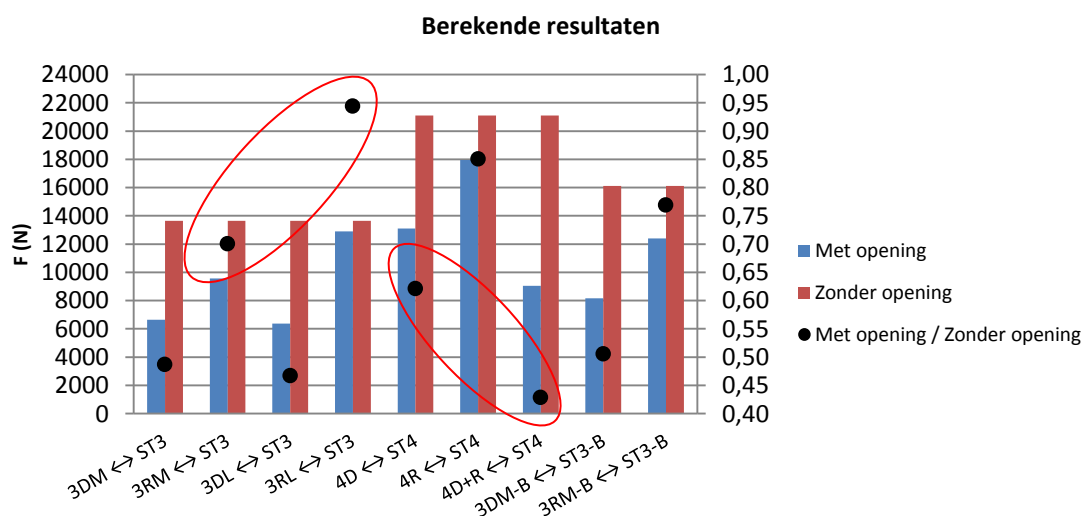


Figuur 125 en Figuur 126 geven respectievelijk een overzicht van de experimentele resultaten en van de berekende resultaten. Deze figuren geven duidelijk weer dat de invloed van de positie van de raamopening verschillend is voor de experimentele en berekende resultaten. Een oorzaak hiervan kan zijn:

- Het rekenmodel gaat uit van een verdeelde schuifkracht ten gevolge van de verbinding. In realiteit zijn het discrete punten waar nieten zitten. Er kan hetzelfde fenomeen voorkomen zoals dat op de onderregel (5.4.1). Waarbij er één niet meer of minder aanwezig is.
- Spreiding van de experimentele resultaten. De experimentele schrankweerstand van de wand 3RM ligt hoger dan de berekende waarde. Voor de wand 3RL ligt de experimentele schrankweerstand dan weer lager dan de berekende waarde. De hogere waarde van de wand 3RM en de lagere waarde van de wand 3RL zorgen ervoor dat deze waarden ongeveer hetzelfde zijn. En het dus lijkt alsof de invloed van de positie van de raamopening te verwaarlozen is.



Figuur 125: Overzicht experimentele resultaten.



Figuur 126: Overzicht berekende resultaten.

Wat ook opvalt is dat de experimentele resultaten van de wanden 4D en 4D+R ongeveer hetzelfde zijn en dat de waarde 4D+R zelf iets hoger ligt. Terwijl de grootte van de openingen in beide wanden duidelijk verschillend is. Spreiding van de experimentele resultaten kan ook hier weer een oorzaak zijn.

Ondanks dat de invloed van raam- en deuropeningen voor de experimentele en berekende resultaten verschillend zijn, is er nog altijd een goede overeenkomst tussen de experimentele en berekende resultaten. De ratio tussen beide ligt tussen 0,80 en 1,21.

### **6.3 Vergelijking met de Britse methode**

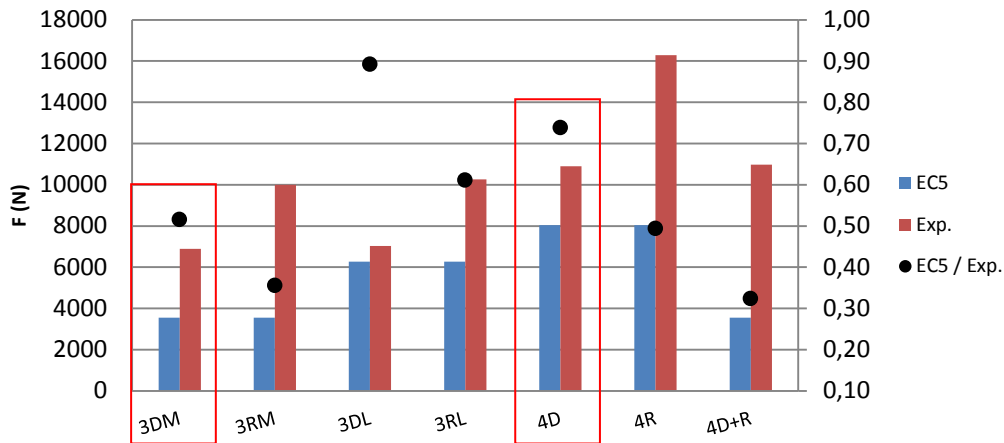
Bij de Britse methode [6], besproken in 2.3.2, wordt er gesproken van een onderbreking indien een wand een deur- of raamopening bevat waarvan de verticale afmeting groter is dan 0,65 keer de hoogte van de wand of indien de hoogte onder de opening kleiner is dan 0,25 keer de hoogte van de wand. Deze onderbreking deelt de wand op in meerdere wanden. De sterkte van deze onderbreking wordt niet opgenomen in de berekening. Een deur- of raamopening die geen onderbreking vormt wordt wel opgenomen in de berekening mits reductie van de sterkte van de wand waarin de opening zich bevindt.

De deurhoogte van de wanden van het testprogramma bedraagt 1075 mm. De wandhoogte bedraagt 1400 mm. De deurhoogte is groter dan 0,65 keer de hoogte van de wand (910 mm). De deuropening moet dus aanzien worden als een onderbreking die de wand opdeelt in meerdere wanden.

Voor een stabiliteitswand die bestaat uit meerdere wanden wordt de sterkte gegeven als de som van de afzonderlijke wanden:

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd}$$

Dit zou betekenen dat de schrankweerstand van de wand 3DM berekend wordt als de som van de schrankweerstand van twee wanden bestaande uit één paneel (ST1). De schrankweerstand van de wand 4D wordt dan bepaald aan de hand van de som van de schrankweerstand van een wand bestaande uit één paneel (ST1) en een wand bestaande uit twee panelen (ST2). Dit komt overeen met de rekenwijze van Methode B beschreven in Eurocode 5 [EC5]. Het enigste verschil is dat de Eurocode ook raamopeningen beschouwd als een onderbreking. Zoals aangetoond in 4.6.4 zal deze methode leiden tot grote onderschatting van de schrankweerstand.



Figuur 127: Vergelijking schrankweerstand volgens rekenwijze Methode B van Eurocode 5 en de experimentele schrankweerstand van de wanden met opening.

De hoogte van de raamopeningen van de wanden van het testprogramma bedraagt 575 mm en is kleiner dan 0,65 keer de hoogte van de wand. De hoogte onder de raamopening bedraagt 500 mm. Dit is groter dan 0,25 keer de wandhoogte (350 mm). De raamopeningen vormen dus geen onderbreking. Een wand mag zulke openingen bevatten mits reductie van de sterkte van de wand. De reductie gebeurt aan de hand van de factor  $K_{opening}$ . Deze factor wordt als volgt bepaald:

$$K_{opening} = 1 - 1,19p$$

met

$$p = \frac{A}{HL}$$

$A$  is de totale oppervlakte van de openingen in de wand, in m<sup>2</sup>.

Volgens de factor  $K_{opening}$  zal de schrankweerstand van de wanden met enkel een raamopening nog 84% en 88% bedragen van de schrankweerstand van de wanden zonder opening (ST3 en ST4). De experimentele schrankweerstand van de wanden 3RM, 3RL, 3RM-B en 4R bedraagt respectievelijk 85%, 88%, 85% en 84% van de experimentele schrankweerstand van de wanden zonder opening (ST3 en ST4). De berekende schrankweerstand van de voorgenoemde wanden met raamopening bedraagt respectievelijk 70%, 94%, 85% en 77% van berekende schrankweerstand van de wanden zonder opening. De reductie volgens  $K_{opening}$  komt dus zeer goed overeen met deze van de experimentele resultaten. Ten opzichte van de berekende resultaten overschat de factor  $K_{opening}$  de schrankweerstand van de wanden 3RM en 4R met respectievelijk 14% en 11%.

Tabel 27: Reductie schrankweerstand wand met raamopening.

	3RM	3RL	3RM-B	4R
$p = \frac{A}{HL}$	0,137	0,137	0,137	0,103
$K_{opening} = 1 - 1,19p$	0,84	0,84	0,84	0,88
Experimentele resultaten	0,85	0,88	0,85	0,84
Berekende resultaten	0,70	0,94	0,85	0,77

Een wandpaneel waarvan de opening in rekening dient gebracht te worden, moet ook nog voldoen aan onderstaande eis:

- Elke volle plaat aan weerszijde van de opening moet een minimum lengte hebben van 0,25 maal de breedte van de opening of 1/8 van de wandhoogte, welke het grootste is. Zoniet, dan moet er een volle plaatbreedte (normaal 1200 mm) binnen een afstand van 1/8 van de wandhoogte van de verticale rand van de opening bevinden.

De wanden 3RM, 3RL, 3RM-B en 4R voldoen aan deze eis.

## 7 Inrekenen van raam- en deuropeningen

### 7.1 Inleiding

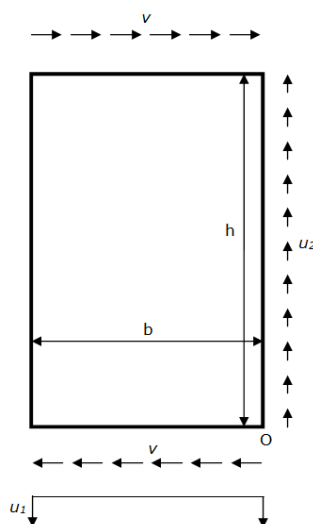
In dit hoofdstuk wordt er onderzocht hoe raam- en deuropeningen met het rekenmodel ontwikkeld door De Proft [1] in rekening kunnen gebracht worden. Dit rekenmodel kan enkel worden toegepast op gedeeltelijk verankerde houtskeletwanden zonder openingen. Het rekenmodel wordt in dit hoofdstuk eerst uitgelegd.

### 7.2 Schrankweerstand volgens De Proft

Het rekenmodel ontwikkeld door De Proft leunt sterk aan bij een model voorgesteld door Salenikovich [36]. Salenikovich bekijkt hierbij de hele krachtswerking op de houten skeletdelen. Het model van De Proft bekijkt het geheel vanuit het standpunt van de beplating. Om de krachtswerking te bestuderen werd er door De Proft een eindig elementen model ontwikkeld. Op basis van de resultaten van dit model werd een rekenmodel ontwikkeld.

#### 7.2.1.1 Schrankweerstand van een wand bestaande uit één paneel

Figuur 128 toont de krachtsverdeling van een wand bestaande uit één wandpaneel. Hierbij is  $v$  de krachtscomponent die ontstaat in de de boven en onderregel. De krachtscomponent in de eindstijl wordt voorgesteld door  $u_2$ . Ter hoogte van de onderregel treedt ook een verticale krachtscomponent  $u_1$  op. Deze dient om het kantelen tegen te gaan.



Figuur 128: Rekenmodel voor het bepalen van de schrankweerstand van een niet-verankerde wand (gedeeltelijk verankerde wand).[1]

Het rotatie-evenwicht rond het punt O geeft:

$$bu_1 \frac{b}{2} - vbh = 0 \quad (7-1)$$

Uitwerken van het rotatie-evenwicht geeft:

$$\frac{u_1}{v} = \frac{2h}{b} \quad (7-2)$$

De maximale capaciteit van het verbindingsmiddel wordt gegeven door:

$$v_{max} = \sqrt{u_1^2 + v^2} \quad (7-3)$$

Combinatie van vergelijking (7-2) en (7-3) geeft uiteindelijk:

$$v_{max} = v \sqrt{1 + \left(\frac{u_1}{v}\right)^2} = v \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{b}\right)^2} \quad (7-4)$$

De maximale capaciteit  $v_{max}$  kan gevonden worden via:

$$v_{max} = \frac{F_f}{s} \quad (7-5)$$

met  $F_f$  de capaciteit van de verbinding tussen het houten skelet en de beplating. De schrankweerstand wordt dan gegeven door:

$$F_{v,max} = \frac{F_f b}{s \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{b}\right)^2}} \quad (7-6)$$

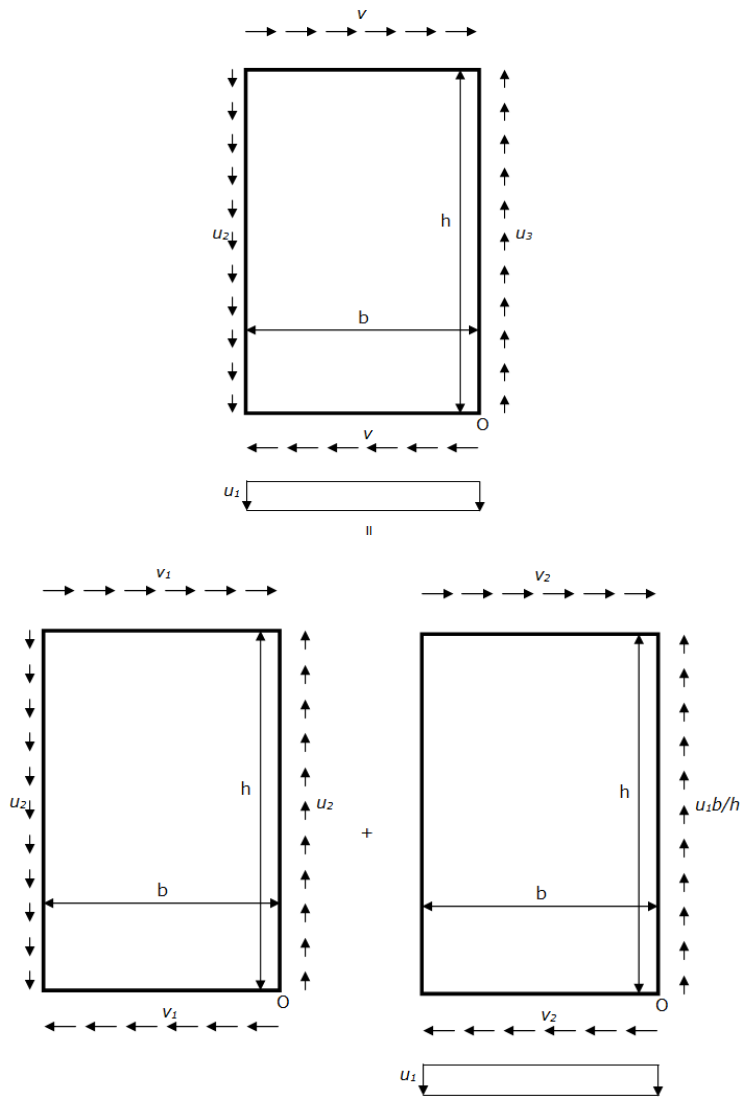
De kracht in de eindstijl kan berekend worden via het verticale evenwicht:

$$bu_1 = u_2 h \quad (7-7)$$

### 7.2.1.2 Schrankweerstand van een wand bestaande uit meerdere wandpanelen

Indien een wand bestaat uit meerdere panelen, dient de berekening van het tweede paneel aangepast te worden. De kracht in de eindstijl van het eerste paneel, zal bij het tweede paneel als een "gedeelde verankering" werken. Deze kracht moet eerst volledig overwonnen worden vooraleer de beginstijl van het tweede paneel, wat ook de eindstijl van het eerste paneel is, omhoog zal bewegen. De capaciteit van het tweede paneel bestaat dan ook uit twee bijdragen:

1. een verankerd deel, nodig om de kracht in de eindstijl van het eerste paneel te compenseren;
2. een onverankerd deel.



Figuur 129: Krachswerking bij meerdere panelen.[1]

De kracht in de beginstijl is gekend. Om deze kracht te compenseren kan een horizontale kracht  $v_1$  worden aangebracht:

$$v_1 b h = u_2 h b \quad (7-8)$$

De tweede horizontale bijdrage,  $v_2$ , is te wijten aan de overblijvende niet-verankerde wand. Uitwerken van het rotatie-evenwicht geeft:

$$\frac{u_1}{v_2} = \frac{2h}{b} \quad (7-9)$$

Aangezien de verbindingsmiddelen vloeien wordt de maximale capaciteit van het verbindingsmiddel gegeven door:

$$v_{max}^2 = (v_1 + v_2)^2 + u_1^2 \quad (7-10)$$

Deze vergelijking kan in functie van één onbekende geschreven worden, bijvoorbeeld  $v_2$ .

$$\left(1 + \frac{4h^2}{b^2}\right)v_2^2 + 2v_1v_2 + v_1^2 - v_{max}^2 = 0 \quad (7-11)$$

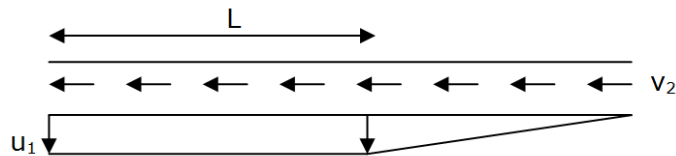
Deze vergelijking kan worden opgelost om  $v_2$  te bepalen. De totale horizontale kracht van het tweede paneel is dan:

$$v = v_1 + v_2 \quad (7-12)$$

De verticale kracht in de eindstijl kan opnieuw bepaald worden via:

$$u_2 + \frac{u_1b}{h} = u_3 \quad (7-13)$$

Deze oplossing is geldig zolang  $u_3 < v_{max}$ . Wanneer dit niet meer het geval is betekent dit dat de verbindingsmiddelen hun maximale capaciteit hebben bereikt. De kracht op de eindstijl kan dan ook niet groter zijn dan  $v_{max}$ . De oplossing dient dan ook aangepast te worden. Dit betekent dat een deel van de verbindingsmiddelen op de onderregel niet volledig gaan vloeien. De krachtsverdeling wordt dan ook verondersteld te zijn zoals in Figuur 130.



Figuur 130: Krachtsverdeling onderregel waarbij niet alle verbindingen vloeien.[1]

Volgend evenwicht kan worden uitgeschreven:

$$u_2h + u_1L + \frac{u_1(b-L)}{2} = v_{max}h \quad (7-14)$$

$$u_1L\left(b - \frac{L}{2}\right) + \frac{u_1(b-L)^2}{3} = v_2bh \quad (7-15)$$

Vergelijking (7-16) moet ook geldig zijn. Deze drie vergelijkingen kunnen opgelost worden naar de onbekenden  $u_1$ ,  $v_2$ ,  $L$ . Het oplossen van deze vergelijking maakt het geheel wel zeer complex. Daarom wordt gekozen voor een vereenvoudiging in te voeren. De krachtscomponent  $u_1$  wordt nu bepaald aan de hand van:

$$u_2h + u_1b = v_{max}h \quad (7-16)$$

Alle nakomende panelen kunnen nu als verankerd beschouwd worden en worden ook als dusdanig berekend. Bovenstaande methode laat ook toe het effect van een bovenbelasting op de wand te beschouwen. Een bovenbelasting kan eveneens gezien worden als een "verankering".



### 7.3 Sugiyama's empirische vergelijking

Uit het voorgaand onderzoek (3.2) blijkt dat er reeds een methode bestaat om de schrankweerstand van een houtskeletwand met openingen te bepalen indien de schrankweerstand van een volle houtskeletwand met dezelfde eigenschappen gekend is.

Volgens de methode kan de schrankweerstand van een wand met openingen die verankerd is aan de uiteindes als volgt worden bepaald:

$$F = \left( \frac{r}{3 - 2r} \right) \quad (7-17)$$

$$F_o = F'F \quad (7-18)$$

waarbij:

$F$  is de schrankweerstandsratio;

$F'$  is de schrankweerstand van de wand zonder openingen;

$F_o$  is de schrankweerstand van de wand met openingen.

De methode maakt gebruik van de paneelratio  $r$ . De paneelratio wordt bepaald door de ratio van de openingen in de wand en de ratio van de volle wandpanelen:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\beta}} = \frac{H \sum l_i}{H \sum l_i + \sum A_i} \quad (7-19)$$

waarbij:

$H$  is de hoogte van de wand;

$L$  is de lengte van de wand;

$\sum l_i$  is de lengte van alle volle wandpanelen;

$\sum A_i$  is de oppervlakte van alle openingen;

$\alpha = \frac{\sum A_i}{HL}$  is de ratio van de openingen in de wand;

$\beta = \frac{\sum l_i}{L}$  is de ratio van de volle wandpanelen.

Uit het voorgaand onderzoek blijkt ook dat de vergelijking (7-17) leidt tot lichte onderschatting van de schrankweerstand en de volgende vergelijking een betere voorspelling geeft:

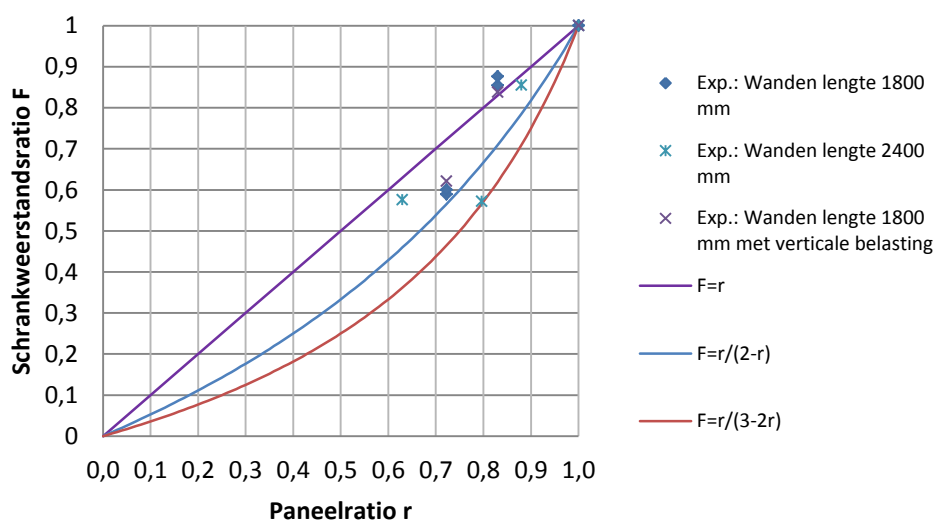
$$F = \left( \frac{r}{2 - r} \right) \quad (7-20)$$

Tabel 28 geeft de vergelijking weer van de werkelijke (experimenteel), berekende (Källsner en Girhammar) en voorspelde schrankweerstandsratio van de wanden van het testprogramma.

Tabel 28: Vergelijking van de werkelijke, berekende en voorspelde schrankweerstandsratio van de wanden van het testprogramma.

Notatie	$\alpha$	$\beta$	Paneelratio $r$	Schrangweerstandsratio			$\frac{(1)}{(3)}$	$\frac{(2)}{(3)}$
				(1)	(2)	(3)		
				$F_{exp}$	$F_{Källsner}$	$F = \frac{r}{2-r}$		
3DM 3DM-V	0,256	0,667	0,723	0,589	0,487	0,566	1,04	0,86
3RM 3RM-V	0,137	0,667	0,830	0,854	0,701	0,709	1,20	0,99
3DL	0,256	0,667	0,723	0,600	0,468	0,566	1,06	0,83
3RL	0,137	0,667	0,830	0,876	0,945	0,709	1,24	1,33
4D	0,192	0,750	0,796	0,572	0,621	0,661	0,87	0,94
4R	0,103	0,750	0,880	0,855	0,851	0,785	1,09	1,08
4D+R	0,295	0,500	0,629	0,576	0,429	0,459	1,25	0,93
3DM-B-1 3DM-B-2	0,256	0,667	0,723	0,621	0,506	0,566	1,10	0,89
3RM-B-1 3RM-B-2	0,137	0,667	0,830	0,838	0,769	0,709	1,18	1,08

Figuur 131 geeft de werkelijke schrankweerstandsratio weer in functie van de paneelratio van de wanden van het testprogramma.

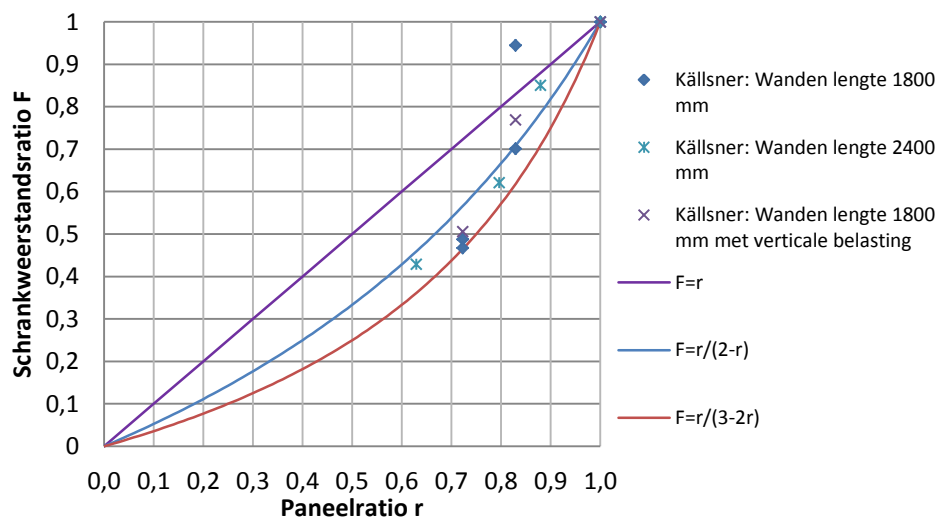


Figuur 131: Schrangweerstandsratio van de experimentele resultaten in functie van de paneelratio.

Ondanks dat de geteste wanden gedeeltelijk verankerd zijn en vergelijking (7-20) werd opgesteld aan de hand van wanden waarbij de uiteindes verankerd zijn, is er een goede overeenkomst van de schrangweerstandsratio. De schrangweerstandsratio van de experimentele resultaten liggen 4% tot 25% hoger dan deze voorspeld met vergelijking (7-20). Enkel bij de wand 4D ligt de

experimentele schrankweerstandsratio lager dan de voorspelde schrankweerstandsratio.

Figuur 132 geeft de schrankweerstandsratio van de berekende resultaten bekomen met de methode van Källsner en Girhammar weer in functie van de paneelratio.



Figuur 132: Schrankweerstandsratio van de berekende resultaten in functie van de paneelratio.

Wat opvalt is dat de schrankweerstandsratio's een zelfde verloop vertonen als de lijn die gevormd wordt door de empirische vergelijking (7-20).

Net zoals bij de experimentele resultaten komen de berekende schrankweerstandsratio's zeer goed overeen met de voorspelde schrankweerstandsratio's. De ratio's tussen de berekende en de voorspelde schrankweerstandsratio's, met uitzondering van de wand 3RL, liggen tussen 0,83 en 1,08.

De schrankweerstandsratio van de wand 3RL toont een zeer groot verschil met de voorspelde schrankweerstandsratio. Deze schrankweerstandsratio ligt 33% hoger dan de voorspelde. Vergelijking (7-20) is opgesteld aan de hand van wanden waarbij er aan elk uiteinde een volle plaat aanwezig was. Dit is niet het geval bij de wand 3RL. Op zich is de grotere schrankweerstand van deze wand niet zo erg aangezien de voorspelde schrankweerstandsratio lager ligt en dus aan de veilige kant ligt. Daarnaast geeft de voorspelde schrankweerstandsratio nog altijd een hogere schrankweerstand (8296 N) dan indien de rekenwijze van Methode B in Eurocode 5 gevolgd wordt (6296 N).

Ondanks dat de empirische vergelijking (7-20) bepaald is geweest aan de hand van wanden met een multiplexbeplating waarbij de uiteindes verankerd waren, kan er besloten worden dat de vergelijking een goede voorspelling geeft van de schrankweerstand van een gedeeltelijk verankerde wand met spaanplaat en met opening indien de schrankweerstand van een volle wand met dezelfde eigenschappen gekend is.

#### **7.4 Combinatie rekenmodel De Proft en Sugiyama's empirische vergelijking**

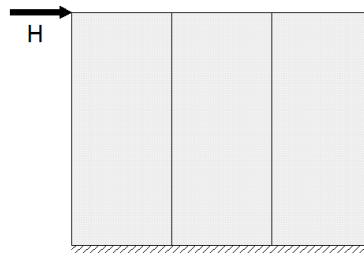
Het rekenmodel ontwikkeld door De Proft kan enkel worden toegepast op volle gedeeltelijk verankerde wanden. Raam- en deuropeningen kunnen aan de hand van vergelijking (7-18) en (7-20) nu heel simpel in rekening worden gebracht.

Tabel 29 geeft de resultaten weer indien de schrankweerstand van de wanden van het testprogramma bepaald worden aan de hand van het rekenmodel ontwikkeld door De Proft en vergelijking (7-18) en (7-20).

De schrankweerstand van de volle wanden wordt op twee manieren bepaald:

- gedetailleerde manier;
- vereenvoudigde manier.

Bij de gedetailleerde manier wordt de schrankweerstand van de volle wanden bepaald zoals beschreven in 7.2.1.2. Hierbij zal de kracht in de eindstijl ten gevolge van het eerste paneel bij het tweede paneel werken als een verankering. Deze kracht zal eerst moeten worden overwonnen vooraleer de beginstijl van het tweede paneel omhoog zal bewegen, enzovoorts.

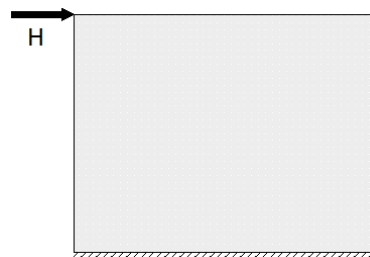


*Figuur 133: Voorstelling wand ST3 volgens de gedetailleerde manier.*

Bij de vereenvoudigde manier wordt de schrankweerstand van de volle wanden die uit meerdere panelen bestaan bepaald aan de hand van vergelijking (7-6):

$$F_{v,max} = \frac{F_f b}{s \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{b}\right)^2}}$$

Hierbij wordt een wand die uit meerdere wandpanelen bestaat beschouwd als een wand dat bestaat uit 1 groot paneel. De krachten die optreden in de stijlen en als verankering werken worden verwaarloosd.



*Figuur 134: Voorstelling wand ST3 volgens de vereenvoudigde manier.*

Tabel 29: Vergelijking berekende en experimentele resultaten.

Notatie	$H_{exp}$ (N)	(1)	(2)	(3)	(4)	$\frac{(1)}{(2)}$	$\frac{(1)}{(3)}$	$\frac{(1)}{(4)}$
		$H_{exp,gem}$ (N)	$H_{Källsner}$ (N)	$H_{De Proft}$ Detail. (N) \$	$H_{De Proft}$ Vereen. (N) °			
ST1-1	1776	1778	1596	1560	1560	1,11	1,14	1,14
ST1-2	1779							
ST2	6269		6382	5967	5866	0,98	1,05	1,07
ST3	12407	11701	13561*	12446	12079	0,86	0,94	0,97
ST3-V	10994							
3DM	7752	6893	6652*	7040	6833	1,04	0,98	1,01
3DM-V	6034							
3RM	10551	9996	9568*	8822	8562	1,04	1,13	1,17
3RM-V	9440							
3DL	7026		6382	7040	6833	1,10	1,00	1,03
3RL	10255		12894	8822	8562	0,80	1,16	1,20
ST4	19045		21097	19801	19383	0,90	0,96	0,98
4D	10893		13105	13097	12820	0,83	0,83	0,85
4R	16283		17945	15545	15217	0,91	1,05	1,07
4D+R	10975		9047	9089	8897	1,21	1,21	1,23
ST3-B-1	13597	14277	16121*	15283	15416	0,89	0,93	0,93
ST3-B-2	14901							
ST3-V-B	14333							
3DM-B-1	8900	8867	8154*	8645	8720	1,09	1,03	1,02
3DM-B-2	8833							
3RM-B-1	11540	11961	12398*	10834	10928	0,96	1,10	1,09
3RM-B-2	12382							
* Berekeningen terug te vinden in Bijlage B \$ Berekeningen terug te vinden in Bijlage C ° Berekeningen terug te vinden in Bijlage D								

Zoals verwacht is er een goede overeenkomst tussen de experimentele schrankweerstand van de wanden met opening en de schrankweerstand berekend met het rekenmodel van De Proft en vergelijking (7-18) en (7-20). De schrankweerstand van de wanden zonder verticale belasting berekend met de gedetailleerde methode ligt 2% à 3% hoger dan deze berekend met de vereenvoudigde methode. Voor de wanden met verticale belasting ligt de schrankweerstand berekend met de gedetailleerde methode iets lager dan deze berekend met de vereenvoudigde methode. Bij de vereenvoudigde methode worden de verticale belastingen voorgesteld als één equivalente belasting die aangrijpt op de eerste stijl.

De ratio's tussen de experimentele schrankweerstand en de gedetailleerde schrankweerstand liggen tussen 0,83 en 1,21. De ratio's tussen de experimentele schrankweerstand en de vereenvoudigde schrankweerstand liggen tussen 0,85 en 1,23.

De grootste afwijking is terug te vinden bij de wanden 3RL, 4D en 4D+R. Zoals aangehaald in 6.2 werd niet dezelfde invloed van de openingen bij deze wanden terug gevonden dan als bij de berekende resultaten verkregen met de rekenmethode van Källsner en Girhammar.

Indien deze wanden buiten beschouwing worden gelaten, liggen de ratio's tussen de experimentele schrankweerstand en de vereenvoudigde schrankweerstand tussen 0,93 en 1,17. Enkel de berekende waarden van de volle wanden (ST3, ST4 en ST3-B) liggen aan de onveilige kant. De berekende schrankweerstand van de wanden met opening liggen allemaal lager dan de experimentele schrankweerstand. De methode is dus een zeer veilige methode.

## **8 Conclusie**

Naar aanleiding van het onderzoek 'Stabiliteit van houten constructies' werd door De Proft een rekenmodel ontwikkeld voor gedeeltelijk verankerde houtskeletwanden zonder openingen. In dit onderzoek wordt de invloed van raam- en deuropeningen op de schrankweerstand van gedeeltelijk verankerde wanden onderzocht en werd er onderzocht hoe deze openingen in rekening kunnen gebracht worden.

De invloed van raam- en deuropeningen werd een eerste keer onderzocht aan de hand van een testprogramma. Het testprogramma bestond enkel uit gedeeltelijk verankerde wanden met verschillende wand- en belastingsconfiguraties. Het bezwijken van de gedeeltelijk verankerde wanden was te wijten aan het falen van de plaat-houtverbindingen ter hoogte van de onderregel.

De invloed van raam- en deuropeningen werd een tweede keer onderzocht aan de hand van berekende resultaten bekomen met een plastische rekenmethode ontwikkeld door Källsner en Girhammar.

Uit de experimentele en berekende resultaten kan geconcludeerd worden dat openingen leiden tot reductie van de schrankweerstand ten opzichte van een wand zonder openingen en met dezelfde eigenschappen en dat deze reductie afhangt van de grootte van de openingen.

Daarnaast kan er geconcludeerd worden dat de invloed van de positie van een deuropening te verwaarlozen is. Voor de experimentele resultaten bedroeg het verschil tussen de wand met deuropening in het midden en de wand met deuropening aan de leidende stijl 1%. Voor de berekende resultaten was dit 4%.

De invloed van de positie van de raamopening verschilde voor de berekende en experimentele resultaten. Volgens de experimentele resultaten is de invloed van de positie van een raamopening te verwaarlozen. Voor de berekende resultaten lag de schrankweerstand van de wand met aan de leidende stijl een raamopening 34% hoger dan deze van de wand met in het midden een raamopening. Verder onderzoek naar de invloed van de positie van een raamopening is dan ook vereist. Dit door dieper op de krachtswerking in te gaan en door een aantal nieuwe experimentele testen uit te voeren. Zo is er altijd een zekere spreiding op de experimentele resultaten en kan het zijn dat hierdoor de invloed van de positie van de raamopening niet zichtbaar is.

De gemiddelde experimentele sterkte van de plaat-houtverbinding werd gebruikt voor de berekeningen. Deze sterkte werd vergeleken met de sterkte bekomen volgens de rekenregels opgenomen in Eurocode 5 (NBN EN 1995-1-1). De experimentele sterkte van de plaat-houtverbinding lag 20% tot 28% hoger dan de berekende sterkte. De rekenregels opgenomen in Eurocode 5 onderschatten dus de werkelijke sterkte van de plaat-houtverbinding.

De invloed van raam- en deuropeningen werd ingerekend aan de hand van een methode die gebruik maakt van de paneelratio. De combinatie van de methode waarbij de paneelratio wordt berekend en het rekenmodel ontwikkeld door De Proft geeft een goede voorspelling van de schrankweerstand van een wand met openingen. De ratio's tussen de experimentele resultaten en de resultaten bekomen door de combinatie liggen tussen 0,85 en 1,23. Een methode om raam- en deuropeningen bij gedeeltelijk verankerde wanden in rekening te brengen is dus gevonden.



## 9 **Bronnen**

[EC5] European Committee for Standardization (CEN). 2006. Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1-1-General-Common rules and rules for buildings – EN 19951-1-1: 2006, CEN Brussels.

[1] De Proft, K. (2013). Stabiliteit van houten constructies: uitwerken van type-oplossingen. Anderlecht: Technisch Centrum der Houtnijverheid.

[2] Vessby, J. (2008). Shear walls for multi-storey timber buildings. Licentiate thesis, School of Technology and Design, Växjö University, Sweden: 2008.

[3] Vessby, J. (2011). Analysis of shear walls for multi-storey timber buildings. Linnaeus University Dissertations No 45/2011. Linnaeus University Press, Växjö.

[4] Van den Bossche, T. (2009). Krachten inwerkend op houtskeletgebouwen. Splinter. SEC bvba.

[5] Hoekstra, T. (2012). Multi-storey timber-frame building: Modelling the racking stiffness of timber-frame shear-walls. MSc Thesis. TUDelft.

[6] BSI Standard Publication. (2012). Recommendations for the design of timber structures to Eurocode 5: Design of timber structures. Part1: General – Common rules and rules for buildings.

[7] Källsner, B., Girhammar, U.A., (2009). Plastic models for analysis of fully anchored light-frame timber shear walls. Engineering Structures.

[8] Källsner, B. Girhammar, U.A., (2009). Elasto-plastic model for analysis of influence of imperfection on stiffness of fully anchored light-frame timber shear walls. Engineering Structures.

[9] Payeur, M., Salenikovich, A., Muñoz. W., Influence of vertical loads in lateral resistance and deflections of light-frame shear walls. In: Proceedings CIB-W18, Alghero, Italy, 2011.

[10] Sugiyama, H., Yasamura, M., (1984). Shear Properties of Plywood Sheathed Wall Panels with Openings. Trans. Of A.I.J., No. 338. Japan

[11] NAHB Research Center. (2001). Wood Shear Walls with Corners. Prepared for the U.S. Department of Housing and Urban Development and The National Association of Home Builders by the NAHB Research Center, Inc., Upper Marlboro MD.

[12] Douglas, B.K., Sugiyama, H. (2001). Perforated Shearwall Design Approach. American Forest & Paper Association.

[13] Dujic, B., Klobcar, S., Zarnic, R. (2007). Influence of Openings on Shear Capacity of Massive Cross-Laminated Wooden Walls. Slovenia.

- [14] Sugiyama, H., Matsumoto, T. (1994). Empirical equations for the estimation of racking strength of a plywood shear wall with openings. Summary of Technical Papers, Annual Meetings, Trans of A.I.J. Japan.
- [15] Sugiyama, H., Matsumoto, T. (1994). A simplified method for calculating the shear strength of a plywood-sheathed shear wall with openings. Mokuzai Gakkaishi, Vol. 40, No.3.
- [16] Wakatsuki, S. (1981). Bachelor Thesis at the University of Tokyo.
- [17] Uchida, J. (1982). Bachelor Thesis at the University of Tokyo.
- [18] Minutes of the AF&PA Subcommittee on Conventional Construction's Perforated Shear wall Task Group meeting. (1994).
- [19] Dolan, J., Johnson, A. (1996). Cyclic and Monotonic Tests of Long Shear Walls with Openings. Prepared for the American Forest & Paper Association by Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- [20] Dolan, J., Heine, C. (1997). Monotonic Tests of Wood Frame Shear Walls with Various Openings and Base Restraints Configurations. Prepared for the NAHB Research Center, Inc. by Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- [21] Dolan, J., Heine, C. (1997). Sequential Phased Displacement Cyclic Tests of Wood Frame Shear Walls with Various Openings and Base Restraint Configurations. Prepared for the NAHB Research Center, Inc. by Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- [22] Yasamura, M. (2010). Racking resistance of panel-sheathed shear walls with opening. Department of Environment and Forest Resources Science, Shizuoka University. Japan.
- [23] Influence of openings on horizontal load-carrying capacity of timber-frame walls elements with fibre-plaster sheathing boards. (2011). Advances in Engineering Software.
- [24] Källsner, B., Girhammar, U.A. Tests on Partially Anchored Wood-Framed Shear Walls.
- [25] Vesbby, J., Källsner, B., Girhammar, U.A. Influence of contact stress between sheets on strength and stiffness of timber frame shear walls. WCTE 2010.
- [26] Girhammar, U.A., Bovim, N.I., Källsner, B. (2004). Characteristics of sheathing-to-timber joints in wood shear walls. WCTE. Finland.
- [27] Bureau voor normalisatie. (2011). NBN EN 594. Houtconstructies – Beproevingmethoden – Beproeving op stijfheid en windweerstand van houtskeletwanden. Brussel.
- [28] Bureau voor normalisatie. (2009). NBN EN 338. Hout voor dragende toepassingen – Sterkteklassen. Brussel.

- [29] Spano: Wood Based Solutions.  
<http://www.spanogroup.be/productdetails.aspx?con=189>, Naturspan-HS.
- [30] Bureau voor normalisatie. (2009). NBN EN 312. Spaanplaat - Specificaties. Brussel.
- [31] Bureau voor normalisatie. (2001). NBN 12369-1. Houtachtige platen – Kenmerkende waarden voor berekening en ontwerp van timmerwerk – Deel 1: OSB, spaanplaten en vezelplaten. Brussel.
- [31] Källsner, B. & Girhammar, U.A., (2008). Horizontalstabilisering av träregelstommar: Plastisk dimensionering av väggar med träbaserade skivor. Stockholm: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- [32] Källsner, B. & Girhammar, U.A. (2006). A plastic design method for incompletely anchored wood-framed wall diaphragms. In: Proceedings of 9th World Conference on Timber Engineering.
- [33] Bureau voor normalisatie. (1991). NBN EN 1381. Timmerwerk – Beproevingwijzen – Dragende geniete verbindingen. Brussel.
- [34] Bureau voor normalisatie. (1992). NBN ISO 6891. Houten draagsystemen – Verbindingen gemaakt met mechanische bevestigingsmiddelen – Algemene beginselen voor het bepalen van sterkte- en vervormingskenmerken (EN 26891).
- [35] Bureau voor normalisatie. (1992). NBN EN 14358. Houtconstructies: Berekening van de 5-percentielwaarden en aanvaardingscriteria voor een steekproef. Brussel.
- [36] Salenikov, A.J., (2000). The Racking Performance of Light-Frame Shear Walls.



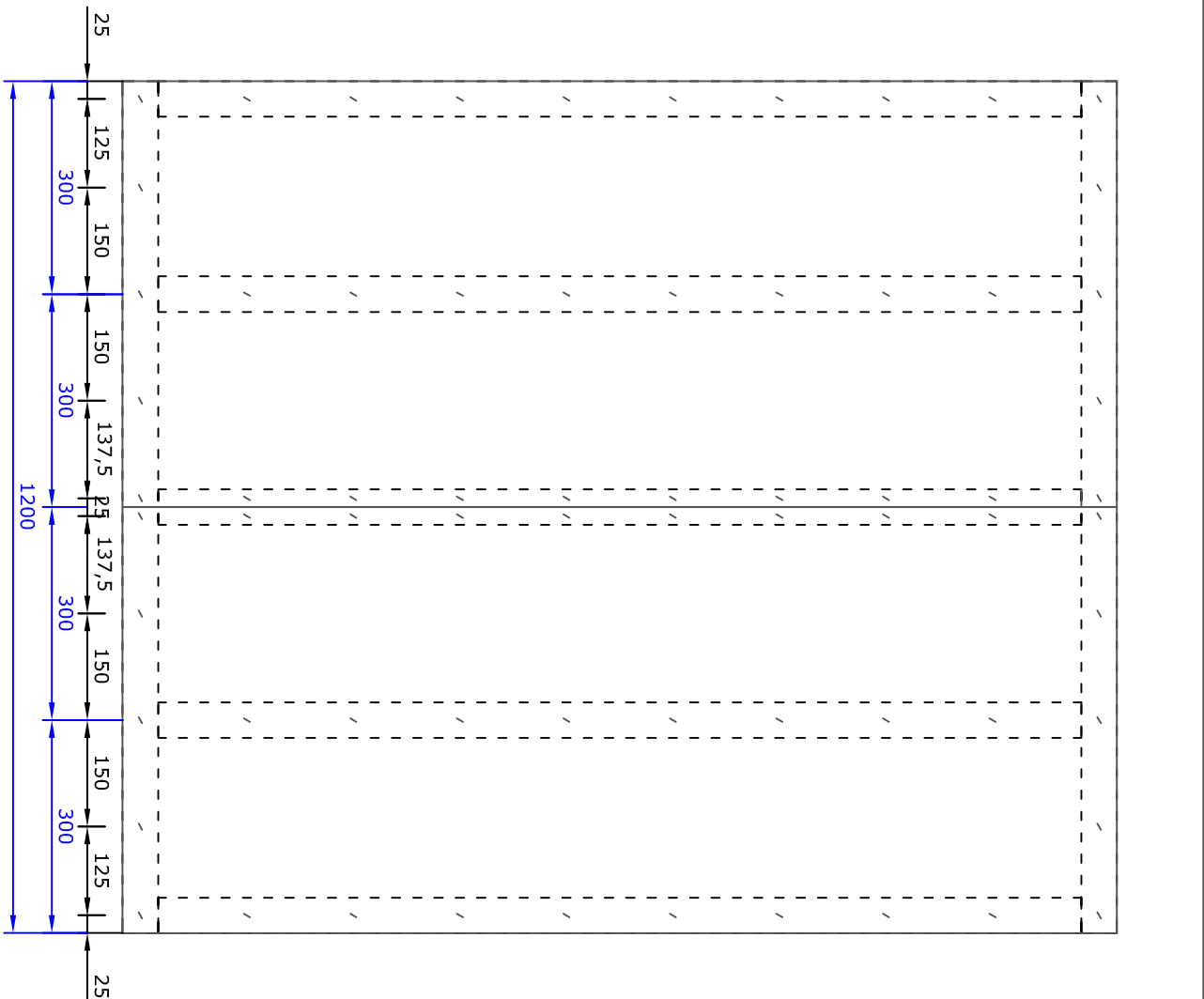
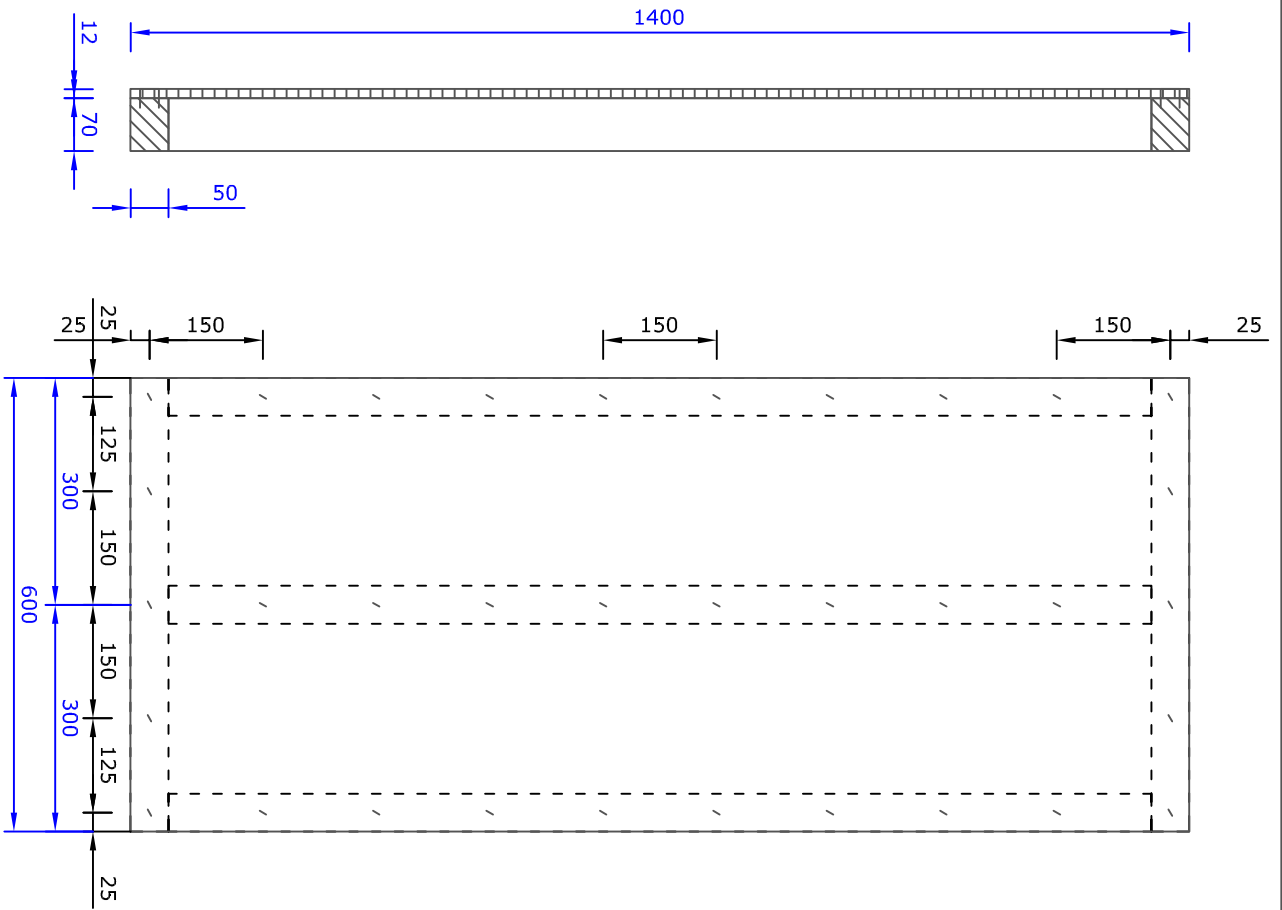
## **10 Bijlage**

10	Bijlage .....	131
	Bijlage A: Afmetingen wanden testprogramma .....	131
	Bijlage B: Berekeningen volgens Källsner en Girhammar.....	142
	Bijlage C: Gedetailleerde berekeningen volgens De Proft .....	150
	Bijlage D: Vereenvoudigde berekeningen volgens De Proft .....	153

### **Bijlage A: Afmetingen wanden testprogramma**

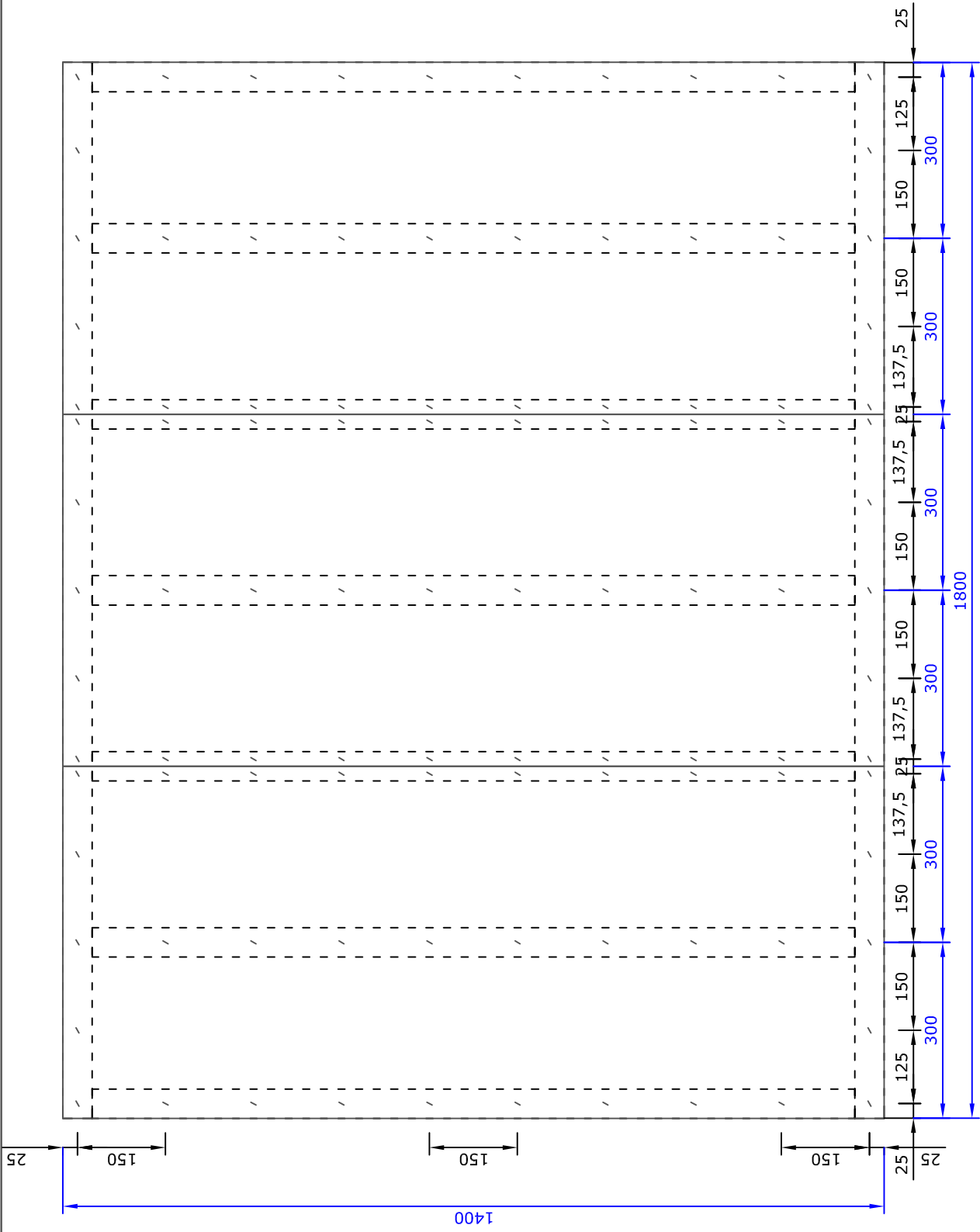
Overzicht:

- ST1 & ST2
- ST3, ST3-V
- 3DM, 3DM-V
- 3RM, 3RM-V
- 3DL
- 3RL
- ST4
- 4D
- 4R
- 4D+R



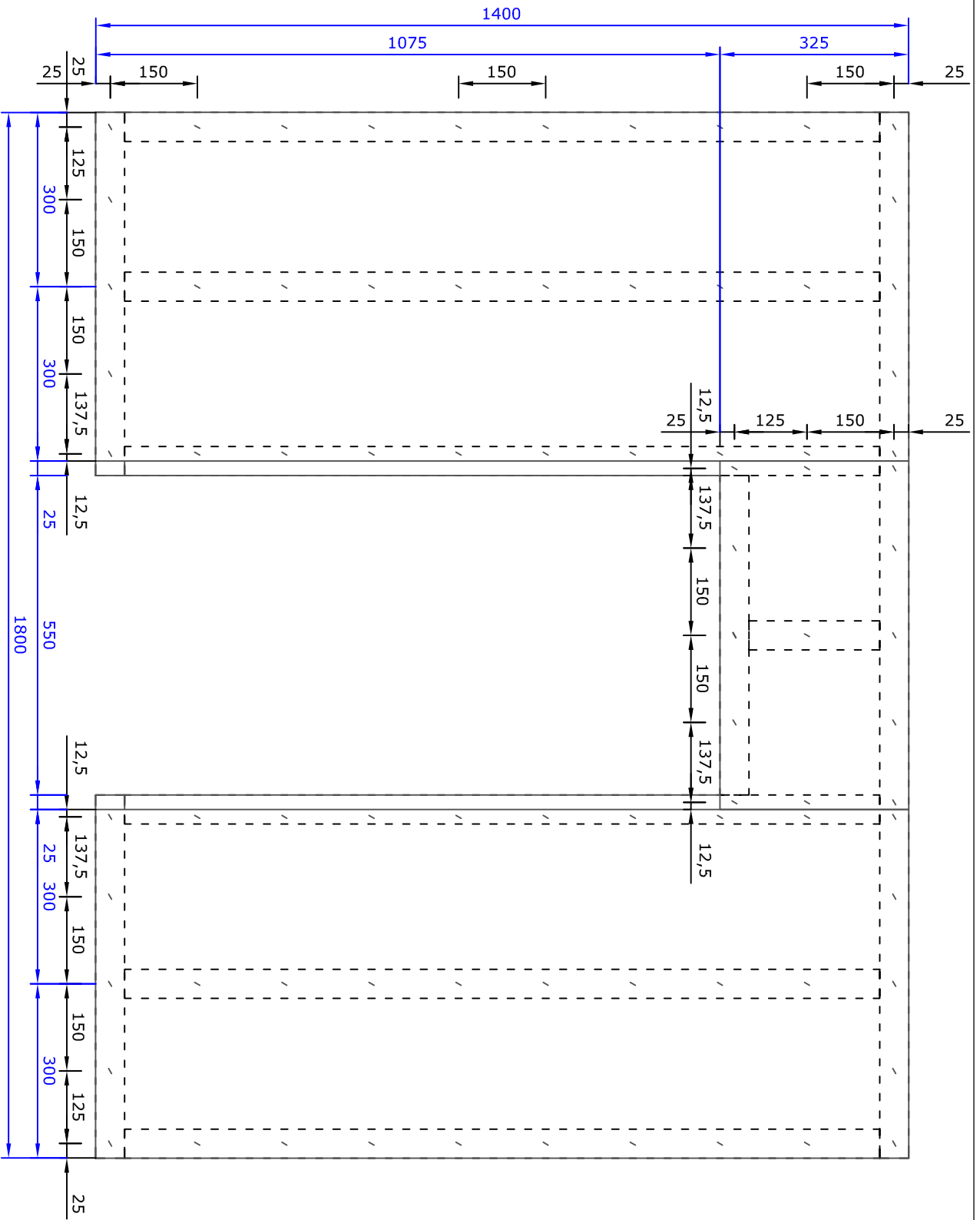
De nlieten worden onder een hoek van 30° met de houtvezelrichting aangebracht.

Schaal 1:10	ST1 & ST2	MA. BK.	16-01-2015
Maateneheid mm	UHasseit - CTIB-TCHN	Kenny Reweghs	A4



De nieten worden onder een hoek van 30° met de houtvezelrichting aangebracht.  
 Notatie V = voeg van 2 mm tussen de verschillende platen.

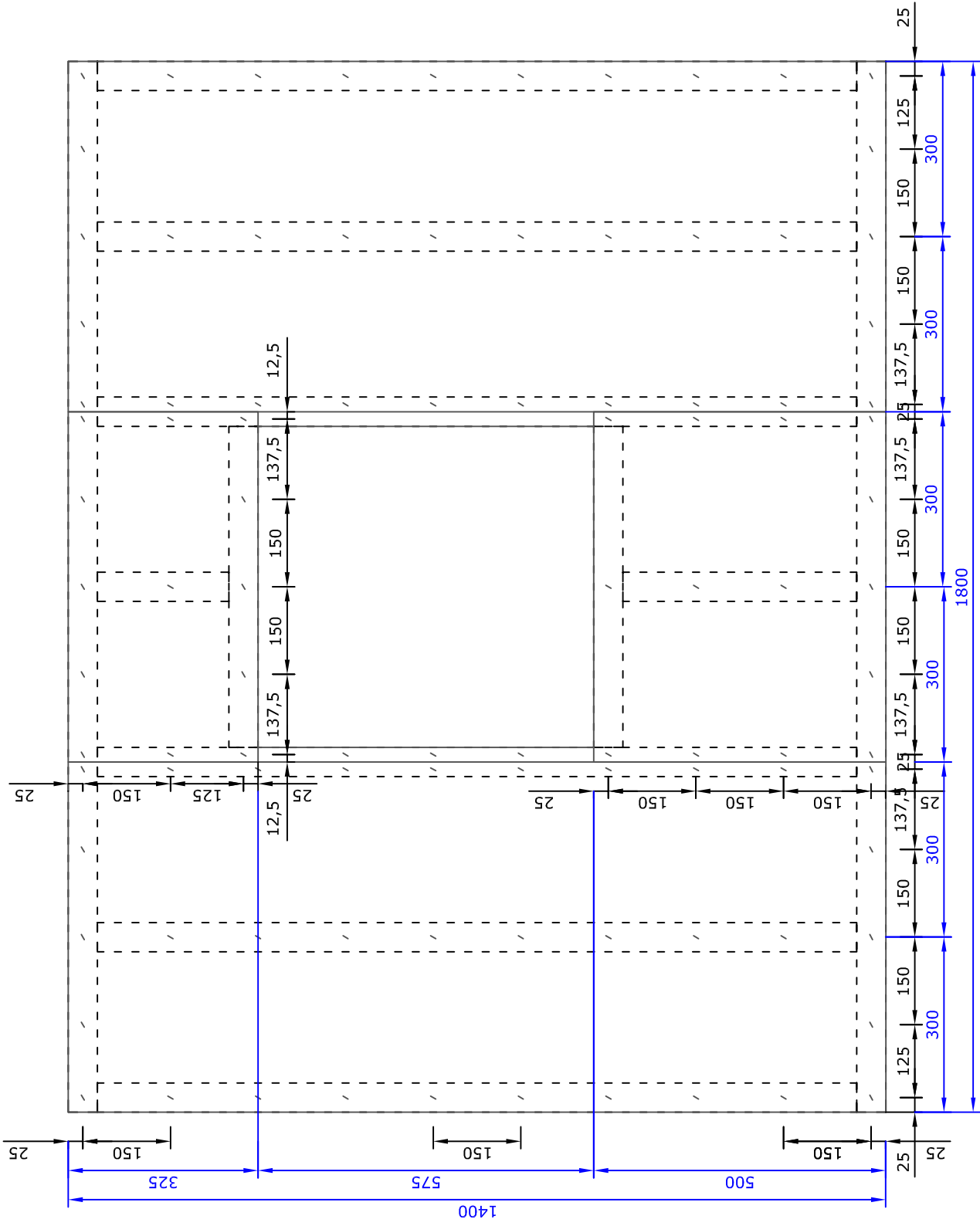
Schaal 1:10	ST3 , ST3-V	MA. BK.	16-01-2015
Maateenheid mm	UHasselt - CTIB-TCHN	Kenny Reweghs	A4



De nleten worden onder een hoek van 30° met de houtvezelrichting aangebracht.  
 Notatie V = voeg van 2 mm tussen de verschillende platen.

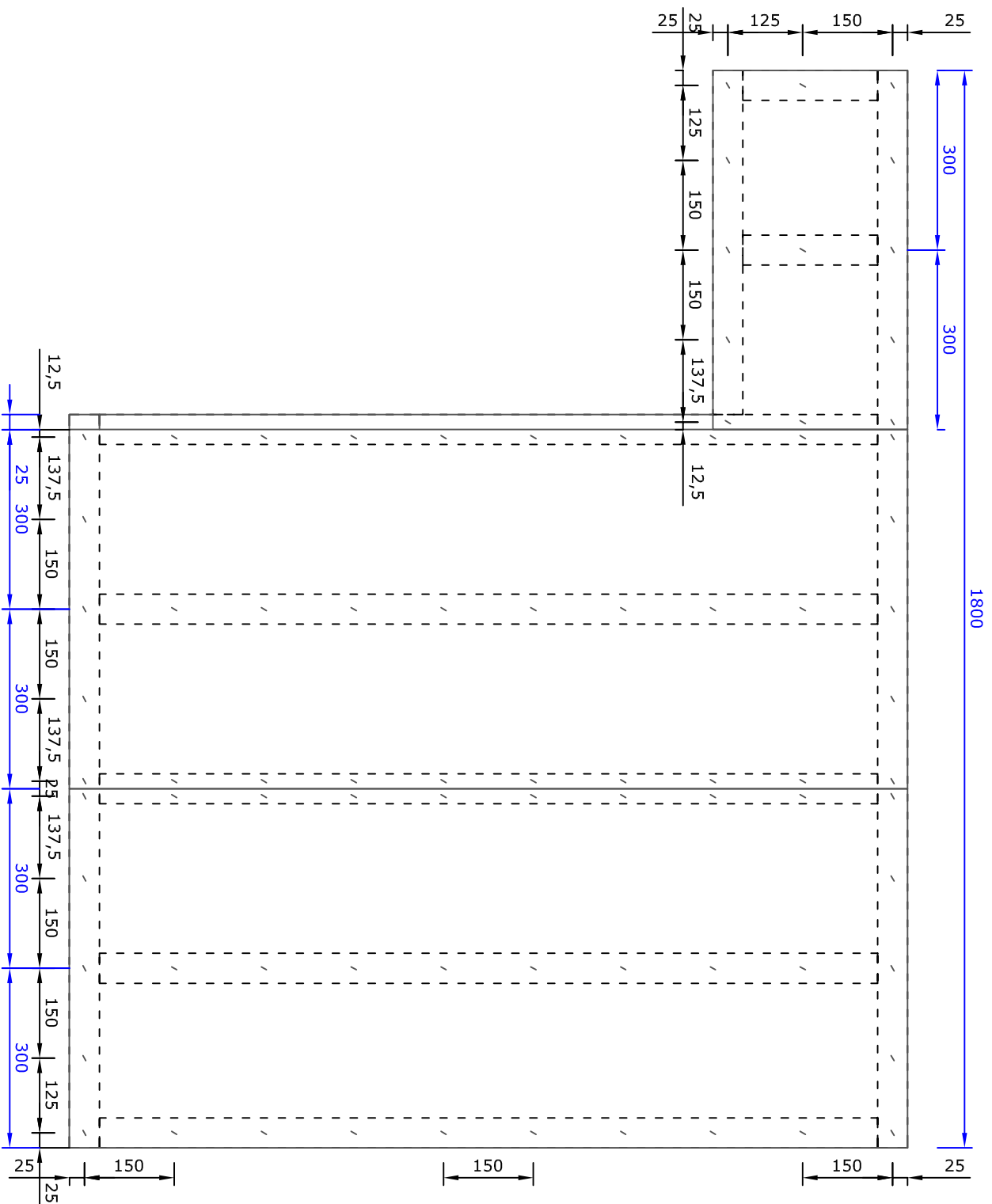
Schaal 1:10	3DM, 3DM-V	MA. BK.	16-01-2015
Maateenheid mm	UHasselt - CTIB-TCHN	Kenny Reweghs	A4





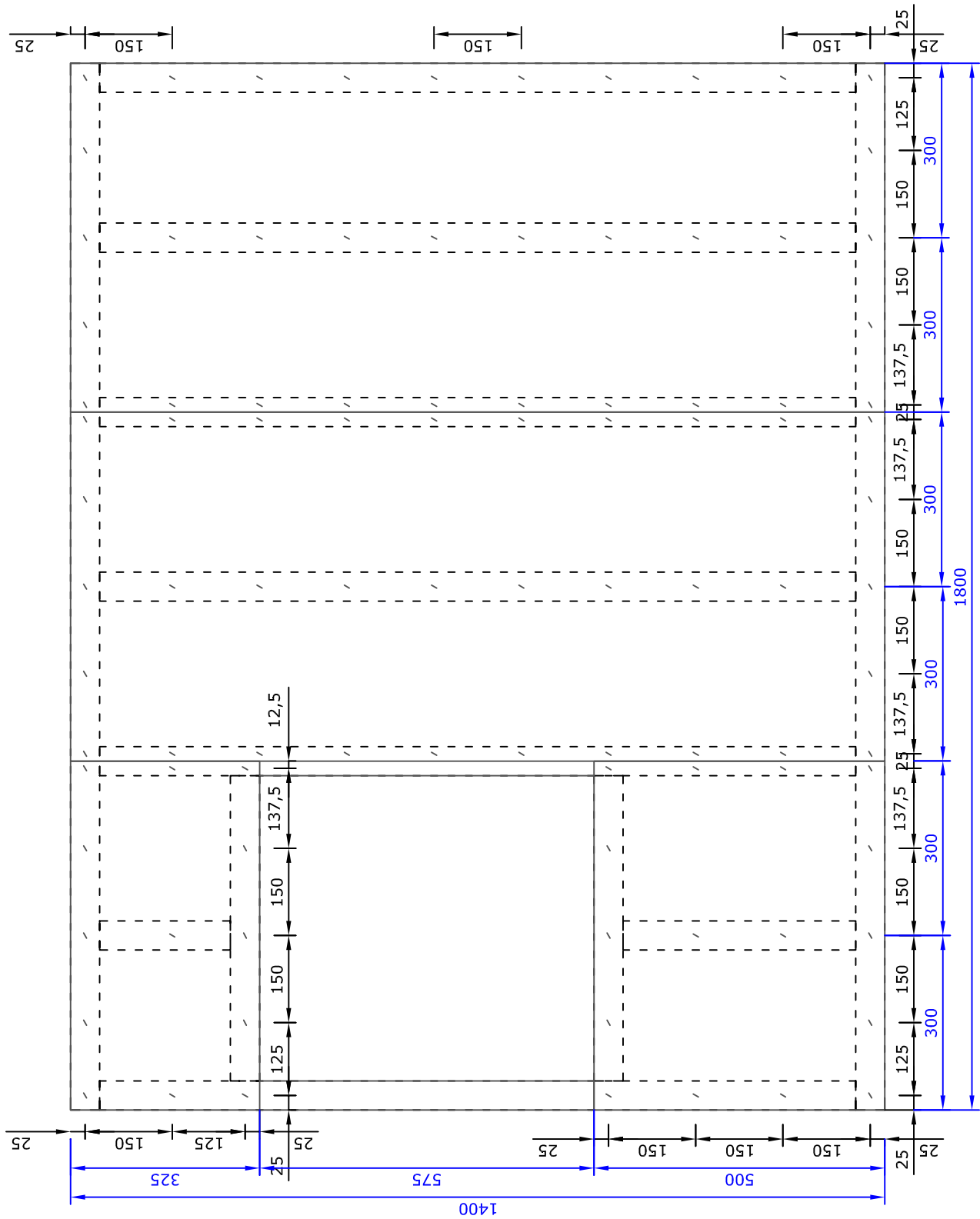
De nieten worden onder een hoek van 30° met de houtvezelrichting aangebracht.  
 Notatie V = voeg van 2 mm tussen de verschillende platen.

Schaal 1:10	3RM, 3RM-V	MA. BK.	16-01-2015
Maateenheid mm	UHasselt - CTIB-TCHN	Kenny Reweghs	A4



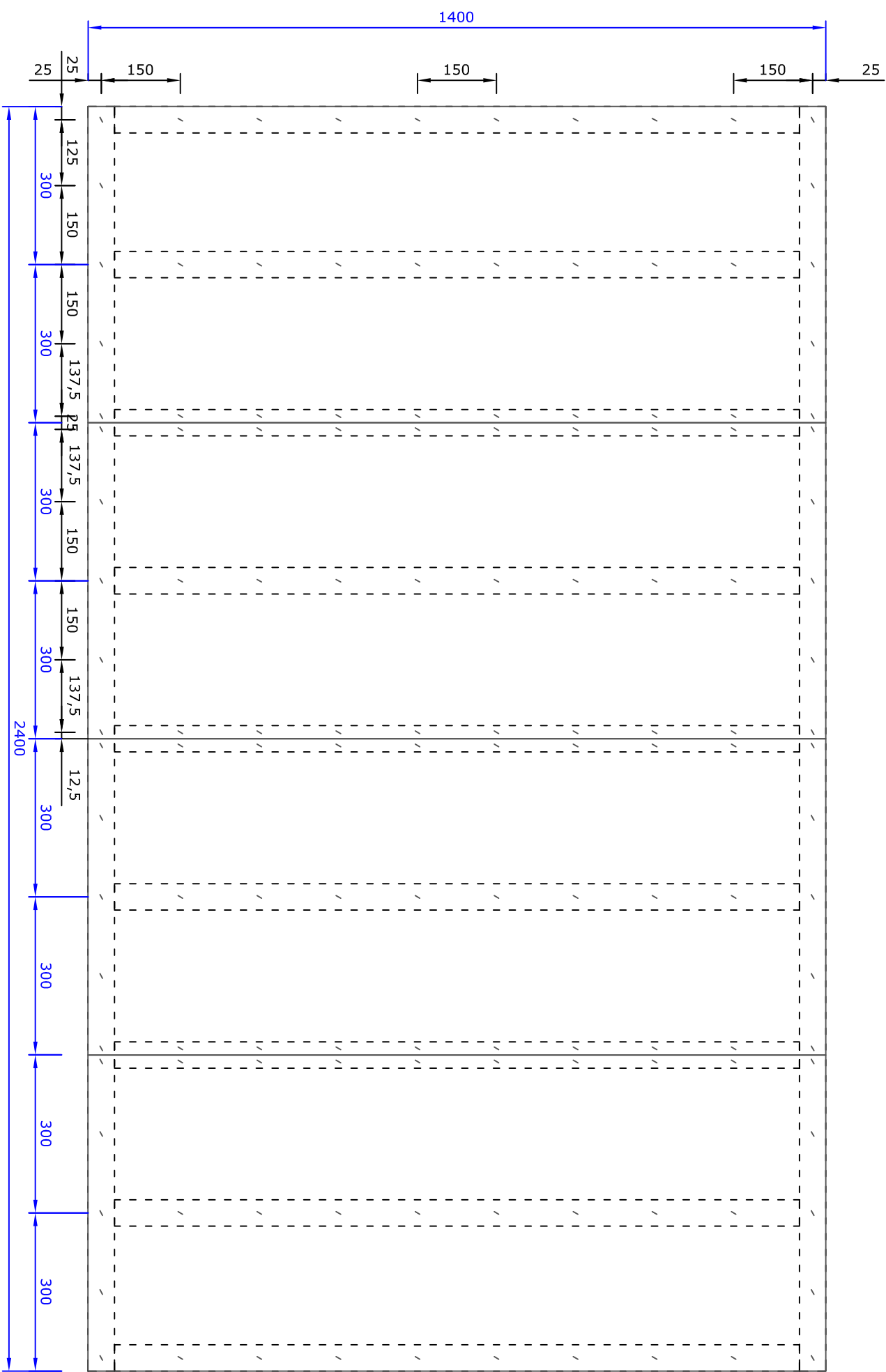
De nleten worden onder een hoek van 30° met de houtvezelrichting aangebracht.

Schaal 1:10	3DL	MA. BK.	16-01-2015
Maateenheid mm	UHasselt - CTIB-TCHN	Kenny Reweghs	A4



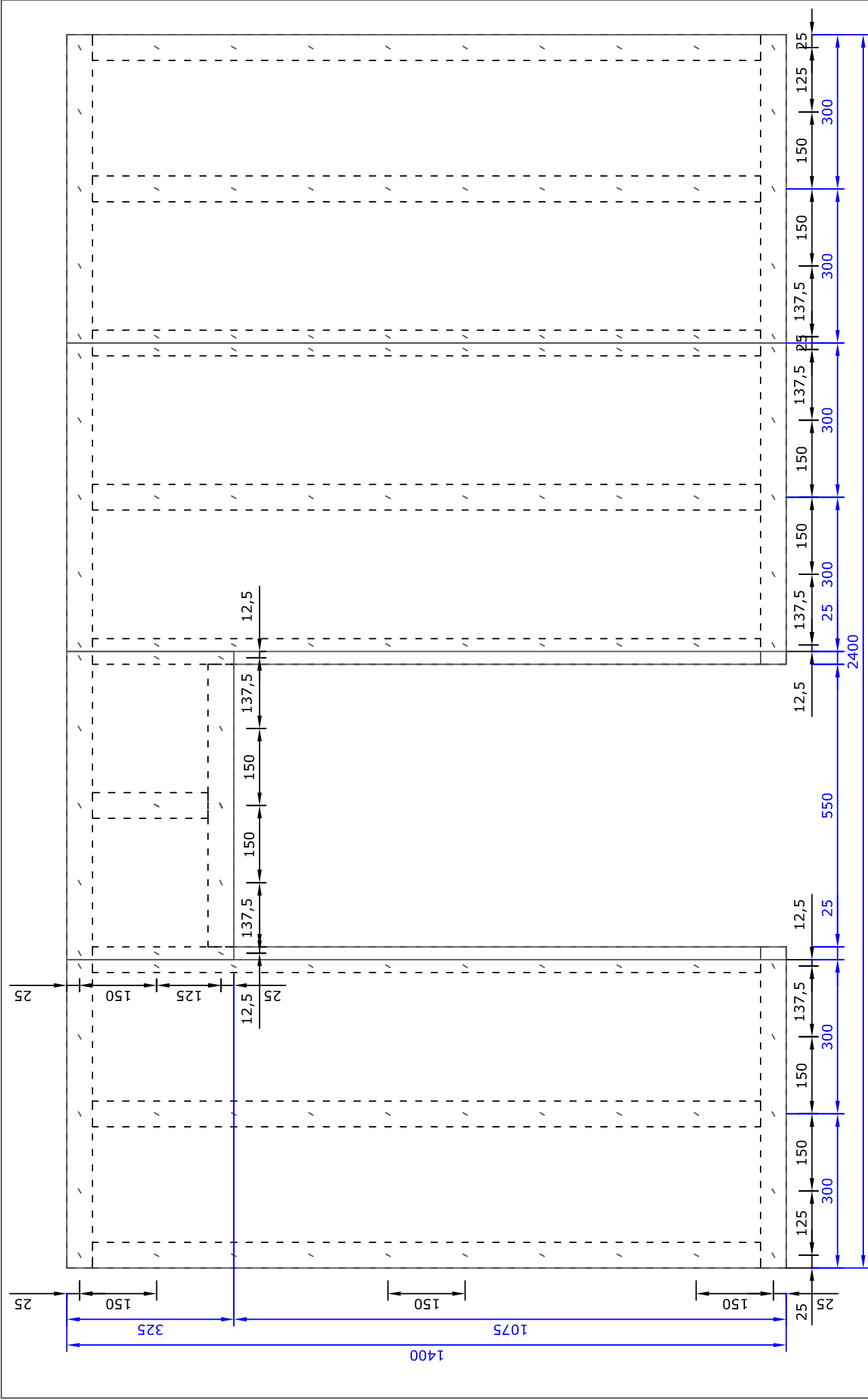
De nieten worden onder een hoek van 30° met de houtvezelrichting aangebracht.

Schaal 1:10	3RL	MA. BK.	16-01-2015
Maateenheid mm	UHasselt - CTIB-TCHN	Kenny Reweghs	A4



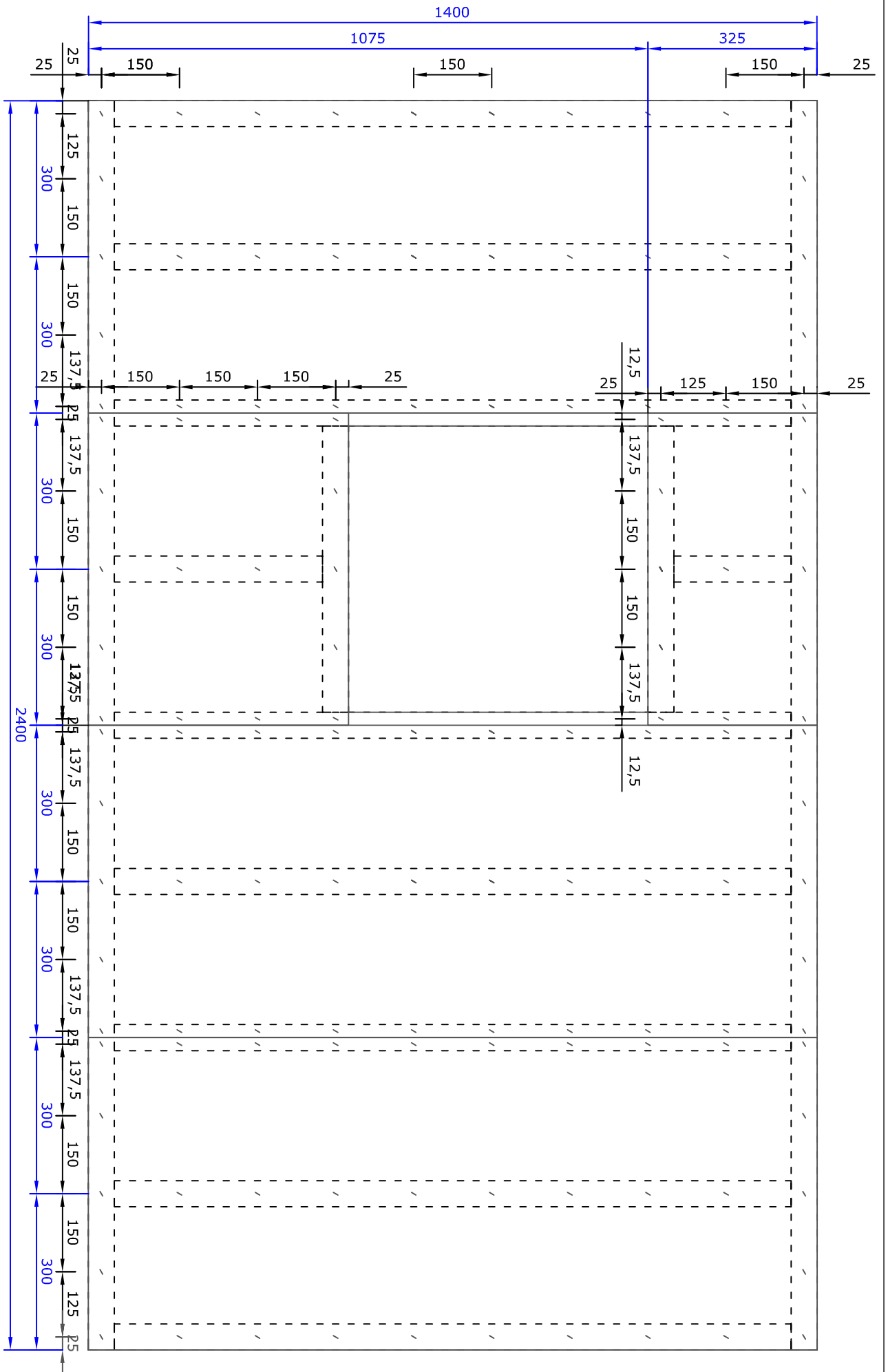
De nieten worden onder een hoek van 30° met de houtvezelrichting aangebracht.

Schaal 1:10	ST4	MA. BK.	16-01-2015
Maateneheid mm	UHasselt - CTIB-TCHN	Kenny Reweghs	A4



De nieten worden onder een hoek van 30° met de houtvezelrichting aangebracht.

Schaal 1:10	4D	MA. BK.	16-01-2015
Maateenheid mm	UHasselt - CTIB-TCHN	Kenny Reweghs	A4



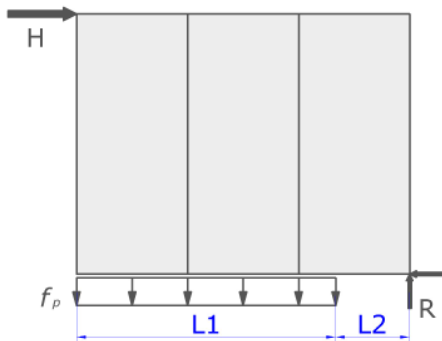
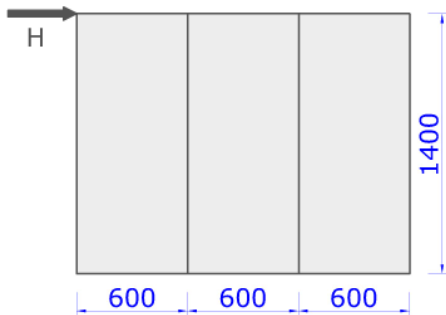
De nielen worden onder een hoek van 30° met de houtvezelrichting aangebracht.

Schaal 1:10	4R	MA. BK.	16-01-2015
Maateenheid mm		UHasselt - CTIB-TCHN	Kenny Reweghs
			A4

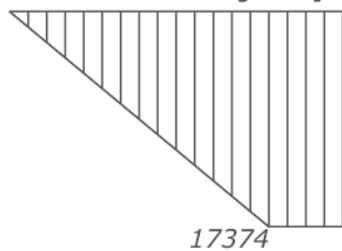


**Bijlage B: Berekeningen volgens Källsner en Girhammar**

**ST3, ST3-V**



Dwarskrachtendiagram [N]



De lengte  $l_1$  wordt bepaald aan de hand van de voorwaarde dat de plastische schuifcapaciteit  $f_p$  bereikt is in deze verticale sectie van de wand.

$$V_0 = f_p h = 12,41 \cdot 1400$$

$$= 17374 \text{ N}$$

$$l_1 = h \left( 1 - \frac{\sum_{i=0}^n V_i}{f_p h} \right) = 1400(1 - 0)$$

$$= 1400 \text{ mm}$$

$$l_2 = l - l_1 = 1800 - 1400$$

$$= 400 \text{ mm}$$

$$V_{ekv} = \sum_{i=0}^n \left( \frac{l_1 - x_i}{l_1} V_i \right) = 0 \text{ N}$$

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2$$

$$= \left( \frac{1400}{2 \cdot 1400} + 0 \right) 1400 + 400$$

$$= 1100 \text{ mm}$$

$$H = f_p l_{eff} = 12,41 \cdot 1100$$

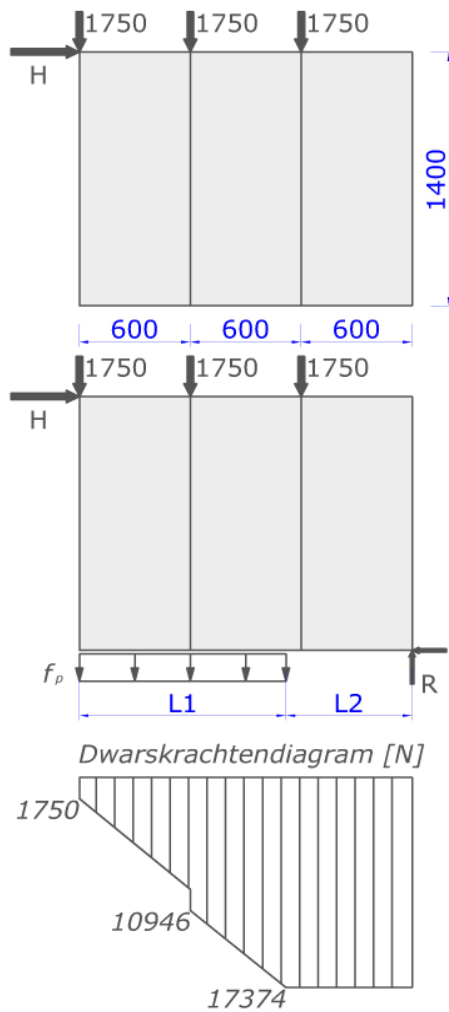
$$= 13651 \text{ N}$$

$$R_6 = V_6 + f_p h = 0 + 12,41 \cdot 1400$$

$$= 17374 \text{ N}$$



**ST3-B, ST3-V-B**



$$l_1 = h \left( 1 - \frac{\sum_{i=0}^n V_i}{f_p h} \right)$$

$$= 1400 \left( 1 - \frac{1750 + 1750}{12,41 \cdot 1400} \right)$$

$$= 1118 \text{ mm}$$

$$l_2 = l - l_1 = 1800 - 1118$$

$$= 682 \text{ mm}$$

$$V_{ekv} = \sum_{i=0}^n \left( \frac{l_1 - x_i}{l_1} V_i \right)$$

$$= \left( \frac{1118 - 600}{1118} 1750 \right) + \left( \frac{1118}{1118} 1750 \right)$$

$$= 2651 \text{ N}$$

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2$$

$$= \left( \frac{1118}{2 \cdot 1400} + \frac{2658}{12,41 \cdot 1400} \right) 1118 + 682$$

$$= 1299 \text{ mm}$$

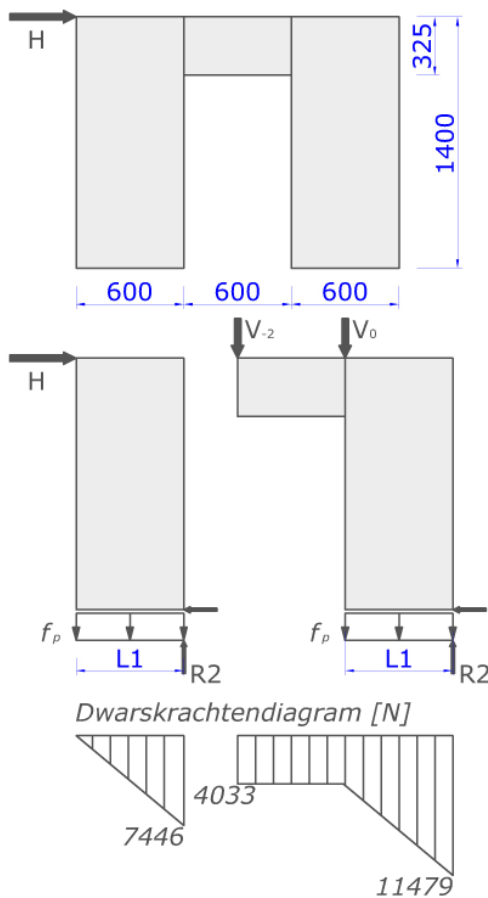
$$H = f_p l_{eff} = 12,41 \cdot 1299$$

$$= 16121 \text{ N}$$

$$R_6 = V_6 + f_p h = 0 + 12,41 \cdot 1400$$

$$= 17374 \text{ N}$$

### 3DM, 3DM-V



#### Deel 1

$$l_1 = h \left( 1 - \frac{\sum_{i=0}^n V_i}{f_p h} \right) = 1400(1 - 0)$$

$$= 1400 < 600 = 600 \text{ mm}$$

$$l_2 = l - l_1 = 600 - 600 = 0 \text{ mm}$$

$$V_{ekv} = \sum_{i=0}^n \left( \frac{l_1 - x_i}{l_1} V_i \right) = 0 \text{ N}$$

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2$$

$$= \left( \frac{600}{2 \cdot 1400} + 0 \right) 600 + 0$$

$$= 129 \text{ mm}$$

$$H_1 = f_p l_{eff} = 12,41 \cdot 129$$

$$= 1601 \text{ N}$$

$$R_2 = f_p l_1 + \sum_{i=0}^N V_i = 12,41 \cdot 600 + 0$$

$$= 7446 \text{ N}$$

#### Deel 2

$$V_{-2} = \min \left\{ \begin{array}{l} R_2 = 7446 \text{ N} \\ f_p h_{boven} = 12,41 \cdot 325 = 4033 \text{ N} \end{array} \right.$$

$$= 4033 \text{ N}$$

$$V_0 = 0 \text{ N}$$

$$l_1 = h \left( 1 - \frac{\sum_{i=-k}^n V_i}{f_p h} \right)$$

$$= 1400 \left( 1 - \frac{4033}{12,41 \cdot 1400} \right)$$

$$= 1075 < 600 = 600 \text{ mm}$$

$$l_2 = l - l_1 = 600 - 600 = 0 \text{ mm}$$

$$V_{ekv} = \sum_{i=-k}^n \left( \frac{l_1 - x_i}{l_1} V_i \right)$$

$$= \frac{600 - (-600)}{600} 4033 = 8066 \text{ N}$$

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2$$

$$= \left( \frac{600}{2 \cdot 1400} + \frac{8066}{12,41 \cdot 1400} \right) 600 + 0$$

$$= 407 \text{ mm}$$

$$H_2 = f_p l_{eff} = 12,41 \cdot 407$$

$$= 5051 \text{ N}$$

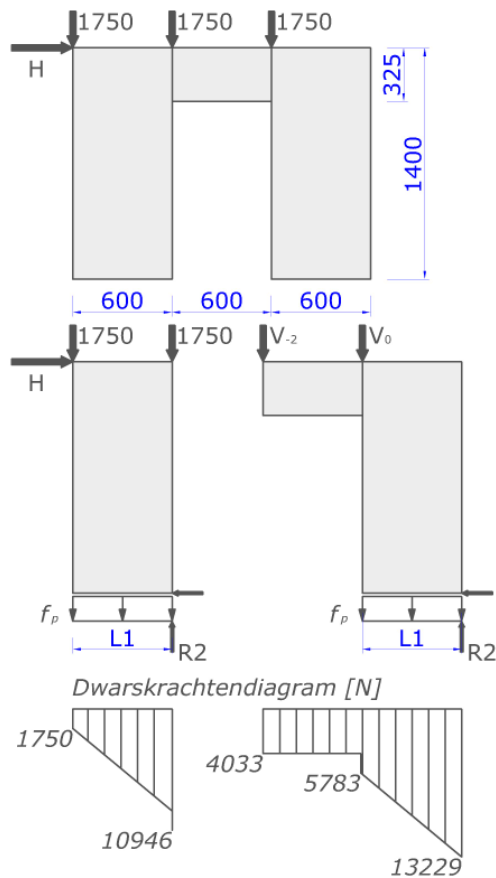
$$R_2 = f_p l_1 + \sum_{i=-k}^N V_i = 12,41 \cdot 600 + 4033$$

$$= 1479 \text{ N}$$

#### Totaal

$$H = H_1 + H_2 = 1601 + 5051 = \mathbf{6652 \text{ N}}$$

### 3DM-B



### Deel 1

$$l_1 = h \left( 1 - \frac{\sum_{i=0}^n V_i}{f_p h} \right)$$

$$= 1400 \left( 1 - \frac{1750 + 1750}{12,41 \cdot 1400} \right)$$

$$= 1118 < 600 = 600 \text{ mm}$$

$$l_2 = l - l_1 = 600 - 600 = 0 \text{ mm}$$

$$V_{ekv} = \sum_{i=0}^n \left( \frac{l_1 - x_i}{l_1} V_i \right)$$

$$= \left( \frac{600 - 0}{1118} 1750 \right) + \left( \frac{600 - 600}{1118} 1750 \right)$$

$$= 1750 \text{ N}$$

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2$$

$$= \left( \frac{600}{2 \cdot 1400} + \frac{1750}{12,41 \cdot 1401} \right) 600 + 0$$

$$= 189 \text{ mm}$$

$$H_1 = f_p l_{eff} = 12,41 \cdot 189$$

$$= 2345 \text{ N}$$

$$R_2 = f_p l_1 + \sum_{i=0}^N V_i = 12,41 \cdot 600 + 1750 + 1750$$

$$= 10946 \text{ N}$$

### Deel 2

$$V_{-2}$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} R_2 = 10946 \text{ N} \\ f_p h_{boven} = 12,41 \cdot 325 = 4033 \text{ N} \end{array} \right.$$

$$= 4033 \text{ N}$$

$$V_0 = 1750 \text{ N}$$

$$l_1 = h \left( 1 - \frac{\sum_{i=-k}^n V_i}{f_p h} \right)$$

$$= 1400 \left( 1 - \frac{4033 + 1750}{12,41 \cdot 1400} \right)$$

$$= 934 < 600 = 600 \text{ mm}$$

$$l_2 = l - l_1 = 600 - 600 = 0 \text{ mm}$$

$$V_{ekv} = \sum_{i=-k}^n \left( \frac{l_1 - x_i}{l_1} V_i \right)$$

$$= \frac{600 - (-600)}{600} 4033 + \frac{600 - 0}{600} 1750 = 9816 \text{ N}$$

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2$$

$$= \left( \frac{600}{2 \cdot 1400} + \frac{9816}{12,41 \cdot 1400} \right) 600 + 0$$

$$= 468 \text{ mm}$$

$$H_2 = f_p l_{eff} = 12,41 \cdot 468$$

$$= 5809 \text{ N}$$

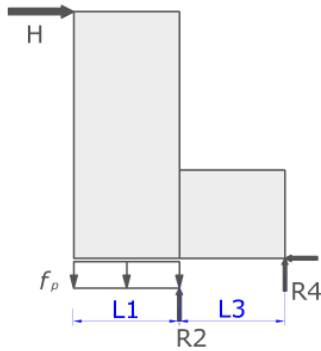
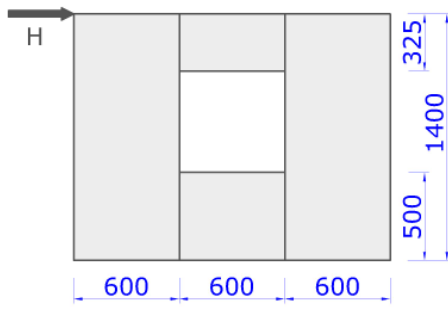
$$R_2 = f_p l_1 + \sum_{i=-k}^N V_i = 12,41 \cdot 600 + 4033 + 1750$$

$$= 13229 \text{ N}$$

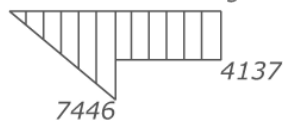
Totaal

$$H = H_1 + H_2 = 2345 + 5809 = \mathbf{8154 \text{ N}}$$

### 3RM



Dwarskrachtendiagram [N]



### Deel 1

$$l_1 = h \left( 1 - \frac{\sum_{i=0}^n V_i}{f_p h} \right) = 1400(1 - 0)$$

$$= 1400 < 600 = 600 \text{ mm}$$

$$l_2 = l - l_1 = 600 - 600 = 0 \text{ mm}$$

$$l_3 = 600 \text{ mm}$$

$$V_{ekv} = \sum_{i=0}^n \left( \frac{l_1 - x_i}{l_1} V_i \right) = 0 \text{ N}$$

$$\lambda_2 = \min \left\{ \frac{2h}{l_3(h - h_{onder})} \left[ \left( \frac{l_1}{2h} - \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2 \right], \frac{b_{vol}}{l_3} \right\}$$

$$= \min \left\{ \frac{2 \cdot 1400}{600(1400 - 500)} \left[ \left( \frac{600}{2 \cdot 1400} - 0 \right) 600 + 0 \right], \frac{600}{600} \right\}$$

$$= \frac{2}{3}$$

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2 + \frac{h_{onder}}{h} \lambda l_3$$

$$= \left( \frac{600}{2 \cdot 1400} + 0 \right) 600 + 0 + \frac{500}{1400} \frac{2}{3} 600$$

$$= 271 \text{ mm}$$

$$H_1 = f_p l_{eff} = 12,41 \cdot 271$$

$$= 3363 \text{ N}$$

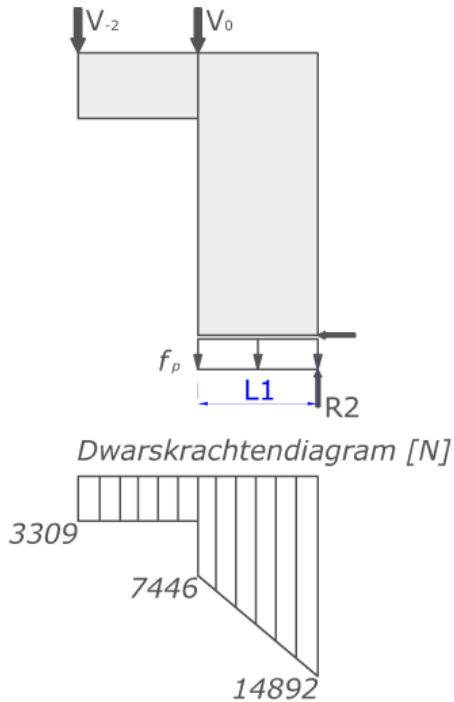
$$R_2 = f_p (l_1 - \lambda h_{onder}) + \sum_{i=0}^n V_i$$

$$= 12,41 \left( 600 - \frac{2}{3} 500 \right) + 0$$

$$= 3309 \text{ N}$$

$$R_4 = f_p \lambda h_{onder} = 12,41 \cdot \frac{2}{3} \cdot 500$$

$$= 4137 \text{ N}$$



Deel 2

$$V_{-2} = \min \left\{ \begin{array}{l} R_2 = 3309 \text{ N} \\ f_p h_{boven} = 12,41 \cdot 325 = 4033 \text{ N} \end{array} \right.$$

$$= 3309 \text{ N}$$

$$V_0 = 4137 \text{ N}$$

$$l_1 = h \left( 1 - \frac{\sum_{i=-k}^n V_i}{f_p h} \right)$$

$$= 1400 \left( 1 - \frac{3309 + 4137}{12,41 \cdot 1400} \right)$$

$$= 800 < 600 = 600 \text{ mm}$$

$$l_2 = l - l_1 = 600 - 600 = 0 \text{ mm}$$

$$V_{ekv} = \sum_{i=-k}^n \left( \frac{l_1 - x_i}{l_1} V_i \right)$$

$$= \frac{600 - (-600)}{600} 3309 + \frac{600 - 0}{600} 4137$$

$$= 10755 \text{ N}$$

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2$$

$$= \left( \frac{600}{2 \cdot 1400} + \frac{10755}{12,41 \cdot 1400} \right) 600 + 0$$

$$= 500 \text{ mm}$$

$$H_2 = f_p l_{eff} = 12,41 \cdot 500$$

$$= 6205 \text{ N}$$

$$R_2 = f_p l_1 + \sum_{i=-k}^n V_i$$

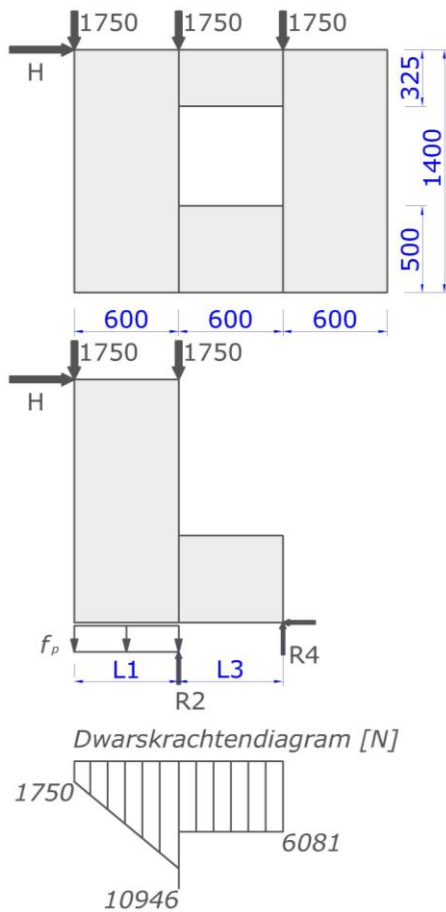
$$R_2 = 12,41 \cdot 600 + 3309 + 4137$$

$$= 14892 \text{ N}$$

Totaal

$$H = H_1 + H_2 = 3363 + 6205 = \mathbf{9568 \text{ N}}$$

### 3RM-B



### Deel 1

$$l_1 = h \left( 1 - \frac{\sum_{i=0}^n V_i}{f_p h} \right)$$

$$= 1400 \left( 1 - \frac{1750 + 1750}{12,41 \cdot 1400} \right)$$

$$= 1118 < 600 = 600 \text{ mm}$$

$$l_2 = l - l_1 = 600 - 600 = 0 \text{ mm}$$

$$V_{ekv} = \sum_{i=0}^n \left( \frac{l_1 - x_i}{l_1} V_i \right)$$

$$= \left( \frac{600 - 0}{1118} 1750 \right) + \left( \frac{600 - 600}{1118} 1750 \right)$$

$$= 1750 \text{ N}$$

$$\lambda_2 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2h}{l_3(h - h_{onder})} \left[ \left( \frac{l_1}{2h} - \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2 \right] \\ \frac{b_{vol}}{l_3} \end{array} \right.$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2 \cdot 1400}{600(1400 - 500)} \\ \left[ \left( \frac{600}{2 \cdot 1400} - \frac{1750}{12,41 \cdot 1400} \right) 600 + 0 \right] \\ \frac{600}{600} \end{array} \right.$$

$$= 0,98$$

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2 + \frac{h_{onder}}{h} \lambda l_3$$

$$= \left( \frac{600}{2 \cdot 1400} + \frac{1750}{12,41 \cdot 1400} \right) 600 + 0 + \frac{500}{1400} 0,98$$

$$= 399 \text{ mm}$$

$$H_1 = f_p l_{eff} = 12,41 \cdot 399$$

$$= 4952 \text{ N}$$

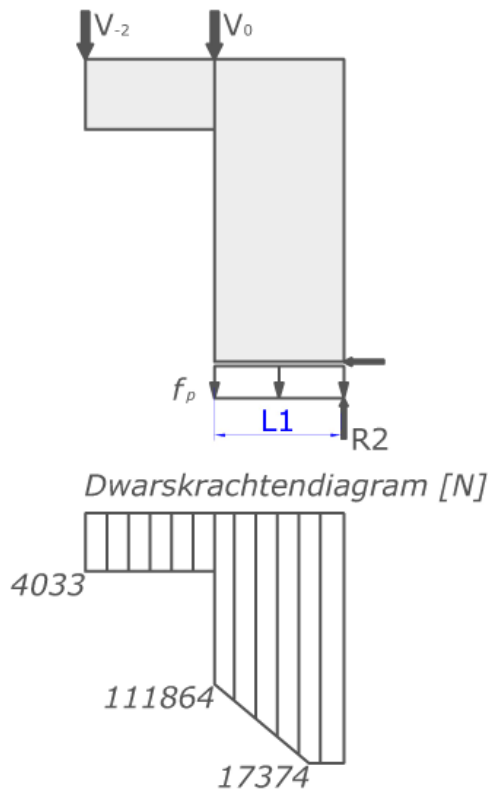
$$R_2 = f_p (l_1 - \lambda h_{onder}) + \sum_{i=0}^N V_i$$

$$= 12,41(600 - 0,98 \cdot 500) + 1750 + 1750$$

$$= 4865 \text{ N}$$

$$R_4 = f_p \lambda h_{onder} = 12,41 \cdot 0,98 \cdot 500$$

$$= 6081 \text{ N}$$



## Deel 2

$$V_{-2} = \min \begin{cases} R_2 = 4865 \text{ N} \\ f_p h_{boven} = 12,41 \cdot 325 = 4033 \text{ N} \end{cases}$$

$$= 4033 \text{ N}$$

$$V_0 = R_4 + V = 6081 + 1750$$

$$= 7831 \text{ N}$$

$$l_1 = h \left( 1 - \frac{\sum_{i=-k}^n V_i}{f_p h} \right)$$

$$= 1400 \left( 1 - \frac{4033 + 7831}{12,41 \cdot 1400} \right)$$

$$= 444 \text{ mm}$$

$$l_2 = l - l_1 = 600 - 444 = 156 \text{ mm}$$

$$V_{ekv} = \sum_{i=-k}^n \left( \frac{l_1 - x_i}{l_1} V_i \right)$$

$$= \frac{444 - (-600)}{444} 4033 + \frac{444 - 0}{444} 7831$$

$$= 17314 \text{ N}$$

$$l_{eff} = \left( \frac{l_1}{2h} + \frac{V_{ekv}}{f_p h} \right) l_1 + l_2$$

$$= \left( \frac{444}{2 \cdot 1400} + \frac{17314}{12,41 \cdot 1400} \right) 444 + 156$$

$$= 669 \text{ mm} < 444 + 156$$

$$= 600 \text{ mm}$$

$$H_2 = f_p l_{eff} = 12,41 \cdot 600$$

$$= 7446 \text{ N}$$

$$R_2 = V_2 + f_p h = 0 + 12,41 \cdot 600$$

$$= 17374 \text{ N}$$

## Totaal

$$H = H_1 + H_2 = 4952 + 7446 = \mathbf{12398 \text{ N}}$$

### **Bijlage C: Gedetailleerde berekeningen volgens De Proft**

Tabel 30: Schrankweerstand volle wanden zonder verticale belasting volgens De Proft.

Schrangweerstand: ST1, ST2, ST3, ST3-V, ST4			
vmax (N/mm)		12,41	
h (mm)		1400	
b paneel (mm)		600	
Paneel 1		Paneel 2	
u links (N/mm)	0,00	u links (N/mm)	5,20
P boven (N)	0,00	P boven (N)	0,00
u boven (N/mm)	0,00	u boven (N/mm)	0,00
u links,tot (N/mm)	0,00	u links,tot (N/mm)	5,20
Kracht t.g.v. gedeeltelijke verankering		Kracht t.g.v. gedeeltelijke verankering	
v1 (N/mm)	0,00	v1 (N/mm)	5,20
Overblijvend deel niet-verankerd		Overblijvend deel niet-verankerd	
v2 (N/mm)	2,60	v2 (N/mm)	2,14
u onder (N/mm)	12,13	u onder (N/mm)	10,00
u rechts (N/mm)	5,20	u rechts (N/mm)	9,49
Vloei in rechter deel?		Vloei in rechter deel?	
Vloei	nee	Vloei	nee
Indien ja		Indien ja	
u rechts (N/mm)	12,41	u rechts (N/mm)	12,41
u onder (N/mm)	28,96	u onder (N/mm)	16,82
v2 (N/mm)	6,21	v2 (N/mm)	3,60
<b>v (N/mm)</b>	<b>2,60</b>	<b>v (N/mm)</b>	<b>7,34</b>
<b>Hmax (N)</b>	<b>1560</b>	<b>Hmax (N)</b>	<b>5967</b>
Paneel 3		Paneel 4	
u links (N/mm)	9,49	u links (N/mm)	12,11
P boven (N)	0,00	P boven (N)	0,00
u boven (N/mm)	0,00	u boven (N/mm)	0,00
u links,tot (N/mm)	9,49	u links,tot (N/mm)	12,11
Kracht t.g.v. gedeeltelijke verankering		Kracht t.g.v. gedeeltelijke verankering	
v1 (N/mm)	9,49	v1 (N/mm)	12,11
Overblijvend deel niet-verankerd		Overblijvend deel niet-verankerd	
v2 (N/mm)	1,31	v2 (N/mm)	0,25
u onder (N/mm)	6,12	u onder (N/mm)	1,15
u rechts (N/mm)	12,11	u rechts (N/mm)	12,60
Vloei in rechter deel?		Vloei in rechter deel?	
Vloei	nee	Vloei	ja
Indien ja		Indien ja	
u rechts (N/mm)	12,41	u rechts (N/mm)	12,41
u onder (N/mm)	6,82	u onder (N/mm)	0,70
v2 (N/mm)	1,46	v2 (N/mm)	0,15
<b>v (N/mm)</b>	<b>10,80</b>	<b>v (N/mm)</b>	<b>12,26</b>
<b>Hmax (N)</b>	<b>12446</b>	<b>Hmax (N)</b>	<b>19801</b>



Tabel 31: Schrankweerstand volle wanden met verticale belasting volgens De Proft.

Schrankweerstand: ST3-B, ST3-V-B			
vmax (N/mm)		12,41	
h (mm)		1400	
b paneel (mm)		600	
P (N)		1750	
Paneel 1		Paneel 2	
u links (N/mm)	0,00	u links (N/mm)	6,32
P boven (N)	1750,00	P boven (N)	1750,00
u links,tot (N/mm)	1,25	u links,tot (N/mm)	7,57
Kracht t.g.v. ged. verankering		Kracht t.g.v. ged. verankering	
v1 (N/mm)	1,25	v1 (N/mm)	7,57
Overblijvend deel niet-verankerd		Overblijvend deel niet-verankerd	
v2 (N/mm)	2,53	v2 (N/mm)	1,76
u onder (N/mm)	11,82	u onder (N/mm)	8,19
u rechts (N/mm)	6,32	u rechts (N/mm)	11,08
Vloei in rechter deel?		Vloei in rechter deel?	
Vloei	nee	Vloei	nee
Indien ja		Indien ja	
u rechts (N/mm)	12,41	u rechts (N/mm)	12,41
u onder (N/mm)	26,04	u onder (N/mm)	11,30
v2 (N/mm)	5,58	v2 (N/mm)	2,42
v (N/mm)	3,78	v (N/mm)	9,32
Hmax (N)	2270	Hmax (N)	7862
Paneel 3			
u links (N/mm)	11,08		
P boven (N)	1750,00		
u links,tot (N/mm)	12,33		
Kracht t.g.v. ged. verankering			
v1 (N/mm)	12,33		
Overblijvend deel niet-verankerd			
v2 (N/mm)	0,08		
u onder (N/mm)	0,36		
u rechts (N/mm)	12,48		
Vloei in rechter deel?			
Vloei	ja		
Indien ja			
u rechts (N/mm)	12,41		
u onder (N/mm)	0,19		
v2 (N/mm)	0,04		
<b>v (N/mm)</b>	<b>12,37</b>		
<b>Hmax (N)</b>	<b>15283</b>		

Tabel 32: Bepaling schrankweerstand wanden met opening aan de hand van de gedetailleerde berekeningen.

Notatie	$\sum L_i$ (mm)	$\sum A_i$ (mm <sup>2</sup> )	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\frac{F}{r}$ $= \frac{r}{2-r}$	Schrangweerstand Gedetailleerd	
							$F_{vol}$ (N)	$F_{open.}$ $= F \cdot F_{vol}$ (N)
3DM 3DM-V	1200	645000	0,256	0,667	0,723	0,566	12446	7040
3RM 3RM-V	1200	345000	0,137	0,667	0,830	0,709	12446	8822
3DL	1200	645000	0,256	0,667	0,723	0,566	12446	7040
3RL	1200	345000	0,137	0,667	0,830	0,709	12446	8822
4D	1800	645000	0,192	0,750	0,796	0,661	19801	13097
4R	1800	345000	0,103	0,750	0,880	0,785	19801	15545
4D+R	1200	990000	0,295	0,500	0,629	0,459	19801	9089
3DM-B-1 3DM-B-2	1200	645000	0,256	0,667	0,723	0,566	15283	8645
3RM-B-1 3RM-B-2	1200	345000	0,137	0,667	0,830	0,709	15283	10834

## **Bijlage D: Vereenvoudigde berekeningen volgens De Proft**

Tabel 33: Vereenvoudigde schrankweerstand volle wanden zonder verticale belasting volgens De Proft.

ST1	<b>1560</b>
vmax (N/mm)	12,41
h (mm)	1400
b paneel (mm)	600
ST2	<b>5866</b>
vmax (N/mm)	12,41
h (mm)	1400
b paneel (mm)	1200
ST3, ST3-V	<b>12079</b>
vmax (N/mm)	12,41
h (mm)	1400
b paneel (mm)	1800
ST4	<b>19383</b>
vmax (N/mm)	12,41
h (mm)	1400
b paneel (mm)	2400

$$F_{v,max} = \frac{F_f b}{s \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{b}\right)^2}}$$

Tabel 34: Vereenvoudigde schrankweerstand volle wanden met verticale belasting volgens De Proft.

Schrangweerstand: ST3-B, ST3-V-B	
vmax (N/mm)	12,41
h (mm)	1400
b paneel (mm)	1800
Paneel 1	
u links (N/mm)	0,00
P boven (N) = Vekv.	3500,00
u links,tot (N/mm)	2,50
Kracht t.g.v. ged. verankering	
v1 (N/mm)	2,50
Overblijvend deel niet-verankerd	
v2 (N/mm)	5,88
u onder (N/mm)	9,15
u rechts (N/mm)	14,27
Vloei in rechter deel?	
Vloei	ja
Indien ja	
u rechts (N/mm)	12,41
u onder (N/mm)	7,71
v2 (N/mm)	4,96
<b>v (N/mm)</b>	<b>7,46</b>
vloei in snede (mm)	1397
<b>H1 (N)</b>	<b>10415</b>
lengte na snede (mm)	403
<b>H2 (N)</b>	<b>5001</b>
<b>Hmax (N)</b>	<b>15416</b>

Tabel 35: Bepaling schrankweerstand wanden met opening aan de hand van de vereenvoudigde berekeningen.

Notatie	$\sum L_i$ (mm)	$\sum A_i$ (mm <sup>2</sup> )	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\frac{F}{r}$ $= \frac{r}{2-r}$	Schrانkweerstand Vereenvoudiging	
							$F_{vol}$ (N)	$F_{open.}$ $= F \cdot F_{vol}$ (N)
3DM 3DM-V	1200	645000	0,256	0,667	0,723	0,566	12079	6833
3RM 3RM-V	1200	345000	0,137	0,667	0,830	0,709	12079	8562
3DL	1200	645000	0,256	0,667	0,723	0,566	12079	6833
3RL	1200	345000	0,137	0,667	0,830	0,709	12079	8562
4D	1800	645000	0,192	0,750	0,796	0,661	19383	12820
4R	1800	345000	0,103	0,750	0,880	0,785	19383	15217
4D+R	1200	990000	0,295	0,500	0,629	0,459	19383	8897
3DM-B-1 3DM-B-2	1200	645000	0,256	0,667	0,723	0,566	15416	8720
3RM-B-1 3RM-B-2	1200	345000	0,137	0,667	0,830	0,709	15416	10928

# Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

**Schrankweerstand van houtskeletwanden: invloed van raam- en deuropeningen**

Richting: **master in de industriële wetenschappen: bouwkunde**

Jaar: **2015**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

**Reweghs, Kenny**

Datum: **16/01/2015**