

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

**Impact van hergebruik op het gedrag van verbindingen in houtconstructies:
experimentele evaluatie**

**Louise Labus
Lisa Wevers**

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Jose GOUVEIA HENRIQUES

COPROMOTOR :

dr. ing. Rik STEENSELS

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



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

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



2022
2023

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

***Impact van hergebruik op het gedrag van verbindingen in houtconstructies:
experimentele evaluatie***

Louise Labus

Lisa Wevers

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Jose GOUVEIA HENRIQUES

COPROMOTOR :

dr. ing. Rik STEENSELS



KU LEUVEN

Woord vooraf

Deze masterproef vormt de afsluiter van de gezamenlijke opleiding industriële ingenieurswetenschappen van UHasselt en KU Leuven. Het schrijven van deze masterproef was zowel een uitdaging als een verrijkende ervaring.

Onze masterproef is het resultaat van de onvermoeibare inzet, begeleiding en ondersteuning van vele individuen. Als eerst willen we graag onze oprecht dank uitspreken aan onze promotor en copromotor, prof. dr. ir. Jose A. G. Henriques en dr. ing. Rik Steensels. Hun begeleiding en expertise samen met de inzichten en richtlijnen die we van hen hebben gekregen, hebben ons geholpen om ons onderzoek op een hoger niveau te tillen. Daarnaast willen we ing. Dries Byloos en ir. Alper Turgut bedanken voor hun inzet en hulp bij het uitvoeren van onze testen. Ook willen we graag Jan bedanken die ons wegwijs heeft gemaakt in het labo en ons heeft bijgestaan bij het maken van de proefstukken.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Figurenlijst.....	7
Tabellenlijst	11
Symbolenlijst.....	13
Verklarende woordenlijst	17
Abstract (Nederlands).....	19
Abstract (English).....	21
1 Inleiding	23
1.1 Situering	23
1.2 Probleemstelling.....	23
1.3 Doelstellingen	24
2 Circulariteit in de bouw	25
2.1 Van een lineair economisch model naar een circulair economisch model.....	25
2.1.1 strategieën	26
2.1.2 Belangrijke begrippen	27
3 Circulariteit in houtconstructies.....	29
3.1 Onderzoek hergebruik in houtconstructies.....	29
4 Belangrijke parameters voor de capaciteit.....	31
4.1 Type hout + kenmerken.....	31
4.1.1 Houtsoort	31
4.1.2 Vochtgehalte	31
4.1.3 Dichtheid.....	32
4.2 Verbindingen	33
4.2.1 Type verbindingsmiddelen + kenmerken.....	33
4.2.2 Tussen, eind- en randafstanden	35
4.3 Verbindingsmiddelen.....	36
4.3.1 Schroeven.....	36
4.3.2 Bouten.....	37
5 Analytische berekening.....	39
5.1. Vloeimoment	39
5.2. Stuksterkte	39
5.3 Axiale uittreksterkte	42
5.3.1 Bouten.....	42
5.3.2 Schroeven.....	43
5.4 Bepaling capaciteit	46
5.5. Bepaling Stijfheid K_{ser}	52
5.5.1 Analytische berekening	52

5.5.2	Experimentele berekening	53
5.6	Eigenschappen schuin vs. recht geplaatste schroeven	54
6	Proeven	57
6.1	Beschrijving van de proefstukken	57
6.1.1	Aanpak ontwerp proefstukken	57
6.1.2	Definitief ontwerp proefstukken	60
6.2	Proefopstelling	66
6.3	Testprocedure	66
6.3.1	Monotone testen.....	66
6.3.2	Cyclische testen	67
6.4	Statistische berekeningen	69
7	Resultaten	73
7.1	Analytisch	73
7.1.1	Bepaling van de capaciteit.....	73
7.2	Resultaten proeven.....	77
7.2.1.	Monotone testen.....	77
7.2.2	Cyclische testen	82
7.3.	Statistische resultaten.....	93
7.3.1	Monotone testen.....	93
7.3.2.	Cyclische testen	96
8	Analyse resultaten	99
8.1	Vergelijking tussen configuraties.....	99
8.1.1	Monotone testresultaten binnen de configuraties	99
8.1.2	Monotone testresultaten tussen de configuraties	112
8.1.3	Cyclische testresultaten binnen de configuraties	112
8.1.4	Cyclische testresultaten tussen de configuraties.....	117
8.2	Monotone vs cyclische testen.....	117
8.2.1	Bouten met een hoek $\alpha = 90^\circ$ (B)	117
8.2.2	Schroeven met een hoek $\alpha = 90^\circ$ (S)	119
8.2.3	Schroeven met een hoek $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek (S45T).....	121
8.2.4	Schroeven met een hoek $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk (S45D)	122
8.2.5	Schroeven met gekruiste opstelling (SX)	123
8.2.6	Vergelijking degradatiefactoren.....	124
8.3	Analytische vs proefondervindelijke resultaten	125
9	Conclusie	127
	Bibliografie.....	129
	Bijlage A Ontwerpvoorstellen	133
	Bijlage B Kenmerken	137
	Bijlage C Bepaling vochtgehalte.....	143

Bijlage D	Rekennota's bepaling capaciteit.....	145
Bijlage E	Belasting-tijddiagrammen ($F-t$)	153
Bijlage F	Bepaling stijfheid K_{ser}	161

Figurenlijst

Figuur 1: Circulaire Economie strategie [4].....	26
Figuur 2: Materiaal levenscyclus fases in CE [1].....	27
Figuur 3: Concept van aanpasbaarheid en circulariteit [6].....	28
Figuur 4: Stiftvormige metalen verbindingen [15].....	34
Figuur 5: Tussen-, eind- en randafstanden [27].....	35
Figuur 6: Tussen-, eind- en randafstanden voor schuine schroeven.....	36
Figuur 7: Schroef types gedeeltelijk schroefdraad, dubbele schroefdraad [29].....	36
Figuur 8: Schroef met volledige schroefdraad [28].....	37
Figuur 9: Test principe stuksterkte EN 383 [33].....	41
Figuur 10: Bezwijkmechanismen met (1) één afschuifvlak en met (2) twee afschuifvlakken [23].....	46
Figuur 11: Krachtwerking in verbindingsmiddel bij bezwijkmechanisme f [35].....	48
Figuur 12: Hout-op-houtconstructie met schuine schroeven [36].....	49
Figuur 13: Overlappingslengte [23].....	50
Figuur 14: Belastings-verplaatsingsdiagram (F-v) voor a) schroeven, b) bouten [22].....	54
Figuur 15: Belasting-vervormingsgrafiek schuine en laterale belaste schroeven [37].....	54
Figuur 16: Definitief ontwerp proefstukken met a) Bouten $\alpha = 90^\circ$ (B), b) Schroeven $\alpha = 90^\circ$ (S), c) Schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek (S45T), d) Schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk (S45D), e) Gekruiste schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek en -druk (SX).....	60
Figuur 17: Ontwerp met rand- en eindafstanden voor a) configuratie B en S en b) configuraties S45T, S45D en SX.....	62
Figuur 18: Hout-op-houtconfiguratie met a) bouten (B), b) schroeven (S), c) schuine schroeven 45° op afschuiving-druk belast (S45D), d) schroeven 45° op afschuiving-trek belast (S45T), e) schuine gekruiste schroeven 45° op afschuiving-trek en -druk belast (SX).....	64
Figuur 19: Opstelling in drukmachine.....	66
Figuur 20: Belasting-ontlasting monotone testen.....	67
Figuur 21: Theoretische belasting en ontlasting bij cyclische testen.....	68
Figuur 22: Theoretisch belastingcycli bij cyclische testen.....	68
Figuur 23: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen per proefstuk van configuratie B.....	78
Figuur 24: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen per proefstuk van configuratie S.....	78
Figuur 25: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen per proefstuk van configuratie S45T.....	79
Figuur 26: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen per proefstuk van configuratie S45D.....	79
Figuur 27: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen per proefstuk van configuratie SX.....	80
Figuur 28: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk B-C1.....	83
Figuur 29: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk B-C1.....	84
Figuur 30: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk B-C2.....	85

Figuur 31: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk B-C2	85
Figuur 32: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk S-C1	86
Figuur 33: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk S-C1	86
Figuur 34: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk S-C2	87
Figuur 35: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk S-C2	88
Figuur 36: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk S45T-C1	88
Figuur 37: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk S45T-C1	89
Figuur 38: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk S45D-C1	90
Figuur 39: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk S45D-C1	90
Figuur 40: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk SX-C1	91
Figuur 41: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk SX-C1	91
Figuur 42: Proefstuk B-M1 na monotone test	99
Figuur 43: Proefstuk B-M2 na monotone test met a) Voorzijde b) zijkant (kooeffect)	100
Figuur 44: Proefstuk B-M3 na monotone test met a) Voorzijde b) zijkant	100
Figuur 45: Proefstuk B-M4 na monotone test met a) Voorzijde b) zijkant	101
Figuur 46: Proefstuk S-M1 na monotone test met a) element a b) element c	102
Figuur 47: Proefstuk S-M2 na monotone test met a) element a b) element c	102
Figuur 48: Proefstuk S-M3 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c	103
Figuur 49: Proefstuk S-M4 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c	103
Figuur 50: Proefstuk S45T-M1 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c	104
Figuur 51: Proefstuk S45T-M2 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c	105
Figuur 52: Proefstuk S45T-M3 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c	105
Figuur 53: Proefstuk S45T-M4 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c	106
Figuur 54: Proefstuk S45D-M1 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c	107
Figuur 55: Proefstuk S45D-M2 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c	107
Figuur 56: Proefstuk S45D-M3 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c	108
Figuur 57: Proefstuk S45D-M4 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c	108
Figuur 58: Opstelling gekruiste schroeven onder drukmachine	109
Figuur 59: Proefstuk SX-M1 na monotone test met a) houtelement b, b) Houtelement c	110
Figuur 60: Proefstuk SX-M2 na monotone test met a) houtelement b, b) Houtelement c	110

Figuur 61: Proefstuk SX-M3 na monotone test met a) houtelement a, b) Houtelement b, c) houtelement c.....	111
Figuur 62: Proefstuk SX-M4 na monotone test met a) houtelement a, b) Houtelement b, c) houtelement c.....	111
Figuur 63: Configuratie B-C1 voor de cyclische test (a) en na de cyclische test (b).....	113
Figuur 64: Configuratie S-C1 na het uitvoeren van de cyclische test	114
Figuur 65: Configuratie S45T-C1 na het uitvoeren van de cyclische test.....	115
Figuur 66: Configuratie S45D-C1 na het uitvoeren van de cyclische test	116
Figuur 67: Configuratie SX na het uitvoeren van de cyclische test	116
Figuur 68: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (B-M) en cyclische testen (B-C1)	118
Figuur 69: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (B-M) en cyclische testen (B-C2)	119
Figuur 70: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (S-M) en cyclische testen (S-C1)	120
Figuur 71: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (S-M) en cyclische testen (S-C2)	120
Figuur 72: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (S45T-M) en cyclische testen (S45T-C1)	122
Figuur 73: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (S45D-M) en cyclische testen (S45D-C1).....	123
Figuur 74: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (SX-M) en cyclische testen (SX-C1).....	124
Figuur A.1: Schets voorstel 2 bouten $\alpha = 90^\circ$	133
Figuur A.2: Schets voorstel 2 schroeven $\alpha = 90^\circ$	133
Figuur A.3: Schets voorstel 2 schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk.....	134
Figuur A.4: Schets voorstel 2 schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk.....	134
Figuur A.5: Schets voorstel 3 configuraties met Bouten $\alpha = 90^\circ$ (B), Schroeven $\alpha = 90^\circ$ (S), Schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk (S45D), Schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek (S45T), Gekruiste schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek en druk (SX).....	135
Figuur E.1: Belastings-tijddiagram (F-t) monotone testen van configuratie B	153
Figuur E.2: Belastings-tijddiagram (F-t) monotone testen van configuratie S.....	154
Figuur E.3: Belastings-tijddiagram (F-t) monotone testen van configuratie S45T	154
Figuur E.4: Belastings-tijddiagram (F-t) monotone testen van configuratie S45D	155
Figuur E.5: Belastings-tijddiagram (F-t) monotone testen van configuratie SX	155
Figuur E.6: Belastings-tijddiagram (F-t) cyclisch testen van proefstuk B-C1	156
Figuur E.7: Belastings-tijddiagram (F-t) cyclisch testen van proefstuk B-C2	156
Figuur E.8: Belastings-tijddiagram (F-t) cyclisch testen van proefstuk S-C1	157
Figuur E.9: Belastings-tijddiagram (F-t) cyclisch testen van proefstuk S-C2	157
Figuur E.10: Belastings-tijddiagram cyclisch testen van proefstuk S45t-C1	158
Figuur E.11: Belastings-tijddiagram cyclisch testen van proefstuk S45D-C1	158
Figuur E.12: Belastings-tijddiagram cyclisch testen van proefstuk SX-C1	159

Tabellenlijst

Tabel 1: Mechanische eigenschappen per sterkteklasse van zachthout [18]	31
Tabel 2: Minimum tussen-, eind- en randafstanden van de verbindingen loodrecht op de vezelrichting.....	35
Tabel 3: Minimum tussen-, eind- en randafstanden van de schuine schroeven	35
Tabel 4: Staalkwaliteit bouten	38
Tabel 5: Houtdikte proefstukken per soort verbindingsmiddel voorstel 1	58
Tabel 6: Afmetingen proefstukken per configuratie van voorstel 3	59
Tabel 7: Configuraties met nominale afmetingen.....	60
Tabel 8: Afmetingen en type verbindingsmiddelen per configuratie.....	61
Tabel 9: Ontwerp tussen- en eindafstanden van de verbindingsmiddelen van bouten en schroeven.....	62
Tabel 10: Ontwerp tussen- en eindafstanden van de schuine schroeven	63
Tabel 11: Gemiddelde afmetingen per proefelement en houtsoort.....	65
Tabel 12: Hoek α per configuratie per methode	73
Tabel 13: Analytische resultaat capaciteit van configuratie B.....	74
Tabel 14: Analytische resultaten van capaciteit van configuratie S	74
Tabel 15: Analytische resultaten van capaciteit van configuratie S45T, S45D	75
Tabel 16: Analytische resultaten van capaciteit van configuratie SX.....	76
Tabel 17: Het effectieve meewerkend aantal verbindingen n_{ef} , aantal rijen n_{rows} en aantal afschuifvlakken n_{sp} per configuratie	76
Tabel 18: De rekenwaarde van de sterkte van de verbindingen en bezwijkmechanisme per configuratie	77
Tabel 19: Monotone testresultaten van configuratie B.....	80
Tabel 20: Monotone testresultaten van configuratie S	81
Tabel 21: Monotone testresultaten van configuratie S45T.....	81
Tabel 22: Monotone testresultaten van configuratie S45D	81
Tabel 23: Monotone testresultaten van configuratie SX.....	81
Tabel 24: Cyclische testresultaten van configuratie B	92
Tabel 25: Cyclische testresultaten van configuratie S.....	92
Tabel 26: Cyclische testresultaten van configuratie S45T	92
Tabel 27: Cyclische testresultaten van configuratie S45D	93
Tabel 28: Cyclische testresultaten van configuratie SX	93
Tabel 29: Resultaten statistische berekeningen (B-M).....	94
Tabel 30: Resultaten statistische berekeningen (S-M)	94
Tabel 31: Resultaten statistische berekeningen (S45T-M)	94
Tabel 32: Resultaten statistische berekeningen (S45D-M)	94
Tabel 33: Resultaten statistische berekeningen (SX-M).....	95
Tabel 34: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters (B-M).....	95
Tabel 35: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters (S-M).....	95
Tabel 36: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters (S45T-M).....	96
Tabel 37: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters (S45D-M)	96
Tabel 38: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters (SX-M)	96
Tabel 39: Resultaten statistische berekeningen (B)	97
Tabel 40: Resultaten statistische berekeningen (S).....	97
Tabel 41: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters	98

Tabel 42: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters	98
Tabel 43: Gemiddelde waarden van de monotone testen voor alle configuraties	112
Tabel 44: Gemiddelde waarden van de cyclische testen voor alle configuraties	117
Tabel 45: Gemiddelde waarden van de monotone en cyclische testen voor configuratie B	118
Tabel 46: Gemiddelde waarden van de monotone en cyclische testen voor configuratie S	119
Tabel 47: Gemiddelde waarden van de monotone en cyclische testen voor configuratie S45T	121
Tabel 48: Gemiddelde waarden van de monotone en cyclische testen voor configuratie S45D	122
Tabel 49: Gemiddelde waarden van de monotone en cyclische testen voor configuratie SX	123
Tabel 50: Degradatiefactoren voor de maximum capaciteit en de stijfheid	124
Tabel 51: Maximum capaciteit van de analytische resultaten en de monotone testen per configuratie	125
Tabel B.1: Kenmerken van configuratie B	137
Tabel B.2: Kenmerken van configuratie S	137
Tabel B.3: Kenmerken van configuratie S45T	139
Tabel B.4: Kenmerken van configuratie S45D	140
Tabel B.5: Kenmerken van configuratie SX	141
Tabel C.1: Metingen voor het bepalen van de vochtigheid	143
Tabel C.2: Bepaling van het vochtgehalte	144
Tabel F.1: Belasting en verplaatsing monotone testen voor K_{ser}	162
Tabel F.2: Belasting en verplaatsing cyclische testen voor K_{ser}	163

Symbolenlijst

a_1	De tussenafstand van de verbindingen in de vezelrichting, in mm
A_{eff}	De effectieve oppervlakte van de bout, in mm ²
$A_{sluitring}$	De oppervlakte van de sluitring, in mm ²
$B_{p,Rk}$	De karakteristieke sterkte van de sluitring of de staalplaat, in N
CV	De variatiecoëfficiënt, in %
d	De diameter van de verbinding, in mm
d_1	De diameter van de kern van de verbinding, in mm
d_{bout}	De diameter van de bout, in mm
d_e	De effectieve diameter van de schroef, in mm
d_h	De diameter van de schroefkop, in mm
d_m	De gemiddelde diameter van het verbindingsmiddel, in mm
$d_{sluitring}$	De buitenste diameter van de sluitring, in mm
e_{head}	De overhoeksmaat van de bout, in mm
e_{nut}	De overhoeksmaat van de moer, in mm
$f_{ax,k}$	De karakteristieke uittreksterkte loodrecht op de vezelrichting, in N/mm ²
$f_{c,90,Rk}$	De karakteristieke druksterkte loodrecht op de vezelrichting, in N/mm ²
f_h	De stuiksterkte, in N/mm ²
$f_{h,k}$	De karakteristieke stuiksterkte, in N/mm ²
$f_{h,0,k}$	De karakteristieke stuiksterkte evenwijdig aan de vezelrichting, in N/mm ²
$f_{h,\alpha,k}$	De karakteristieke stuiksterkte van het houtelement onder een hoek α , in N/mm ²
$f_{h,i,k}$	De karakteristieke stuiksterkte van het houten element i , in N/mm ²
$f_{head,k}$	De karakteristieke doortrekparameter van de schroef, in N/mm ²
$f_{tens,k}$	De karakteristieke trekkracht van de schroef, in N/mm ² ;
f_u	De treksterkte van de staaldraad, in N/mm ²
$f_{u,k}$	De karakteristieke treksterkte, in N/mm ²

$f_{y,k}$	De karakteristieke vloeigrens van staal, in N/mm ²
$F_{ax,Rk}$	De karakteristieke axiale uittreksterkte van het verbindingsmiddel, in N
$F_{ax,\alpha,Rk}$	De karakteristieke uittrekkraft van de verbinding onder een hoek α met de vezelrichting, in N
$F_{ax,Rk,2}$	De karakteristieke doortreksterkte van de verbinding loodrecht de vezelrichting, in N
F_{max}	De maximale belasting op het proefstuk, in N
$F_{t,Rk}$	De karakteristieke trekweerstand van de schroef, in N
$F_{v,ef,Rk}$	De effectieve karakteristieke sterkte, in N
$F_{v,Rk}$	De karakteristieke sterkte per snede en per verbindingsmiddel, in N
IQR	De interkwartielafstand
k_{90}	Factor afhankelijk van soort hout
K_{ser}	De verschuivingsmodulus, in kN/mm
$k_s(n)$	De factor voor de berekening van de karakteristieke eigenschappen voor initiële testen
l_{ef}	De penetratiediepte van het deel met schroefdraad, in mm
m	De massa van het hout, in kg
m_i	De individuele testwaarde i van de stochastische variabele m
m_k	De 5-percentielwaarde van de stochastische variabele m
$M_{y,Rk}$	Het karakteristieke vloeimoment van de verbinding, in Nmm ²
n	Het aantal testwaarden
n	Het aantal verbindingen op een rij
n_{ef}	Het meewerkend aantal verbindingsmiddelen op één rij, evenwijdig aan de vezelrichting
n_{rows}	Het aantal rijen
n_{sp}	Het aantal afschuifvlakken
$N_{c,90,Rk}$	De hout druksterkte onder de sluitring op het contact oppervlak, in N
$N_{R,t,k}$	De karakteristieke sterkte van de bout, in N

P_ω	Het gewicht van het proefstuk, in g
P_s	Het droog gewicht van het proefstuk, in g
Q_1	De eerste kwartiel van de testwaardes
Q_2	De mediaan van de testwaardes
Q_3	De derde kwartiel van de testwaardes
s_1	De verankeringslengte in het eerste houtelement gemeten parallel op het afschuifvlak, in mm
s_2	De verankeringslengte in het tweede houtelement gemeten parallel op het afschuifvlak, in mm
s_{head}	De sleutelwijken van de bout, in mm
s_{nut}	De sleutelwijken van de moer, in mm
S_y	De standaard deviatie
t_i	De hout- of plaatdikte of de hechtlengte, met i de waarde 1 of 2, in mm ²
t_p	De indringingsdiepte van het verbindingsmiddel, in mm
$t_{sluitring}$	De dikte van de sluitring, in mm
v	De verplaatsing van de proefstukken, in mm
V	Het volume van het hout, in m ³
\bar{y}	De gemiddelde waarde
<i>Griekse letters</i>	
α	De hoek tussen de belasting en de vezelrichting
β	De verhouding van de stuiksterkten van de elementen
μ	De wrijvingsconstante in hout $\mu = 0,25$
ρ_a	De bij $f_{ax,k}$ horende volumieke massa, in kg/m ³
ρ_k	De karakteristieke volumieke massa van het hout, in kg/m ³
ρ_m	De gemiddelde volumieke massa van het hout, in kg/m ³ ;
$\sigma_{c,90,Rk}$	De karakteristieke trekspanning loodrecht op de vezelrichting, in N
ω	Het vochtgehalte, in %
ω_m	Het gemiddelde vochtgehalte, in %

Verklarende woordenlijst

B	Configuratie met bouten loodrecht op de vezelrichting
C	Cyclische test
CE	Circulaire economie
CLS	<i>Canadian Lumber Standard</i>
EC5	Eurocode 5 (EN NBN 1995-1-1)
GGT	Gebruiksgrenstoestand
M	Monotone test
RND	Rood Noors Dennen
S	Configuratie met schroeven loodrecht op de vezelrichting
S45D	Configuratie met schuine schroeven met hoek ($\alpha = 45^\circ$) belast op afschuiving-druk
S45T	Configuratie met schuine schroeven met hoek ($\alpha = 45^\circ$) belast op afschuiving-trek
SX	Configuratie met gekruiste schuine schroeven met hoek ($\alpha = 45^\circ$) belast op afschuiving-trek en druk
UGT	Uiterste grenstoestand

Abstract (Nederlands)

De overgang naar circulair bouwen vereist extra onderzoek naar hergebruik van bouwelementen, waarbij de rol van verbindingen cruciaal is. Daarom onderzoekt deze masterproef de impact van hergebruik op het gedrag van stiftvormige verbindingen in houtconstructies.

Vijf soorten proefstukken, verbonden met bouten of schroeven, al dan niet in een schuine positie, werden analytisch en experimenteel geanalyseerd. In het analytisch onderzoek werden de sterkte en stijfheid van de verbinding berekend volgens Eurocode 5 en de theorie van Bejtka en Blaß. Tijdens het experimenteel onderzoek ondergingen de proefstukken monotone en cyclische testen, inclusief demontage en montage van de proefstukken, resulterend in belastings-verplaatsingsdiagrammen. Hieruit werd de degradatie van sterkte en stijfheid na hergebruik bepaald.

Het onderzoek toont aan dat alle verbindingen degradatie ervaren na hergebruik, variërend van 3% tot 22% voor de capaciteit en 21% tot 53% voor de stijfheid. De schroeven belast op afschuiving-trek ondergaan de minste degradatie van de capaciteit, terwijl schroeven loodrecht op de vezelrichting de hoogste degradatie hebben. De degradatie van de stijfheid is het kleinst bij de gekruiste schroeven en het hoogst bij de schroeven loodrecht op de vezelrichting. Met uitzondering van de bouten vormt het hergebruik, ondanks de degradatie, geen probleem in de GGT-toestand. Echter kan hergebruik wel een probleem vormen wanneer de UGT-toestand bereikt wordt, daarom dient er nog extra onderzoek uitgevoerd te worden.

Abstract (English)

The transition to circular construction requires additional research on the reuse of building elements, where the role of joints is crucial. Therefore, this master's thesis investigates the impact of reuse on the behaviour of dowel-type joints in timber structures.

Five types of test specimen connected with bolts or screws, whether or not in an inclined position, were analysed analytically and experimentally. In the analytical study, joint strength and stiffness were calculated according to Eurocode 5 and the theory of Bejtka and Blaß. During the experimental study, the specimens underwent monotonic and cyclic tests, including disassembly and assembly of the specimens, resulting in load-displacement diagrams. From these, the degradation of strength and stiffness after reuse was determined.

The study shows that all joints experience degradation after reuse, ranging from 3% to 22% for capacity and 21% to 53% for stiffness. The screws loaded on shear-pull undergo the lowest capacity degradation, while screws perpendicular to the fibre direction have the highest degradation. Stiffness degradation is lowest for crossed screws and highest for screws perpendicular to the fibre direction. Despite the degradation, reuse does not pose a problem in the GGT condition except for the bolts. However, reuse may pose a problem when the UGT condition is reached. Therefore, additional research should be carried out.

1 Inleiding

1.1 Situering

De bouwsector maakt gebruik van een lineair model (“take, make, consume, dispose”), wat betekent dat grondstoffen worden ontgonnen, verwerkt, geconsumeerd en ten slotte aan het eind van hun levenscyclus worden weggegooid [1], [2]. Het geproduceerde afval in de bouw stijgt daardoor met de jaren, waardoor de bouwsector op nummer één staat als grootste afvalstroom [3].

Om de reeds opgenoemde gevolgen van een lineair model tegen te gaan, streeft de huidige bouwsector naar een circulair model. Het doel van dit model is het verminderen van afval, het verhogen van de materiaalefficiëntie, de materialen in een gesloten kring houden en hun waarde maximaliseren [2] [4]. Afvalvermindering kan onder andere door producten een langere levensduur te geven, producten modulair te maken en/of een product te ontwerpen met minder materiaal [5]. Er zijn meerdere strategieën om de levensduur van bouwmaterialen te verhogen.

Sinds 1994 is het gebruik van hout als constructiemateriaal in gebouwen gestegen met 20% [6]. Na de levenscyclus van deze gebouwen wordt het hout nog niet vaak hergebruikt, omdat nieuw hout een lage materiaalkost heeft en de prestaties voor hergebruik nog niet gestandaardiseerd zijn. Om het hout te kunnen hergebruiken moet er gedacht worden aan *Design for Adaption*. Deze methode streeft naar duurzame gebouwen door de gebouwen aanpasbaar te maken voor veranderingen. De verbindingen zijn van belang op het vlak van aanpasbaarheid. Op dit moment worden verbindingen ontworpen voor elk afzonderlijk project. Hierdoor zijn de verbindingen niet universeel waardoor aanpassingen of het hergebruik van hout bemoeilijkt wordt [6] [7].

Deze masterproef focust op de impact van het hergebruik van stiftvormige verbindingen in houtconstructies, die experimenteel beoordeeld gaan worden in samenwerking met CERG (*Construction Engineering Research Group*). CERG is de onderzoeksgroep van bouwkunde binnen de UHasselt. Deze onderzoeksgroep focust op het mechanisch gedrag van structurele elementen door het uitvoeren van experimentele testen, numerieke en analytische modellering [8]. Aan de hand van de experimentele testen kan de degradatiefactor van hergebruik bepaald worden, wat nog niet eerder werd onderzocht.

1.2 Probleemstelling

Dit onderzoek focust op het hergebruik van verbindingen in houtconstructies. Momenteel is er nog weinig kennis over dit onderwerp en werd er beperkt onderzoek naar uitgevoerd. Ook is er een gebrek aan specifieke en gedetailleerde ontwerprichtlijnen die architecten en ingenieurs kunnen gebruiken bij het ontwerp van een gebouw. Hierdoor wordt er bij het ontwerp van een gebouw geen rekening gehouden met het hergebruik van materialen na de levenscyclus van dat gebouw [7]. Om het bouwafval te beperken moet het implementeren van circulariteit in de beginfase gebeuren. Na de levenscyclus wordt het merendeel van het hout gesloopt en gebruikt als een hernieuwbare energiebron [6]. Dit

draagt op zijn beurt bij aan de opwarming van de aarde. Aangezien er beperkt onderzoek is verricht naar het hergebruik van stiftvormige metalen verbindingen in houtconstructies, is er nog weinig bekend over de degradatie van deze verbindingen na hergebruik. Het bepalen van de degradatie vereist het onderzoeken van belangrijke mechanische eigenschappen, zoals sterkte, stijfheid en vervormingscapaciteit. Een bijkomende onderzoeksvraag is hoe het hergebruik van deze verbindingen van invloed is op deze eigenschappen.

Door deze bovenstaande vragen te onderzoeken kan er een analyse uitgevoerd worden, die de impact van hergebruik op het gedrag van stiftvormige verbindingen in houtconstructies bepaalt.

1.3 Doelstellingen

Deze masterproef heeft als hoofddoel het bepalen van de impact van hergebruik op het gedrag van verbindingen met stiftvormige metalen verbindingsmiddelen in houtconstructie met behulp van labotesten. De doelstellingen van deze masterproef worden in de volgende paragrafen verder besproken.

De eerste doelstelling is het uitvoeren van experimentele testen op stiftvormige metalen verbindingen, met name schroeven en bouten. Deze experimentele testen bestaan uit monotone testen en cyclische testen. Binnen de cyclische testen wordt het concept van hergebruik gesimuleerd.

De tweede doelstelling is het identificeren en kwantificeren van de impact van hergebruik in stiftvormige metalen verbindingen (schroeven/bouten) in houtconstructies. Hierbij worden de mechanische eigenschappen van de schroeven en bouten geëvalueerd, zoals sterkte en stijfheid.

2 Circulariteit in de bouw

2.1 Van een lineair economisch model naar een circulair economisch model

Zoals eerder aangegeven in de inleiding, omvat de bouwsector momenteel een lineair model dat bekendstaat als "take, make, consume, dispose". Dit model doorloopt verschillende fasen, beginnend met de ontginning van grondstoffen die vervolgens worden verwerkt tot bouwmaterialen. Deze bouwmaterialen worden op hun beurt geassembleerd op de bouwplaats en gebruikt gedurende hun levensduur, waarna ze uiteindelijk worden gesloopt. Het is belangrijk op te merken dat dit model geen aandacht besteedt aan de resulterende afvalstoffen die worden gegenereerd [1] [2].

De verschillende milieukwesties die gepaard gaan met het lineair model worden steeds meer in vraag gesteld. De menigte is er van bewust dat er een noodzaak is aan verandering van dit model. Om de reeds opgenoemde gevolgen van een lineair model tegen te gaan streeft de huidige bouwsector naar een circulair model. Tussen 2016 en 2019 is het aantal wetenschappelijke publicaties over de circulaire economie verdubbeld, wat duidt op een verhoogde interesse in het onderwerp. Echter, in de praktijk blijkt het moeilijk om deze verandering te verwezenlijken vanwege verschillende obstakels die overwonnen moeten worden [2], deze obstakels worden verder nog besproken. Hoewel er in een lineair economisch model enkele aspecten van circulariteit aanwezig zijn, zoals afvalvermindering en -preventie, gaat een circulaire economie verder dan deze genoemde aspecten van circulariteit [9].

Er worden vijf circulaire economische principes voor de bouwsector geïdentificeerd: het maximaliseren van hergebruik, het optimaliseren van het ontwerp om het gebruik van materialen tot een minimum te beperken, het gebruik van standaardisatie, het aanbieden van producten als een dienst en het minimaliseren van impact en afval [10]. Het doel van dit model is het verminderen van afval, het verhogen van de efficiëntie van materialen en het behouden van materialen in een gesloten kringloop om hun waarde te maximaliseren [2] [4]. Afvalvermindering kan onder andere worden bereikt door producten een langere levensduur te geven, modulaire producten te ontwikkelen en/of producten te ontwerpen met minder materiaal [5].

De transitie naar een circulaire economie vereist het overwinnen van verschillende barrières. Op Europees, nationaal, regionaal en lokaal niveau zijn al verschillende maatregelen genomen om deze transitie te bevorderen, zoals *Circular Economy Package*, *Roadmap to a resource Efficient Europe*, *green economy within and beyond the European Union (EU)*, *bio-economy in the EU*, *Europe 2020 Strategy* en *Europe Semester process*. Deze maatregelen bieden een solide basis en de nodige acties om de overgang naar een circulaire economie te bewerkstelligen, hoewel slechts bepaalde aspecten van de transitie op individueel niveau worden aangepakt. Er moet meer nadruk worden gelegd op de onderlinge verbanden binnen en tussen sectoren, schakels en belanghebbenden [1]. Bovendien zijn er maatregelen genomen om afval te verminderen, zoals beschreven in de Kaderrichtlijn Water (KRW), waarin terugwinning, recycling en hergebruik van afval

worden behandeld. De Europese Commissie heeft ook als doel gesteld om een terugwinning van 700% te bereiken voor bouw- en sloopafval (*Construction and Demolition Waste*, CDW) [3].

2.1.1 strategieën

Volgens *Morseletto* zijn er tien strategieën om de overgang naar een circulaire economie te vergemakkelijken, deze strategieën zijn weergegeven in figuur 1. In de studie van *Morseletto* wordt geconcludeerd dat de huidige strategieën vooral gericht zijn op recycling en terugwinning (R8-R9). Ook kan het product of de constructie worden geoptimaliseerd, waardoor het product een langere levensduur krijgt. Bovendien kunnen verschillende strategieën worden gecombineerd om de overgang naar een circulaire economie te vergemakkelijken [4].

Smarter product use and manufacture	R0	Refuse	Make product redundant by abandoning its function or by offering the same function with a radically different product
	R1	Rethink	Make product use more intensive (e.g. through sharing products or by putting multi-functional products on market).
	R2	Reduce	Increase efficiency in product manufacture or use by consuming fewer natural resources
Extend lifespan of product and its parts	R3	Reuse	Re-use by another consumer of discarded product which is still in good condition and fulfils its original function
	R4	Repair	Repair and maintenance of defective product so it can be used with its original function
	R5	Refurbish	Restore an old product and bring it up to date
	R6	Remanufacture	Use parts of discarded product in a new product with the same function
	R7	Repurpose	Use discarded products or its part in a new product with a different function
Useful application of materials	R8	Recycle	Process materials to obtain the same (high grade) or lower (low grade) quality
	R9	Recovery	Incineration of material with energy recovery

Figuur 1: Circulaire Economie strategie [4]

Deze tien strategieën voor het maximaliseren van het hergebruik van bouw materiaal kunnen worden gecategoriseerd in vier categorieën:

1. hergebruik, waarbij het product zijn oorspronkelijke functies behoudt of vergelijkbare functies verkrijgt zonder dat er significante reparaties nodig zijn;
2. opknappen, waarbij een aanzienlijke mate van herstel en/of versterking nodig is om het product dezelfde of vergelijkbare functies te laten behouden;
3. demontage en hergebruik van onderdelen waarbij delen van het product worden gedemonteerd en opnieuw worden gebruikt om een nieuw product te creëren;
4. terugwinning van energie, dit verwijst bijvoorbeeld naar het produceren van energie uit biomassa.

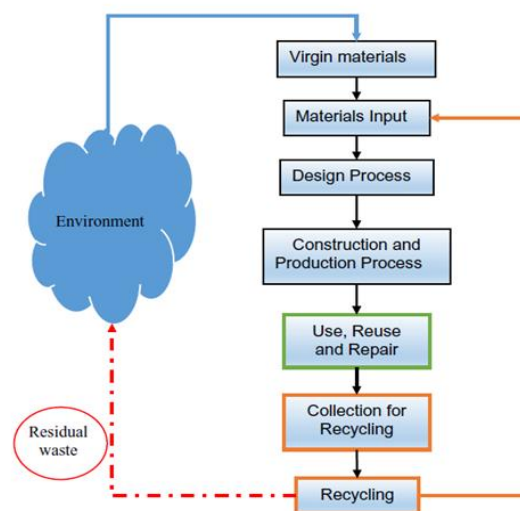
2.1.2 Belangrijke begrippen

a *Materiaalefficiëntie*

Materiaalefficiëntie speelt een cruciale rol binnen het kader van de circulaire economie, aangezien de beschikbaarheid van grondstoffen steeds beperkter wordt. Het voornaamste doel van materiaalefficiëntie is het verminderen van zowel de productie als verwerking van materialen, en dit kan worden bereikt door de verschillende strategieën toe te passen die zijn uiteengezet in sectie 2.1.1. Het maken van bewuste keuzes omtrent producten met een langere levensduur en het ontwerpen van producten met een verlaagde materiaalbehoefte zijn eveneens effectieve benaderingen om dit doel te verwezenlijken. Niettemin worden er in de huidige tijd nog steeds diverse obstakels ondervonden die de succesvolle implementatie van materiaalefficiëntie belemmeren, waaronder sociale, economische en regelgevende beperkingen. Het overwinnen van deze uitdagingen vereist een gezamenlijke inspanning om te streven naar energie-efficiëntie [5].

b *Demontage en hergebruik*

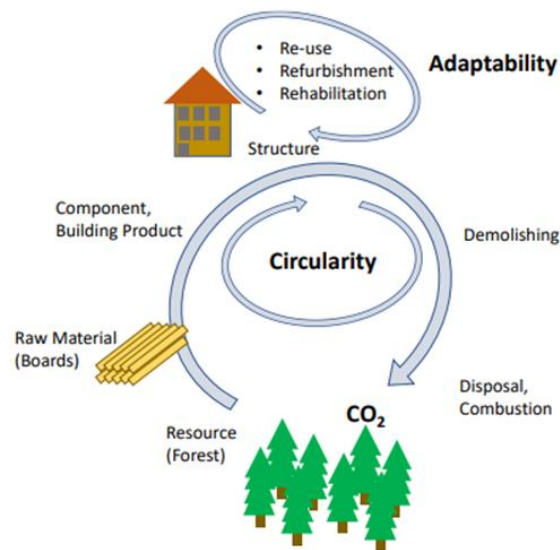
Een essentiële stap om de circulaire economie toe te passen, is het aanpakken van bouwen en sloopafval in de ontwerpfase van een product. Het ontwerp kan worden aangepast om een efficiënte materiaalkeuze mogelijk te maken [1], [2], [10]. Hierbij kan het hergebruiksproces worden gemaximaliseerd en kan demontage worden gegarandeerd door de onderdelen eenvoudig uit elkaar te kunnen halen. Efficiënte terugwinning van materialen kan worden verzekerd door middel van demontage en montage. Figuur 2 illustreert de materiaallevenscyclus binnen een circulair economisch model, wat resulteert in een vermindering van nieuwe grondstoffen binnen de economie en uiteindelijk leidt tot minder afval [1].



Figuur 2: Materiaal levenscyclus fases in CE [1]

Circulariteit omvat niet alleen het hergebruik van hernieuwbaar materiaal, maar richt zich ook op het verlengen van de levensduur van constructies, van minimaal 50 jaar tot 100 jaar of langer [6]. Om dit te realiseren, moet er flexibiliteit zijn om de constructie aan te passen aan veranderende eisen of functies in de loop der jaren. Wanneer een deel van de constructie het einde van zijn levensduur bereikt, moeten de elementen verzameld en indien mogelijk hergebruikt kunnen worden, op een niet-destructieve wijze [11].

Design for adaption and disassembly omvat twee belangrijke technische specificaties: aanpasbaarheid en circulariteit. Door het toepassen van aanpasbaarheid kunnen dragende elementen van constructies eenvoudig worden aangepast aan veranderingen in gebruik of structuur. Hierdoor wordt het tevens mogelijk om elementen van de constructie te hergebruiken of te recyclen. In eerste instantie wordt onderzocht of er binnen een gebouw mogelijkheden zijn om de levenscyclus te verlengen door de structuur aan te passen. Mocht dit niet het geval zijn, kan demontage plaatsvinden en kunnen materialen dankzij de aanpasbaarheid een tweede leven krijgen [6]. Dit proces wordt geïllustreerd in figuur 3.



Figuur 3: Concept van aanpasbaarheid en circulariteit [6]

Om deze principes toe te passen, dient in de ontwerpfase al rekening te worden gehouden met de wijze van verbinden. In de huidige constructies zijn verbindingen vaak gespecialiseerd en specifiek ontworpen voor elk individueel project of toepassing. Vanwege het individualistische karakter van bouwprojecten worden universele verbindingen vaak niet in overweging genomen [6].

3 Circulariteit in houtconstructies

Massief hout is een veelgebruikt bouw materiaal dat de afgelopen jaren steeds meer wordt toegepast. Het heeft zowel commerciële als ecologische voordelen, zoals een lange levensduur en mogelijkheden voor hergebruik. De specifieke mogelijkheden voor hergebruik en herfabricage van hout zijn echter nog onduidelijk. Er is nog weinig kennis over wat er met hout gebeurt aan het einde van zijn levenscyclus. Het succes van houtergebruik is afhankelijk van de keuze van de houtsoort, en dit moet al in de ontwerpfase worden overwogen. In Europa zijn er gecertificeerde bossen die zorgen voor een lager koolstofdioxidegehalte bij de verwerking en het transport van hout. Het grootste voordeel van hout is dat het een hernieuwbaar materiaal is. Er zijn al veel houtsystemen ontwikkeld die voldoen aan de beleidsambities van de industrie [12] [13].

In de studie van *Campbell A.* worden de prestaties van drie soorten bouwmaterialen vergeleken op basis van de implementatie van CE (Circulaire Economie). Verschillende criteria werden opgesteld en door middel van gewogen rangschikking geëvalueerd. In de beoordeling waren kosten het belangrijkste, gevolgd door watervervuiling, energiegebruik, CO₂-uitstoot, uitputting van abiotische hulpbronnen en water- en luchtvervuiling. Uit de vergelijking van verschillende indicatoren en criteria met behulp van multicriteria-analyse bleek dat een houten huis de beste prestaties leverde op alle criteria, gevolgd door een betonnen huis, terwijl een stalen huis de slechtste prestatie leverde [13].

Aangezien het aandeel van hout in gebouwen tussen 1994 en 2020 met 20% is toegenomen, is hergebruik en circulariteit belangrijk om afvalproductie te verminderen. Er zijn drie effectieve benaderingen om de voordelen van circulariteit van hout te behouden [6]:

1. de levensduur van de structuren zo lang mogelijk in stand houden;
2. de kwaliteit van het hout zo lang mogelijk behouden;
3. alleen onderdelen en materialen recycleren die om technische of sociaal-culturele redenen niet meer kunnen functioneren.

In de houtbouwsector wordt CE nog niet volledig geïmplementeerd, voornamelijk vanwege de lage kost van hout als materiaal, waardoor er sneller nieuw hout wordt aangeschaft dan dat bestaand hout wordt hergebruikt. Het gebruik van gestandaardiseerde elementen die geschikt zijn voor hergebruik is nog beperkt toegepast in de huidige bouwpraktijk. Op dit moment wordt er doorgaans geen rekening gehouden met een langere levensduur van gebouwen, aangezien de huidige levenscyclus vaak beperkt blijft tot 50 jaar, wat resulteert in de sloop van gebouwen in plaats van hergebruik. Bovendien zijn er nog geen gestandaardiseerde prestatiecriteria vastgesteld voor hergebruik, waardoor er geen duidelijke richtlijnen bestaan [6].

3.1 Onderzoek hergebruik in houtconstructies

Er is nog weinig onderzoek verricht naar het cyclisch testen van stiftvormige verbindingsmiddelen in houtconstructies. Er zijn echter al cyclische beproevingen uitgevoerd op houtconstructies met behulp van CLT-panelen [14]. Een andere studie onderzocht de ductiliteit van houtconstructies, waarbij de ductiliteitsklasse afhangt van de diameter van de schroeven, waarbij grotere diameters corresponderen met hogere

ductiliteitsklassen [15]. Daarnaast werden cyclische druktesten uitgevoerd op deuvels met één of twee afschuifvlakken, waarbij verschillende houtsoorten werden gebruikt [16].

Al deze onderzoeken werden toegepast op basis van de Europese norm EN 12512 [17], die de cyclische beproevingsmethoden beschrijft voor houtconstructies met mechanische bevestigingsmiddelen. Met behulp van de testmethode volgens EN 12512 kan de vervormbaarheid worden bepaald. Daarnaast kunnen gegevens worden verkregen over ductiliteit, energieverlies en sterktevermindering tijdens cyclische beproevingen [17].

Het is van cruciaal belang op te merken dat deze norm specifiek gericht is op seismische activiteiten, en daarom kunnen de verkregen resultaten niet rechtstreeks worden toegepast om hergebruik te simuleren. Voor hergebruik is het namelijk noodzakelijk dat belasting en ontlasting worden toegepast tot dezelfde belastingniveaus.

4 Belangrijke parameters voor de capaciteit

4.1 Type hout + kenmerken

4.1.1 Houtsoort

Om hout te kunnen gebruiken in bouwkundige constructies, moet de sterkteklasse van het gebruikte hout bekend zijn. Deze sterkteklassen zijn bepaald in EN 338 [18].

Voor zacht hout kan de sterkte op twee verschillende manieren genoteerd worden. Wanneer de sterkte gebaseerd is op de buigsterkte van het hout, wordt de sterkte op de volgende manier genoteerd: C_{xx} , waarbij xx verwijst naar de 5-percentiel karakteristieke buigsterkte. Wanneer de sterkte gebaseerd is op de treksterkte van het hout, wordt de sterkte als volgt genoteerd: T_{xx} waarbij xx verwijst naar de 5-percentiel karakteristieke treksterkte. Voor hardhout wordt er een andere manier gebruikt om de sterkte te noteren, namelijk: D_{xx} , waarbij xx verwijst naar de 5-percentiel karakteristieke buigsterkte [18].

Binnen deze masterproef wordt er gebruikgemaakt van zacht hout, waarbij de sterkte gebaseerd is op de buigsterkte. EN 338 [18] definieert de meest voorkomende sterkteklassen in Europa, voor zacht hout zijn dit: C16, C18, C24 en C30. Daarom wordt er specifiek gebruikgemaakt van hout met sterkteklasse C24. Tabel 1 geeft de mechanische eigenschappen per sterkteklasse van zacht hout weer.

Tabel 1: Mechanische eigenschappen per sterkteklasse van zacht hout [18]

	Class	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Strength properties in N/mm²													
Bending	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tension parallel	$f_{t,0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
Tension perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compression parallel	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Compression perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
Shear	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Stiffness properties in kN/mm²													
Mean modulus of elasticity parallel bending	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
5 percentile modulus of elasticity parallel bending	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
Mean modulus of elasticity perpendicular	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Mean shear modulus	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Density in kg/m³													
5 percentile density	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Mean density	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520
NOTE 1 Values given above for tension strength, compression strength, shear strength, char. modulus of elasticity in bending, mean modulus of elasticity perpendicular to grain and mean shear modulus have been calculated using the equations given in EN 384.													
NOTE 2 The tension strength values are conservatively estimated since grading is done for bending strength.													
NOTE 3 The tabulated properties are compatible with timber at moisture content consistent with a temperature of 20 °C and a relative humidity of 65 %, which corresponds to a moisture content of 12 % for most species.													
NOTE 4 Characteristic values for shear strength are given for timber without fissures, according to EN 408.													
NOTE 5 These classes may also be used for hardwoods with similar strength and density profiles such as e.g. poplar or chestnut.													
NOTE 6 The edgewise bending strength may also be used in the case of flatwise bending.													

4.1.2 Vochtgehalte

Het vochtgehalte heeft een belangrijke invloed op de mechanische eigenschappen van het hout. Een verandering van het vochtgehalte kan leiden tot een verandering van de stijfheid en sterkte en maatveranderingen door krimpen of zwellen. Ook speelt het

vochtgehalte een rol bij het bepalen van de modificatiefactoren k_{mod} en k_{def} , die nodig zijn bij het bepalen van de bezwijkingsmechanismen.

Volgens formule 1 kan het vochtgehalte in het hout bepaald worden [19].

$$\omega = \frac{P_{\omega} - P_s}{P_s} \cdot 100\% \quad (1)$$

Met:

- ω het vochtgehalte in procent %;
- P_{ω} het gewicht van het proefstuk, in g;
- P_s het droog gewicht van het proefstuk, in g.

Wanneer het vochtgehalte een waarde van ongeveer 0% heeft, is het proefstuk volledig droog. Deze waarde wordt bekomen wanneer het proefstuk na een bepaalde tijd uit de oven gehaald wordt. Het vezelvezelverzadigingspunt van het hout wordt bereikt wanneer het hout een vochtgehalte van ongeveer 25% tot 30% bezit, het water vormt hierbij groepen met de moleculeketens. Indien het vochtgehalte verder stijgt, worden de poriën steeds meer gevuld met vrij water. Het vrij water wordt bij droging als eerst terug afgegeven. Wanneer alle poriën gevuld zijn bevindt het hout zich in een volledig verzadigde toestand.

In deze masterproef wordt het vochtgehalte van verschillende houtsoorten bepaald volgens de volgende procedure. Voordat de testen van start gaan, worden zes houten proefstukken van elke houtsoort in een oven geplaatst bij een temperatuur van 100°C ($\pm 3^{\circ}\text{C}$) graden Celsius. Voorafgaand aan het plaatsen in de oven worden de proefstukken gewogen, wat resulteert in het 'natte' gewicht van de proefstukken. Gedurende de ovenperiode worden de proefstukken regelmatig opnieuw gewogen. Zodra het gewicht stabiel blijft, zijn de proefstukken droog en kunnen ze uit de oven worden gehaald. Met behulp van het 'natte' gewicht en het droge gewicht van de houten proefstukken kan het vochtgehalte worden berekend met behulp van formule 1.

4.1.3 Dichtheid

Een andere mechanische eigenschap van het hout is de dichtheid. De dichtheid kan worden onderverdeeld in twee concepten: de gemiddelde dichtheid en de karakteristieke dichtheid. De gemiddelde dichtheid wordt berekend door de massa van een bepaald volume hout te delen door dat volume, zoals weergegeven in formule 2.

$$\rho_m = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Met:

ρ_m de gemiddelde volumieke massa van het hout, in kg/m^3 ;

m de massa van het hout, in kg;

V het volume van het hout, in m^3 .

Aan de hand van de gemiddelde dichtheid kan de karakteristieke dichtheid bepaald worden. Dit wordt gedaan aan de hand van formule 3.

$$\rho_k = \rho_m - 1,65(0,1\rho_m) \quad (3)$$

Met:

ρ_k de karakteristieke volumieke massa van het hout, in kg/m^3 .

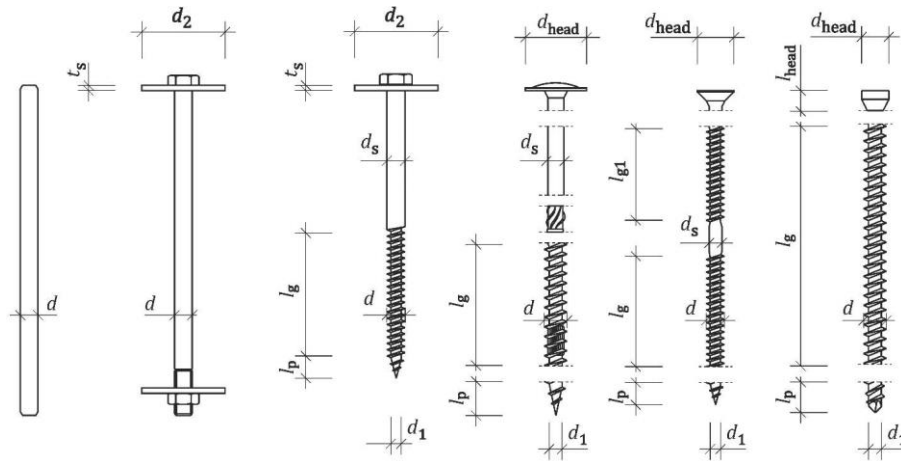
De karakteristieke dichtheid wordt gebruikt bij het uitvoeren van berekeningen voor de karakteristieke stuiksterkte, welke nodig zijn voor het bepalen van de bezwijkingsmechanismen.

De sterkte van het hout is afhankelijk van de dichtheid, houtsoorten met een grote sterkte hebben steeds een grotere dichtheid. Bij het uitvoeren van de testen speelt de dichtheid dan ook een rol.

4.2 Verbindingen

4.2.1 Type verbindingsmiddelen + kenmerken

In houtconstructies kunnen verbindingen worden onderverdeeld in drie typen: stiftvormige metalen verbindingsmiddelen, contactverbindingen en gelijkde verbindingen. Deze masterproef richt zich specifiek op stiftvormige metalen verbindingen, zoals geïllustreerd in figuur 4, vanwege hun faciliterende rol bij hergebruik. Bouten, nagels, schroeven, deuvels en nieten worden beschouwd als stiftvormige verbindingen. Bouten en deuvels vormen sterke verbindingen die voornamelijk worden gebruikt voor balk-kolom en balk-balk verbindingen. Nagels, schroeven en nieten daarentegen vertegenwoordigen minder sterke verbindingen en worden gebruikt voor plaat-stijl verbindingen en niet-structurele verbindingen [20]. Houtconstructies kunnen verschillende configuraties hebben, namelijk hout-op-hout, staal-op-hout en plaat-op-hout constructies. Het gebruikte constructiemateriaal is uiteraard van belang bij het bepalen van de prestaties van de verbindingsmiddelen. Deze masterproef richt zich op hout-op-hout constructies.



Figuur 4: Stiftvormige metalen verbindingen [15]

Deze verbindingen worden beschreven in Eurocode 5, specifiek hoofdstuk 8. Ondanks de richtlijnen die in deze norm worden gegeven, blijven er beperkingen bestaan [21] [22]. Het ontwerp van verbindingen speelt een uiterst belangrijke rol bij het ontwerpproces van houtconstructies, aangezien de verbindingen bijdragen aan de verdeling van krachten. Een slechte ontwerpaanpak voor verbindingen kan resulteren in het falen van de houtconstructie. Volgens [21] is een slecht ontwerp van verbindingen verantwoordelijk voor 23% van de gevallen van falen van houtconstructies.

De prestaties van houtconstructies zijn afhankelijk van zowel het systeem en de verbinding als de eigenschappen van de metalen verbinding en het hout. Verscheidene eigenschappen worden gebruikt om het gedrag van verbindingen te beschrijven, waaronder sterkte, stijfheid, effectief aantal verbindingen en ductiliteit [22] [23]. Belangrijke parameters voor de sterkte van het metaal zijn de treksterkte f_u en het vloeimoment $M_{y,k}$. Voor het systeem spelen parameters zoals de houtdikte t , de stuiksterkte van het hout f_h en de axiale uitreksterkte F_{ax} een rol [24].

De karakteristieke sterkte en stijfheid van een verbindingsmiddel kunnen worden bepaald aan de hand van trek- en drukproeven, die worden beschreven in de norm EN 1380 [25]. Deze norm beschrijft testmethoden waarmee de sterkte en vervorming van verbindingen in houten constructies met nagels, deuvels, schroeven en bouten kunnen worden vastgesteld. Deze methoden zijn van toepassing op verbindingen met houten elementen, evenals op producten die zijn gebaseerd op hout en metalen platen.

De sterkte van een hout-op-hout verbinding kan worden berekend met behulp van de Johansen-theorie. De prestatie-eigenschappen van de verbindingsmiddelen die gebruikt worden in deze masterproef worden beschreven in de European Technical Assessment (ETA), die overeenkomt met het European Assessment Document (EAD) [26].

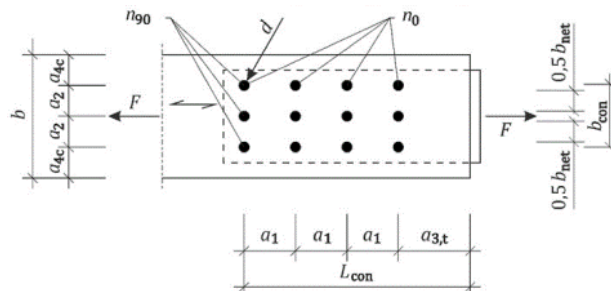
4.2.2 Tussen, eind- en randafstanden

Bij het plaatsen van de verbindingsmiddelen dienen specifieke rand- en tussenafstanden in acht te worden genomen. De richtlijnen voor deze afstanden worden beschreven in Eurocode NBN EN 1995-1-1 [23], en zijn afhankelijk van het type verbindingsmiddel.

In tabel 2 worden de vereiste minimale afstanden weergegeven voor bouten en schroeven die loodrecht op de vezelrichting worden geplaatst. Figuur 5 illustreert de specifieke tussen-, eind- en randafstanden die worden toegepast.

Tabel 2: Minimum tussen-, eind- en randafstanden van de verbindingen loodrecht op de vezelrichting

	a_1 [mm]	a_2 [mm]	$a_{3,t}$ [mm]	$a_{3,c}$ [mm]	$a_{4,t}$ [mm]	$a_{4,c}$ [mm]
B, S	5d	4d	max(7d; 80)	4d	4d	3d

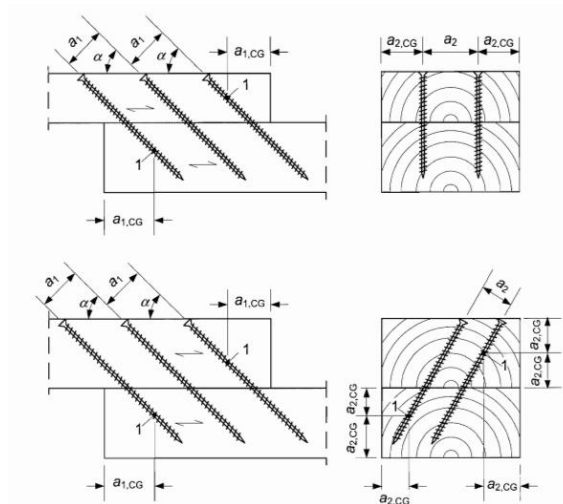


Figuur 5: Tussen-, eind- en randafstanden [27]

Voor schuine schroeven gelden specifieke rand- en eindafstanden. Deze afstanden, zoals weergegeven in figuur 6, worden ook beschreven in de norm NBN EN 1995-1-1 [23]. Tabel 3 geeft de vereiste minimale afstanden weer die dienen te worden toegepast.

Tabel 3: Minimum tussen-, eind- en randafstanden van de schuine schroeven

	a_1 [mm]	a_2 [mm]	$a_{1,CG}$ [mm]	$a_{2,CG}$ [mm]
S45D; S45T; SX	7d	5d	10d	4d



Figuur 6: Tussen-, eind- en randafstanden voor schuine schroeven

4.3 Verbindingsmiddelen

4.3.1 Schroeven

Onder de stiftvormige verbindingen zijn schroeven de meest gebruikte verbindingsmiddelen [26]. Vooral zelftappende schroeven worden veelvuldig gebruikt in zowel lichte als massieve houtconstructies binnen de houtbouw. Hout vertoont anisotrope eigenschappen met een lage sterktecapaciteit loodrecht op de houtnerf en onder afschuiving. Schroeven spelen een cruciale rol bij het overdragen van spanning in houtconstructies, waarbij ze een versterkende werking hebben bij schroeven loodrecht op de vezelrichting [15].

Schroeven bestaan doorgaans uit drie hoofdcomponenten: de kop, de schroefdraad en de zelfborende punt. Deze componenten kunnen verder worden onderverdeeld op basis van een al dan niet verzonken kop. Schroeven kunnen worden geclassificeerd op basis van de schroefdraad. Er zijn schroeven met gedeeltelijke schroefdraad, ook wel enkele schroefdraad genoemd (ST), schroeven met dubbele schroefdraad (DT) en schroeven met volledige schroefdraad (FT) [28] [29]. Schroeven met volledige schroefdraad zorgen voor een gelijkmatige verdeling van de kracht [28]. De eigenschappen van de schroeven worden bepaald volgens de productnormen van de fabrikant. Figuur 7 toont vier verschillende schroeven met gedeeltelijke schroefdraad (ST_A en ST_B) en met dubbele schroefdraad (DT_A en DT_B). Figuur 8 toont een schroef met volledige schroefdraad.



Figuur 7: Schroef types gedeeltelijk schroefdraad, dubbele schroefdraad [29]



Figuur 8: Schroef met volledige schroefdraad [28]

a Mechanische eigenschappen

Er is reeds onderzoek verricht naar de mechanische eigenschappen van schroeven in houtconstructies. Een studie uitgevoerd door *G. Schiro et al.* heeft de mechanische eigenschappen van schroeven in een hybride houtconstructie gekarakteriseerd op basis van stijfheid, sterkte, statische vervormbaarheid en reststerkte. Hieruit is geconcludeerd dat de schroefdraadsoort, de inbrenghoek van de schroeven, de diameter van de schroef en het houttype (massief of zacht hout) invloed hebben op de sterkte en stijfheid van de houtconstructie [29]. Schroefverbindingen vertonen een grotere sterkte en stijfheid wanneer het verbindingsmiddel onder een hoek, zoals 30° of 45° , ten opzichte van het glijvlak wordt geplaatst, in plaats van loodrecht daarop [28] - [30].

R. Tomasi et al. hebben een studie uitgevoerd naar het inbrengen van schroeven onder verschillende hoeken in een hout-op-hout verbinding met één afschuifvlak. Op basis van experimentele testen is een analyse gemaakt van de belasting in relatie tot de verplaatsing. Hieruit konden de belangrijkste parameters die de mechanische eigenschappen van schroeven beschrijven worden afgeleid, zoals sterkte, stijfheid, effectief aantal schroeven en ductiliteit. Tevens zijn formules voorgesteld om de karakteristieke sterkte $F_{v,Rk}$, de stijfheid en de verschuivingsmodulus K_{ser} voor schuine verbindingen te berekenen. Voor de karakteristieke sterkte en verschuivingsmodulus tonen de formules van Eurocode 5 de beste overeenstemming met de testresultaten voor schroeven die loodrecht op het afschuifvlak staan [24].

4.3.2 Bouten

Bouten vormen een ander veelgebruikt verbindingsmiddel in houtconstructies. Deze verbindingen zijn verkrijgbaar in verschillende maten en kunnen op verschillende manieren worden toegepast in houtconstructies. Bouten zijn bijzonder geschikt vanwege hun vermogen om laterale krachten over te brengen en te weerstaan. Materiaaleigenschappen, zoals het type hout, het type bout en de afmetingen van de verbinding, hebben invloed op de afschuifsterkte van de verbinding. De uiteindelijke sterkte van de boutverbinding hangt af van de afstanden tot de uiteinden en de randen

van de boutverbinding, de verankering van de bout, het vloeimoment van de bout en de dikte [31].

De berekeningsmethode om de stijfheid van boutverbindingen te bepalen is nog niet optimaal. Volgens [32] bestaat er momenteel geen goede methode om het bezwijkgedrag van boutverbindingen in houtconstructies te voorspellen [32]. Onderzoek is uitgevoerd om de stijfheid van boutverbindingen te bepalen en formules zijn ontwikkeld voor de dragende stijfheid van deuvels, zowel loodrecht als parallel aan de vezelrichting. De stijfheid is gerelateerd aan de boutdiameter en de massa-dichtheid. De boutstijfheid loodrecht op de vezelrichting is driemaal kleiner dan de boutstijfheid parallel aan de vezelrichting. De berekeningsmethode van Eurocode 5 voor het bepalen van de stijfheid wordt in 68,7% van de gevallen overschat [32]. Ook de kwaliteit van het staal van de bouten heeft invloed op de berekening van de capaciteit van de verbinding, zoals weergegeven in tabel 4.

Tabel 4: Staalkwaliteit bouten

Staalkwaliteit	4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	8.8	10.9
$f_{y,k}$ [N/mm ²]	240	320	300	400	360	640	900
$f_{u,k}$ [N/mm ²]	400	400	500	500	600	800	1000

5 Analytische berekening

5.1. Vloeimoment

De berekening van het vloeimoment van verbindingsmiddelen zoals bouten, nagels en schroeven wordt ook uitgevoerd met behulp van verschillende formules. Voor bouten wordt het vloeimoment berekend aan de hand van formule 4 [23].

$$M_{y,Rk} = 0,3f_{u,k}d^{2,6} \quad (4)$$

Met:

$M_{y,Rk}$ het karakteristieke vloeimoment van de verbinding, in Nmm²;

$f_{u,k}$ de karakteristieke treksterkte, in N/mm²;

d de diameter van de verbinding, in mm.

Bij gebruik van nagels is het vloeimoment afhankelijk van de vorm van de nagels, zoals weergegeven in formule 5 en 6. Voor deze formules moet de treksterkte van de staaldraad een minimum hebben van 600 N/mm² [23].

$$M_{y,Rk} = 0,3f_u d^{2,6} \quad \text{voor ronde nagels} \quad (5)$$

$$M_{y,Rk} = 0,45f_u d^{2,6} \quad \text{voor vierkante of geprofileerde nagels} \quad (6)$$

Met:

f_u de treksterkte van de staaldraad, in N/mm².

Het vloeimoment van schroeven wordt, zoals eerder vermeld, bepaald door de diameter van de schroef. Bij een diameter groter dan 6 mm wordt het vloeimoment bepaald op dezelfde manier als voor de bouten. Bij een diameter kleiner dan of gelijk aan 6 mm wordt het vloeimoment bepaald aan de hand van de formules voor de nagels [23].

5.2. Stuiksterkte

Bij de berekening van de stuiksterkte wordt een onderscheid gemaakt tussen hout-op-hout verbindingen en plaat-op-hout verbindingen. Aangezien dit onderzoek gericht is op hout-op-hout verbindingen, zijn de volgende formules alleen van toepassing op dergelijke verbindingen. Voor het bepalen van de stuiksterkte wordt er tevens onderscheid gemaakt tussen bouten, nagels en schroeven. Voor bouten met een diameter kleiner dan 30 mm, wordt de stuiksterkte berekend volgens formule 7 [23].

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (7)$$

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (8)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \quad \text{voor naaldhout} \quad (9)$$

$$k_{90} = 1,30 + 0,015d \quad \text{voor LVL} \quad (10)$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015d \quad \text{voor loofhout} \quad (11)$$

Met:

$f_{h,\alpha,k}$ de karakteristieke stuiksterkte van het houtelement onder een hoek α , in N/mm²;

$f_{h,0,k}$ de karakteristieke stuiksterkte evenwijdig aan de vezelrichting, in N/mm²;

k_{90} factor afhankelijk van soort hout;

α de hoek tussen de belasting en de vezelrichting;

d de diameter van de verbinding, in mm;

ρ_k de karakteristieke volumieke massa van het hout, in kg/m³.

Bij het gebruik van nagels met een diameter kleiner dan 8 mm, wordt er onderscheid gemaakt tussen stuiksterkte in verbindingen met voorgeboorde gaten en verbindingen zonder voorgeboorde gaten. Voor verbindingen zonder voorgeboorde gaten in het hout, wordt de stuiksterkte berekend volgens formule 12 [23].

$$f_{h,k} = 0,082\rho_k d^{-0,3} \quad (12)$$

Met:

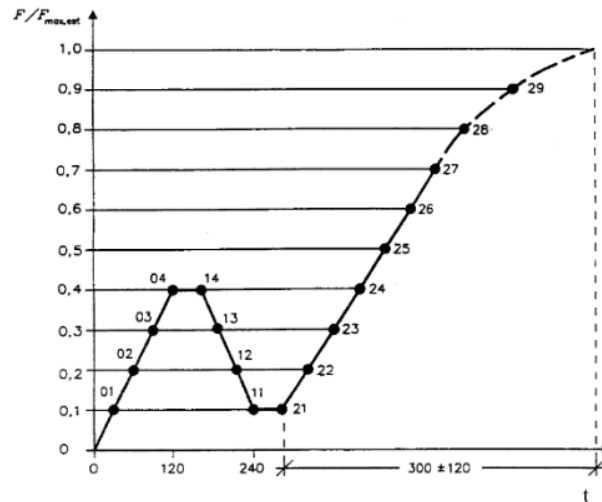
$f_{h,k}$ De karakteristieke stuiksterkte, in N/mm²

Wanneer de gaten voorgeboord worden in het hout, wordt de stuiksterkte berekend aan de hand van formule 13 [23].

$$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (13)$$

Bij het gebruik van schroeven wordt de stuiksterkte bepaald aan de hand van de diameter van de schroef. Bij een diameter groter dan 6 mm wordt de stuiksterkte bepaald volgens de formules van de bouten. Voor schroeven met een diameter kleiner dan of gelijk aan 6 mm wordt de stuiksterkte bepaald volgens de formules van nagels [23].

De procedure voor het bepalen van de stuiksterkte wordt beschreven in de norm EN 383 [33]. Het houten proefstuk met het verbindingsmiddel wordt geplaatst tussen twee staalplaten. Een belasting wordt loodrecht op de vezelrichting op de verbinding aangebracht, waarbij de resulterende vervorming wordt gemeten. EN 383 [33] geeft specifieke afmetingen waaraan het proefstuk moet voldoen. De resultaten worden weergegeven in een belasting-vervormingsdiagram. Figuur 9 illustreert de belasting-vervormingsrelatie van de maximale belasting in functie van de tijd.



Figuur 9: Test principe stuiksterkte EN 383 [33]

Het proefstuk wordt gedurende een periode van 120 s voorbelast tot $0,4 F_{max}$, waarna het gedurende 30 s wordt belast. Vervolgens wordt de belasting verlaagd tot $0,1 F_{max}$ gedurende 30 s. Daarna wordt de belasting gelijkmatig verhoogd tot F_{max} over een periode van $300 \text{ s} \pm 120 \text{ s}$. Tijdens deze belasting worden de vervormingen ook gemeten op de aangegeven punten. De stuiksterkte kan met een nauwkeurigheid van 1% worden berekend met behulp van formule 14 [33].

$$f_h = F_{max}/(dt) \quad (14)$$

Met:

f_h de stuiksterkte, in N/mm^2 ;

F_{max} de maximale belasting op het proefstuk, in N.

5.3 Axiale uittreksterkte

5.3.1 Bouten

Voor bouten moet de axiale uittreksterkte gelijk zijn aan het minimum van de sterkte van de bout, de sterkte van de sluitring of de hout druksterkte onder de sluitring op het contactoppervlak [23].

$$F_{ax,Rk} = \min(N_{t,Rk}; B_{p,Rk}; N_{R,c,90,k}) \quad (15)$$

Met:

$F_{ax,Rk}$ de karakteristieke axiale uittreksterkte van het verbindingsmiddel, in N;

$N_{t,Rk}$ de karakteristieke sterkte van de bout, in N;

$B_{p,Rk}$ de karakteristieke sterkte van de sluitring of de staalplaat, in N;

$N_{c,90,Rk}$ de hout druksterkte onder de sluitring op het contact oppervlak, in N.

De sterkte van de bout wordt berekend volgens formule 16 [23].

$$N_{t,Rk} = f_{y,k} A_{eff} \quad (16)$$

Met:

$f_{y,k}$ de karakteristieke vloeigrens van staal, in N/mm²;

A_{eff} de effectieve oppervlakte van de bout, in mm².

De sterkte van de sluitring wordt bepaald aan de hand van formule 17 [23].

$$B_{p,Rk} = 0,6\pi d_m t_p f_{u,k} \quad (17)$$

$$d_m = \min\left(\frac{e_{head} + s_{head}}{2}; \frac{e_{nut} + s_{nut}}{2}\right) \quad (18)$$

Met:

d_m de gemiddelde diameter van het verbindingsmiddel, in mm;

t_p de indringingsdiepte van het verbindingsmiddel, in mm;

$f_{u,k}$ de karakteristieke treksterkte, in N/mm²;

e_{head} de overhoeksmaat van de bout, in mm;

s_{head} de sleutelwijken van de bout, in mm;

e_{nut} de overhoeksmaat van de moer, in mm;

s_{nut} de sleutelwijken van de moer, in mm.

Om de druksterkte van het hout onder de sluitring op het contactoppervlak te bepalen wordt formule 19 gebruikt [23].

$$N_{c,90,Rk} = \sigma_{c,90,Rk} A_{sluitring} = 3f_{c,90,Rk} \frac{\pi}{4} (d_{sluitring}^2 - d_{bout}^2) \quad (19)$$

$$\text{Hierbij is } d_{sluitring} \leq \min(12t_{sluitring}; 4d_{bout}). \quad (20)$$

Met:

$\sigma_{c,90,Rk}$ de karakteristieke trekspanning loodrecht op de vezelrichting, in N;

$A_{sluitring}$ de oppervlakte van de sluitring, in mm²;

$f_{c,90,Rk}$ de karakteristieke druksterkte loodrecht op de vezelrichting, in N/mm²;

$d_{sluitring}$ de buitenste diameter van de sluitring, in mm;

d_{bout} de diameter van de bout, in mm;

$t_{sluitring}$ de dikte van de sluitring, in mm.

5.3.2 Schroeven

Voor schroeven geldt het volgende [23]:

$$6 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$$

$$0,6 \leq \frac{d_1}{d} \leq 0,75 \quad (21)$$

Met:

d de diameter van de verbinding, in mm;

d_1 de diameter van de kern van de verbinding, in mm.

De axiale uittreksterkte van de schroeven is gelijk aan het minimum van de uittrekkraft van de schroef onder een hoek α met de vezelrichting, de doorstreksterkte van de schroef loodrecht op de vezelrichting en de trekweerstand van de schroef [23].

$$F_{ax,Rk} = \min(F_{ax,\alpha,Rk,1}; F_{ax,Rk,2}; F_{t,Rk}) \quad (22)$$

Met:

- $F_{ax,Rk}$ de karakteristieke axiale uittreksterkte van het verbindingsmiddel, in N;
- $F_{ax,\alpha,Rk,1}$ de karakteristieke uittrekkkracht van de verbinding onder een hoek α met de vezelrichting, in N;
- $F_{ax,Rk,2}$ de karakteristieke doortreksterkte van de verbinding loodrecht de vezelrichting, in N;
- $F_{t,Rk}$ de karakteristieke trekweerstand van de schroef, in N.

De karakteristieke uittreksterkte voor schroeven kan dan berekend worden volgens formule 23 [23]:

$$F_{ax,\alpha,Rk,1} = \frac{n_{ef} f_{ax,k} d l_{ef} k_d}{1,2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \quad (23)$$

$$f_{ax,k} = 0,52 d^{-0,5} l_{ef}^{-0,1} \rho_k^{0,8} \quad (24)$$

$$k_d = \min\left(\frac{d}{8}; 1\right) \quad (25)$$

Met:

- n_{ef} het meewerkend aantal verbindingsmiddelen op één rij, evenwijdig aan de vezelrichting;
- $f_{ax,k}$ de karakteristieke uittreksterkte loodrecht op de vezelrichting, in N/mm²;
- l_{ef} de penetratiediepte van het deel met schroefdraad, in mm;
- α de hoek tussen de belasting en de vezelrichting;
- ρ_k de karakteristieke volumieke massa van het hout, in kg/m³.

Indien vergelijking 21 van de diameters niet geldt, wordt formule 26 toegepast om de karakteristieke uittreksterkte te bepalen [23].

$$F_{ax,\alpha,Rk,1} = \frac{n_{ef} f_{ax,k} d l_{ef}}{1,2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \left(\frac{\rho_k}{\rho_a}\right)^{0,8} \quad (26)$$

Om te voorkomen dat de kop van de schroef afgetrokken wordt, geldt er voor de schroeven ook een karakteristieke doortrekweerstand. Deze trekweerstand wordt bepaald aan de hand van formule 27 [23]:

$$F_{ax,Rk,2} = n_{ef} f_{head,k} d_h^2 \left(\frac{\rho_k}{\rho_a}\right)^{0,8} \quad (27)$$

Met:

- n_{ef} het meewerkend aantal verbindingsmiddelen op één rij, evenwijdig aan de vezelrichting;
- $f_{head,k}$ de karakteristieke doortrekparameter van de schroef, in N/mm²;
- d_h de diameter van de schroefkop, in mm;
- ρ_a de bij $f_{ax,k}$ horende volumieke massa, in kg/m³.

De karakteristieke trekweerstand van de verbinding moet ook in rekening worden gebracht bij de bepaling van de uittreksterkte, deze wordt berekend in formule 28 [23].

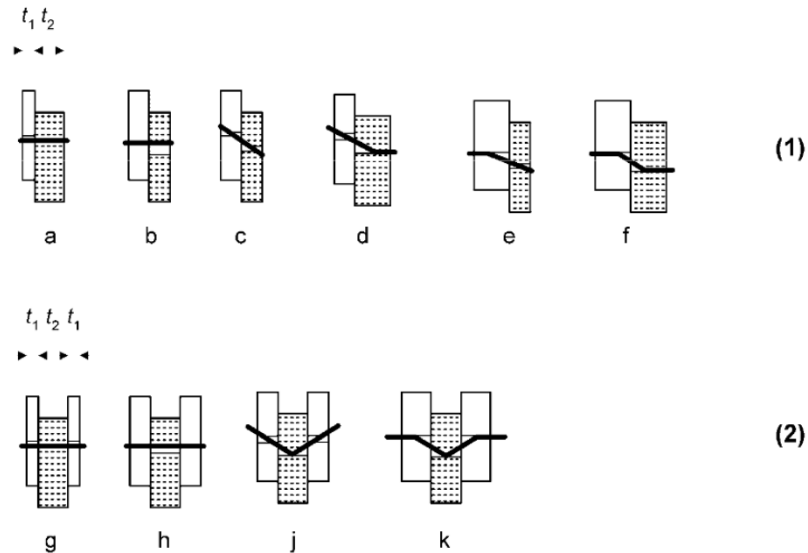
$$F_{t,Rk} = n_{ef} f_{tens,k} \quad (28)$$

Met:

- n_{ef} het meewerkend aantal verbindingsmiddelen op één rij, evenwijdig aan de vezelrichting;
- $f_{tens,k}$ de karakteristieke trekkracht van de schroef, in N/mm²;

5.4 Bepaling capaciteit

Voor het bepalen van de sterkte van een verbinding in een houten constructie wordt gebruik gemaakt van de Johansen-theorie. Deze theorie is gebaseerd op verschillende bezwijkmechanismen, die worden geïllustreerd in figuur 10. In Eurocode 5 [23] worden de bezwijkmechanismen ingedeeld op basis van het aantal afschuifvlakken, namelijk één of twee.



Figuur 10: Bezwijkmechanismen met (1) één afschuifvlak en met (2) twee afschuifvlakken [23]

De effectieve karakteristieke sterkte $F_{v,Rk}$ van hout-op-houtverbindingen van bouten en schroeven per verbindingsmiddel kan berekend worden met formules 29 en 31. De minimale waarde moet genomen worden van de formules per afschuifvlak. Formule 29 geldt voor verbindingen met één afschuifvlak [23].

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{h,1,k} t_1 d & (a) \\ f_{h,2,k} t_2 d & (b) \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (f) \end{array} \right. \quad (29)$$

Met:

$$\beta = f_{h,2,k} / f_{h,1,k} \quad (30)$$

Met:

- $f_{h,i,k}$ de karakteristieke stuiksterkte van het houten element i , in n/mm^2 ;
- t_i de hout- of plaatdikte of de hecht lengte, met i de waarde 1 of 2, in mm^2 ;
- d de diameter van de verbinding, in mm ;
- β de verhouding van de stuiksterkten van de elementen;
- $M_{y,Rk}$ het karakteristieke vloeimoment van de verbinding, in Nmm^2 ;
- $F_{ax,Rk}$ de karakteristieke axiale uittreksterkte van het verbindingsmiddel, in N .

Voor verbindingen met twee afschuifvlakken geldt dat de karakteristieke sterkte per afschuifvlak en per verbindingsmiddel moet voldoen aan het minimum van bovenstaande bezwijkmechanismen in Figuur 10 [23].

$$F_{v,RK} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & (g) \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & (h) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (i) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (j) \end{cases} \quad (31)$$

Met:

$$\beta = f_{h,2,k} / f_{h,1,k} \quad (32)$$

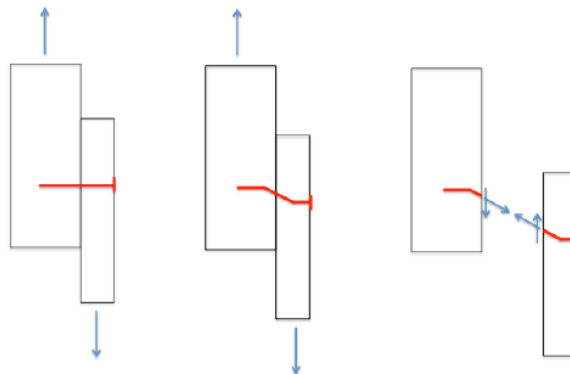
Het koordeffect van de bezwijkmechanismen, aangeduid als $F_{ax}/4$, wordt ook toegepast in formules 29 en 31. Dit effect treedt op wanneer de verbinding tussen de twee houtelementen vervormt. Er ontstaat een trekkracht die het verbindingsmiddel uit het ene houtelement wil trekken, deze kracht kan worden opgesplitst in horizontale en verticale componenten zoals weergegeven in figuur 11. De horizontale component houdt rekening met de wrijving tussen de twee houtelementen, terwijl de verticale component een extra bijdrage levert aan de capaciteit van de verbinding. Desalniettemin wordt de maximale trekkracht beperkt door het uittrekken van het verbindingsmiddel en het doortrekken van de kop door het andere houtelement. De verticale kracht wordt berekend met behulp van de formules van Johansen.

De axiale uittreksterkte $F_{ax,Rk}$ door het koordeffect van de schroeven is gelijk aan het minimum van de twee bovenstaande uittreksterktes en de karakteristieke trekweerstand van de schroef. Deze trekweerstand werd vastgesteld in overeenstemming met EN 14592 [34].

$$F_{ax,Rk} = \min(F_{ax,Rk,1}; F_{ax,Rk,2}; F_{t,Rk}) \quad (33)$$

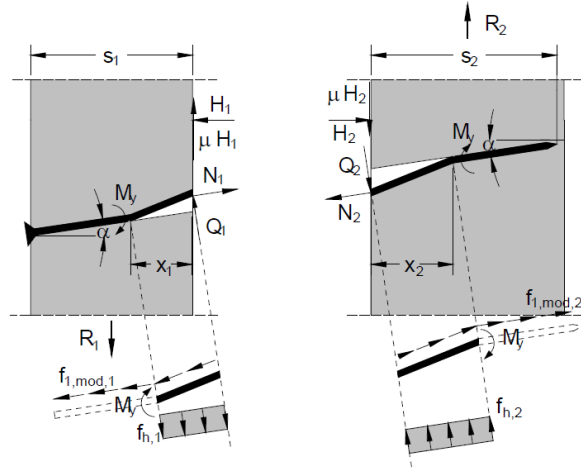
De invloed van het koordeffect hangt af van de vervorming van de verbinding en wordt in aanmerking genomen door een beperking van het Johansen-gedeelte per verbinding. De beperking van de bijdrage van het koordeffect wordt als geformuleerd in formule 34.

$$\frac{F_{ax}}{4} \leq \begin{cases} 15\% F_{v,Rk} & \text{Ronde nagels} \\ 25\% F_{v,Rk} & \text{Vierkante en geprofileerde nagels} \\ 25\% F_{v,Rk} & \text{Ander nagels} \\ 100\% F_{v,Rk} & \text{Schroeven} \\ 25\% F_{v,Rk} & \text{Bouten} \end{cases} \quad (34)$$



Figuur 11: Krachtwerking in verbindingmiddel bij bezwijkmechanisme f [35]

De formules 29 en 31 zijn afgeleid voor verbindingmiddelen die loodrecht op de verbindingas worden belast. In deze situatie wordt de uiteindelijke belasting beperkt door de stuiksterkte en het buigmoment van de verbindingmiddelen. Bij verbindingmiddelen die onder een hoek worden geplaatst, wordt de uiteindelijke belasting echter ook beperkt door de uittrekcapaciteit van het verbindingmiddel en de wrijving tussen de elementen. Om deze complexere situatie aan te pakken, hebben Bejtka en Blaß een geavanceerde theorie van Johansen ontwikkeld voor schuine verbindingmiddelen, weergegeven in formule 35. Deze theorie is specifiek gericht op hout-op-houtconstructies met schuine schroeven, waarbij α de hoek is tussen de schroefas en de richting loodrecht op de vezels. Figuur 12 illustreert de krachtwerking in hout-op-houtconstructie met schuine schroeven.



Figuur 12: Hout-op-houtconstructie met schuine schroeven [36]

$$F_{v,RK} = \min \left\{ \begin{array}{ll} F_{ax,Rk} \cdot \sin(\alpha) + f_{h,1,k} \cdot s_1 \cdot d \cdot \cos(\alpha) & (a) \\ F_{ax,Rk} \cdot \sin(\alpha) + f_{h,2,k} \cdot s_2 \cdot d \cdot \cos(\alpha) & (b) \\ F_{ax,Rk} \cdot [\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)] + \frac{f_{h,1,k} s_1 d}{1+\beta} (1 - \mu \cdot \tan(\alpha)) & \\ \cdot \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{s_2}{s_1} + \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{s_2}{s_1} \right) \right] & (c) \\ F_{ax,Rk} \cdot [\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)] + \frac{f_{h,1,k} s_1 d}{2+\beta} (1 - \mu \cdot \tan(\alpha)) & \\ \cdot \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d s_1^2}} - \beta \right] & (d) \\ F_{ax,Rk} \cdot [\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)] + \frac{f_{h,1,k} s_1 d}{2+\beta} (1 - \mu \cdot \tan(\alpha)) & \\ \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d s_2^2}} - \beta \right] & (e) \\ F_{ax,Rk} \cdot [\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)] + (1 - \mu \cdot \tan(\alpha)) \cdot \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} & \\ \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d \cos^2(\alpha)} & (f) \end{array} \right. \quad (35)$$

Met:

- μ De wrijvingsconstante in hout $\mu = 0,25$;
- s_1 De verankeringslengte in het eerste houtelement gemeten parallel op het afschuifvlak
- s_2 De verankeringslengte in het tweede houtelement gemeten parallel op het afschuifvlak

De effectieve karakteristieke sterkte $F_{v,ef,Rk}$ wordt berekend met behulp van formule 36.

$$F_{v,ef,Rk} = n_{ef} F_{v,Rk} \quad (36)$$

Met:

$F_{v,ef,Rk}$ de effectieve karakteristieke sterkte, in N;

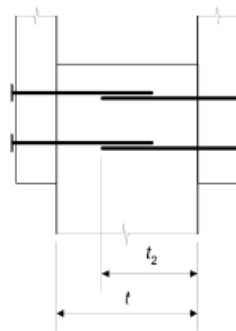
n_{ef} het meewerkend aantal verbindingsmiddelen op één rij, evenwijdig aan de vezelrichting;

$F_{v,Rk}$ de karakteristieke sterkte per snede en per verbindingmiddel, in N.

Bij schroeven met een gladde schacht moet rekening worden gehouden met de meewerkende diameter d_{ef} . In het geval van schroeven met een gladde schacht, waarbij de diameter van de buitenkant van de schroefdraad d gelijk is aan de diameter van de schacht d_1 , wordt de meewerkende diameter d_{ef} als volgt bepaald:

- meewerkende diameter d_{ef} wordt genomen als diameter van de gladde schacht
- hechtlengthe van de gladde schacht in het element waar de punt van de schroef bevindt $> 4d$.

Indien deze voorwaarden niet getroffen kunnen worden dan is d_{ef} gelijk aan $1,1 \cdot d_1$. Een minimum hechtlengthe van $6d$ moet verzekerd worden, zodat de verbinding onder schuifspanning werkt en er geen uittrekking van de schroef voordoet. De overlapping van de schroeven in het middendeel ($t_2 - t_1$), weergegeven in figuur 13, moet groter zijn dan $4d$, zodat de schroeven elkaar niet beïnvloeden [23].



Figuur 13: Overlappingslengthe [23]

Verbindingen met meer dan één verbindingmiddel

Voor verbindingen in één rij evenwijdig aan de vezelrichting kan de sterkte bepaald worden volgens formule 37 [23].

$$F_{v,Rk,Vb} = n_{ef} F_{v,Rk,i} \quad (37)$$

Met:

$F_{v,Rk}$ de karakteristieke sterkte per snede en per verbindingsmiddel, in N;

n_{ef} het meewerkend aantal verbindingsmiddelen op een rij evenwijdig aan de vezelziching.

Bij het gebruik van bouten wordt n_{ef} bepaald aan de hand van formule 38 [23].

$$n_{ef} = \min\left(n; n^{0,9^4} \sqrt{\frac{a_1}{13d}}\right) \quad (38)$$

Met:

n het aantal verbindingen op één rij;

a_1 de tussenafstand van de verbindingen in de vezelrichting, in mm;

d de diameter van de verbinding, in mm.

Bij belastingen die loodrecht op de vezelrichting inwerken is het meewerkende aantal bouten gelijk aan het aantal bouten in een rij [23].

$$n_{eff} = n \quad (39)$$

Wanneer de belasting onder een hoek tussen 0° en 90° op de vezelrichting inwerkt, kan het meewerkend aantal bouten n_{eff} bepaald worden door een lineaire interpolatie uit te voeren tussen $\alpha = 0^\circ$ en $\alpha = 90^\circ$ [23].

Voor schroeven met een diameter d groter dan 6 mm worden de formules van bouten gebruikt om het meewerkend aantal schroeven te bepalen. Indien de diameter d kleiner dan of gelijk is aan 6 mm, worden de formules van nagels gebruikt [23].

Het meewerkend aantal schroeven voor een groep schroeven belast met een krachtcomponent wordt bepaald door formule 40 [23].

$$n_{ef} = n^{0,9} \quad (40)$$

In [37] wordt het meewerkend aantal schroeven voor een groep schroeven bepaald zoals weergegeven in formule 41.

$$n_{ef} = \max(n^{0,9}; 0,9n) \quad (41)$$

Bovenstaande formules kunnen enkel toegepast worden indien de verbindingsmiddelen op één rij liggen. Indien er meerdere rijen verbindingsmiddelen aanwezig zijn, evenwijdig

aan de vezelrichting met meer dan één afschuifvlak moet formule 42 worden toegepast [23].

$$F_{v,Rk,Vb} = n_{sp}n_{rows}n_{ef}F_{v,Rk,i} \quad (42)$$

Met:

n_{sp} het aantal afschuifvlakken;

n_{rows} het aantal rijen.

5.5. Bepaling Stijfheid K_{ser}

5.5.1 Analytische berekening

De berekening van de verschuivingsmodulus K_{ser} voor schroeven en bouten is afhankelijk van verschillende factoren, zoals de dichtheid van het gebruikte hout, de doorboring lengte in het hout en de buitendiameter van de schroef [30]. De specifieke formule voor de berekening van K_{ser} wordt bepaald door de gebruikstoestand (GGT) van de constructie zoals weergegeven in formule 43 [23].

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1.5} \cdot d}{23} \quad (43)$$

Met:

K_{ser} de verschuivingsmodulus, in kg/m²;

ρ_m de gemiddelde dichtheid, in kg/m³;

d de diameter van de verbinding, in m.

Formule 43 kan enkel toegepast worden indien de verbindingsmiddelen op één rij liggen. Indien er meerdere rijen verbindingsmiddelen aanwezig zijn, evenwijdig aan de vezelrichting met meer dan één afschuifvlak wordt formule 44 toegepast [23].

$$K_{ser} = n_{sp}n_{rows}n_{ef}K_{ser} \quad (44)$$

n_{sp} het aantal afschuifvlakken;

n_{rows} het aantal rijen.

n_{ef} het meewerkend aantal verbindingsmiddelen op een rij evenwijdig aan de vezelzichting.

De verschuivingsmodulus of de stijfheid op de uiterste grenstoestand K_u kan bepaald worden uit de stijfheid K_{ser} volgens formule 45.

$$K_U = \frac{2}{3} K_{ser} \quad (45)$$

Indien de dichtheid van de houtblokken verschillend zijn, wordt de gemiddelde dichtheid bepaald volgens formule 46.

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1} \cdot \rho_{m,2}} \quad (46)$$

Met:

$\rho_{m,1}$ de gemiddelde dichtheid van houtblok één, in kg/m³;

$\rho_{m,2}$ de gemiddelde dichtheid van houtblok twee, in kg/m³.

5.5.2 Experimentele berekening

De stijfheid K_{ser} kan tevens worden bepaald aan de hand van de belastings-verplaatsingscurve, waarbij formule 47 wordt toegepast [22].

Figuur 14 illustreert de belastings-verplaatsingsdiagram voor zowel schroeven als bouten, waarbij de stijfheid wordt aangegeven voor zowel de gebruiksgrenstoestand (GGT) als de uiterste grenstoestand (UGT). Het is belangrijk op te merken dat de uiterste grenstoestand enkel voor schroeven wordt weergegeven.

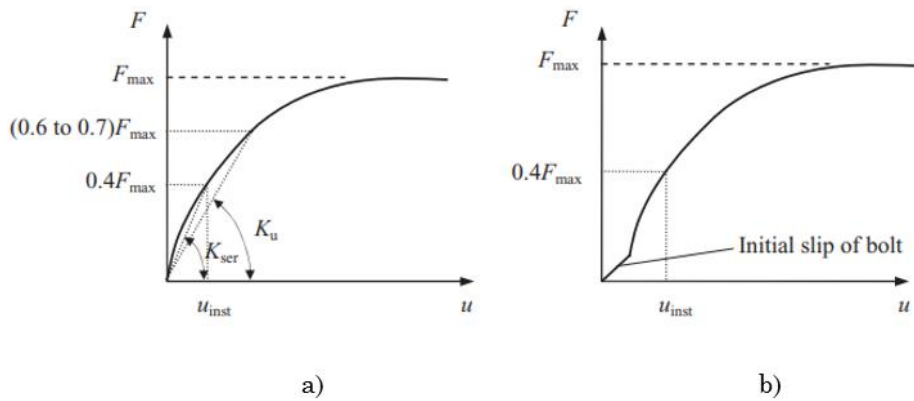
$$K_{ser} = \frac{0,4F_{max} - 0,1F_{max}}{v(0,4) - v(0,1)} \quad (47)$$

Met:

F_{max} de maximale kracht, in N;

$v(0,4)$ de verplaatsing bij 40% van de maximum kracht, in mm;

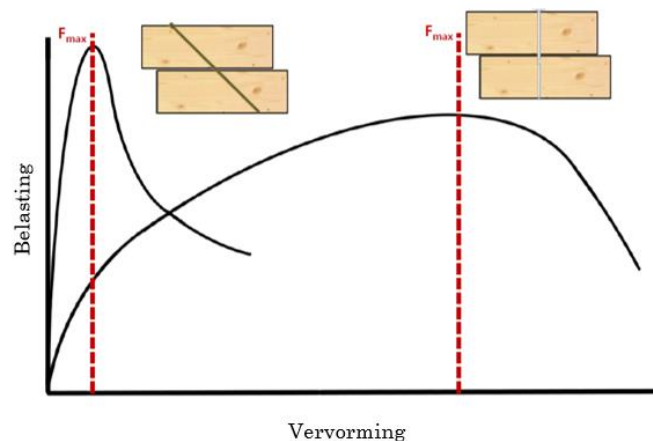
$v(0,1)$ de verplaatsing bij 10% van de maximale kracht, in mm.



Figuur 14: Belastings-verplaatsingsdiagram (F - v) voor a) schroeven, b) bouten [22]

5.6 Eigenschappen schuin vs. recht geplaatste schroeven

De stijfheid van schuin geplaatste schroeven is groter dan die van lateraal belaste schroeven. Bij schroeven die schuin in de houtconstructie zijn geplaatst, wordt de piekbelasting al bereikt na een kleinere vervorming, terwijl schroeven die loodrecht op de verbindingsas belast worden een grotere vervorming nodig hebben om de piekbelasting te bereiken. Deze bevinding wordt geïllustreerd in figuur 15. Het belasten van schroeven loodrecht op de vezelrichting wordt beschouwd als de meest efficiënte manier om krachten over te dragen [20].



Figuur 15: Belasting-vervormingsgrafiek schuine en laterale belaste schroeven [37]

Tomasi et al. hebben onderzoek uitgevoerd naar de theoretische en experimentele analyse van hout-op-hout constructies met schuin geplaatste schroeven. Uit deze bevindingen is gebleken dat schuine schroeven onder afschuiving-druk een lagere maximale toelaatbare belasting hebben dan schuine schroeven onder afschuiving-trek bij eenzelfde vervorming. Bovendien bleek dat de maximale belasting voor de 2+2 schuine schroeven onder een hoek

van 45 graden onder afschuiving-druk, drie keer kleiner is dan die voor schuine schroeven onder een hoek van 45 graden onder afschuiving-trek. De belasting voor de gekruiste schroeven onder een hoek van 45 graden is 1,25 keer kleiner dan die van de schuine schroeven onder een hoek van 45 graden onder afschuiving-trek [22].

Bij de analytische berekening wordt uitsluitend de uittreksterkte in beschouwing genomen, aangezien de maximale capaciteit wordt bereikt bij een geringe mate van vervorming. Deze omstandigheid leidt tot het overheersen van het koordeffect, terwijl de invloed van de Johansen-component beperkt blijkt te zijn bij schuine schroefverbindingen.

6 Proeven

6.1 Beschrijving van de proefstukken

6.1.1 Aanpak ontwerp proefstukken

Het concept van de invloed van het hergebruik van stiftvormige verbindingsmiddelen in houtconstructies is een breed begrip. Hierbij moeten verschillende variabelen in overweging worden genomen tijdens het ontwerpen van de proefstukken. De verschillende variabelen zijn:

- type verbindingsmiddel,
- hoek α , de hoek tussen de schroefas en de vezelrichting,
- houtsoort,
- belasting loodrecht of evenwijdig met de vezelrichting,
- aantal afschuifvlakken,
- diameter van de verbindingen.

De afmetingen van de proefstukken werden vastgesteld door middel van analytische berekeningen met behulp van formules 29 en 31. Deze berekeningen waren gericht op het verkrijgen van de bezwijkmechanismen (a) en (g of h) bij respectievelijk één afschuifvlak en twee afschuifvlakken, waarbij geen vervorming in het verbindingsmiddel werd toegestaan om het proefstuk optimaal te kunnen demonteren en monteren.

a Eerste voorstel

Er zijn diverse berekeningen uitgevoerd om de genoemde bezwijkmechanismen te verkrijgen. Voor bouten en schroeven werden de houtdiktes t_1 en t_2 en de diameter van het verbindingsmiddel gezocht voor zowel belasting loodrecht op als evenwijdig aan de vezelrichting. Voor deze configuraties werd een diameter van 8 mm aangenomen voor de verbindingsmiddelen. Tabel 5 geeft de diktes van de houtelementen per verbindingsmiddel weer voor de eerste poging. Bij de berekeningen werden aannames gemaakt voor het type schroef en bout. Voor de schroeven werd de constructieschroef HAPAX VZK-T 8x80 Zn gebruikt, en voor de bouten werd een staalkwaliteit van 8.8 aangenomen.

Tabel 5: Houtdikte proefstukken per soort verbindingmiddel voorstel 1

Verbindingsmiddel	Belasting met de vezelrichting	t_1 [mm]	t_2 [mm]
Bouten	Loodrecht	18	120
	Evenwijdig	18	120
Schroeven	Loodrecht	20	60
	Evenwijdig	20	60

Hierbij werd een probleem ondervonden voor de diktes 18 mm en 20 mm. Deze diktes zijn geen standaardwaarden van houten planken. Daarom was het niet mogelijk om deze diktes te gebruiken. Omdat circulariteit één van de belangrijke aspecten is van deze masterproef, werd er gekozen om zoveel mogelijk hout te gebruiken dat nog in voorraad was in het labo. Op deze manier moest er minder hout aangekocht worden. Het hout in het labo had een afmeting van 86 mm x 38 mm (breedte x dikte). Op basis van deze afmetingen werd een nieuw ontwerp gemaakt.

b. Tweede voorstel

Voor de tweede poging werd er gewerkt met het hout van het labo, met een breedte en dikte van 86 mm x 36 mm. Aangezien het ontwerp met voorgestelde afmetingen werd ontworpen, werd er geen rekening meer gehouden met het bezwijkingsmechanisme van de configuraties. De belasting loodrecht op de vezelrichting werd niet meer in rekening gebracht bij het tweede voorstel, vanwege de minimale waarden voor de eind-, tussen- en randafstanden van de verbindingen die dit niet toelieten.

In dit aangepast ontwerp werd de hoek α tussen de schroefas en de richting loodrecht op de vezel de nieuwe variabele. Alle configuraties hadden een houtdikte t_1 van 38 mm en t_2 van 86 mm. Het ontwerp omvatte de volgende aspecten:

- bouten $\alpha = 90^\circ$,
- schroeven $\alpha = 90^\circ$,
- schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek,
- schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk.

Bij dit tweede voorstel voldeden de eind- en randafstanden van de verbindingmiddel in het tweede houtelement niet, enkel in het eerste houtelement. Figuur A.1 tot en met figuur A.4 in bijlage A geeft een schets van het tweede voorstel weer.

c *Derde voorstel*

Bij het derde voorstel werd het probleem aangepakt en werd er gezocht naar nieuwe afmetingen voor het tweede houtelement. Hierbij werd een nieuwe configuratie toegevoegd, waarbij schroeven zowel op afschuiving-trek en afschuiving-druk worden belast. Figuur A.5 in bijlage A geeft een schets van het derde voorstel weer. Tabel 6 geeft de afmetingen van de proefstukken per configuratie weer.

Tabel 6: Afmetingen proefstukken per configuratie van voorstel 3

Configuratie	t_1 [mm]	t_2 [mm]	b_1 [mm]	b_2 [mm]
<i>Bouten $\alpha = 90^\circ$</i>	38	58	86	63
<i>Schroeven $\alpha = 90^\circ$;</i>	38	58	86	63
<i>Schroeven $\alpha = 45^\circ$ afschuiving-trek</i>	38	58	86	63
<i>Schroeven $\alpha = 45^\circ$ afschuiving-druk</i>	38	58	86	63
<i>Schroeven gekruist $\alpha = 45^\circ$ afschuiving-druk en trek</i>	25	63	125	150

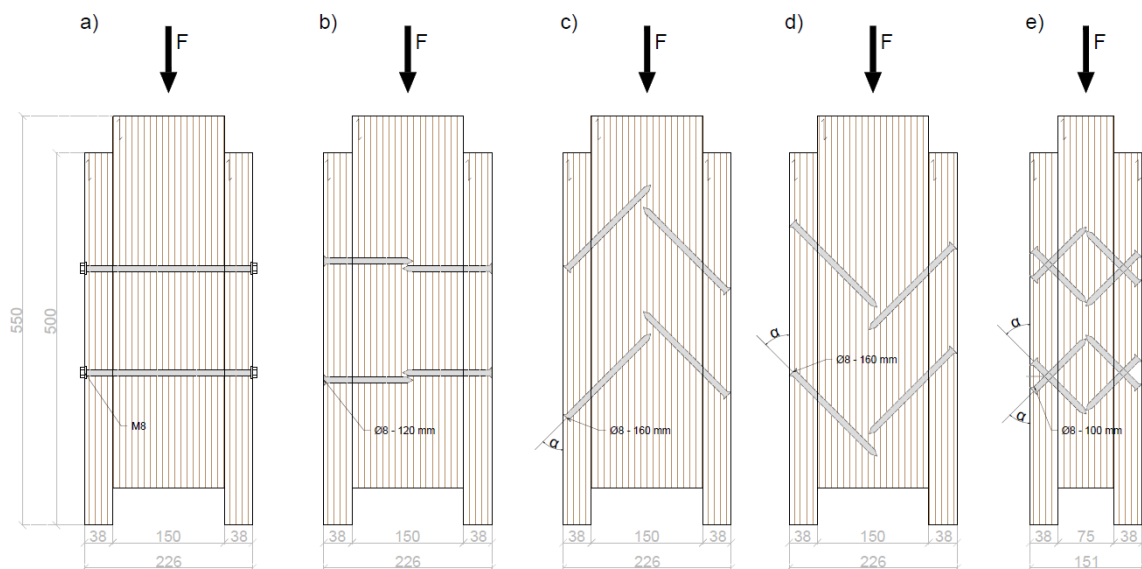
Er werd gestreefd naar uniforme afmetingen voor alle configuraties, behalve voor de gekruiste schroeven. Een probleem dat zich voordeed in dit voorstel was dat de verbindingsmiddelen zich binnen elkaars invloedzone bevonden. In het bijzonder voldeden de configuraties met schroeven onder een hoek $\alpha = 90^\circ$ en een diameter van 8 mm niet aan de vereiste hecht lengte. De hecht lengte moest namelijk groter zijn dan 6 keer de diameter.

- Hecht lengte: 44 mm < 48 mm

Vervolgens werd er gekozen om voor het tweede element een grotere breedte toe te passen, zodat de hecht lengte voldoet. Het definitief ontwerp wordt in 6.1.2 besproken.

6.1.2 Definitief ontwerp proefstukken

Uit de verschillende variabele werd er een definitieve keuze gemaakt om de sterkte of capaciteit van de verbinding te bepalen. Vijf soorten configuraties werden opgesteld met bouten en schroeven met diameter 8 mm. De eerste en tweede configuratie zijn houtconstructies met bouten en schroeven, waarbij de hoek α tussen de schroefas en de vezelrichting gelijk is aan 90° . Voor de derde, vierde en vijfde configuratie is de hoek α tussen de schroefas en de vezelrichting 45° , waarbij de proefstukken op afschuiving-trek en/of afschuiving-druk belast worden. Elk proefstuk bestaat uit drie houtelementen met houtsoort CLS (*Canadian Lumber Standard*) of RND (*Rood Noors Dennen*). De proefstukken worden langs boven loodrecht belast. Figuur 16 illustreert de vijf configuraties. Tabel 7 geeft de afmetingen per configuratie en houtelement weer.



Figuur 16: Definitief ontwerp proefstukken met a) Bouten $\alpha = 90^\circ$ (B), b) Schroeven $\alpha = 90^\circ$ (S), c) Schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek (S45T), d) Schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk (S45D), e) Gekruiste schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek en -druk (SX)

Tabel 7: Configuraties met nominale afmetingen

Configuratie		B [mm]	H [mm]	L [mm]
B, S, S45T, S45D	a,c	38	86	500
	b	63	150	500
SX	a,c	38	225	500
	b	75	225	500

Met:

- B bouten $\alpha = 90^\circ$,
- S schroeven $\alpha = 90^\circ$,
- S45D schroeven $\alpha = 45^\circ$ op afschuiving-druk belast,
- S45T schroeven $\alpha = 45^\circ$ op afschuiving-trek belast,
- SX gekruiste schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek en -druk,
- a het eerste houtelement,
- b het tweede houtelement,
- c het derde houtelement,
- α de hoek tussen de schroefas en de richting loodrecht op de vezel.

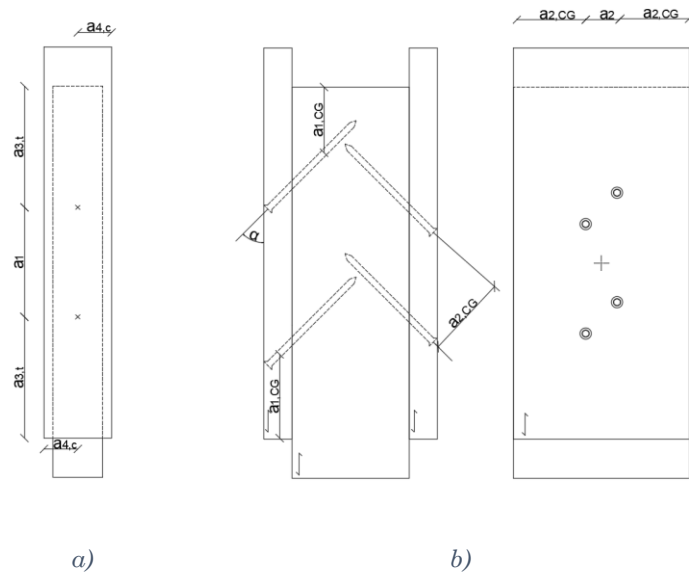
De benodigde verbindingen per soort configuratie en per proefstuk wordt in Tabel 8 weergegeven.

Tabel 8: Afmetingen en type verbindingmiddelen per configuratie

Configuratie	Diameter [mm]	Lengte [mm]	Aantal per proefstuk	Type
S	8	120	4	SPAX – 8x120-T40
S45D	8	160	4	SPAX – 8x160-T40
S45T	8	160	4	SPAX – 8x160-T40
SX	8	100	8	SPAX – 8x160-T40
B	M8	240	2	Staaldraad M8

Voor configuraties B werd er in plaats van de bouten staaldraad M8 gebruikt, deze werd in stukken van ± 300 mm gezaagd, zodat er voldoende ruimte was voor de sluitring en de moeren te plaatsen.

Bij het ontwerpen van de proefstukken zijn de afstanden genomen zodat ze voldoen aan de normen zoals weergegeven in tabel 2 en tabel 3. De tussenafstanden (a_i) van de verbindingmiddelen is genomen zodat het meewerkende effectieve aantal verbindingmiddelen gelijk gesteld werden aan het effectief aantal. De eind- en tussenafstanden worden geïllustreerd in figuur 17.



Figuur 17: Ontwerp met rand- en eindafstanden voor a) configuratie B en S en b) configuraties S45T, S45D en SX

Voor de configuratie-reeksen met schroeven, worden de schroeven in het eerste houtelement (a) ten opzichten van het derde houtelement (c) niet volledig symmetrisch geplaatst. Dit om te voorkomen dat de schroeven elkaar raken bij het inschroeven. Bij elke reeks is er bij het eerste houtelement een grotere tussenafstand gerespecteerd tussen de schroeven. Tabel 9 geeft de ontwerp tussen-, eind- en randafstanden weer voor bouten en schroeven en tabel 10 voor schuine schroeven. Voor de randafstand $a_{1,CG}$ wordt enkel de kleinste randafstand vermeld in de tabel.

Tabel 9: Ontwerp tussen- en eindafstanden van de verbindingmiddelen van bouten en schroeven

Configuraties		a_1 [mm]	$a_{3,t}$ [mm]	$a_{4,c,1}$ [mm]	$a_{4,c,2}$ [mm]
B		140	155	43	43
S	a	160	145	40,5	40,5
	c	140	155	40,5	40,5

Tabel 10: Ontwerp tussen- en eindafstanden van de schuine schroeven

Configuraties		a_1 [mm]	a_2 [mm]	$a_{1,CG,min}$ [mm]	$a_{2,CG}$ [mm]
S45T	a	141,4	/	83,9	40,5
	c	99,0	/		40,5
S45D	a	141,4	/	83,9	40,5
	c	99,0	/		40,5
SX	a	106,1	40,0	118,2	92,5
	c	99,0	40,0		92,5

Met a: Het eerste houtelement

c: Het derde houtelement

Figuur 18 geeft de schetsen van de vijf verschillende soorten configuraties weer. In totaal worden er 30 proefstukken gemaakt, zes proefstukken per configuratie. Er worden vier monotone testen uitgevoerd per configuratie en 1 à 2 cyclische testen per configuratie.

Vervolgens kon de dichtheid van de proefstukken bepaald worden, die afhankelijk is van het gewicht en het volume van de proefstukken. Er werden willekeurige houtelementen uitgekozen die werden opgemeten. Voor de bouten (B), schroeven (S), schroeven belast op afschuiving-trek (S45T), schroeven belast op afschuiving-druk (S45D) en gekruiste schroeven (SX) worden de hout-op-hout elementen geïdentificeerd als x-Myi of x-Ci.

Met:

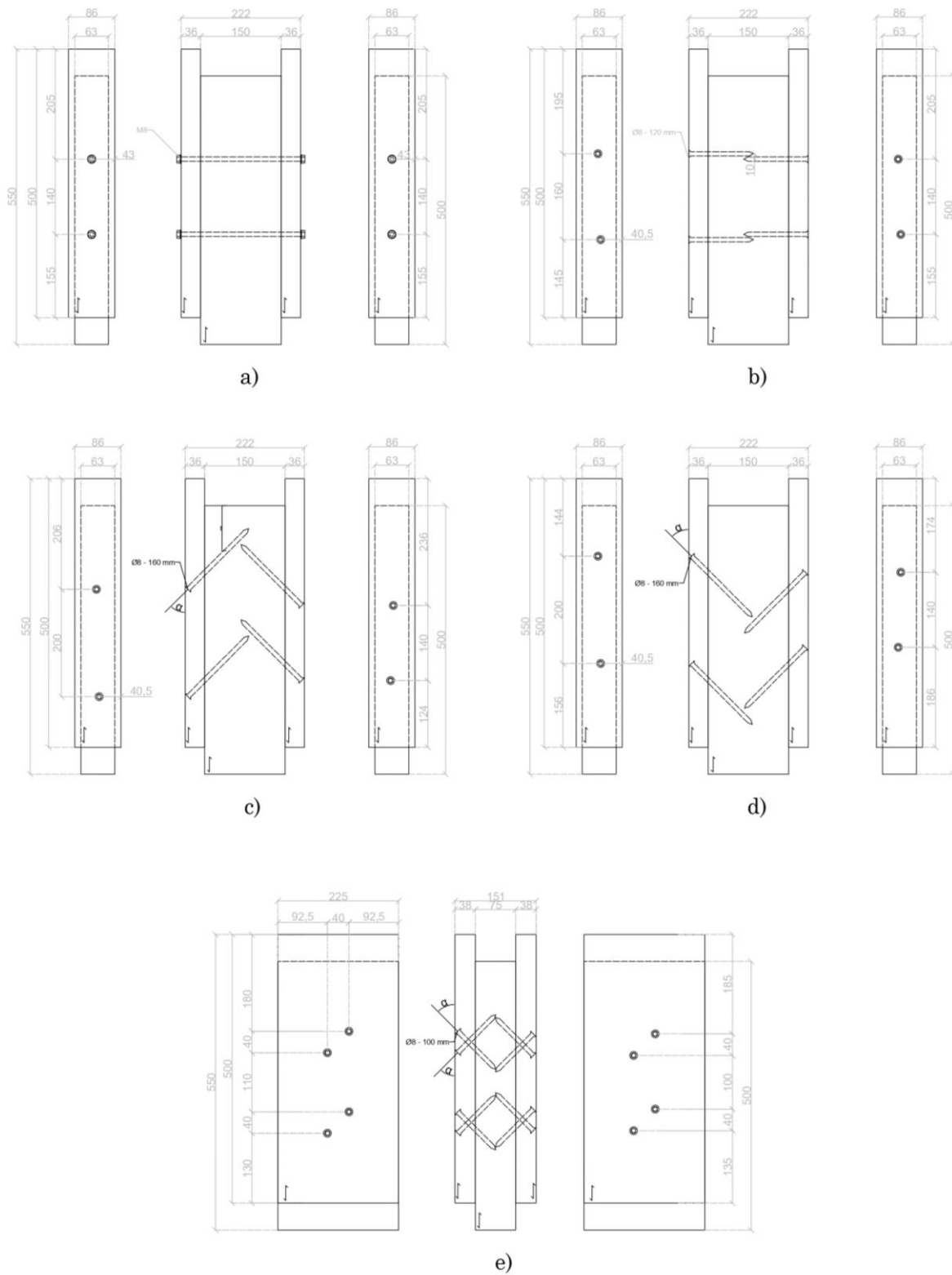
x B, S, S45T, S45D of SX;

y proef 1 tot en met 5;

i a, b of c: verwezen naar het houtelement van het proefstuk;

M monotone test;

C cyclische test.



Figuur 18: Hout-op-houtconfiguratie met a) bouten (B), b) schroeven (S), c) schuine schroeven 45° op afschuiving-druk belast (S45D), d) schroeven 45° op afschuiving-trek belast (S45T), e) schuine gekruiste schroeven 45° op afschuiving-trek en -druk belast (SX)

De gemiddelde afmetingen van de profelementen worden per houtelement en -soort weergegeven in tabel 11. Omdat er niet voldoende voorraad was van het hout met afmetingen 38 mm x 86 mm, moest er extra hout aangekocht worden van deze afmetingen. Het houtsoort van deze proefstukken is CLS. Aangezien er een verschil in dichtheid tussen de aangekochte en de voorraad waargenomen werd, werden de houtsoorten gekenmerkt als CLS₁ en CLS₂. De andere houtelementen hebben RND als houtsoort.

Tabel 11: Gemiddelde afmetingen per profelement en houtsoort

Configuratie	Proefstuk element <i>i</i>	Hout soort	B [mm]	H [mm]	L [mm]
B, S, S45T, S45D	a = c	CLS ₁	87,1	37,5	500
		CLS ₂	88,6	38,0	500
	b	RND	64,7	152,8	500
SX	a = c	RND	39,2	226,3	500
	e	RND	74,5	219,0	500

De gemiddelde dichtheid werd bepaald per houtsoort:

$$\rho_{m,CLS1} = 551 \frac{kg}{m^3}, \rho_{m,CLS2} = 458 \frac{kg}{m^3}, \rho_{m,RND} = 502 \frac{kg}{m^3}$$

Bijlage B geeft de kenmerken zoals het gewicht, afmetingen, volume, dichtheid en soort per proefstukelement weer. De gemiddelde vochtgehalte van de proefstukken per houtsoort werd bepaald door het vochtgehalte te meten van zes proefstukken per houtsoort. Bijlage C geeft de metingen van het gewicht per houtsoort weer om het vochtgehalte te kunnen bepalen.

$$\omega_{m,CLS1} = 11,81 \% , \quad \omega_{m,CLS2} = 12,06 \% , \quad \omega_{m,RND} = 13,85 \%$$

6.2 Proefopstelling

Om hergebruik te bepalen worden er vier monotone en twee cyclische testen uitgevoerd per soort proefstuk, waaruit de capaciteit van de verbinding in functie van de verplaatsing wordt bepaald ($F-v$). Aan de hand van deze resultaten kan de maximale capaciteit en de stijfheid bepaald worden. De proefstukken worden in een drukmachine geplaatst zoals weergegeven in figuur 19. De drukmachine kan een maximale belasting toebrengen van 250 kN op het proefstuk. Hierbij is het van belang dat het proefstuk in het midden geplaatst wordt. Daarna wordt het bovenste deel naar onder verplaatst zodat dit het proefstuk net raakt.



Figuur 19: Opstelling in drukmachine

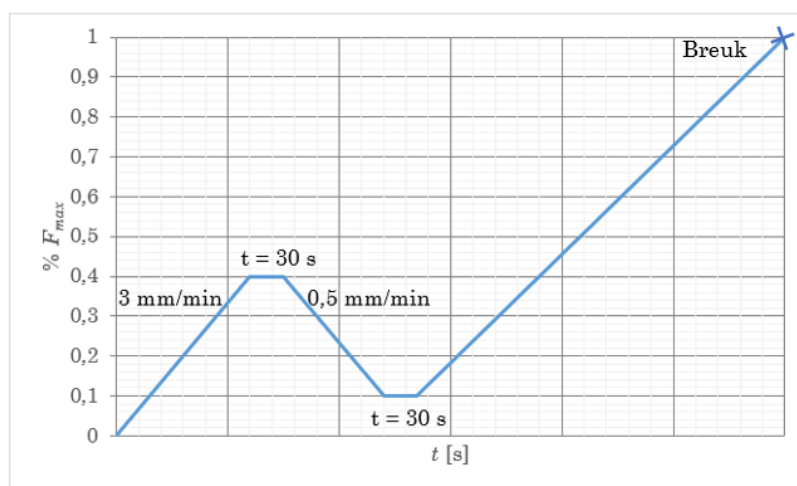
De drukproef wordt uitgevoerd aan de hand van verschillende parameters. De eerste parameter is de verplaatsing in mm per minuut. De tweede parameter is de maximum capaciteit F_{max} , waarbij het proefstuk bezwijkt, deze parameter werd aan de hand van de analytische berekening bepaald. Uit deze testen kan de kracht in functie van de tijd ($F-t$) en in functie van de verplaatsing ($F-v$) weergegeven worden.

6.3 Testprocedure

6.3.1 Monotone testen

Bij het uitvoeren van de monotone testen wordt er verwezen naar EN 383, maar aangezien de drukmachine enkel werkt met de parameter verplaatsing per minuut, werd er handmatig gezocht naar een snelheid waarbij deze norm zou voldoen.

Voor het uitvoeren van de monotone testen werd het eerste proefstuk van elke configuratie tot breuk belast met een snelheid van 3 mm/min. De volgende drie proefstukken van elke configuratie werden belast tot $0,4F_{max}$. Vervolgens werd deze belasting met een tijdsduur van ± 30 s aanhouden om daarna het proefstuk te ontlasten tot $0,1F_{max}$ met een snelheid van 0,5 mm/min. Na het ontlasten wordt $0,1F_{max}$ ook aangehouden met een tijdsduur van ± 30 s. Vervolgens wordt het proefstuk verder belast tot bezwijken. Figuur 20 geeft de uitvoering weer van de monotone testen.



Figuur 20: Belasting-ontlasting monotone testen

Opmerking:

De eerste monotone test van elke configuratie wordt uitgevoerd om de maximale capaciteit van het proefstuk te bepalen, aangezien er aanzienlijke verschillen waren tussen de resultaten van de analytische berekeningen en de daadwerkelijke capaciteit. Uit de eerste test kan de maximale belasting (F_{max}) worden afgeleid, die vervolgens wordt gebruikt voor de daaropvolgende testen. Op deze manier wordt voorkomen dat de proefstukken worden belast en ontlast in het plastische gedrag van de houtconstructie, wat niet wenselijk is.

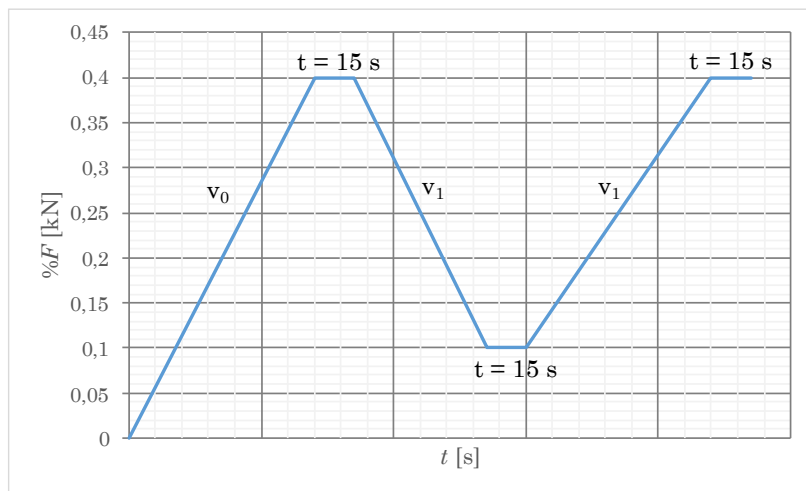
6.3.2 Cyclische testen

De cyclische testen bestaan uit twee opeenvolgende belastingscycli gevolgd door één monotone test tot breuk. Elke belastingscyclus omvat 15 herhalingen van belasting en ontlasting, vergelijkbaar met de monotone testen. Na elke belastingscyclus worden de proefstukken gedemonteerd en gemonteerd om het hergebruik van de verbindingen na te bootsen en eventuele zichtbare schade aan het proefstuk en/of de verbindingen waar te nemen.

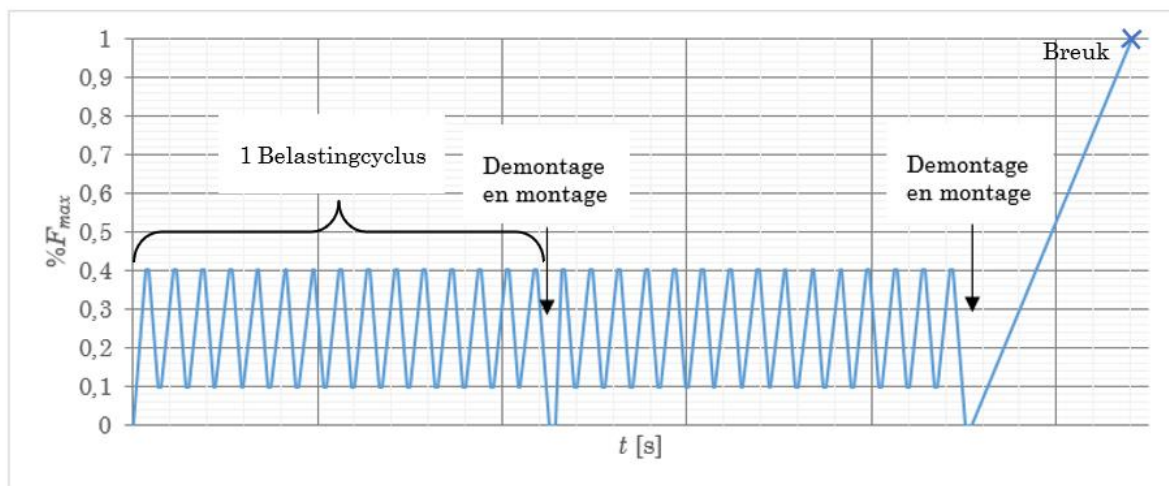
Voor elk proefstuk variëren de belastingssnelheden. De initiële belastingssnelheid, aangeduid als v_0 , wordt gebruikt om het proefstuk aan het begin van de belastingscyclus te belasten tot $0,4 F_{max}$. Vervolgens wordt er een andere snelheid, v_1 , gebruikt voor het verder belasten en ontlasten van de belastingscyclus. De initiële belasting wordt steeds

verhoogd, aangezien het proefstuk na belasting minder kracht vereist om vervorming te ondergaan. Bij het belasten tot breuk wordt de snelheid verhoogd om een snellere breuk te bevorderen. De belastingssnelheden van elk proefstuk wordt toegelicht bij 7.2.

Tijdens de cyclische testen wordt de tijdsduur tussen het handhaven van de belasting verkort tot 15 s, aangezien deze testen veel tijd in beslag nemen. Figuur 21 illustreert de theoretische belasting en ontlasting. Figuur 22 weergeeft de twee theoretische belastingcyclussen voor de cyclische testen en de belasting tot breuk, waarbij demontage en montage van de proefstukken wordt toegepast na elke belastingcyclus.



Figuur 21: Theoretische belasting en ontlasting bij cyclische testen



Figuur 22: Theoretisch belastingcycli bij cyclische testen

6.4 Statistische berekeningen

In deze masterproef worden niet enkel de theoretisch waarden uitgewerkt maar zullen er ook praktische testen uitgevoerd worden. Om aan de hand van de verschillende testen de karakteristieke waarden te bepalen, wordt er verwezen naar norm EN 14358 [38].

In deze norm worden er statistische methoden gegeven voor het bepalen van de karakteristieke waarden uit de uitgevoerde testen op basis van steekproeven. Deze steekproeven worden verkregen uit een duidelijk gedefinieerde referentiepopulatie. De karakteristieke waarde kan gebaseerd zijn op de 5-percentielwaarde van de sterkte, de weerstand of de dichtheid, maar ook op een gemiddelde waarde voor de stijfheid. Om deze percentielen of gemiddelden te bepalen, worden er in de norm verschillende methoden uitgewerkt die hiervoor gevolgd kunnen worden [38]. Deze norm kan gebruikt worden voor typetesten en productiecontrole van structurele producten zoals hout [38].

In een eerste stap wordt de gemiddelde waarde berekend volgens formule 48.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (48)$$

Met:

\bar{y} de gemiddelde waarde;

n het aantal testwaarden;

m_i de individuele testwaarde i van de stochastische variabele m .

Aan de hand van dit gemiddelde kan de standaard deviatie berekend worden aan de hand van formule 49.

$$S_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2}, 0,05\bar{y} \right\} \quad (49)$$

Met:

S_y de standaard deviatie

In de volgende stap worden de 5-percentielwaarde en 95-percentielwaarde bepaald. De 5-percentielwaarde wordt berekend via formule 50.

$$m_k = \bar{y} - k_s(n) \cdot S_y \quad (50)$$

$$\text{Waarbij: } k_s(n) = \frac{6,5n+6}{3,7n-3} \quad (51)$$

Met:

m_k de 5-percentielwaarde van de stochastische variabele m ;

$k_s(n)$ de factor voor de berekening van de karakteristieke eigenschappen voor initiële testen.

Formule 52 om de 95-percentielwaarde te berekenen is gelijkaardig aan formule 51 voor het bepalen van de 5-percentielwaarde.

$$m_k = \bar{y} + k_s(n) \cdot S_y \quad (52)$$

$$\text{Waarbij: } k_s(n) = \frac{6,5n+6}{3,7n-3} \quad (53)$$

Tot slot wordt de variatiecoëfficiënt bepaald via formule 54.

$$CV = \frac{S_y}{\bar{y}} \cdot 100\% \quad (54)$$

Met:

CV de variatiecoëfficiënt, in %.

Om te controleren als alle testen representatief zijn, wordt er gecontroleerd als alle waarden binnen de grenzen vallen. De waarden die buiten deze grenzen vallen worden uitschieters genoemd, deze waarden worden beschouwd als niet representatief. De grenzen worden volgens de volgende stappen bepaald [39]:

Stap 1

De testwaarden worden gesorteerd van klein naar groot. Van deze waarden wordt dan de mediaan bepaald, welke de naam Q_2 krijgt.

Stap 2

In stap twee wordt de eerst en derde kwartiel berekend, respectievelijk Q_1 en Q_3 . Q_1 is het punt waaronder 25% van de waarden liggen. Dit is ook het middelpunt van de waarden onder de mediaan. Q_3 is het punt waarboven 25% van de testwaarden liggen, ook wel het middelpunt van de waarden boven de mediaan.

Stap 3

De interkwartielafstand IQR wordt bepaald door formule 55 toe te passen.

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (55)$$

Stap 4

In de deze stap worden de binnenste grenzen bepaald. Dit gebeurt volgens formule 56 en 57.

$$\text{Onderste grens} = Q_1 - (1,5 \cdot IQR) \quad (56)$$

$$\text{Bovenste grens} = Q_3 + (1,5 \cdot IQR) \quad (57)$$

Wanneer de testwaarden buiten de binnenste grenzen liggen, worden deze waarden gezien als matige uitschieters. Er moet bijkomend nog gecontroleerd worden als deze uitschieter een extreme uitschieter is, dit gebeurt in de volgende stap.

Stap 5

Ten slotte worden de buitenste grenzen bepaald, zodat de extreme uitschieters vastgesteld kunnen worden. Deze grenzen worden bepaald via formule 58 en 59.

$$\text{Onderste grens} = Q_1 - (3 \cdot IQR) \quad (58)$$

$$\text{Bovenste grens} = Q_3 + (3 \cdot IQR) \quad (59)$$

7 Resultaten

7.1 Analytisch

7.1.1 Bepaling van de capaciteit

Zoals beschreven in sectie 6.1.1 zijn er verschillende voorstellen gedaan op basis van trial-and-error om het bezwijkmechanisme a, g of h te bereiken met behulp van formules 29, 31 en 35. Vanwege de beperkingen op het gebied van eind- en randafstanden volgens de normen, was het uiteindelijk niet mogelijk om aan deze eisen te voldoen. Daarom is er een definitief ontwerp gekozen voor de configuraties. Dit ontwerp wordt weergegeven in figuur 18.

Het is belangrijk op te merken dat de hoek α , die de hoek tussen de schroefas en de vezelrichting vertegenwoordigt, op een andere manier wordt vermeld in formules 29 en 31 volgens EN 1995-1-1 dan in formule 35. Tabel 12 geeft de hoek weer voor elke configuratie volgens de rekenmethode van Eurocode 5 en de methode van Betjka en Blaß.

Tabel 12: Hoek α per configuratie per methode

<i>Configuratie</i>	<i>Hoek α</i>	
	<i>Methode EC 5 (α) [°]</i>	<i>Methode Betjka en Blaß (90-α) [°]</i>
<i>S</i>	90	0
<i>S45T, S45D, SX</i>	45	45

De analytische resultaten van de capaciteit van de configuraties met één verbindingsmiddel en één afschuifvlak (bouten met $\alpha = 90^\circ$) worden weergegeven in tabel 13. De bezwijkmechanismen voor de proesftukken met twee afschuifvlakken worden weergegeven in tabel 14 tot en met tabel 16. Bij alle configuraties waar het houtsoort CLS werd gebruikt, werd het gemiddelde genomen van de dichtheid van CLS₁ en CLS₂. De gemiddelde dichtheid van CLS, aangeduid als $\rho_{m,CLS}$, is 502 N/mm². De overige mechanische eigenschappen van het houtsoort worden vermeld in het technische datasheet van Vuren ongedrenkt C24 Deslagmolen [40].

Bij deze berekeningen werden aannames gedaan voor de bouten, aangezien er geen mechanische eigenschappen ter beschikking zijn over de gebruikte staaldraad. Hierbij werd er aangenomen dat de bouten een staalkwaliteit van 4.8 hebben, waarbij de karakteristieke vloeisterkte $f_{y,k}$ 320 N/mm² is en de karakteristieke treksterkte van de bouten $f_{u,k}$ gelijk is aan 400 N/mm². Ook voor de afmetingen van sluitring en de bout en moer werden er aannames genomen uit ISO 4014 [41]. Voor de schroeven werden de berekeningen uitgevoerd, waarbij de mechanische eigenschappen voor de type van de schroef van HAPAX - HAEVTG werden gehaald uit ETA-20/0787 [42].

Tabel 13: Analytische resultaat capaciteit van configuratie B

<i>i</i>	$F_{v,Rk,i}$ [kN]
g	11,43
h	46,32
j	5,00
k	4,92

Met:

i bezwijkmechanisme,

$F_{v,Rk,i}$ de capaciteit van de configuratie.

Uit de resultaten in tabel 14 kan er geconcludeerd worden dat bezwijkmechanisme k de minimale capaciteit van de configuratie heeft. Voor de configuraties met schroeven worden de resultaten van de capaciteit berekend aan de hand van twee verschillende methodes, namelijk de geavanceerde methode van Betjka en Blaß (1) en Eurocode 5 (2).

Tabel 14: Analytische resultaten van capaciteit van configuratie S

<i>i</i>	$F_{v,Rk(i),1}$ [kN]	$F_{v,Rk(i),2}$ [kN]
a	8,73	8,73
b	17,35	17,35
c	7,31	7,31
d	4,83	5,00
e	7,46	7,76
f	4,46	4,91

Met:

$F_{v,Rk,i,1}$ de capaciteit van de configuratie volgens *Betjka en Blaß*;

$F_{v,Rk,i,2}$ de capaciteit van de configuratie volgens *EC5*.

Uit deze resultaten blijkt bezwijkmechanisme d de kritische waarde te hebben. Configuraties S45T en S45D hebben dezelfde afmetingen en verbindingen onder een hoek α van 45° , hierdoor werd er voor deze twee proefstukken de capaciteit op dezelfde manier berekend. Deze resultaten worden weergegeven in tabel 15. Voor de schuine schroeven werd er volgens de methode van Eurocode 5 enkel rekening gehouden met het uittreksterkte, aangezien het koordeffect overheerst en een beperkte versterking is van de capaciteit door de Johansen-component. Op basis van formule 60 werd geconcludeerd dat de doortreksterkte minimaal is, en bijgevolg werd de uittrekkkracht gedefinieerd als:

$$F_{v,Rk(i),2} = F_{ax,Rk,2} \cdot \sin(\alpha) \quad (60)$$

Tabel 15: Analytische resultaten van capaciteit van configuratie S45T, S45D

<i>i</i>	$F_{v,Rk(i),1}$ [kN]	$F_{v,Rk(i),2}$ [kN]
<i>a</i>	8,78	-
<i>b</i>	15,79	-
<i>c</i>	8,94	3,72
<i>d</i>	6,82	3,72
<i>e</i>	9,09	3,72
<i>f</i>	6,11	3,72

Voor configuratie SX zijn afwijkende afmetingen en een ander aantal en type verbindingsmiddelen gebruikt. Daarom is er een aparte berekening gemaakt met de verschillende parameters. De resultaten van de schuine gekruiste schroeven worden weergegeven in tabel 16.

Tabel 16: Analytische resultaten van capaciteit van configuratie SX

<i>i</i>	$F_{v,Rk(i),1}$ [kN]	$F_{v,Rk(i),2}$ [kN]
a	8,96	-
b	9,68	-
c	7,10	3,70
d	6,85	3,70
e	7,06	3,70
f	6,09	3,70

Uit de resultaten van configuraties S45T, S45D en bij SX is gebleken dat capaciteit bij bezwijkmechanisme f de kleinste is. Tabel 17 geeft het effectieve meewerkend aantal verbindingen n_{ef} , aantal rijen n_{rows} en aantal afschuifvlakken n_{sp} per configuratie weer.

Tabel 17: Het effectieve meewerkend aantal verbindingen n_{ef} , aantal rijen n_{rows} en aantal afschuifvlakken n_{sp} per configuratie

Configuratie	n_{ef}	n_{rows}	n_{sp}
B	2	1	2
S	2	2	1
S45T, S45D	1,87	2	1
SX	2	4	1

De capaciteiten volgens de methode van Betjka en Blaß blijken lager te liggen dan de capaciteiten volgens EC5. Daarom worden de resultaten van Betjka en Blaß gebruikt voor verdere berekeningen. Bij de berekening van de capaciteit volgens EC5 en Betjka en Blaß wordt alleen rekening gehouden met schroeven belast op afschuiving-trek en niet op afschuiving-druk. Om dit verschil te compenseren, wordt er een factor toegepast op configuratie S45D en configuratie SX. Deze factoren zijn respectievelijk 3 en 1,25 en zijn berekend uit de resultaten van [22]. De rekenwaarde van de sterkte van de verbindingen en bezwijkmechanismen per configuratie wordt weergegeven in tabel 18.

Tabel 18: De rekenwaarde van de sterkte van de verbindingen en bezwijkmechanisme per configuratie

Configuratie	$F_{v,Rk(i),1}$ [kN]	$F_{v,Rk(i),2}$ [kN]	Bezwijkmechanisme
B	-	19,68	k
S	17,82	19,65	d
S45T	22,81	13,88	f
S45D	7,60	4,63	f
SX	36,36	22,11	f

Er is duidelijk een verschil tussen de waardes uit Betjka en Blass en EC5 bij. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat er bij EC5 enkel rekening werd gehouden met de uittreksterkte.

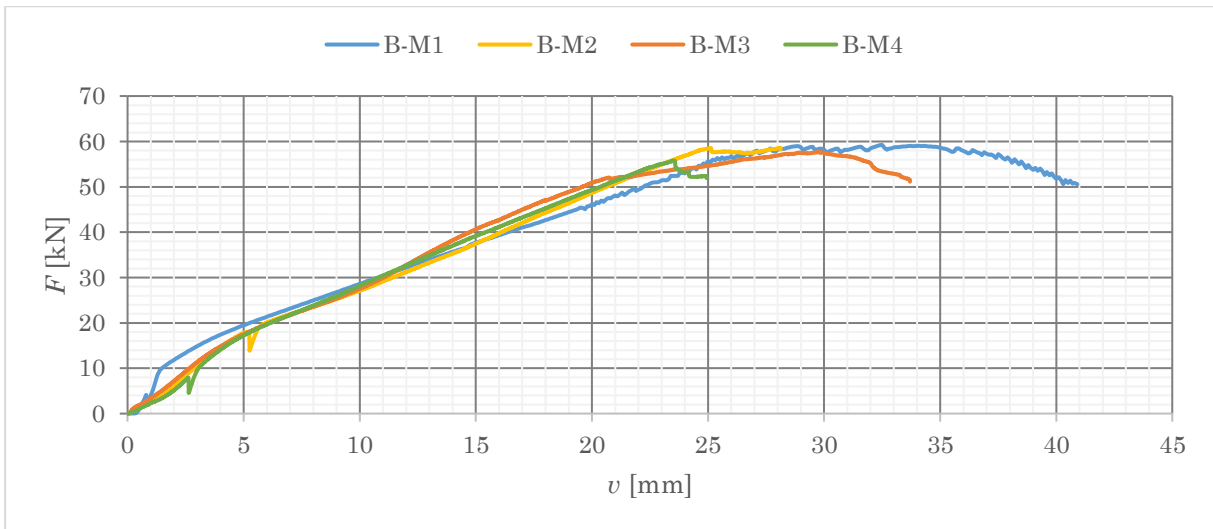
De monotone testen werd gebaseerd op de resultaten waarbij de hoogste capaciteit werd uitgekomen. Voor configuratie B en S is dit EC5, terwijl voor de andere configuraties de capaciteit volgens de methode van Betjka en Blaß maximaal is. Deze resultaten worden verder besproken in hoofdstuk 8. In bijlage D worden de rekennota's weergegeven van de bepaling van de capaciteit per configuratie.

7.2 Resultaten proeven

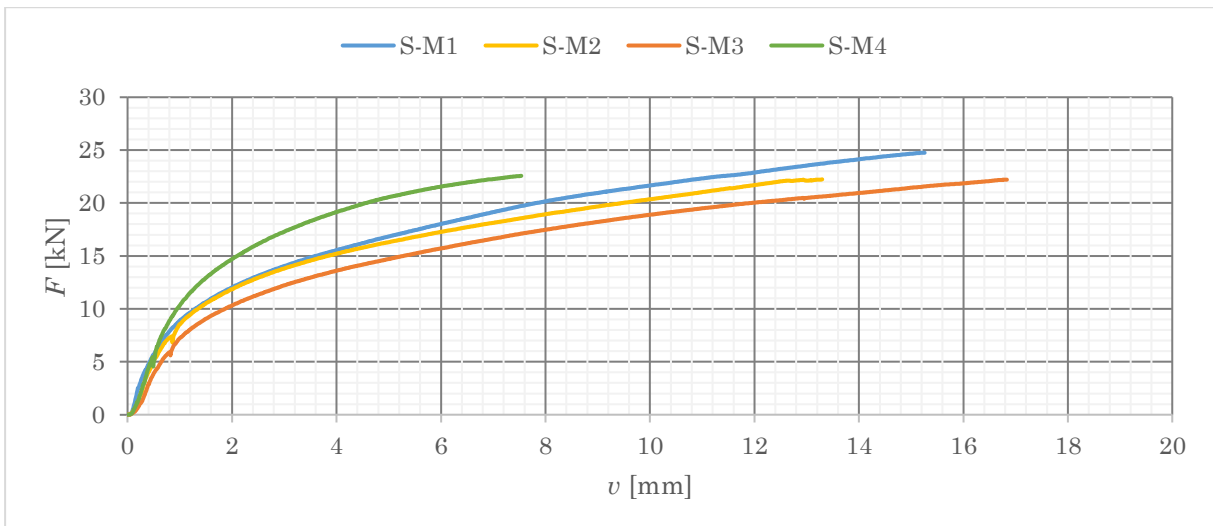
In deze sectie zullen de resultaten van de monotone en cyclische testen besproken worden. Per configuratie wordt de maximale capaciteit F_{max} en de stijfheid K_{ser} bepaald. Ook worden de gemiddelde waardes per configuratie van de monotone en cyclische testen bepaald.

7.2.1. Monotone testen

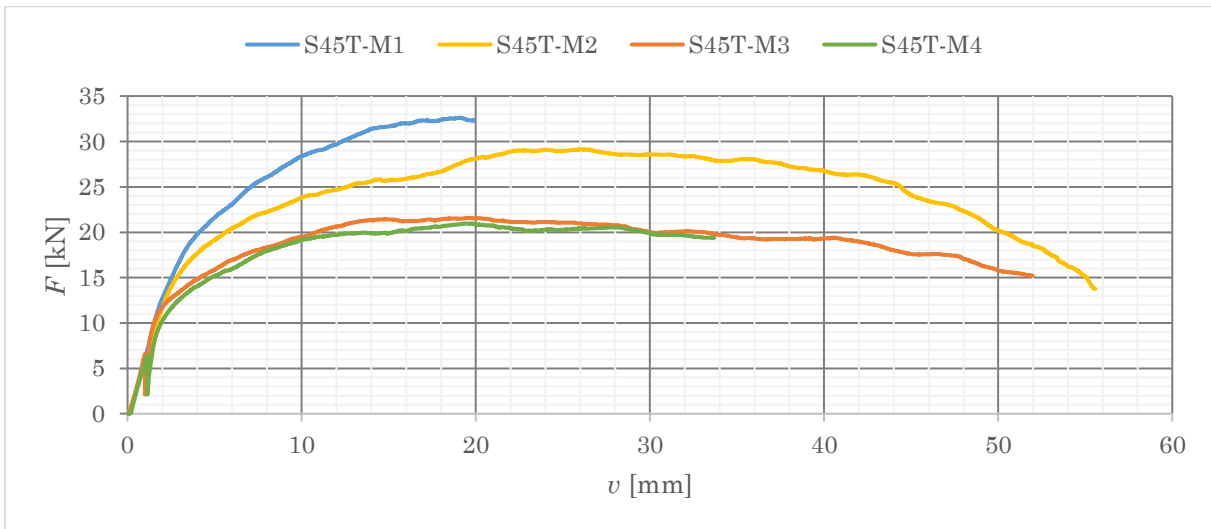
De belastings-verplaatsingsdiagrammen van de monotone testen worden weergegeven in figuur 23 tot en met figuur 27. Per configuratie werden er vier monotone testen uitgevoerd.



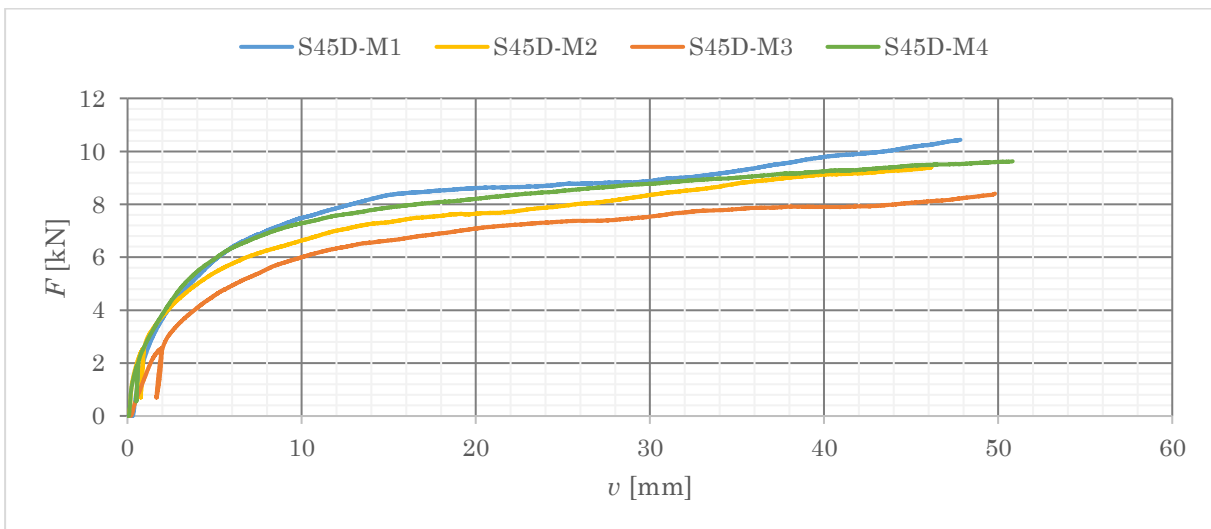
Figuur 23: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen per proefstuk van configuratie B



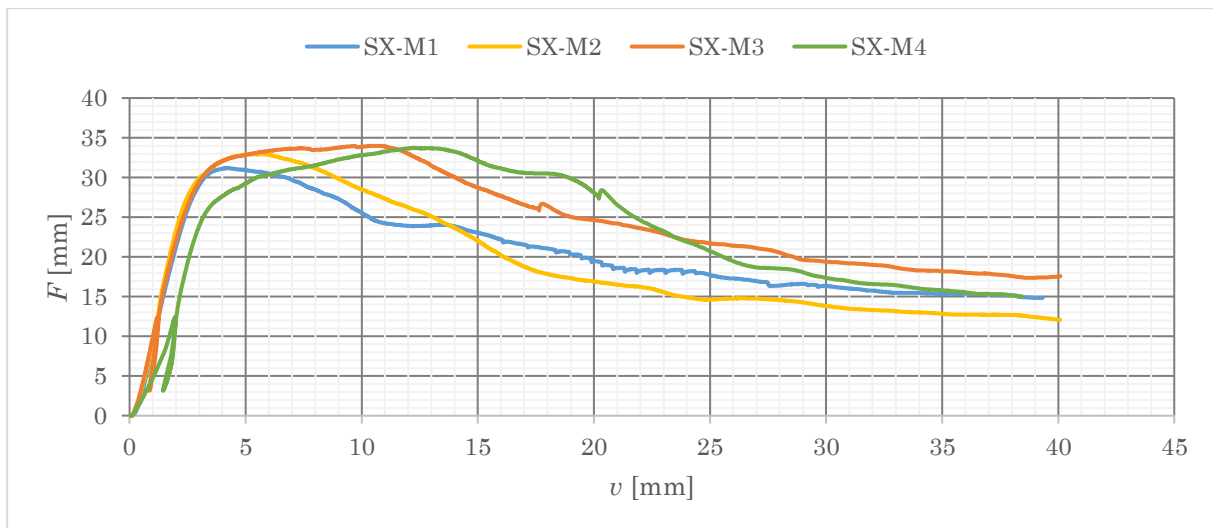
Figuur 24: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen per proefstuk van configuratie S



Figuur 25: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen per proefstuk van configuratie S45T



Figuur 26: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen per proefstuk van configuratie S45D



Figuur 27: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen per proefstuk van configuratie SX

De maximale capaciteit en de stijfheid (K_{ser}), per proefstuk en configuratie, van de monotone testen worden weergegeven in tabel 19 tot en met tabel 23. Ook wordt er per proefstuk het houtsoort van het eerste en derde houtelement vermeld, aangezien dit variabel is bij configuratie B, S en S45T. De stijfheid werd telkens bepaald tussen het gebied waar er opnieuw belaste wordt, na het ontlasten binnen het bereik van $0,1 F_{max}$ en $0,4 F_{max}$. Bij de proefstukken B-M3, S-M1, S45T-M1, S45D-M1 en SX-M1 werd belast tot falen zonder belaste en ontlasten van $0,4 F_{max}$ en $0,1 F_{max}$. Hierdoor is er geen stijfheid bepaald.

Tabel 19: Monotone testresultaten van configuratie B

	B-M1	B-M2	B-M3	B-M4
F_{max} [kN]	59,27	58,61	57,69	55,81
K_{ser} [kN/mm]	15,31	14,39	/	16,19
Houtsoort element a/c	CLS ₁ /CLS ₁	CLS ₁ /CLS ₁	CLS ₁ /CLS ₁	CLS ₁ /CLS ₁

Tabel 20: Monotone testresultaten van configuratie S

	S-M1	S-M2	S-M3	S-M4
F_{max} [kN]	24,75	22,22	22,21	22,56
K_{ser} [kN/mm]	/	29,47	21,73	25,90
Houtsoort element a/c	CLS ₁ /CLS ₁	CLS ₁ /CLS ₁	CLS ₁ /CLS ₂	CLS ₁ /CLS ₁

Tabel 21: Monotone testresultaten van configuratie S45T

	S45T-M1	S45T-M2	S45T-M3	S45T-M4
F_{max} [kN]	32,62	29,15	21,60	20,96
K_{ser} [kN/mm]	/	15,30	22,09	15,36
Houtsoort element a/c	CLS ₁ /CLS ₁	CLS ₁ /CLS ₂	CLS ₂ /CLS ₂	CLS ₂ /CLS ₂

Tabel 22: Monotone testresultaten van configuratie S45D

Configuratie	S45D-M1	S45D-M2	S45D-M3	S45D-M4
F_{max} [kN]	10,44	9,42	8,40	9,63
K_{ser} [kN/mm]	/	12,15	5,78	15,99
Houtsoort element a/c	CLS ₂ /CLS ₂	CLS ₂ /CLS ₂	CLS ₂ /CLS ₂	CLS ₂ /CLS ₂

Tabel 23: Monotone testresultaten van configuratie SX

Configuratie	SX-M1	SX-M2	SX-M3	SX-M4
F_{max} [kN]	31,20	32,96	34,01	33,73
K_{ser} [kN/mm]	/	23,58	22,73	14,53
Houtsoort element a/c	RND/RND	RND/RND	RND/RND	RND/RND

Met:

element a/c eerste houtelement/ derde houtelement.

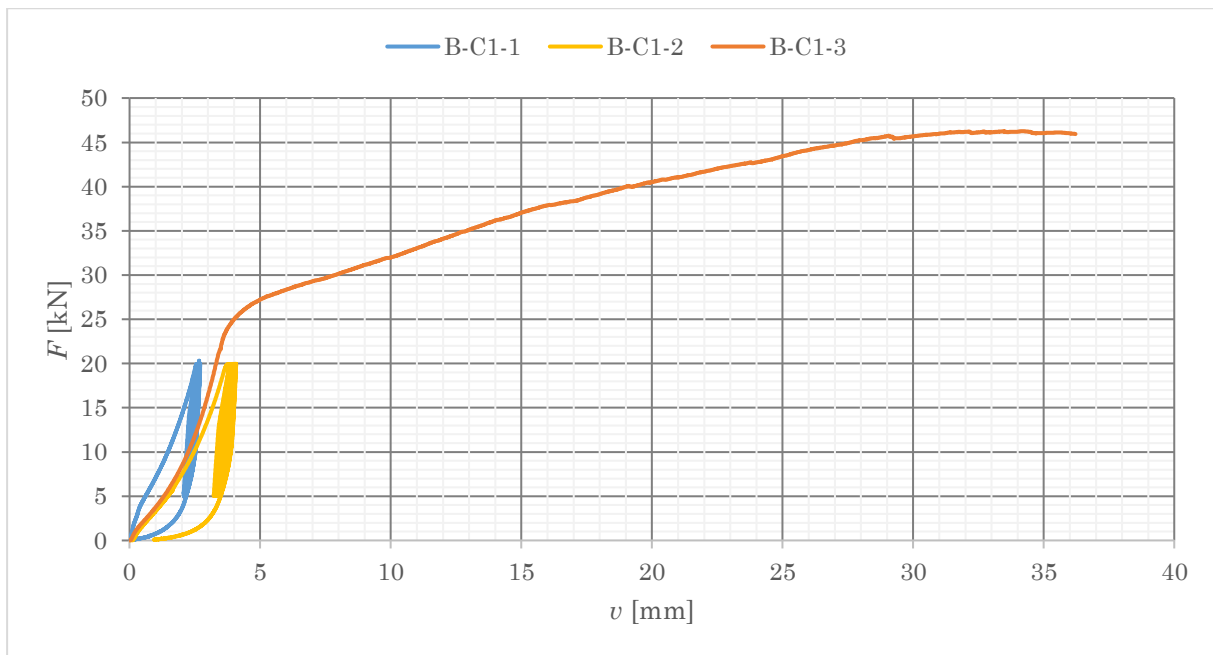
Bijlage F geeft de gebruikte waardes weer voor de berekening van de stijfheid K_{ser} .

7.2.2 Cyclische testen

In deze sectie zullen de resultaten besproken worden van de cyclische testen. De resultaten worden weergegeven in figuur 28 tot figuur 41. In deze figuren zijn de belastingsverplaatsingsdiagrammen weergegeven per proefstuk. De curves tonen de eerste en tweede belastingscyclus, waarbij het proefstuk 15 keer belast en ontlast wordt onder de belasting waarbij de plastische vervorming optreedt. Voor configuratie B en S werden er twee proefstukken op hergebruik getest.

Er werd een berekening uitgevoerd om de vervorming van de bouten te bepalen van de monotone testen tijdens het terugbelasten van de monotone test, waarbij de belasting varieerde tussen $0,4 F_{max}$ (23 kN) en $0,1 F_{max}$ (5,75 kN). Deze vervorming bedroeg 0,8 mm. Er werd besloten om de belasting bij $0,4 F_{max}$ te verlagen tot 20 kN en bij $0,1 F_{max}$ tot 5 kN, om te voorkomen dat het proefstuk in het plastische gebied terecht kwam. Voor de initiële belastingen in de belastingscyclus B-C1-1 en B-C1-2 werd een belastingsnelheid van 7,8 mm/min gehanteerd. Vervolgens werden verdere belastingen en ontlasting uitgevoerd met een snelheid van 1 mm/min.

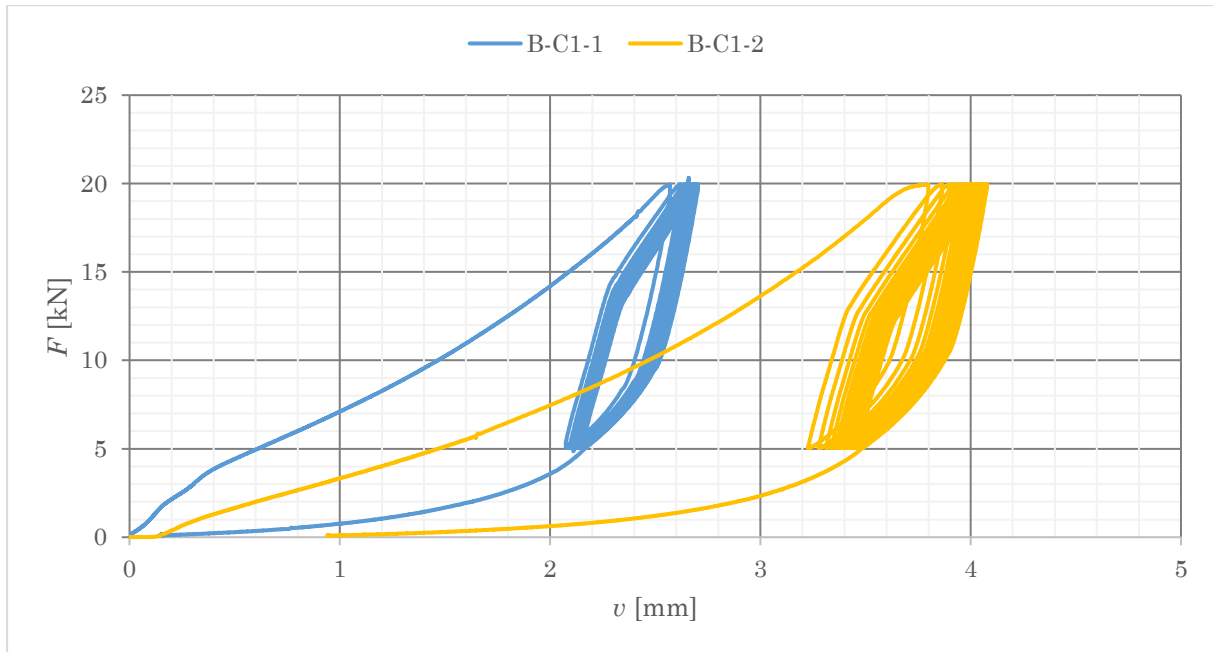
Voor de monotone test B-C1-3, het belasten tot breuk, werd een snelheid van 1 mm/min aangehouden tot de belasting van 20 kN werd bereikt, waarna de snelheid werd verhoogd naar 7,8 mm/min tot het moment van falen. Figuur 28 illustreert de twee cyclische testen en de monotone test tot falen die werden uitgevoerd om het hergebruik van proefstuk B-C1 te bepalen. Figuur 29 toont een vergrote weergave van de twee cyclische testen van proefstuk B-C1.



Figuur 28: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk B-C1

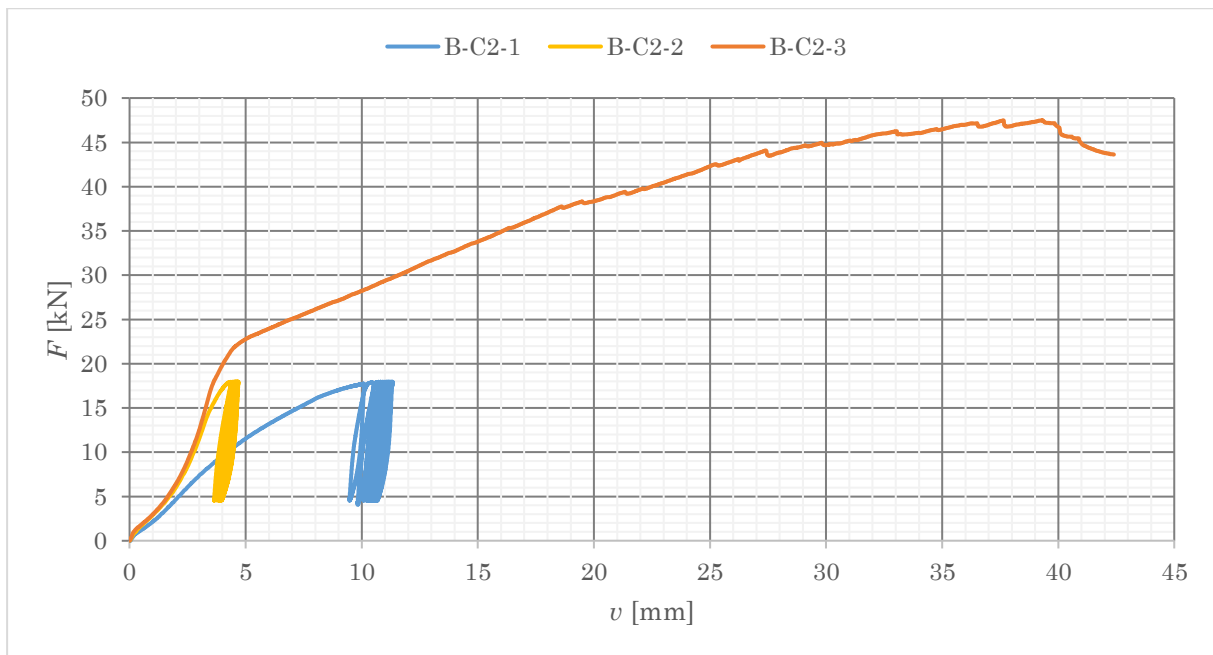
Met

- X-C1/2-1 de eerste cyclus waarbij 15 keer wordt belast en ontlast;
- X-C1/2-2 de tweede cyclus waarbij 15 keer wordt belast en ontlast;
- X-C1/2-3 het monotone belasten tot bezwijken;
- X configuratie B, S, S45T, S45D, SX ;
- C1 het eerste proefstuk getest op hergebruik;
- C2 het tweede proefstuk getest op hergebruik.

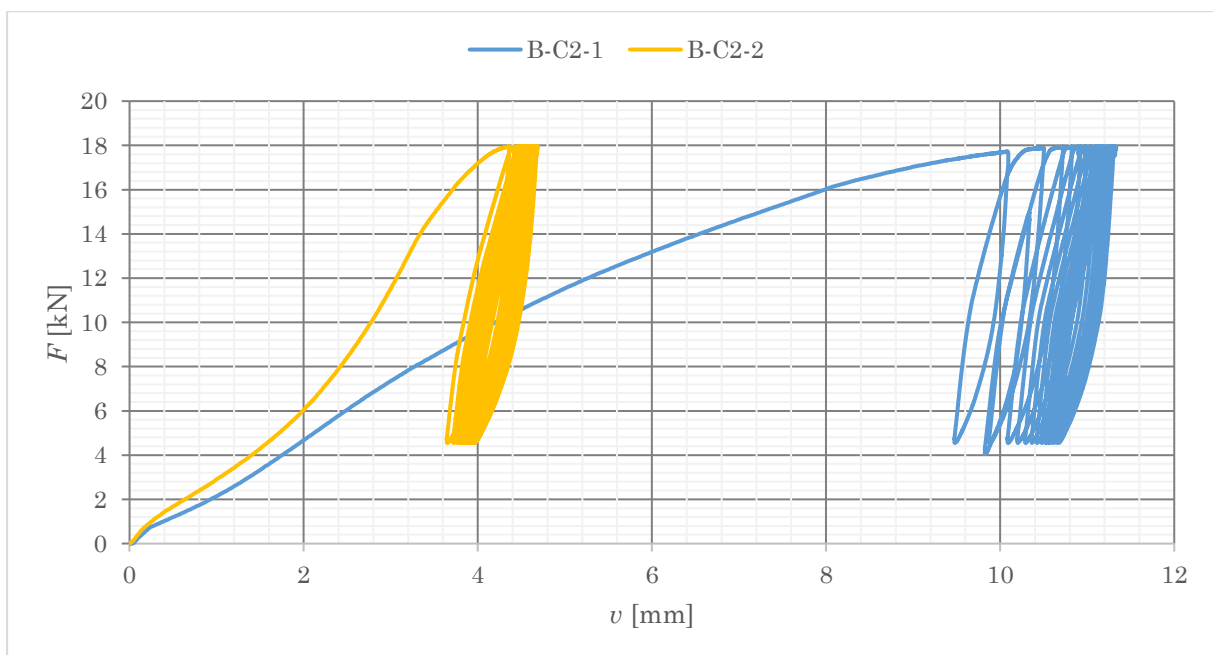


Figuur 29: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk B-C1

Voor het tweede proefstuk van configuratie B, onderworpen aan hergebruikstesten, werden dezelfde initiële belastingsnelheden van 7,8 mm/min toegepast tijdens belastingscyclus 1 (B-C2-1) en belastingscyclus 2 (B-C2-2). Vervolgens werd het proefstuk belast met een snelheid van 1 mm/min. Dezelfde belastings- en ontlastingsnelheden werden gehanteerd tijdens de monotone test tot faal, B-C2-3, als bij de monotone test B-C1-3. Figuur 30 toont het belastings-vervormingsdiagram van de cyclische test van proefstuk B-C2. Figuur 31 biedt een vergrote weergave van de twee cyclische testen van proefstuk B-C2.



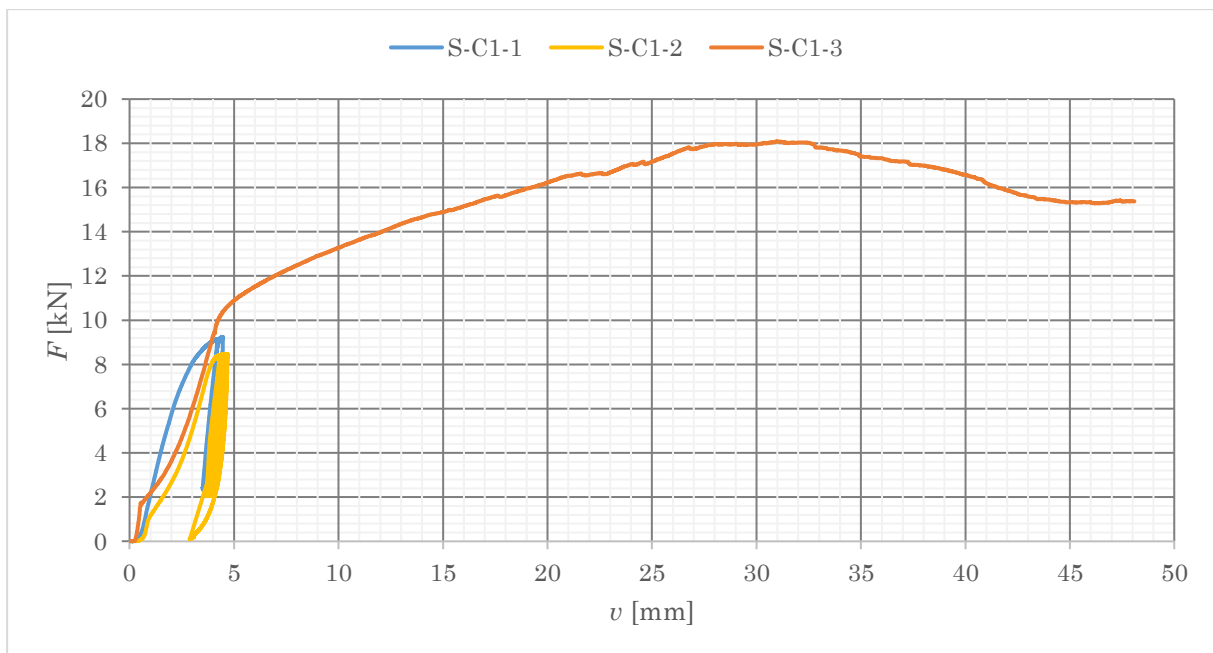
Figuur 30: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk B-C2



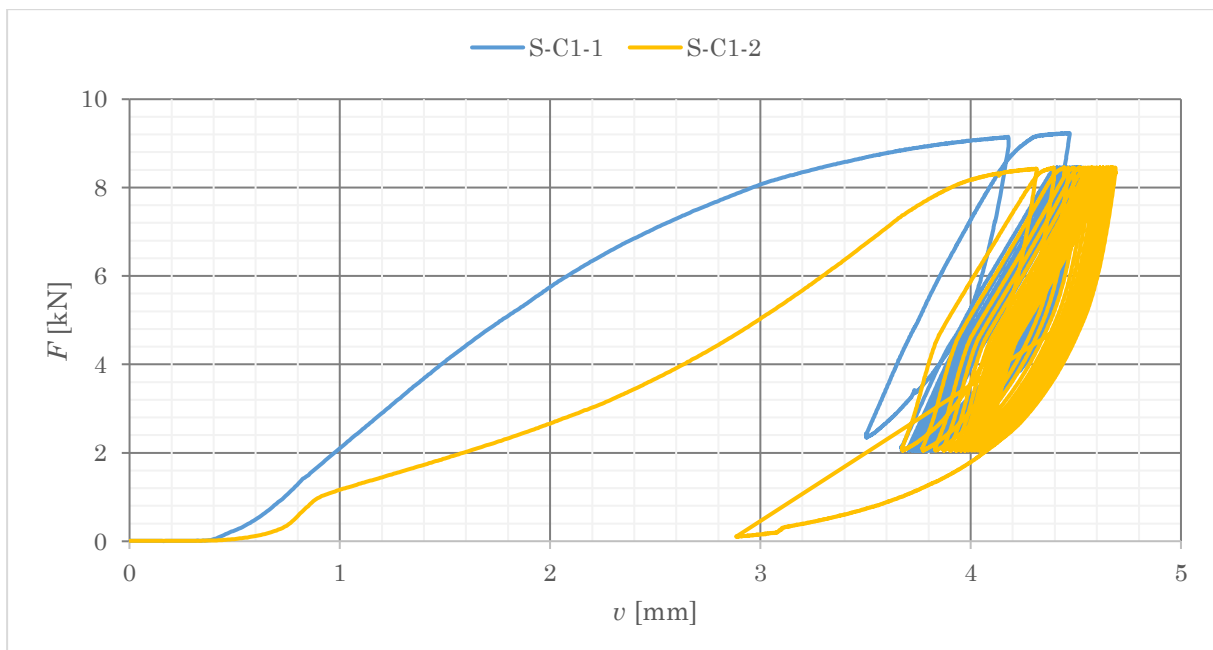
Figuur 31: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk B-C2

Voor de schroeven werd een belasting van 9,26 kN en 2,3 kN toegepast bij respectievelijk $0,4 F_{max}$ en $0,1 F_{max}$. Na twee belastingscycli gevolgd door ontlastingscycli werd geconcludeerd dat deze waarden zich bevonden in het plastische moment, waarna de belastingswaarden werden verlaagd naar 8,5 kN en 2 kN. De initiële belasting van het proefstuk werd uitgevoerd met een snelheid van 5 mm/min, gevolgd door ontlasting met een snelheid van 1 mm/min.

Bij het belasten tot falen werd een rechttere grafiek waargenomen, wat mogelijk te wijten was aan de wrijving van het hout. De belasting tot 8,5 kN werd uitgevoerd met een snelheid van 5 mm/min, waarna de snelheid werd verhoogd naar 7,8 mm/min. Voor de monotone test S-C1-3 tot breuk werd een snelheid van 5 mm/min gebruikt en na 3 kN werd de snelheid verhoogd naar 7,8 mm/min. Figuur 32 toont het belastings-
 vervormingsdiagram van de cyclische test van proefstuk S-C1. Figuur 33 biedt een
 vergrote weergave van de twee cyclische testen van proefstuk S-C1.



Figuur 32: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk S-C1

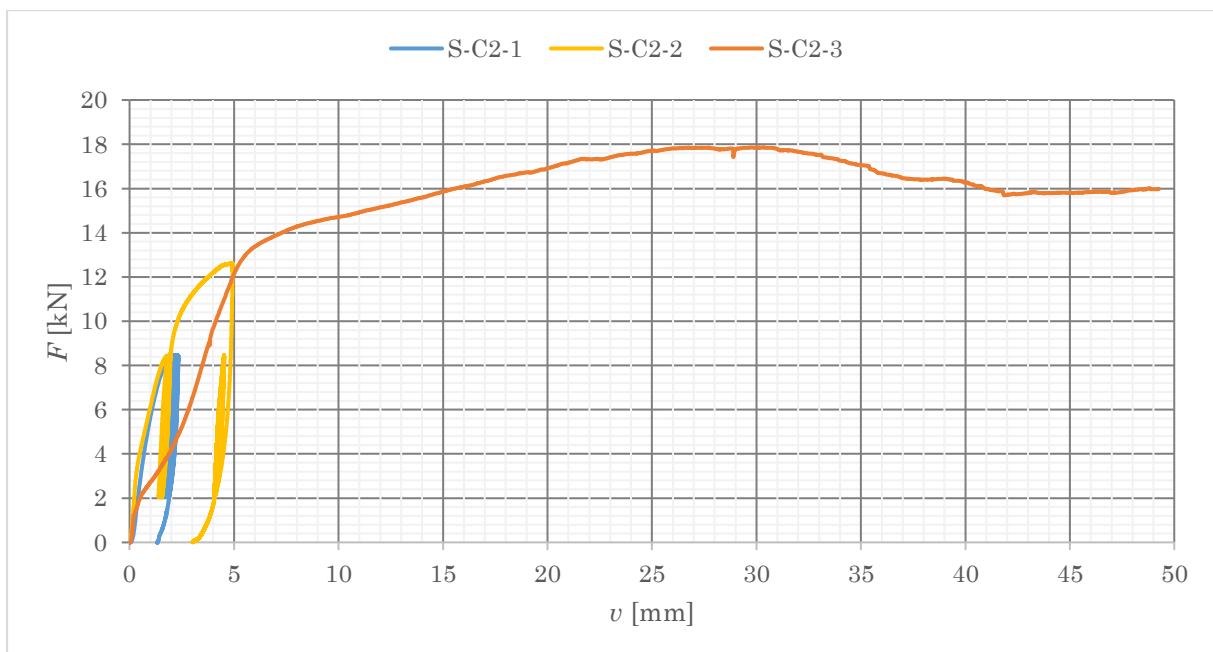


Figuur 33: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk S-C1

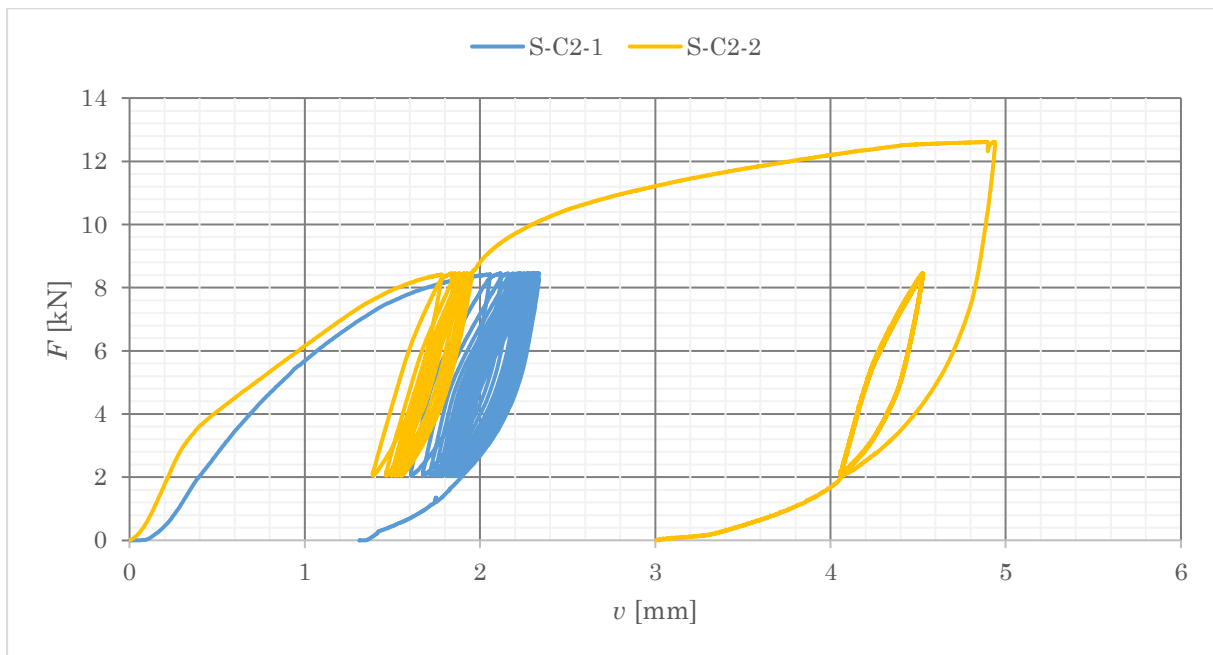
Figuur 34 geeft de hergebruiktest van proefstuk S-C2 weer, waarbij dezelfde belastingsnelheden werden gehanteerd als bij proefstuk S-C1. Tijdens de tweede cyclus S-C2-2 werd er belast tot het bereiken van de gebruikstoestand (GGT) en de uiterste grenstoestand (UGT), met de volgende belasting patronen:

- 7 keer $0,4 F_{max} - 0,1 F_{max}$,
- 1 keer $0,6 F_{max} - 0,1 F_{max}$,
- 7 keer $0,4 F_{max} - 0,1 F_{max}$.

Door deze belasting patronen is er een grote vervorming te zien in de belasting ontlastingscurve bij het tweede proefstuk in figuur 35. Bij het belasten tot 12,75 kN trad er een fout op in de machine en werd de belasting niet verder verhoogd dan een waarde van 12,62 kN.

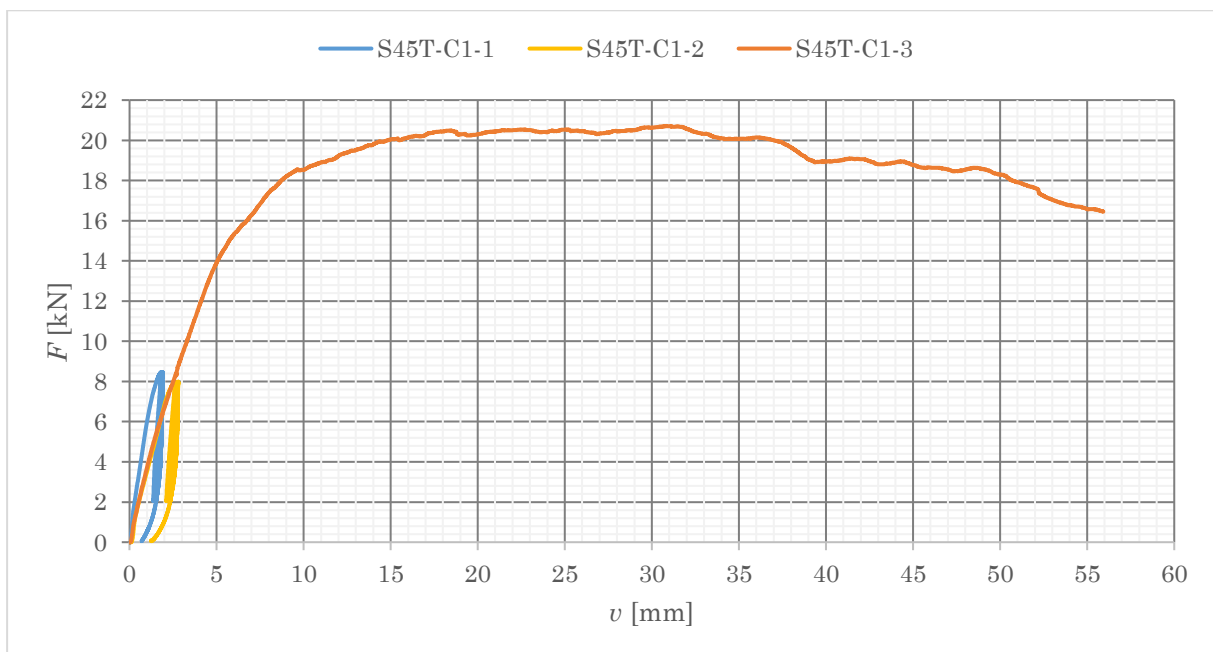


Figuur 34: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk S-C2

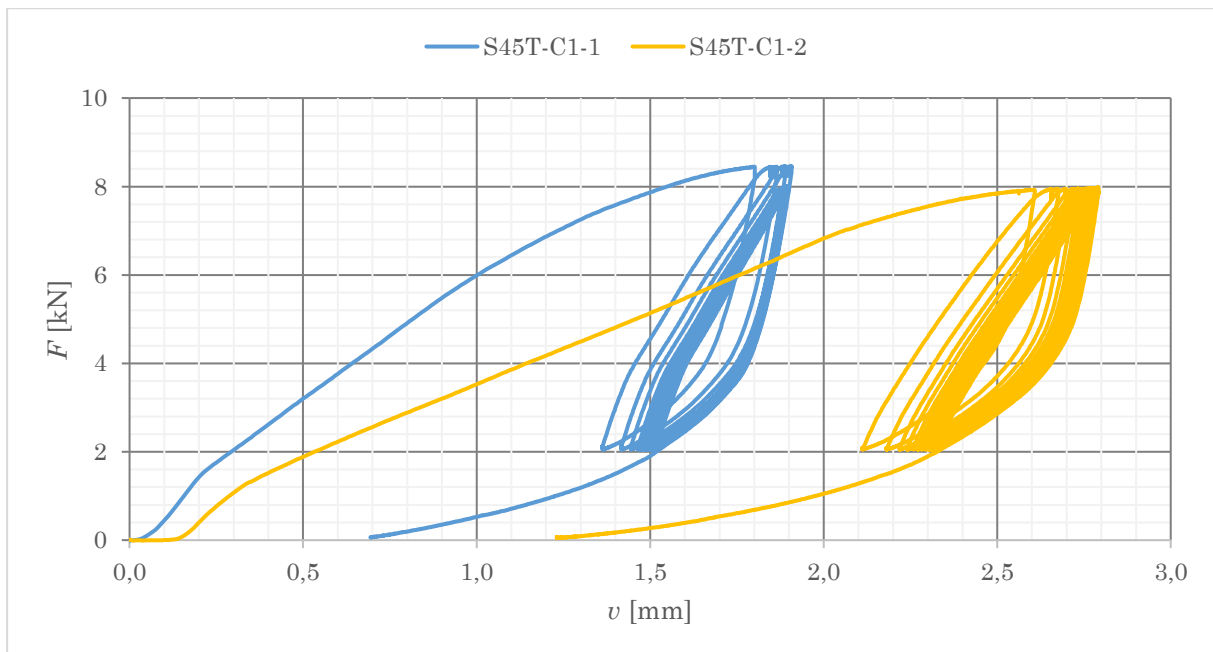


Figuur 35: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk S-C2

De configuratie S45T onderging slechts één hergebruikttest. Voor de eerste belastingscyclus werden belastingen van 8,5 kN en 2 kN toegepast bij respectievelijk $0,4 F_{max}$ en $0,1 F_{max}$. Voor belastingscyclus 2 (S45T-C1-2) werden deze belastingen verlaagd naar 8 kN en 2 kN om te voorkomen dat het plastische moment werd bereikt. De belasting snelheden waren identiek aan die van configuratie S-C1. Figuur 36 en figuur 37 geven de belastings-verplaatsingsdiagrammen weer van proefstuk S45T-C1.

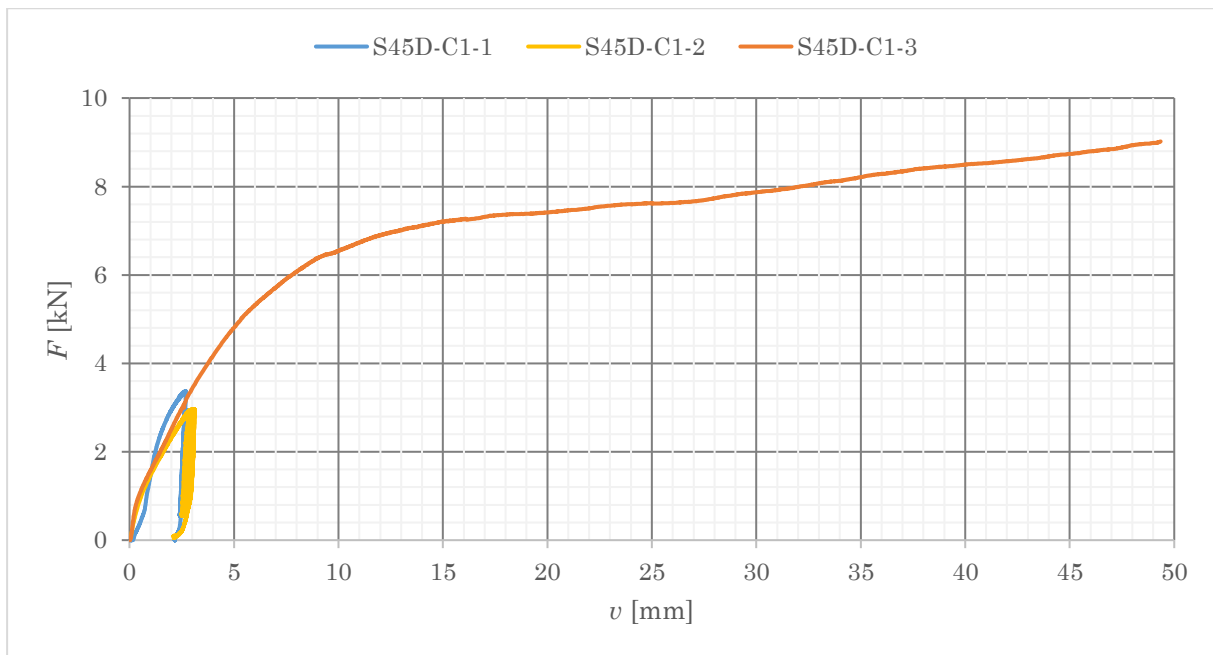


Figuur 36: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk S45T-C1

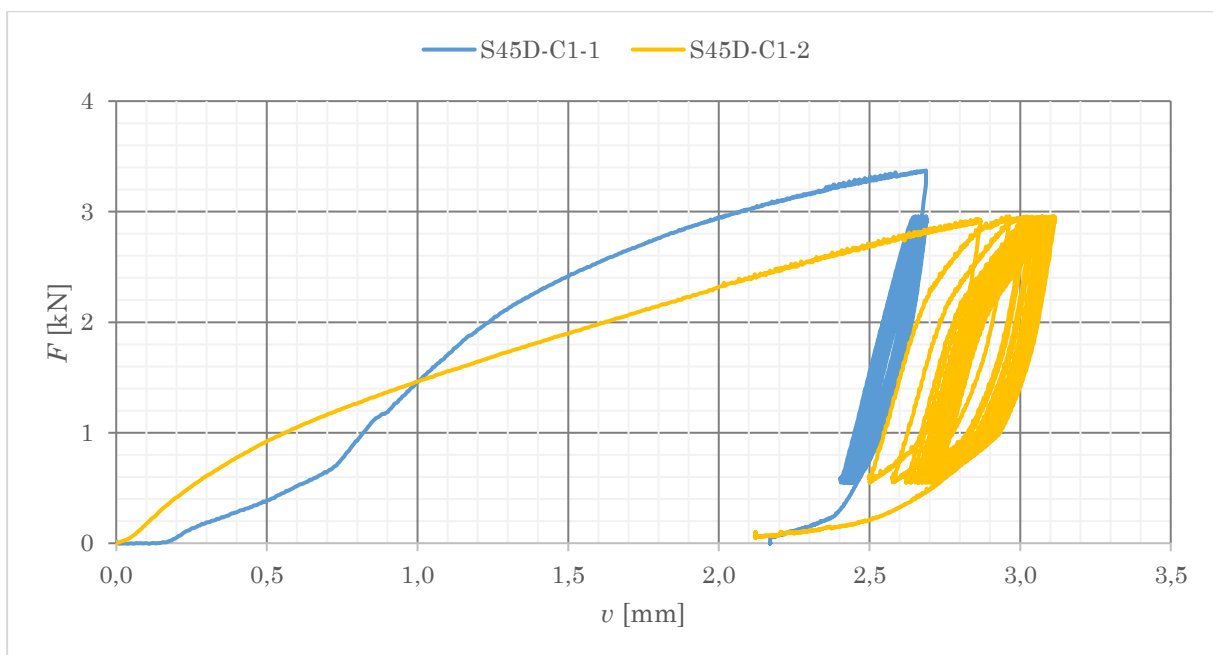


Figuur 37: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk S45T-C1

Bij proefstuk S45D-C1 trad er een fout op tijdens de initiële belasting vanwege een machinefout, waardoor de grafiek niet de aangegeven belasting van 3,5 kN bereikte. Vervolgens werd de belasting verlaagd tot 3 kN voor 0,4 F_{max} en 0,5 voor 0,1 F_{max} . De belastings en ontlasting snelheden waren lager dan bij eerdere tests vanwege de lagere capaciteit van deze specifieke proefstukken. De belasting snelheid voor de eerste belasting was 3 mm/min en vervolgens werd een snelheid van 1 mm/min aangehouden voor zowel belasting als ontlasting. Tijdens de tweede belastingscyclus van belasting en ontlasting werd opnieuw een fout in de grafiek waargenomen bij 3 kN. Desondanks werd deze waarde toch gehandhaafd. Voor de monotone test S45D-C1-3 werd een belastingsnelheid van 5 mm/min gehanteerd tot een belasting van 3 kN werd bereikt, waarna een belastingsnelheid van 7,8 mm/min werd aangehouden tot het moment van breuk. Figuur 38 illustreert de belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch testen van proefstuk S45D-C1. Figuur 39 toont een vergroter beeld van de cyclische testen van proefstuk S45D-C1.

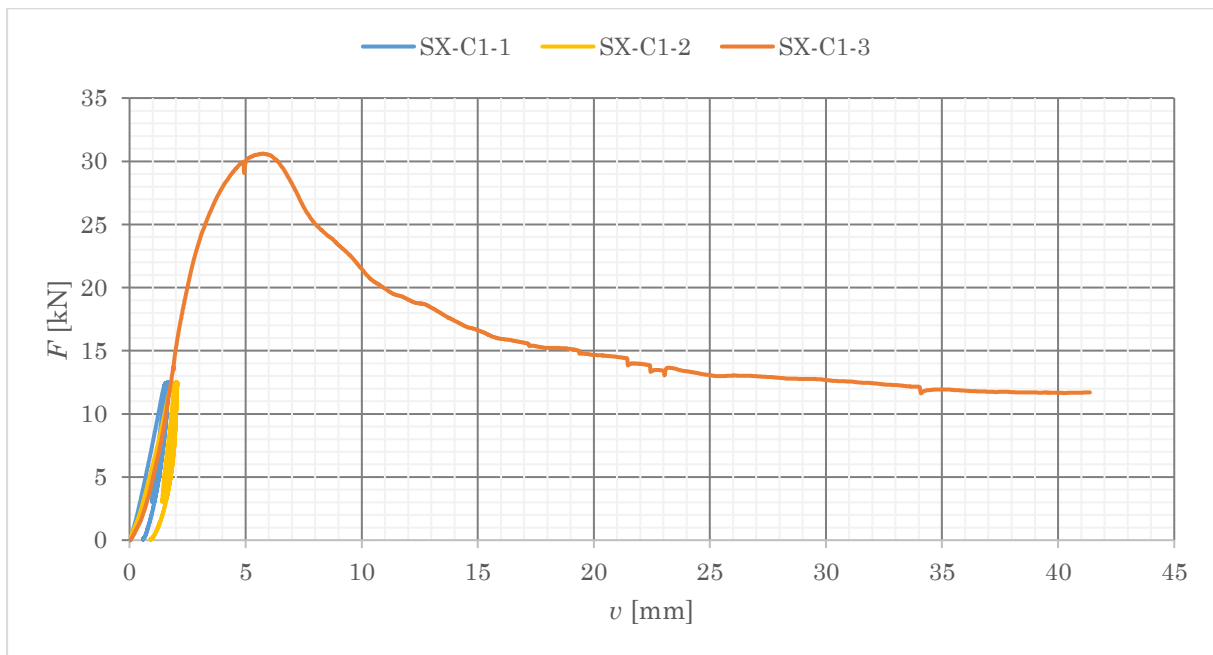


Figuur 38: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk S45D-C1

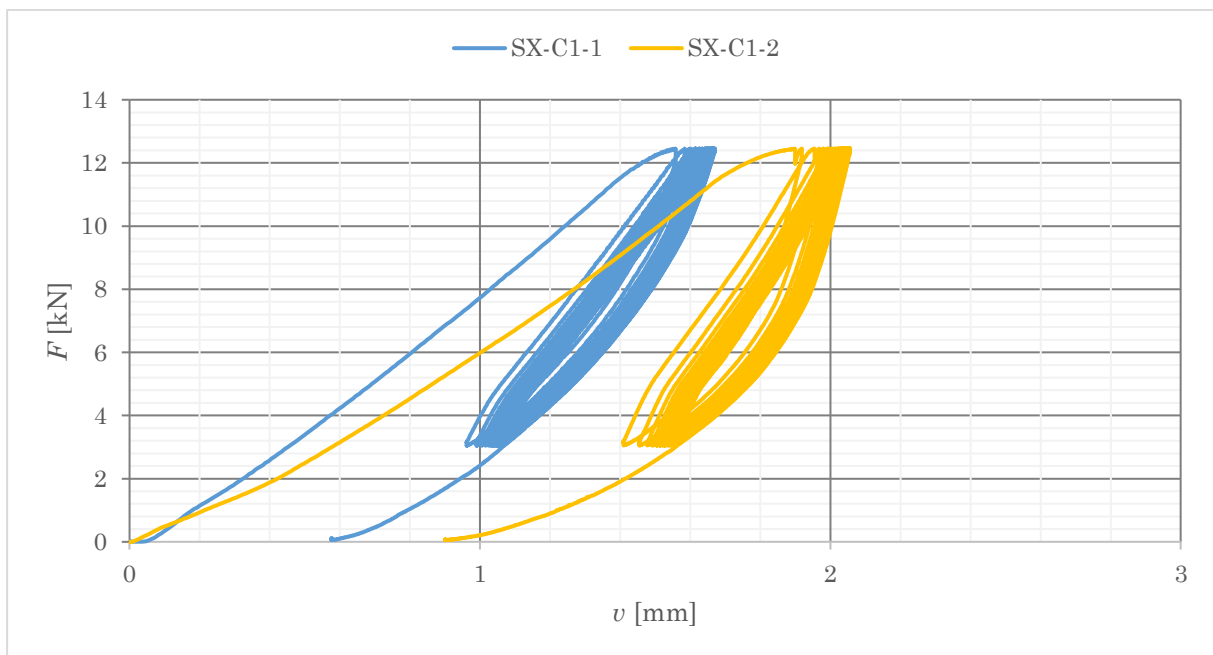


Figuur 39: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk S45D-C1

Voor de schroeven met een gekruiste opstelling werd een belasting van 12,5 kN toegepast met een snelheid van 5 mm/min, gevolgd door een ontlasting met een snelheid van 1 mm/min tot een belasting van 3 kN. De daaropvolgende belastingscyclus werd uitgevoerd met een belasting snelheid van 1 mm/min. De belastings-verplaatsingsdiagrammen van deze testen worden weergegeven in figuur 40 en figuur 41. Voor de monotone test SX-C1-C3 werd een snelheid van 1 mm/min aangehouden tot een belasting van 3 kN werd bereikt, waarna er verder werd belast met een snelheid van 1 mm/min tot het moment van breuk.



Figuur 40: Belastings-verplaatsingsdiagram cyclische testen van proefstuk SX-C1



Figuur 41: Belastings-verplaatsingsdiagram van het cyclisch verloop van proefstuk SX-C1

Tabel 24 tot en met tabel 28 geven de maximum capaciteit, de stijfheid en de houtsoort per element weer.

Tabel 24: Cyclische testresultaten van configuratie B

Configuratie	B-C1			B-C2		
	B-C1-1	B-C1-2	B-C1-3	B-C2-1	B-C2-2	B-C2-3
K_{ser} [kN/mm]	31,64	27,75	/	20,64	18,15	/
F_{max} [kN]	46,27			47,50		
Houtsoort element a/c	CLS ₂ /CLS ₂			CLS ₂ /CLS ₂		

Met:

K_{ser} de stijfheid bepaald in de cyclustesten bij de achtste keer belasten en ontlasten.

Tabel 25: Cyclische testresultaten van configuratie S

Configuratie	S-C1			S-C2		
	S-C1-1	S-C1-2	S-C1-3	S-C2-1	S-C2-2	S-C2-3
K_{ser} [kN/mm]	8,75	9,88	/	13,71	15,92	/
F_{max} [kN]	18,09			17,87		
Houtsoort element a/c	CLS ₂ /CLS ₂			CLS ₂ /CLS ₂		

Tabel 26: Cyclische testresultaten van configuratie S45T

Configuratie	S45T-C1		
	S45T-C1-1	S45T-C1-2	S45T-C1-3
K_{ser} [kN/mm]	14,83	12,19	/
F_{max} [kN]	20,71		
Houtsoort element a/c	CLS ₂ /CLS ₂		

Tabel 27: Cyclische testresultaten van configuratie S45D

Configuratie	S45D-C1		
	S45D-C1-1	S45D-C1-2	S45D-C1-3
K_{ser} [kN/mm]	10,60	6,60	/
F_{max} [kN]	9,03		
Houtsoort element a/c	CLS ₂ /CLS ₂		

Tabel 28: Cyclische testresultaten van configuratie SX

Configuratie	SX-C1		
	SX-C1-1	SX-C1-2	SX-C1-3
K_{ser} [kN/mm]	14,75	17,41	/
F_{max} [kN]	30,61		
Houtsoort element a/c	RND/RND		

Deze resultaten worden in sectie 8 besproken, daarnaast weergeeft bijlage E de belastings-tijddiagrammen van elk proefstuk voor zowel de monotone als cyclische testen.

7.3. Statistische resultaten

In deze sectie wordt er een statistische analyse uitgevoerd, zoals beschreven in 6.4, binnen elke configuratie voor zowel de monotone testresultaten en de cyclische testresultaten.

7.3.1 Monotone testen

Tabel 29 tot en met tabel 33 geeft de resultaten weer van de statistische berekeningen voor alle configuraties voor de monotonetesten. Hierbij worden de resultaten gegeven van het gemiddelde, de standaarddeviatie, de 5-percentiel- en 95-percentielwaarde en de variatiecoëfficiënt.

Tabel 29: Resultaten statistische berekeningen (B-M)

	Gemiddelde \bar{y}	Standaard- deviatie S_y	5- percentiel	95- percentiel	Variatie- coëfficiënt CV
F_{max} [kN]	57,85	2,89	50,00	65,69	5%
K_{ser} [kN/mm]	15,30	0,90	12,46	18,13	5,88%

Tabel 30: Resultaten statistische berekeningen (S-M)

	Gemiddelde \bar{y}	Standaard- deviatie S_y	5- percentiel	95- percentiel	Variatie- coëfficiënt CV
F_{max} [kN]	22,94	1,22	19,63	26,24	5,31%
K_{ser} [kN/mm]	25,70	3,87	13,50	37,90	15,07%

Tabel 31: Resultaten statistische berekeningen (S45T-M)

	Gemiddelde \bar{y}	Standaard- deviatie S_y	5- percentiel	95- percentiel	Variatie- coëfficiënt CV
F_{max} [kN]	26,08	5,73	10,55	41,62	21,96%
K_{ser} [kN/mm]	17,58	3,90	5,30	29,87	22,20%

Tabel 32: Resultaten statistische berekeningen (S45D-M)

	Gemiddelde \bar{y}	Standaard- deviatie S_y	5- percentiel	95- percentiel	Variatie- coëfficiënt CV
F_{max} [kN]	9,47	0,84	7,20	11,75	8,86%
K_{ser} [kN/mm]	11,31	5,16	-4,93	27,54	45,61%

Tabel 33: Resultaten statistische berekeningen (SX-M)

	Gemiddelde \bar{y}	Standaard- deviatie S_y	5- percentiel	95- percentiel	Variatie- coëfficiënt CV
F_{max} [kN]	32,98	1,65	28,50	37,45	5,00%
K_{ser} [kN/mm]	20,28	2,15	4,55	36,01	24,64%

Om de uitschieters te kunnen bepalen moeten de grenzen gekend zijn. Tabel 34 tot en met tabel 38 geven deze grenzen weer voor alle configuraties van de monotone testen.

Tabel 34: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters (B-M)

	Q_1	Q_3	IQR	Ondergrens	Bovengrens
F_{max} [kN]	57,22	58,78	1,56	54,89	61,11
K_{ser} [kN/mm]	14,85	15,75	0,90	13,50	17,10

Tabel 35: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters (S-M)

	Q_1	Q_3	IQR	Ondergrens	Bovengrens
F_{max} [kN]	22,22	23,11	0,89	20,89	24,44
K_{ser} [kN/mm]	23,82	28,69	3,87	18,01	33,49

De waarden van deze testen blijken niet allemaal binnen de grenzen te liggen. De maximum capaciteit van proefstuk S-M1 bevat 24,75 kN. Deze waarde ligt boven de binnenste bovengrens. Bijkomend wordt er een controle gedaan om na te gaan of het gaat om een matige uitschieter of een extreme uitschieter. De buitenste grenzen worden als volgt berekend:

$$\text{Ondergrens} = 22,22 - (0,89 * 3) = 19,55 \text{ kN}$$

$$\text{Bovengrens} = 23,11 * (0,89 * 3) = 25,78 \text{ kN}$$

$$F_{max}(S - M1) = 24,75 \text{ kN} < \text{Bovengrens} = 25,78 \text{ kN}$$

Aangezien de maximum kracht van proefstuk S-M1 kleiner is dan de bovengrens bij de buitenste grenzen, is dit een matige uitschieter. Omdat deze waard maar met 1,3% afwijkt van de binnenste grenzen, wordt deze waarde wel in rekening genomen bij de analyse als een representatieve waarde.

Tabel 36: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters (S45T-M)

	Q_1	Q_3	IQR	Ondergrens	Bovengrens
F_{max} [kN]	21,44	30,02	8,58	8,57	42,88
K_{ser} [kN/mm]	15,33	18,73	3,40	10,24	23,82

Tabel 37: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters (S45D-M)

	Q_1	Q_3	IQR	Ondergrens	Bovengrens
F_{max} [kN]	9,17	9,83	0,67	8,16	10,83
K_{ser} [kN/mm]	8,97	14,07	5,11	1,31	21,73

Tabel 38: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters (SX-M)

	Q_1	Q_3	IQR	Ondergrens	Bovengrens
F_{max} [kN]	32,52	33,80	1,28	30,60	35,72
K_{ser} [kN/mm]	18,63	23,16	4,53	11,84	29,94

Aan de hand van de onder- en bovengrenzen blijkt dat alle testwaarden zich binnen de grenzen bevinden. Dat wil zeggen dat alle waarden representatief zijn en mogen gebruikt worden bij de analyse van de resultaten.

7.3.2. Cyclische testen

Tabel 39 en tabel 40 geven de resultaten weer van de statistische berekeningen voor de cyclische testen van de bouten. Hierbij worden de resultaten gegeven van het gemiddelde, de standaarddeviatie, de 5-percentiel- en 95-percentielwaarde en de variatiecoëfficiënt.

Tabel 39: Resultaten statistische berekeningen (B)

	<i>Gemiddelde</i> \bar{y}	<i>Standaard-</i> <i>deviatie</i> S_y	<i>5-</i> <i>percentiel</i>	<i>95-</i> <i>percentiel</i>	<i>Variatie-</i> <i>coëfficiënt</i> <i>CV</i>
F_{max} [kN]	46,89	2,34	36,76	57,01	5,00%
K_{ser} <i>B-C1</i> [kN/mm]	29,70	2,75	17,82	41,57	9,26%
K_{ser} <i>B-C2</i> [kN/mm]	19,40	1,76	11,79	27,00	9,08%

Tabel 40: Resultaten statistische berekeningen (S)

	<i>Gemiddelde</i> \bar{y}	<i>Standaard-</i> <i>deviatie</i> S_y	<i>5-</i> <i>percentiel</i>	<i>95-</i> <i>percentiel</i>	<i>Variatie-</i> <i>coëfficiënt</i> <i>CV</i>
F_{max} [kN]	17,98	0,90	14,10	21,86	5,00%
K_{ser} <i>S-C1</i> [kN/mm]	9,32	0,80	5,86	12,77	8,58%
K_{ser} <i>S-C2</i> [kN/mm]	14,82	1,56	8,07	21,56	10,55%

Om de uitschieters te kunnen bepalen moeten de grenzen gekend zijn. Tabel 41 en tabel 42 geven deze grenzen weer voor de configuraties van de bouten en de schroeven van de cyclische testen.

Tabel 41: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters

	Q_1	Q_3	IQR	Ondergrens	Bovengrens
F_{max} [kN]	46,58	47,19	0,62	45,66	48,2
K_{ser} B-C1 [kN/mm]	28,72	30,76	1,95	25,81	33,59
K_{ser} B-C2 [kN/mm]	18,77	20,02	1,25	16,91	21,89

Tabel 42: Resultaten onder- en bovengrens voor uitschieters

	Q_1	Q_3	IQR	Ondergrens	Bovengrens
F_{max} [kN]	17,93	18,04	0,11	17,76	18,20
K_{ser} S-C1 [kN/mm]	9,03	9,60	0,57	8,19	10,45
K_{ser} S-C2 [kN/mm]	14,26	15,37	1,11	12,61	17,03

Uit de resultaten is gebleken dat alle waarden van de maximum capaciteit en de stijfheid binnen de grenzen liggen, dus zijn er geen uitschieters.

Voor de configuraties S45T-C, S45D-C en SX wordt er geen statistische analyse uitgevoerd voor de cyclische testen, omdat er voor deze configuraties maar één test werd uitgevoerd.

8 Analyse resultaten

8.1 Vergelijking tussen configuraties

8.1.1 Monotone testresultaten binnen de configuraties

De testresultaten van de monotone tests zijn geanalyseerd voor alle configuraties volgens een statistische analyse zoals beschreven in sectie 7.3. Uit deze analyse is gebleken dat zowel de capaciteit van de verbinding (F_{max}) als de stijfheid (K_{ser}) binnen de vastgestelde onder- en bovengrenzen vallen.

a. Bouten met een hoek $\alpha = 90^\circ$ (B)

Voor conifuratie B werden monotone testen 1 (B-M1) en 3 (B-M3) uitgevoerd, waarbij het hout tot breuk werd belast en zichtbare plastische vervorming optrad na de test. Voor de monotone test 2 (B-M2) en test 4 (B-M4) werd de test gestopt na het bereiken van de maximale capaciteit, waardoor de verplaatsing kleiner en er geen opmerkelijke breuk in het hout optrad. De proefstukken met bouten met een hoek $\alpha = 90^\circ$ na de monotone testen worden weergegeven in figuur 42 tot en met figuur 45. In figuur 43 b) is de insnoering van de sluitring te zien als gevolg van het koordeffect. Bij de analyse van de capaciteit van de verbinding (F_{max}) en de stijfheid (K_{ser}) zijn alle proefstukken in beschouwing genomen en zijn er geen afwijkingen geconstateerd.



Figuur 42: Proefstuk B-M1 na monotone test



a)



b)

Figuur 43: Proefstuk B-M2 na monotone test met a) Voorzijde b) zijkant (kooideffect)

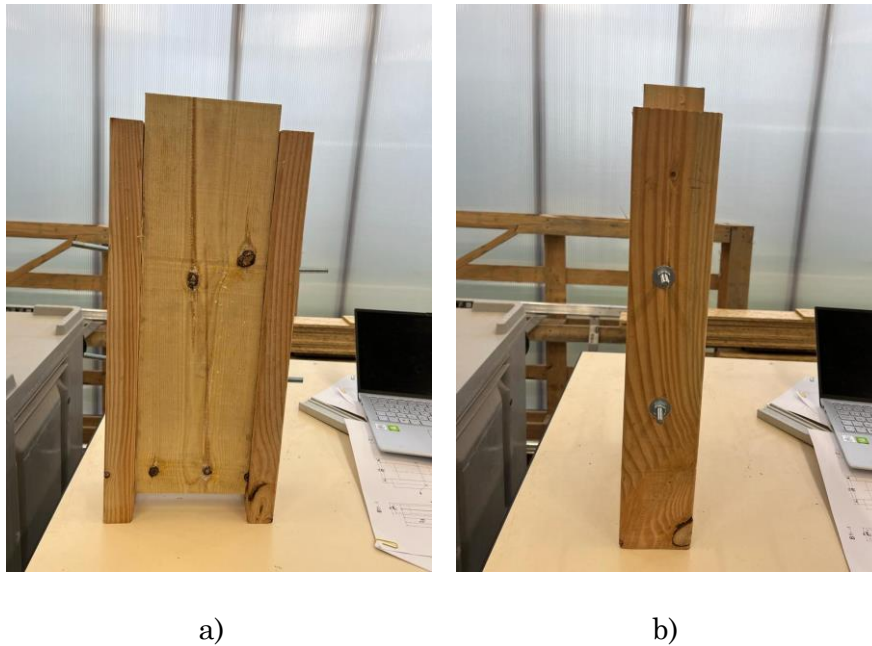


a)



b)

Figuur 44: Proefstuk B-M3 na monotone test met a) Voorzijde b) zijkant



Figuur 45: Proefstuk B-M4 na monotone test met a) Voorzijde b) zijkant

b. Schroeven met een hoek $\alpha = 90^\circ$ (S)

Voor de configuratie van schroeven met een hoek $\alpha = 90^\circ$ vertoont het proefstuk S-M3 een afwijkende stijfheid in vergelijking met proefstuk S-M2, met respectievelijke waarden van 21,73 kN/mm en 29,47 kN/mm. Een mogelijke oorzaak hiervoor zou kunnen zijn dat er variabel CLS hout is gebruikt voor de zijelementen van dit specifieke proefstuk. Ondanks deze afwijking, vallen de stijfheidswaarden binnen de vastgestelde boven- en ondergrenzen volgens de statistische analyse, waardoor alle waarden in overweging kunnen worden genomen. Wat betreft de capaciteit van de proefstukken is er een matige uitschieter geconstateerd bij proefstuk S-M1, waarbij de capaciteit 1,3% afwijkt. Niettemin wordt ook deze afwijking in beschouwing genomen en worden alle proefstukken meegenomen in de analyse.

Het hout van proefstuk S-M4 bezweek bij een kleinere verplaatsing in vergelijking met de andere proefstukken, namelijk 7,54 mm, terwijl de verplaatsing bij de andere proefstukken varieerde tussen 13,30 mm en 22,21 mm. De testen werden ook bij deze proefstukken, net als bij de configuratie van de bouten, gestopt na het optreden van schade.

Figuur 46 tot en met figuur 49 tonen de proefstukken na voltooiing van de monotone testen. Bij alle testen was er een opmerkelijke breuk waarneembaar in één van de twee zijelementen.



a)



b)

Figuur 46: Proefstuk S-M1 na monotone test met a) element a b) element c

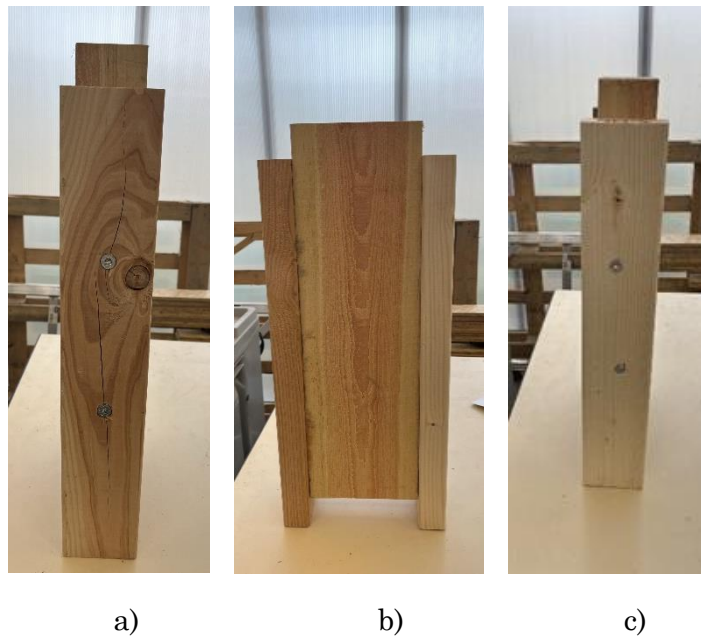


a)

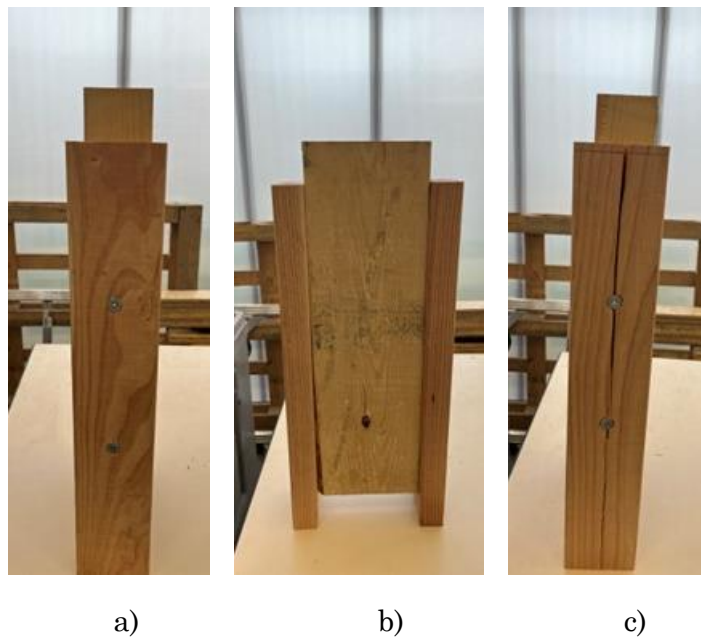


b)

Figuur 47: Proefstuk S-M2 na monotone test met a) element a b) element c



Figuur 48: Proefstuk S-M3 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c



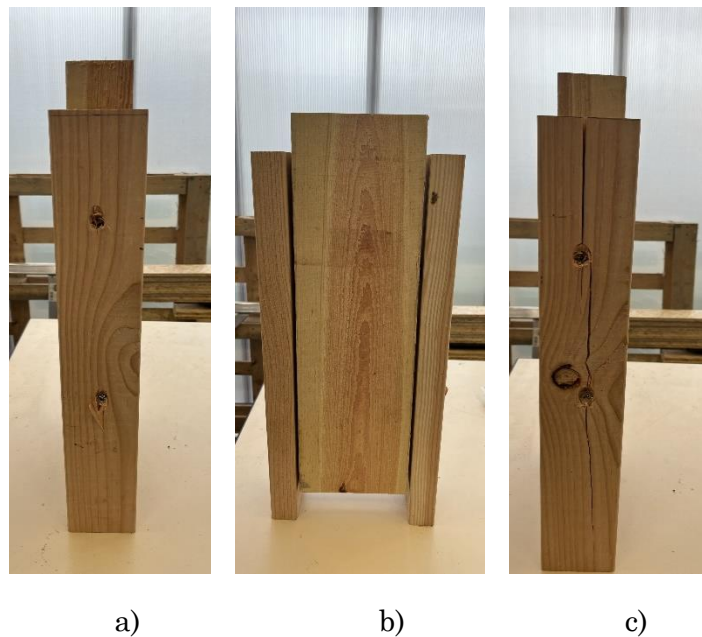
Figuur 49: Proefstuk S-M4 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c

c Schroeven met een hoek $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek (S45T)

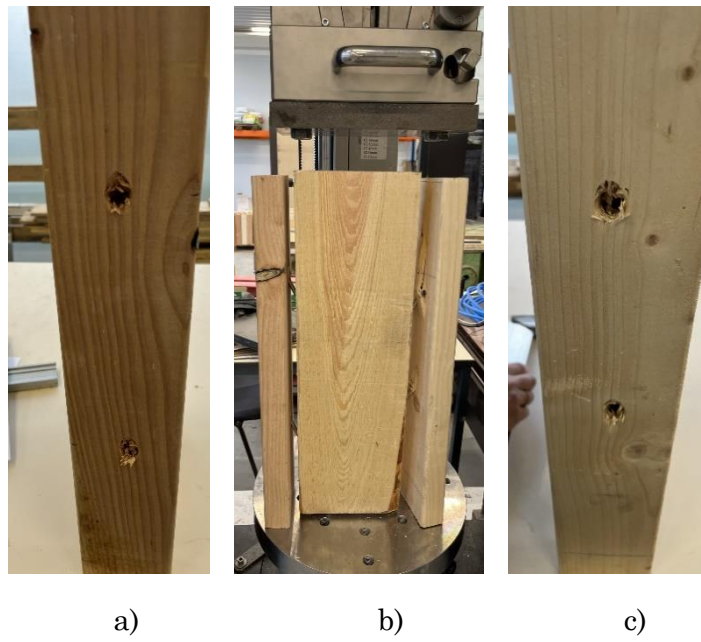
Bij de analyse van de sterkte van de verbinding vertoont zich een opmerkelijk patroon. De capaciteit van proefstukken S45T-M1 en S45T-M2 is hoger dan die van S45T-M3 en S45T-M4, deze afwijking kan worden toegeschreven aan het gebruikte houtsoort. Naarmate er meer CLS₂-hout is gebruikt in de proefstukken, is er een daling zichtbaar in de capaciteit. Ondanks dit aanzienlijke verschil bevinden alle maximale capaciteitswaarden van de proefstukken met schroeven onder een hoek $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek zich

binnen de gestelde grenzen, zonder enige uitschieter. Er is evenmin sprake van uitschieters in termen van stijfheid.

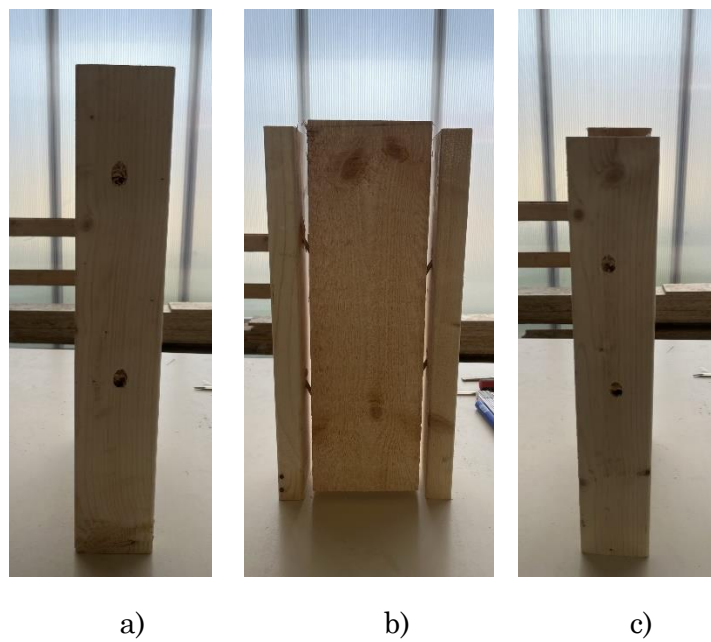
Proefstuk S45T-M1 vertoonde een breuk bij een verplaatsing van 19,91 mm, mogelijk veroorzaakt door het zwakkere houtsoort CLS₁ dat gevoeliger is voor breuk. De overige proefstukken werden verder belast tot de maximale verplaatsing tussen 50 en 56 mm die het proefstuk kon weerstaan, aangezien er geen breuk optrad in deze proefstukken. Bovendien vertonen de schroeven in elk proefstuk afschuiving en worden ze naar binnen getrokken door het middelste element. De proefstukken belast onder trek na de monotone testen worden weergegeven in figuur 50 tot en met figuur 53.



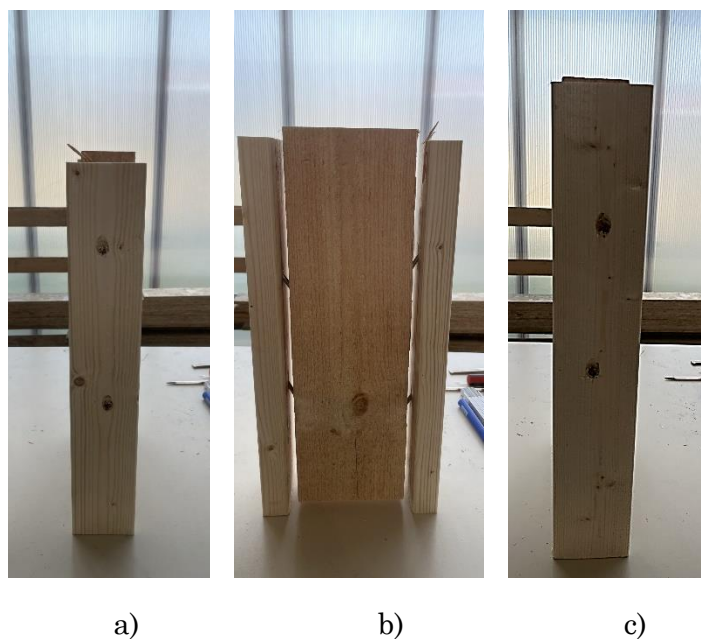
Figuur 50: Proefstuk S45T-M1 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c



Figuur 51: Proefstuk S45T-M2 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c



Figuur 52: Proefstuk S45T-M3 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c

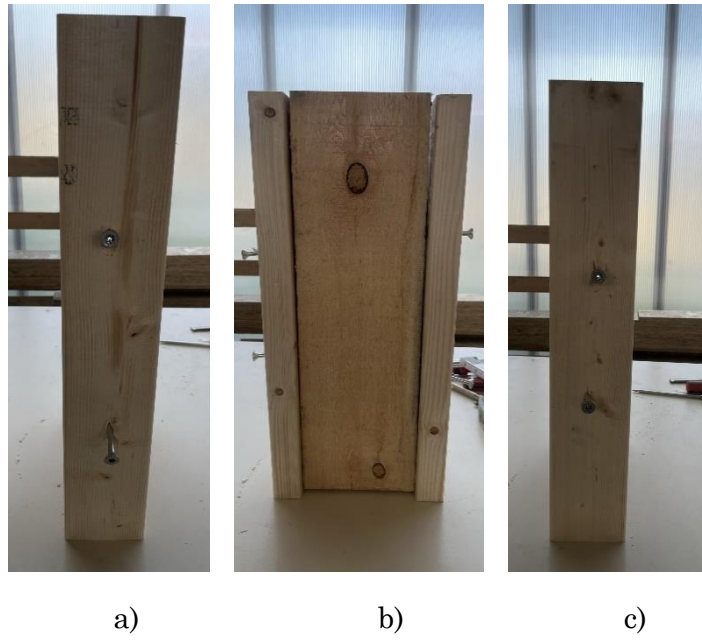


Figuur 53: Proefstuk S45T-M4 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c

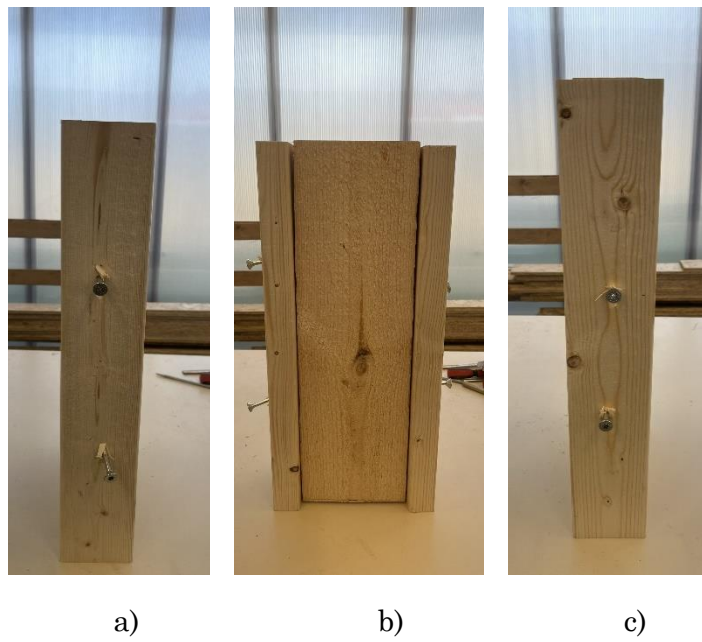
d Schroeven met een hoek $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk (S45D)

Bij de analyse van de stijfheden binnen de configuratie S45D valt op dat proefstuk S45D-M3 een opmerkelijk lage stijfheid vertoont van 5,78 kN/mm, terwijl proefstuk S45D-M2 en S45D-M4 stijfheden hebben van respectievelijk 12,15 kN/mm en 15,99 kN/mm. Hoewel deze stijfheden binnen de vastgestelde grenzen vallen, worden ze niet beschouwd als uitschieters. Alle proefstukken maakten gebruik van hetzelfde houtsoort, namelijk CLS2. Wat betreft de maximale capaciteit vertonen de proefstukken geen afwijkingen.

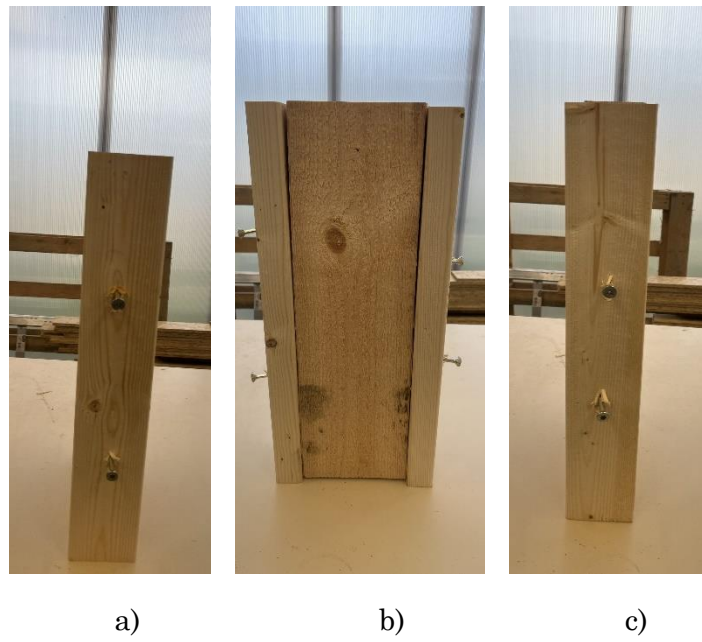
De proefstukken werden belast tot hun maximale capaciteit, aangezien er geen breuk optrad in deze proefstukken. Bovendien vertonen de schroeven in elk proefstuk afschuiving en worden ze naar buiten geduwd door het middelste element. De proefstukken belast onder afschuiving-druk na de monotone testen worden weergegeven in figuur 54 tot en met figuur 57.



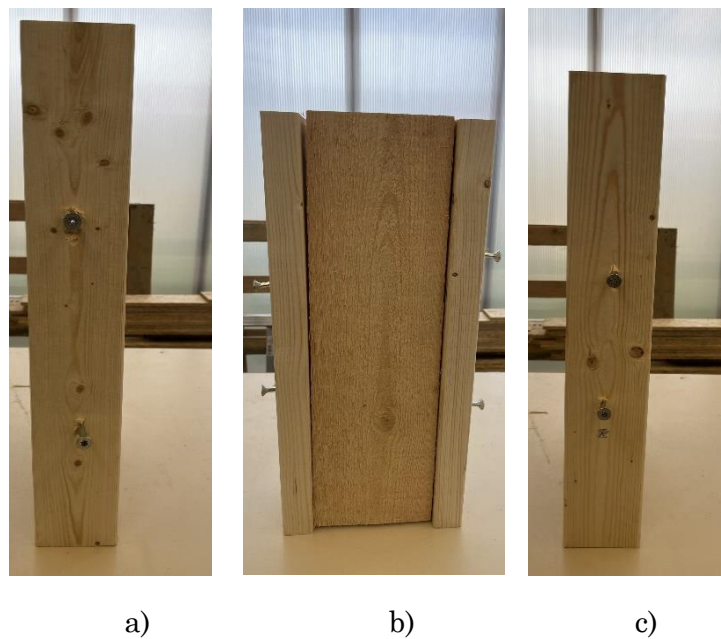
Figuur 54: Proefstuk S45D-M1 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c



Figuur 55: Proefstuk S45D-M2 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c



Figuur 56: Proefstuk S45D-M3 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c



Figuur 57: Proefstuk S45D-M4 na monotone test met a) houtelement a b) houtelement b c) Houtelement c

e Schroeven met gekruiste opstelling (SX)

Voor deze specifieke configuratie was het niet mogelijk om de proefstukken volledig onder de drukmachine te plaatsen. Hierdoor werden de proefstukken in het midden van de drukplaat geplaatst, zoals geïllustreerd in figuur 58. De drukplaat had een lengte van 15,4 cm, terwijl de proefstukken een lengte hadden van 22 cm. Bovendien werden de proeven gestopt wanneer de moeren op de drukplaat het proefstuk raakten, waardoor de verplaatsing beperkt werd.

Wat betreft de maximale capaciteit van de SX-configuratie werden er geen significante afwijkingen waargenomen. In de laatste test van de gekruiste opstelling, SX-M4, werd een lagere stijfheid van 14,53 kN/mm vastgesteld. Niettemin bevond deze stijfheidswaarde zich nog steeds binnen de vooraf bepaalde grenzen, waardoor het niet als een uitschieter werd beschouwd. Daarom kan ook deze test in overweging worden genomen bij de analyse.

Bij alle proefstukken werd een duidelijke verschuivingsmodus waargenomen, waarbij de houtelementen van elkaar werden geduwd. Daarnaast vertoonden de schroeven die onder afschuiving-trek stonden buiging, terwijl de schroeven die onder afschuiving-druk stonden juist werden rechtgetrokken. Dit gedrag is kenmerkend voor een verschuivingsfaalmodus in de onderzochte proefstukken. Deze proefstukken na de monotone testen worden weergegeven in figuur 59 tot en met figuur 62.



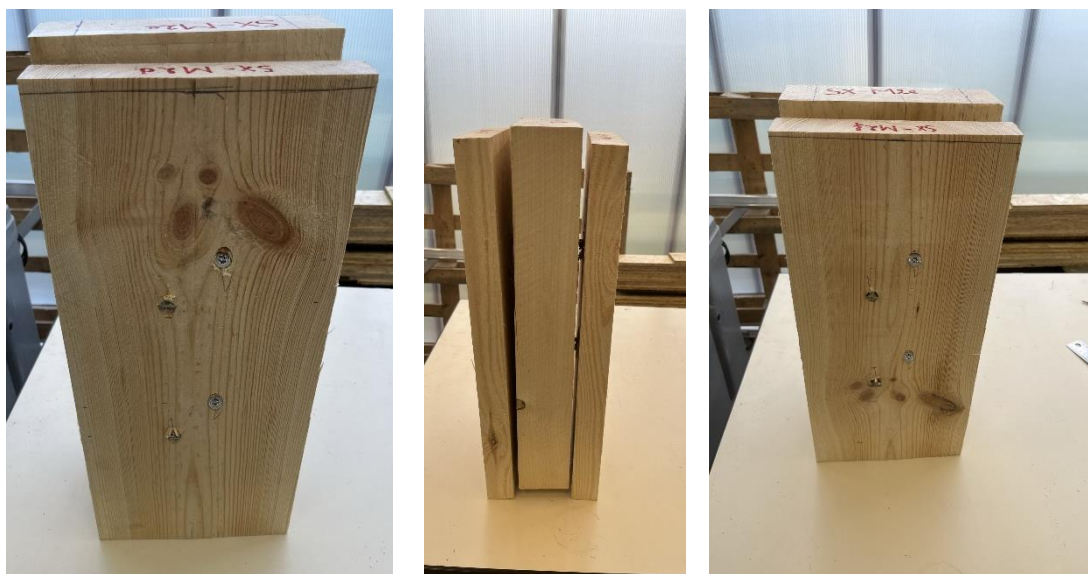
Figuur 58: Opstelling gekruiste schroeven onder drukmachine



a)

b)

Figuur 59: Proefstuk SX-M1 na monotone test met a) houtelement b, b) Houtelement c

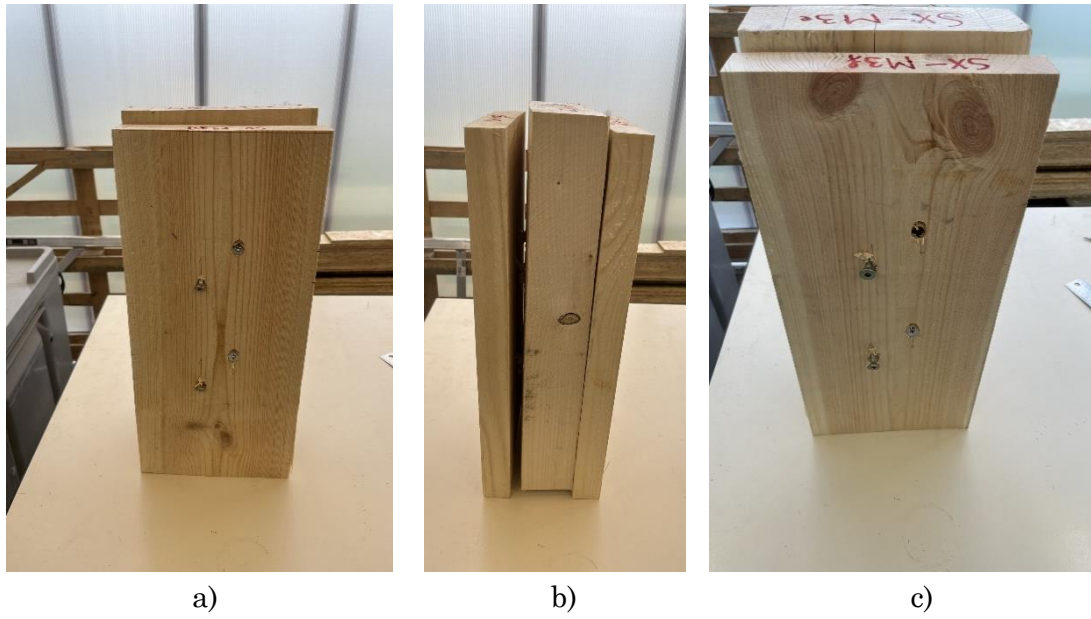


a)

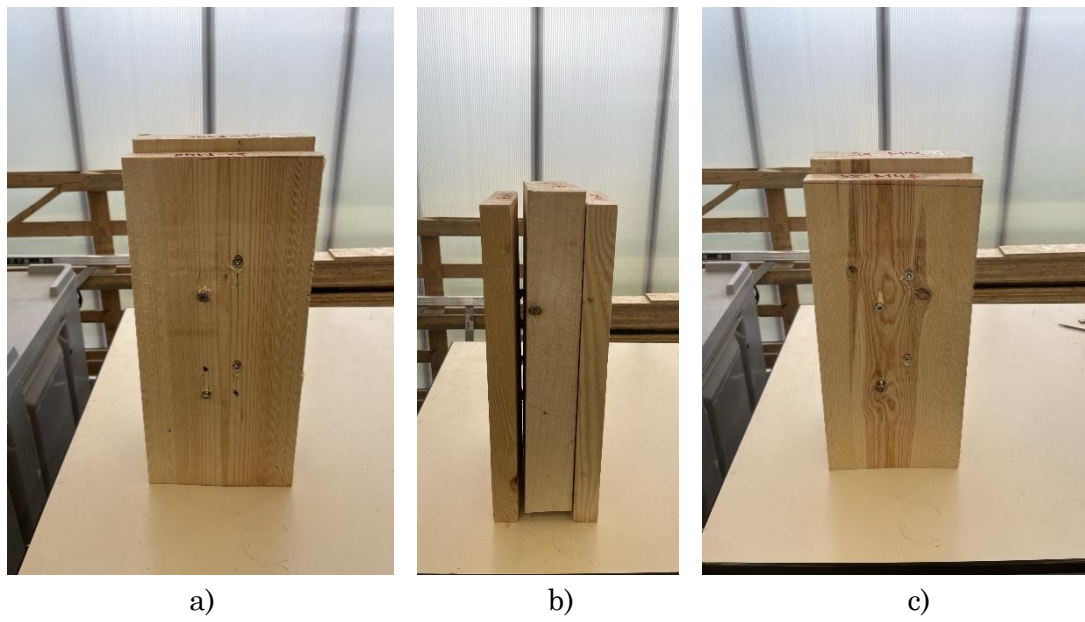
b)

c)

Figuur 60: Proefstuk SX-M2 na monotone test met a) houtelement b, b) Houtelement c



Figuur 61: Proefstuk SX-M3 na monotone test met a) houtelement a, b) Houtelement b, c) houtelement c



Figuur 62: Proefstuk SX-M4 na monotone test met a) houtelement a, b) Houtelement b, c) houtelement c

8.1.2 Monotone testresultaten tussen de configuraties

Tabel 43 weergeeft de gemiddelde waarden van de maximale capaciteit en de stijfheid van elke configuratie voor de monotone testen.

Tabel 43: Gemiddelde waarden van de monotone testen voor alle configuraties

Configuratie	B	S	S45T	S45D	SX
F_{max} [kN]	57,84	22,93	26,08	9,47	32,98
K_{ser} [kN/mm]	15,30	25,70	17,58	11,31	20,28
Houtsoort element a/c	CLS ₁ /CLS ₁	Variabel	CLS ₂ /CLS ₂	CLS ₂ /CLS ₂	RND/RND

Op basis van de verkregen testresultaten kan geconcludeerd worden dat configuratie B de hoogste capaciteit vertoont onder alle onderzochte configuraties, namelijk 57,84 kN. Daarentegen hebben de schroeven die onder druk staan de laagste capaciteit en stijfheid van alle configuraties, met respectievelijk 9,47 kN en 11,31 kN/mm. Dit kan worden verklaard door het bereiken van de maximale capaciteit in de schuine schroeven in de houtconstructie, zelfs na een kleine vervorming. Configuratie S toont daarentegen de hoogste stijfheid, namelijk 25,70 kN/mm. Aangezien schroeven die loodrecht op de vezelrichting geplaatst zijn de meest efficiënte manier zijn om krachten over te brengen, is er meer kracht nodig om een verplaatsing van 1 mm te bereiken.

De capaciteit van configuratie B is 2,52 maal groter dan die van configuratie S, terwijl de stijfheid van configuratie B 1,68 maal kleiner is dan die van configuratie S. Deze bevinding suggereert dat bouten in staat zijn om meer kracht op te nemen, maar tegelijkertijd meer vervorming kunnen ondergaan.

Daarnaast is opgemerkt dat proefstukken waarbij het houttype CLS₁ is gebruikt, neigen tot breuk van het hout. Dit kan worden toegeschreven aan de inherente zwakte van dit specifieke houttype, ondanks dat beide houttypes tot dezelfde CLS-klasse behoren. Er blijft dus een onderscheid bestaan binnen eenzelfde houtsoort.

De configuratie met gekruiste schroeven toont de op één na hoogste maximale capaciteit en stijfheid. Echter, vanwege de gebruikte verschillende houtsoorten, afmetingen en het aantal schroeven, is het moeilijk om deze configuratie direct te vergelijken met de andere configuraties.

8.1.3 Cyclische testresultaten binnen de configuraties

De testresultaten van de cyclische testen werden geanalyseerd aan de hand van een statistische analyse beschreven in 7.3. Deze analyse werd enkel uitgevoerd voor de bouten B en de schroeven S, omdat er enkel van deze configuraties twee testen zijn uitgevoerd.

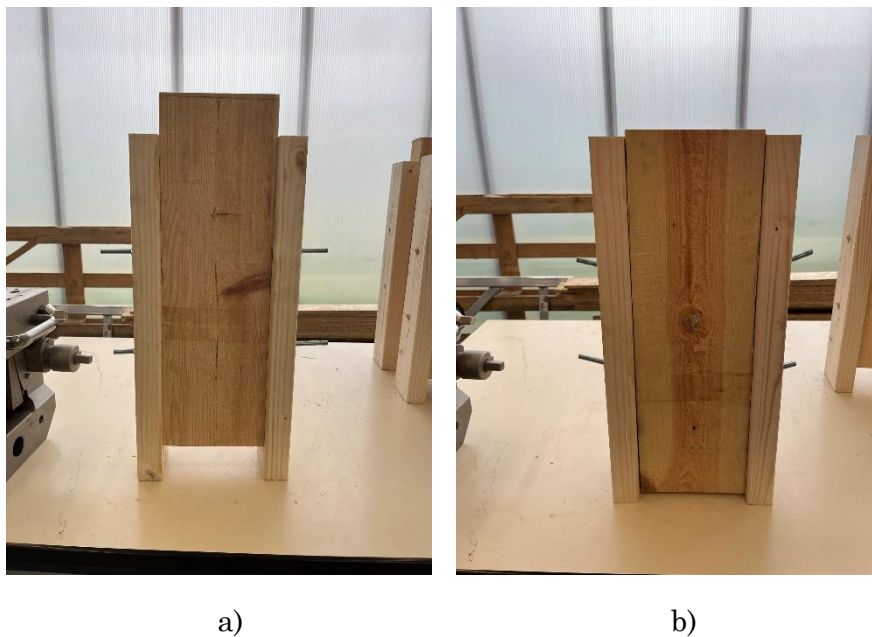
Binnen de context van de statistische analyse werden grenswaarden berekend waarbinnen de testresultaten zich moeten bevinden om als representatief te worden beschouwd. De resultaten, F_{max} en K_{ser} , van de cyclische proeven liggen allemaal binnen de berekende grenzen. Dit duidt erop dat alle resultaten representatief zijn en geschikt zijn voor verdere analyse.

a Bouten met een hoek $\alpha = 90^\circ$ (B)

Voor configuratie B-C1 was het onmogelijk om de proefstukken te demonteren en monteren omdat de plastische vervorming in de bouten al in de eerste belastingscyclus plaats vond. Tijdens deze cyclus werd het proefstuk belast tot de GGT-grens van 20 kN. De oorzaak van deze vervorming is de slankheid van de bouten in vergelijking met de breedte van het proefstuk waardoor het koordeffect in de bouten sneller optreedt. Ondanks dat het proefstuk niet gedemonteerd kon worden, werd de test op dezelfde manier uitgevoerd als normaal.

Voor configuratie B-C2 werd de maximum kracht in de cycli verlaagd tot 18 kN om de plastische vervorming te vermijden, maar ook hier had de plastische vervorming al plaatgevonden. Daardoor was het bij deze configuratie ook onmogelijk om het proefstuk te demoteren en monteren.

Na het uitvoeren van de testen vertoonde geen van beide proefstukken breuk in het hout, de bouten vertoonden wel duidelijk zichtbare vervorming. Figuur 63 (a) toont het proefstuk vóór de testen, waarbij de bouten nog rechten en onvervormd door het proefstuk steken. Figuur 63 (b) toont het proefstuk na uitvoering van de cyclische test, waarbij de plastische vervorming van de bouten zichtbaar is.



Figuur 63: Configuratie B-C1 voor de cyclische test (a) en na de cyclische test (b)

b. *Schroeven met een hoek $\alpha = 90^\circ$ (S)*

Voor configuratie S-C1 werd het proefstuk in beide cycli belast tot de grenswaarde van de gebruiksgrenstoestand (GGT) van 8,5 kN. Bij deze belasting werden er geen plastische vervormingen waargenomen in de schroeven na het demonteren en monteren. Bovendien vertoonde het hout geen schade na het voltooien van de twee cycli. Echter blijkt uit figuur 32 dat de eerste belasting tot 0,4 F_{max} voor de eerste belastingscyclus een stijver gedrag vertoont in vergelijking met de tweede belastingscyclus en de monotone test. Dit resultaat doet vermoeden dat er mogelijk interne degradatie van het hout heeft plaatsgevonden, die niet waarneembaar is aan de buitenzijde.

Voor configuratie S-C2 werd de eerste cyclus op dezelfde wijze uitgevoerd als in configuratie S-C1. Bij het demonteren en monteren na de eerste cyclus werd er geen schade geconstateerd in het hout of de schroeven. Tijdens de tweede cyclus werd het proefstuk eerst zeven keer belast en ontlast tot de GGT-grens van 8,5 kN. Vervolgens werd het proefstuk eenmaal belast en ontlast tot de grens van de uiterste grenstoestand (UGT) van 12,75 kN, gevolgd door opnieuw zeven keer belasten en ontlasten tot de GGT-grens. Bij het demonteren en monteren van het proefstuk, na voltooiing van de tweede cyclus, werd er een ratelend geluid waargenomen, wat kan duiden op vervorming in het hout of de schroeven. Verder onderzoek onthulde dat het schroefgat groter was geworden na het voltooien van de tweede cyclus.

Tijdens het derde deel van de test, de monotone test, werden de schroeven geleidelijk in het proefstuk getrokken bij beide testen, zoals geïllustreerd in figuur 64.



Figuur 64: Configuratie S-C1 na het uitvoeren van de cyclische test

c. *Schroeven met een hoek $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek (S45T)*

Van deze configuratie werd er maar één test uitgevoerd, S45T-C1. Bij deze configuratie werd het proefstuk tijdens de cycli belast en ontlast tot de grenswaarde in GGT van 8 kN.

Bij het demonteren en monteren, na de cycli, werd er geen vervorming of beschadiging waargenomen in het hout of de schroeven. Tijdens het derde (monotone) deel van de test, waarbij trekbelasting werd uitgeoefend op de schroeven, werden de schroeven in het proefstuk getrokken. Dit resulteerde tevens in afschuiving van de schroeven, waarbij de houtelementen van elkaar werden gescheiden, zoals afgebeeld in figuur 65. Er trad geen breuk op in het hout na de cyclische test.



Figuur 65: Configuratie S45T-C1 na het uitvoeren van de cyclische test

d. Schroeven met een hoek $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk (S45D)

Eveneens voor deze configuratie werd er maar één cyclische test uitgevoerd. Gedurende deze test werd het proefstuk in beide cycli belast en ontlast tot de GGT-grenswaarde van 3 kN. Bij het demonteren en monteren na de cycli werd er geen enkele vervorming of beschadiging geconstateerd in het hout of de schroeven. Doordat deze schroeven belast werden op druk, werden de schroeven tijdens het derde deel van de test recht gedrukt. Hierdoor verschoven de schroeven naar buiten toe, zoals weergegeven in figuur 66. Als gevolg van de afschuiving van de schroeven werden de houtelementen lichtjes van elkaar gescheiden. Na voltooiing van de cyclische test trad er geen breuk op in het hout.



Figuur 66: Configuratie S45D-C1 na het uitvoeren van de cyclische test

e. Schroeven met gekruiste opstelling (SX)

Voor configuratie SX-C1 werd er één test uitgevoerd. Gedurende de cycli werd het proefstuk belast en ontlast tot de grenswaarde in GGT van 12,5 kN. Bij het demonteren en monteren na de cycli werden er geen teken van vervorming of beschadiging waargenomen in zowel het hout of de schroeven. Tijdens het laatste deel van de test vond er afschuiving plaats in de schroeven, wat resulteerde in een scheiding van de houtelementen, zoals geïllustreerd in figuur 67. De schroeven die belast werden op afschuiving-trek werden in het proefstuk getrokken, terwijl de schroeven belast op afschuiving-druk werden recht getrokken in het hout. Het hout zelf vertoonde geen breuk na voltooiing van de cyclische test.



Figuur 67: Configuratie SX na het uitvoeren van de cyclische test

8.1.4 Cyclische testresultaten tussen de configuraties

In tabel 44 worden de gemiddelde waarden voor de maximum capaciteit en de stijfheid weergegeven van de cyclische testen, voor alle configuraties.

Tabel 44: Gemiddelde waarden van de cyclische testen voor alle configuraties

Configuratie	B	S	S45T	S45D	SX
F_{max} [kN]	46,89	17,98	20,71	9,03	30,61
K_{ser} [kN/mm]	24,54	12,07	13,51	8,60	16,08
Houtsoort element α/c	CLS ₂ /CLS ₂	CLS ₂ /CLS ₂	CLS ₂ /CLS ₂	CLS ₂ /CLS ₂	RND/RND

Voor zowel de bouten als de schroeven werden er twee cyclische testen uitgevoerd, waardoor de waarden voor de maximum capaciteit en de stijfheid van deze configuraties gelijk zijn aan het gemiddelde van de twee testen. Voor de andere drie configuraties werd er slechts één test uitgevoerd.

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de bouten een gemiddelde capaciteit van 46,89 kN hebben, samen met een gemiddelde stijfheid van 24,54 kN/mm. In vergelijking met de andere configuraties zijn de bouten het sterkste. Aan de andere kant kunnen de schroeven onder een hoek van 45°, belast op afschuiving-druk, slechts een capaciteit van 9,03 kN opnemen, met een stijfheid van 8,6 kN/mm. Deze configuratie is het zwakst. De capaciteit van de bouten is 19,26% groter dan die van de schroeven onder 45°, belast op afschuiving-druk. De stijfheid voor deze twee configuraties verschilt met 35,04%.

8.2 Monotone vs cyclische testen

8.2.1 Bouten met een hoek $\alpha = 90^\circ$ (B)

Tabel 45 geeft de gemiddelde waarden weer van de maximum capaciteit en de stijfheid voor zowel de monotone als de cyclische testresultaten. Aan de hand van deze twee gemiddelde waarden werd een degradatiefactor bepaald.

Tabel 45: Gemiddelde waarden van de monotone en cyclische testen voor configuratie B

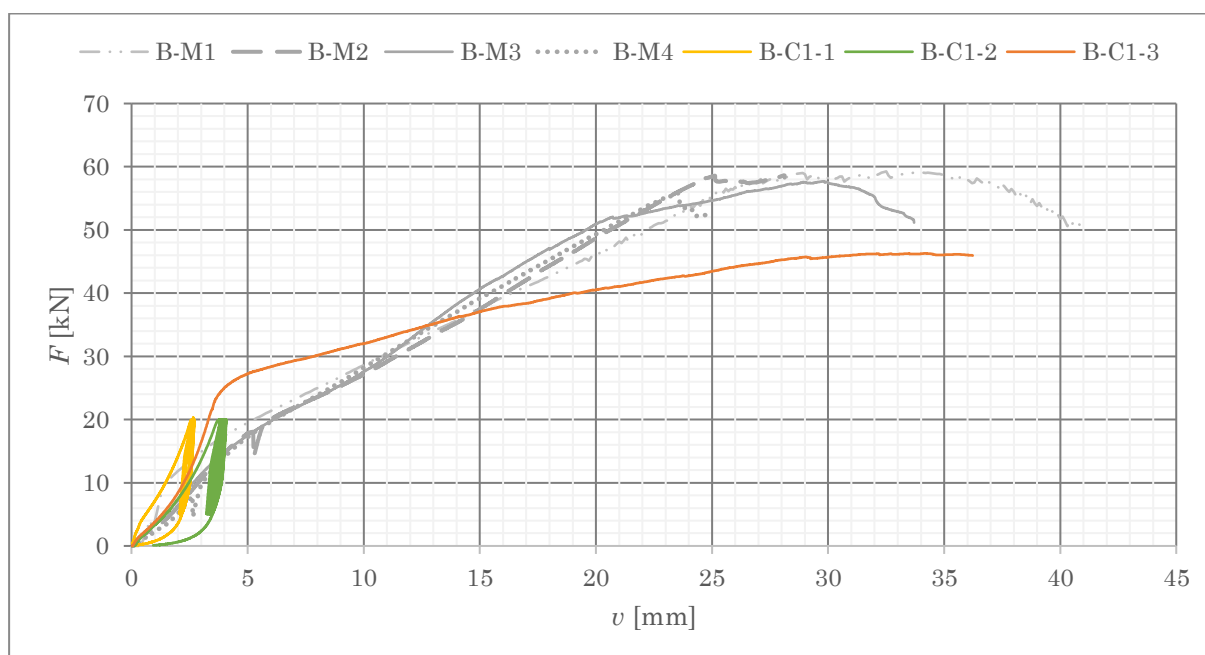
	<i>B-M</i>	<i>B-C</i>	<i>Degradatiefactor</i> η [%]
F_{max} [kN]	57,84	46,88	-19%
K_{ser} [kN/mm]	15,30	24,21	58%
<i>Houtsoort</i> <i>element a/c</i>	CLS ₁ /CLS ₁	CLS ₂ /CLS ₂	/

Na voltooiing van de cyclische testen wordt vastgesteld dat de maximale capaciteit lager is dan die bij de monotone testen. Er wordt een degradatiefactor van -19% vastgesteld, wat impliceert dat het hergebruik van de proefstukken resulteert in een verminderde capaciteit.

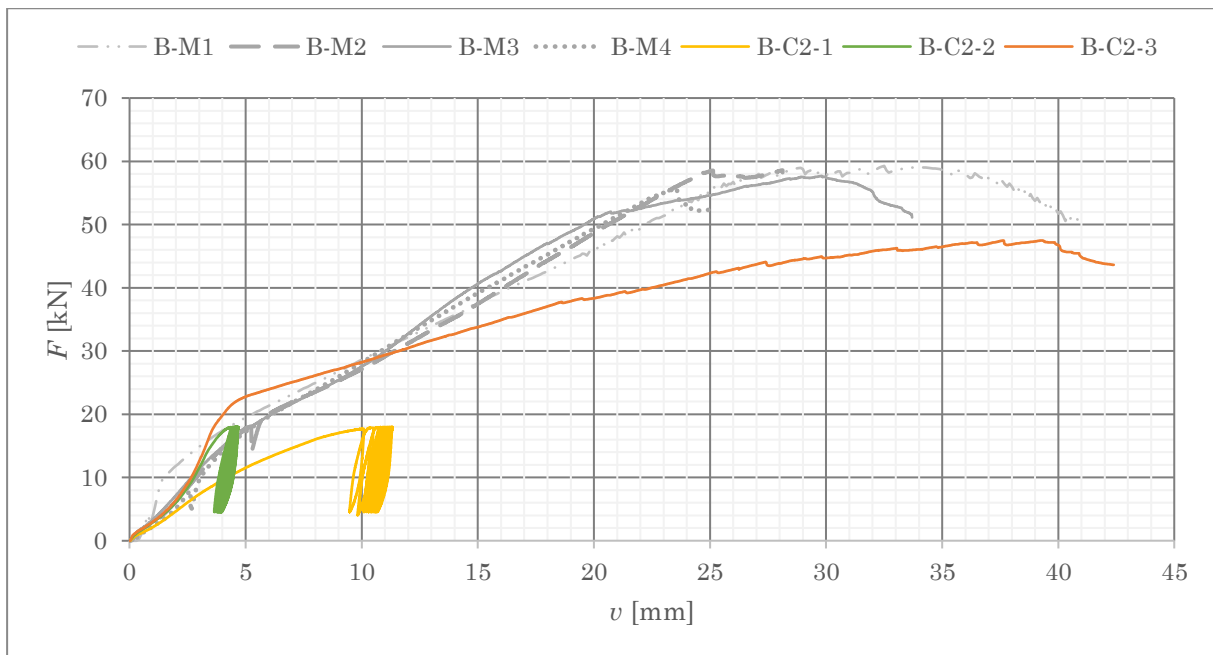
Bij de vergelijking van de stijfheid blijkt dat deze groter is bij het uitvoeren van de cyclische testen. Een mogelijke oorzaak hiervan kan worden toegeschreven aan de variatie in het gebruikte houtmateriaal.

Niettemin is deze vergelijking niet volledig accuraat, aangezien het hout dat werd gebruikt voor de monotone testen niet identiek is aan het hout dat werd gebruikt voor de cyclische testen. Specifiek werd er gebruik gemaakt van CLS₁ voor de monotone testen, terwijl de cyclische testen werden uitgevoerd op CLS₂.

De degradatie is ook zichtbaar in de grafieken. Figuur 68 geeft de belastings-verplaatsingsdiagram weer voor de monotone testen en de cyclische test B-C1. Figuur 69 toont de belastings-verplaatsingsdiagram van de monotone testen en de cyclische test B-C2.



Figuur 68: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (B-M) en cyclische testen (B-C1)



Figuur 69: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (B-M) en cyclische testen (B-C2)

8.2.2 Schroeven met een hoek $\alpha = 90^\circ$ (S)

Tabel 46 geeft het gemiddelde weer van de maximum capaciteit en de stijfheid voor zowel de monotone testen als de cyclische testen, samen met de degradatie factor.

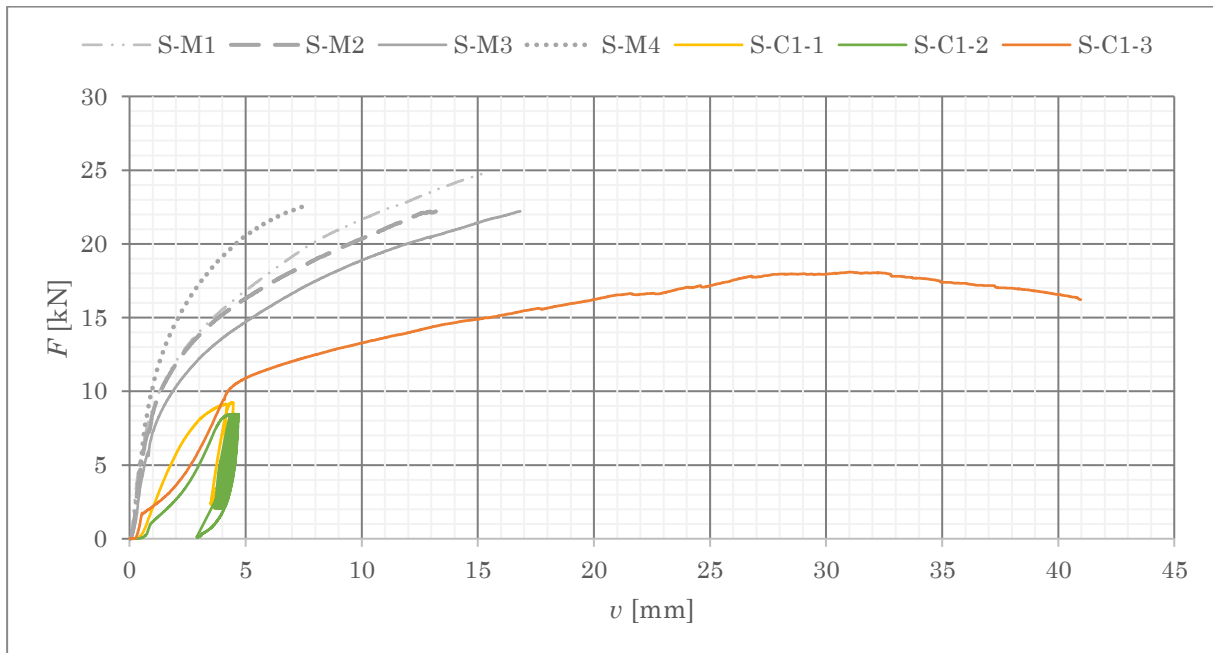
Tabel 46: Gemiddelde waarden van de monotone en cyclische testen voor configuratie S

	S-M	S-C	Degradatiefactor η [%]
F_{max} [kN]	22,93	17,98	-22%
K_{ser} [kN/mm]	25,70	12,07	-53%
Houtsoort element a/c	Variabel	CLS ₂ /CLS ₂	/

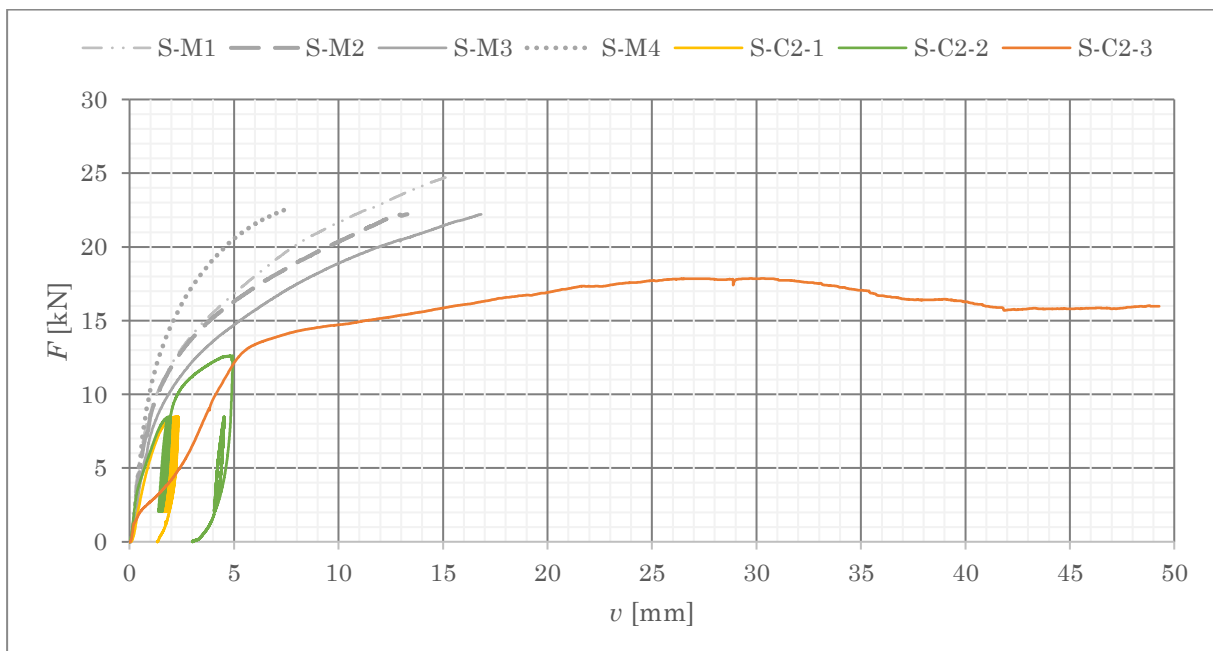
Binnen deze configuratie liggen de waarden van de cyclische testen lager dan die van de monotone testen. De maximum capaciteit ondergaat een degradatie 22% terwijl de stijfheid een degradatie van 53% vertoont. Het hergebruik heeft een negatief effect op zowel de capaciteit als de stijfheid.

De degradatie wordt eveneens weerspiegeld in de grafieken. Figuur 70 illustreert de belastings-verplaatsingsdiagram voor zowel de monotone testen als de cyclische test S-C1, terwijl figuur 71 de belastings-verplaatsingsdiagram toont voor de monotone testen en de cyclische test S-C2. In de monotone testen varieerde de verplaatsing van ongeveer 12 mm tot 15 mm, terwijl de cyclische testen resulteerden in een verplaatsing van ongeveer 40 mm tot 49 mm. Dit verschil wordt verklaard door het ontbreken van breuk in het hout van

de proefstukken tijdens de cyclische testen. Daarentegen trad er wel breuk op in het hout tijdens de monotone testen, wat resulteerde in een beperktere verplaatsing van de proefstukken.



Figuur 70: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (S-M) en cyclische testen (S-C1)



Figuur 71: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (S-M) en cyclische testen (S-C2)

8.2.3 Schroeven met een hoek $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek (S45T)

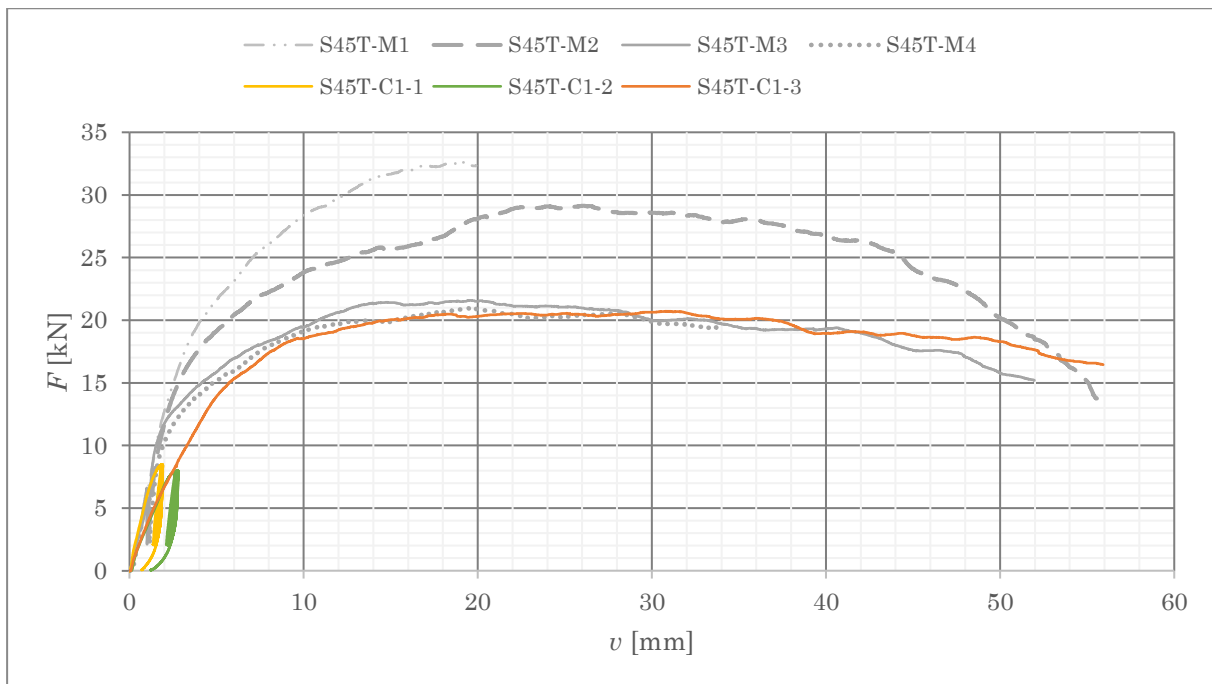
Tabel 47 geeft het gemiddelde weer van de maximum capaciteit en de stijfheid voor zowel de monotone testen als de cyclische testen, samen met de degradatie factor.

Tabel 47: Gemiddelde waarden van de monotone en cyclische testen voor configuratie S45T

	<i>S45T-M</i>	<i>S45T-C</i>	<i>Degradatiefactor</i> <i>η [%]</i>
<i>F_{max} [kN]</i>	21,28	20,71	-3%
<i>K_{ser} [kN/mm]</i>	18,73	13,51	-28%
<i>Houtsoort</i> <i>element a/c</i>	CLS ₂ /CLS ₂	CLS ₂ /CLS ₂	/

Voor de gemiddelde capaciteit en stijfheid van de monotone testen in deze configuratie werden uitsluitend proefstukken S45T-M3 en S45T-M4 gebruikt, aangezien deze proefstukken dezelfde houtsoort hebben als de cyclische testen. De degradatie na het uitvoeren van de cyclische test bij deze configuratie bedraagt slechts 3%. Daarentegen ondergaat de stijfheid een grotere degradatie van 28%. Ook hier heeft het hergebruik van de proefstukken een negatief effect op zowel de capaciteit als de stijfheid.

Figuur 72 presenteert de belasting-vervormingsdiagram van zowel de monotone testen als de cyclische test. Uit de grafiek blijkt dat er weinig verschil is tussen de monotone testen S45T-M3 en S45T-M4 en de cyclische test S45T-C1-3. De configuraties S45T-M1 en S45T-M2 vertonen een hogere capaciteit vanwege het gebruik van CLS₁ voor deze specifieke proefstukken. Zowel de monotone als de cyclische testen vertonen een vervorming van ongeveer 55 mm, aangezien er geen breuk optrad in het hout van de proefstukken.



Figuur 72: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (S45T-M) en cyclische testen (S45T-C1)

8.2.4 Schroeven met een hoek $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk (S45D)

Tabel 48 geeft het gemiddelde weer van de maximum capaciteit en de stijfheid voor zowel de monotone testen als de cyclische testen, samen met de degradatie factor.

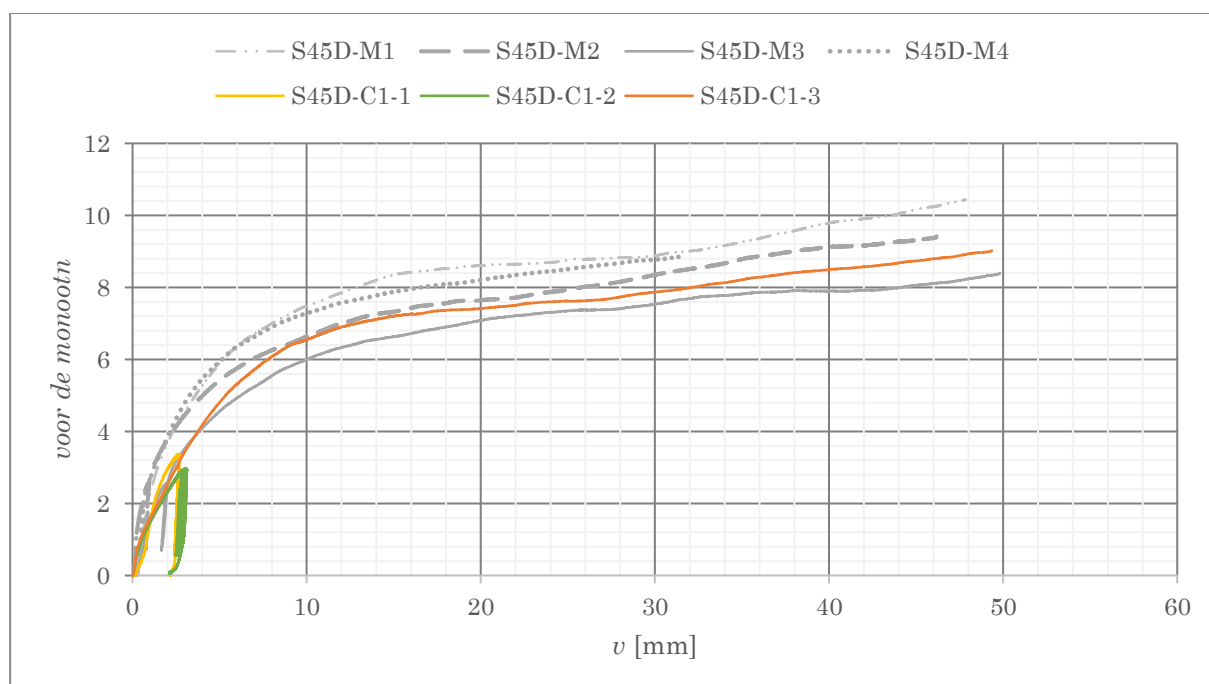
Tabel 48: Gemiddelde waarden van de monotone en cyclische testen voor configuratie S45D

	<i>S45D-M</i>	<i>S45D-C</i>	<i>Degradatiefactor</i> η [%]
F_{max} [kN]	9,47	9,03	-5%
K_{ser} [kN/mm]	11,31	8,6	-24%
<i>Houtsoort</i> <i>element a/c</i>	CLS ₂ /CLS ₂	CLS ₂ /CLS ₂	/

Voor deze specifieke configuratie werden de gemiddelde capaciteit en stijfheid van de monotone testen berekend op basis van alle beschikbare testen, aangezien deze proefstukken over hetzelfde hout beschikten als de cyclische testen. Na een vergelijking van de gemiddelde waarden werd een degradatiefactor van 5% vastgesteld voor de capaciteit na hergebruik. Daarentegen onderging de stijfheid een hogere degradatie van 24%.

Figuur 73 presenteert de belasting-vervormingsdiagram van zowel de monotone testen als de cyclische test voor deze configuratie. Het is opmerkelijk dat zowel de monotone als de

cyclische testen een vergelijkbare verplaatsing vertonen van ongeveer 45 mm tot 50 mm, aangezien er geen breuk optrad in het hout van de proefstukken.



Figuur 73: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (S45D-M) en cyclische testen (S45D-C1)

8.2.5 Schroeven met gekruiste opstelling (SX)

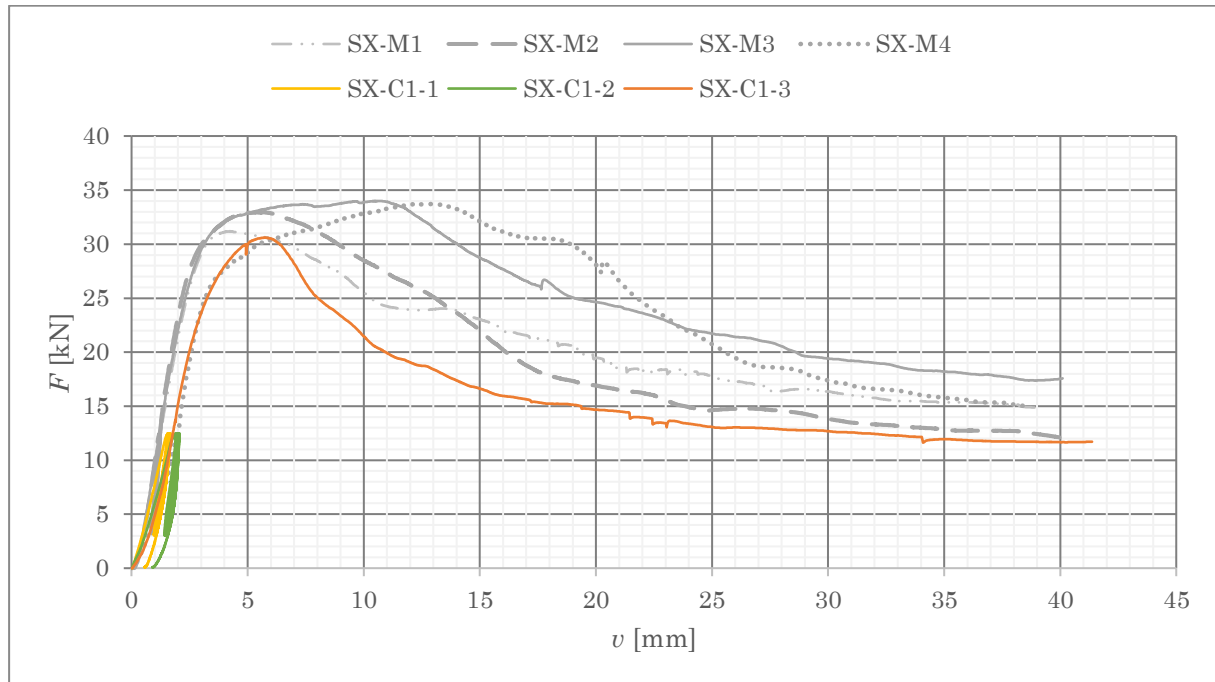
Tabel 49 geeft het gemiddelde weer van de maximum capaciteit en de stijfheid voor zowel de monotone testen als de cyclische testen, samen met de degradatie factor.

Tabel 49: Gemiddelde waarden van de monotone en cyclische testen voor configuratie SX

	SX-M	SX-C	Degradatiefactor η [%]
F_{max} [kN]	32,98	30,61	-7%
K_{ser} [kN/mm]	20,28	16,08	-21%
Houtsoort element a/c	RND/RND	RND/RND	/

Bij deze configuratie worden alle beschikbare testresultaten in beschouwing genomen bij het berekenen van het gemiddelde, aangezien zowel de proefstukken van de monotone testen als de cyclische testen vervaardigd zijn uit hetzelfde houtmateriaal. Na hergebruik vertoont de capaciteit een degradatie van 7%, terwijl de stijfheid afneemt met 21%.

Figuur 74 illustreert de belasting-vervormingsgrafiek van zowel de monotone testen als de cyclische test voor deze configuratie. Hierbij is de degradatie zichtbaar, wanneer de grafieken van de monotone testen vergeleken worden met configuratie SX-C1-3. De proefstukken ondergaan zowel voor de monotone als voor de cyclische testen een verplaatsing van ongeveer 40 mm.



Figuur 74: Belastings-verplaatsingsdiagram monotone testen (SX-M) en cyclische testen (SX-C1)

8.2.6 Vergelijking degradatiefactoren

Tabel 50 geeft de degradatiefactoren weer voor de maximum capaciteit en de stijfheid voor alle configuraties.

Tabel 50: Degradatiefactoren voor de maximum capaciteit en de stijfheid

	B	S	S45T	S45D	SX
Degradatiefactor η voor F_{max}	-19%	-22%	-3%	-5%	-7%
Degradatiefactor η voor K_{ser}	58%	-53%	-28%	-24%	-21%

Het hergebruik van de proefstukken zorgt voor een degradatie van de maximum capaciteit en de stijfheid. Wanneer deze factoren vergeleken worden binnen alle configuraties, heeft configuratie S45T de minste degradatie opgelopen voor de maximum capaciteit. Deze

degradatie bevat 3%. De degradatie van de stijfheid is het minst bij configuratie SX. Hier is de degradatie gelijk aan 21%.

8.3 Analytische vs proefondervindelijke resultaten

Tabel 51 geeft de maximum capaciteit weer van de analytische berekeningen en de monotone testen.

Tabel 51: Maximum capaciteit van de analytische resultaten en de monotone testen per configuratie

Configuratie	$F_{v,Rd}$ [kN]	F_{max} [kN]	Afwijking [%]
B	19,68	57,85	66
S	19,65	22,94	14
S45T	19,63	26,08	25
S45D	6,55	9,47	31
SX	31,26	32,98	5

Voor alle configuraties ligt de maximum capaciteit, verkregen tijdens de testen, hoger dan de berekende analytische waarden. Bij de configuratie van de bouten blijkt er een afwijking van 66% te zijn tussen de berekende analytische maximale capaciteit en de maximale capaciteit die is verkregen uit de testen. Deze afwijking kan het gevolg van de grote axiale uittreksterkte die is waargenomen tijdens de testen, waardoor de proefstukken een maximale capaciteit van 57,85 kN konden opnemen. Als gevolg van deze axiale uittreksterkte is het niet mogelijk om de berekende analytische waarde en de testwaarde rechtstreeks met elkaar te vergelijken. Een andere oorzaak van deze afwijking is dat de materiaaleigenschappen van de verbindingen in de analytische berekening verschillend zijn van de effectieve gebruikte verbindingen.

Bij configuratie S, S45T, S45D en SX is de afwijking tussen de berekende analytische maximale capaciteit en de maximale capaciteit verkregen uit de testen relatief klein. Het verschil tussen deze twee waarden varieert tussen 5% en 31%. Met name bij configuratie SX is de afwijking het kleinst, terwijl bij configuratie S45D de afwijking het grootst is.

Op basis van de bevindingen blijkt dat dat er duidelijk een verschil zit tussen de waarden van Betjka en Blass en EC5. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat er bij EC5 enkel rekening werd gehouden van de uittreksterkte. Daarnaast kan er geconcludeerd worden dat Eurocode 5 een onderschatting maakt van de maximale capaciteit voor configuratie S. Ten slotte blijkt dat de geavanceerde methode van Betjka en Bläß eveneens een onderschatting maakt van de maximale capaciteit voor configuraties S45T, S45D en SX.

Vanwege tijdsbeperkingen kon de bevestiging van de bezwijkmechanismen niet worden uitgevoerd. Het oorspronkelijke plan was om de proefstukken op de verbindingpunten door te snijden om zo het bezwijkmechanisme te kunnen bepalen.

9 Conclusie

Uit de onderzoeksresultaten blijkt dat bouten een sterker verbindingsmechanisme vormen dan schroeven, zowel bij monotone als cyclische testen. Desalniettemin is deze configuratie niet meegenomen in de analyse, vanwege de onmogelijkheid om de proefstukken te demonteren en te monteren. Dit is te wijten aan het feit dat de bouten al bij lage krachten plastische vervormingen ondergaan.

Uit de cyclische testen blijkt dat alle verbindingen een degradatie vertonen in zowel sterkte als stijfheid, met uitzondering van de stijfheid van de bouten. De stijfheid van de bouten blijkt 58% hoger te zijn dan die van de monotone testen. Deze bevinding kan mogelijk worden verklaard door zowel het houttype als het feit dat de initiële zetting van de boutverbindingen niet meer plaatsvindt na één belasting- en ontlastingscyclus. Hierdoor wordt de hoeveelheid vervorming verminderd wat resulteert in een verhoogde stijfheid.

De degradatie van de capaciteit varieert van 3% tot 22%. Hierbij hebben de schroeven met hoek $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk de minste degradatie opgelopen na hergebruik. De schroeven met hoek $\alpha = 90^\circ$ hebben de meeste degradatie opgelopen. Voor de stijfheid varieert de degradatie van 21% tot 53%. De degradatie van de stijfheid is het laagst bij de schroeven met een gekruiste opstelling en het hoogst bij de schroeven met hoek $\alpha = 90^\circ$.

Op basis van de uitgevoerde testen blijkt dat het hergebruik voor alle configuraties, met uitzondering van de bouten, geen probleem vormt in de GGT-toestand. Echter kan hergebruik wel een probleem vormen wanneer de UGT-toestand bereikt wordt. Daarom dient er nog extra onderzoek uitgevoerd te worden. Niet enkel naar het effect van de UGT-toestand maar ook naar de effecten van kruip en vochtgehalte op het hergebruik.

Daarnaast is er nood aan aanvullend onderzoek omtrent de formules die gebruikt worden voor het berekenen van de capaciteit in hout-op-houtconstructies, aangezien deze formules een afwijking vertonen variërend van 5% tot 66% in vergelijking met de waarden die verkregen worden uit experimenten. Deze resultaten zijn slechts een beperkte representatie, aangezien er slechts één of twee cyclische testen werden uitgevoerd voor elk proefstuk.

Deze masterproef vormt een initiële stap in het onderzoek naar hergebruik van stiftvormige verbindingen in houtconstructies, aangezien er momenteel geen specifieke studie is uitgevoerd naar de effecten hiervan. Het is vanzelfsprekend dat aanvullend onderzoek nodig is om deze conclusie te bevestigen.

Bibliografie

- [1] L. A. Akanbi, L. O. Oyedele, K. Omoteso, M. Bilal, O. O. Akinade, A. O. Ajayi, J. M. D. Delgado en H. A. Owolabi, „Disassembly and deconstruction analytics system (D-DAS) for construction in a circular economy,” *Journal of Cleaner Production*, nr. 223, pp. 386-396, 20 juni 2019.
- [2] G. L. F. Benachio, M. d. C. D. Freitas en S. F. Tavares, „Circular economy in the construction industry: A systematic literature,” *Journal of Cleaner Production*, nr. 260, 1 juli 2020.
- [3] European Construction Sector Observatory, „EU construction sector: in transition towards a circular economy,” *Trend Paper Series*, april 2019.
- [4] P. Morsetto, „Targets for a circular economy,” *Resources, Conservation & Recycling*, nr. 153, februari 2020.
- [5] J. M. Allwood, M. F. Ashby, T. G. Gutoswki en E. Worrell, „Material efficiency: A white paper,” *Resources, Conservation and Recycling*, nr. 3, pp. 362-381, januari 2011.
- [6] R. Jockwer en Y. Goto, „Design for adaption – Making timber buildings ready for circular use and extended service life,” in *World Conference of Timber Engineering*, Santiago, Chili, 24-27 augustus 2020.
- [7] S. J. Walsh en E. Shotton, „Adding value to timber components through consideration of demolition and disassembly,” in *World Conference on timber engineering*, Santiago, Chili, 9-12 augustus 2021.
- [8] UHasselt, „About CERG,” [Online]. Available: <https://www.uhasselt.be/nl>. [Geopend 8 oktober 2022].
- [9] European Union, „Scoping study to identify potential circular economy,” Publications Office of the European Union, Luxemburg, augustus 2014.
- [10] E. MacNamara, „Applying circular principles to the design process,” *Circular economy - Climate emergency*, pp. 9-11, 1 augustus 2020.
- [11] A. Güngör, „Evaluation of connection types in design for disassembly (DFD) using analytic network process,” *Computers & Industrial Engineering*, pp. 35-54, mei 2006.
- [12] Z. Hosseini, B. Laratte, B. Amor en P. Blanchet, „An overview of circular economy for wooden construction,” *Ecodesign*, november 2019.
- [13] A. Campbell, „Mass timber in the circular economy: paradigm in practice?,” *Proceedings of the Institution of*, pp. 141-152, 27 juni 2018.
- [14] T. Joyce, M. Ballerini en I. Smith, „Mechanical behaviour of in-plane shear connections between CLT wall panels,” 29 oktober 2015.

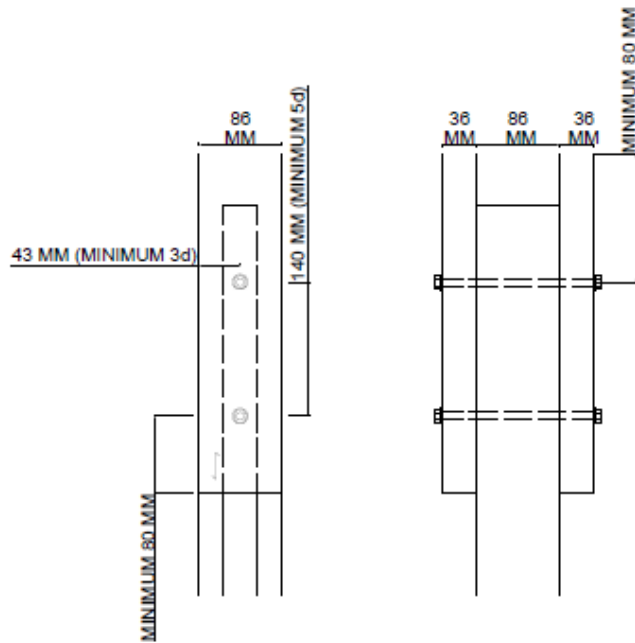
- [15] M. Izzi en A. Polastri, „Low cycle ductile performance of screws used in timber structures,” in *Construction and building materials* , 2019, pp. 416-426.
- [16] M. Oudjene, V.-D. Tran en M. Khelifa, „Cyclic and monotonic responses of double shear single dowelled timber connections made of hardwood species: Experimental investigations,” *Construction and Building Materials*, nr. 132, pp. 188-195, 1 februari 2017.
- [17] European Committee for Standardization, „Timber structures. Test methods Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. EN 12512,” CEN, Brussel, België, 2001.
- [18] European Committee for Standardization, NBN EN 338 - Structural timber - Strength classes, Brussel, 2016.
- [19] European Committee for Standardization, NBN EN 13183-1 - Vochtgehalt van een stuk gezaagd hout - Deel 1: Bepaling door de werkwijze met drogen in de oven, CEN, Brussel, 2002.
- [20] J. Henriques, *4387 Dimensioneren van hout*, Hasselt , 2020.
- [21] J. M. Cabrero, M. Stepinac, K. Ranasinghe en M. Kleiber , „Results from a questionnaire for practitioners about the connections,” in *Design of connections in timber structures*, Duitsland, 2018, pp. 3-18.
- [22] R. Tomasi, A. Crosatti en M. Piazza, „Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws,” in *Construction and building materials*, 2010.
- [23] European Committee for Standardization, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, EN 1995-1-1., CEN, Brussel, 2004.
- [24] S. Franke, B. Franke en E. Tuhkanen, „Test methods for determination of design parameters of fasteners,” in *Design of connections in timber structures*, Duitsland, 2018, pp. 33-60.
- [25] European Committee for Standardization, NBN EN 1380 - Timber structures - Test methods - Load bearing nails, screws, dowels and bolts, Brussel, 2009.
- [26] T. Pazlar, „Technical specifications for fasteners,” in *Design of connections in timber structures*, Duitsland, 2018, pp. 25-32.
- [27] European Committee for Standardization, „Connections,” in *prEN 1995-1-1:2022*, 2022, pp. 166-247.
- [28] A. H. Mirdad, A. Jucutan, R. Khan , J. Niederwestberg en Y. H. Chui, „Embedment and withdrawal stiffness predictions of self-tapping screws,” in *Construction and building materials* , 2022.

- [29] G. Schiro, I. Giongo, W. Sebastiaan en D. Riccadonna, „Testen van hout-hout-schroefverbindingen in hybride configuraties,” in *Construction and building materials*, 2018.
- [30] Y. De Santis en M. Fragiaco, „Timber-to-timber and steel-to-timber screw connections: Derivation of the,” in *Engineering structures*, 2011.
- [31] K. Sawata, „Strength of bolted timber joints subjected to lateral force,” 2015.
- [32] X. T. Wang, E. C. Zhu, S. Niu en H. J. Wang, „Analysis and test of stiffness of bolted connections in timber structures,” in *Construction and building materials*, 2021, p. augustus.
- [33] European Committee for Standardization, EN 383 - Houtconstructies - beproevingsmethodes- bepaling stuiksterkte en stijfheid van stiftvormige verbindingsmiddelen., CEN, Brussel, 2007.
- [34] European Committee for Standardization, NBN EN 14592:2022 - Timber structures - Dowel-type fasteners- Requirements, Brussel, 2022.
- [35] K. De Proft, Dimensioneren van houten constructies, 2014.
- [36] I. Bejtka en H. J. Blaß, „Joints with Inclined Screws,” in *International Council for Research and Innovation in building and construction*, Kyoto, Japan, 2002.
- [37] K. Porter, *Basic Theory and Behavior of Inclined Screws*, MTC Solutions, 2018.
- [38] European Committee for Standardization, NBN EN 14358:2016 - Timber structures - Calculation and verification of characteristic values, Brussel, 2016.
- [39] P. Bhandari, „How to Find Outliers | 4 Ways with Examples & Explanation,” Scribbr, 11 november 2022. [Online]. Available: <https://www.scribbr.com/statistics/outliers/#interquartile>. [Geopend 22 mei 2023].
- [40] Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut WKI, „Leistungserklärung Nr. H4788-C24FS,” Braunschweig, Duitsland, 2011.
- [41] European Committee for Standardization, „ISO 4014: Bevestigingsmiddelen - Zeskantbouten - Productklassen A en B,” CEN, Brussel, 2022.
- [42] European Technical Assessment, „Screws and threaded rods for use,” pgb-Europe NV, Denemarken, 2020.

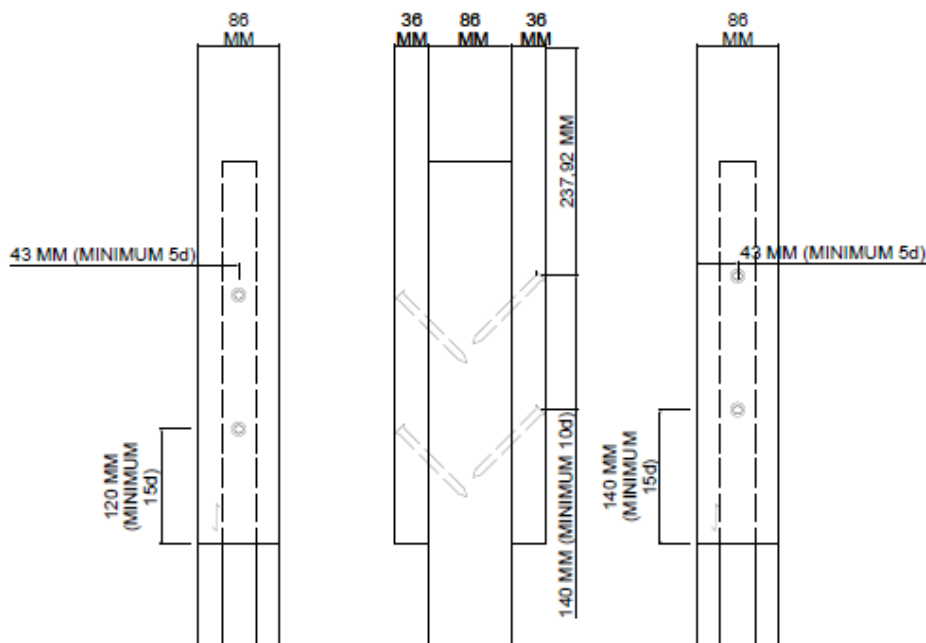
Bijlage A Ontwerpvoorstellen

A.1 Voorstel 2

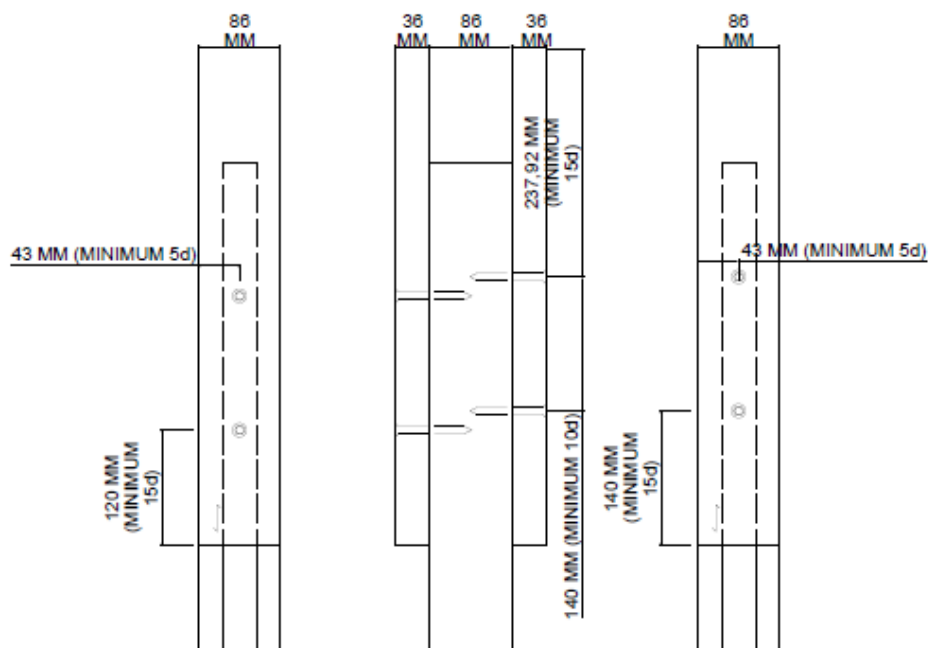
Figuur A.1 tot en met figuur A.4 geven de schetsen weer van de configuraties van voorstel 2.



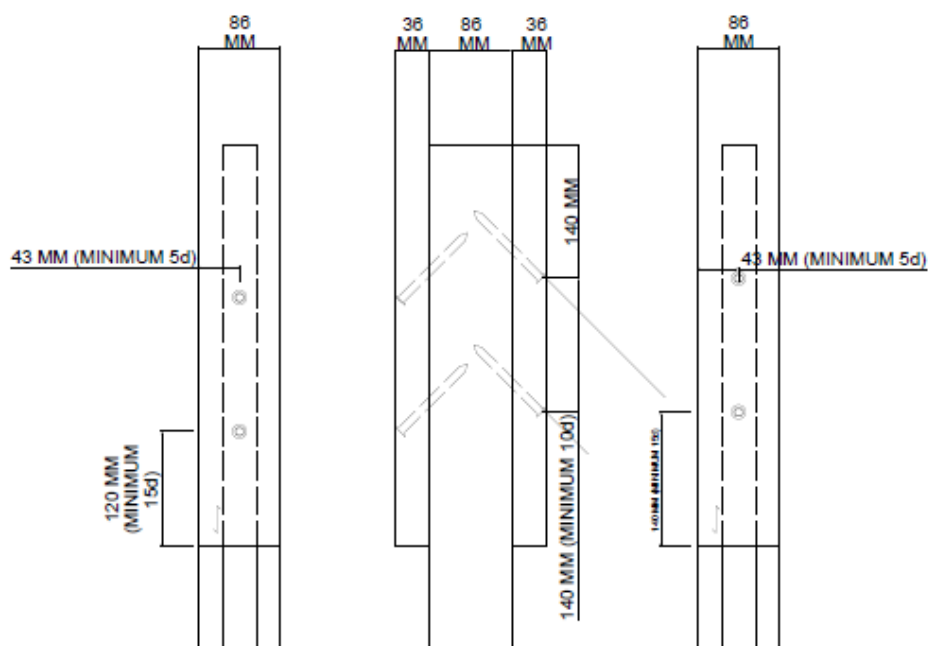
Figuur A.1: Schets voorstel 2 bouten $\alpha = 90^\circ$



Figuur A.2: Schets voorstel 2 schroeven $\alpha = 90^\circ$



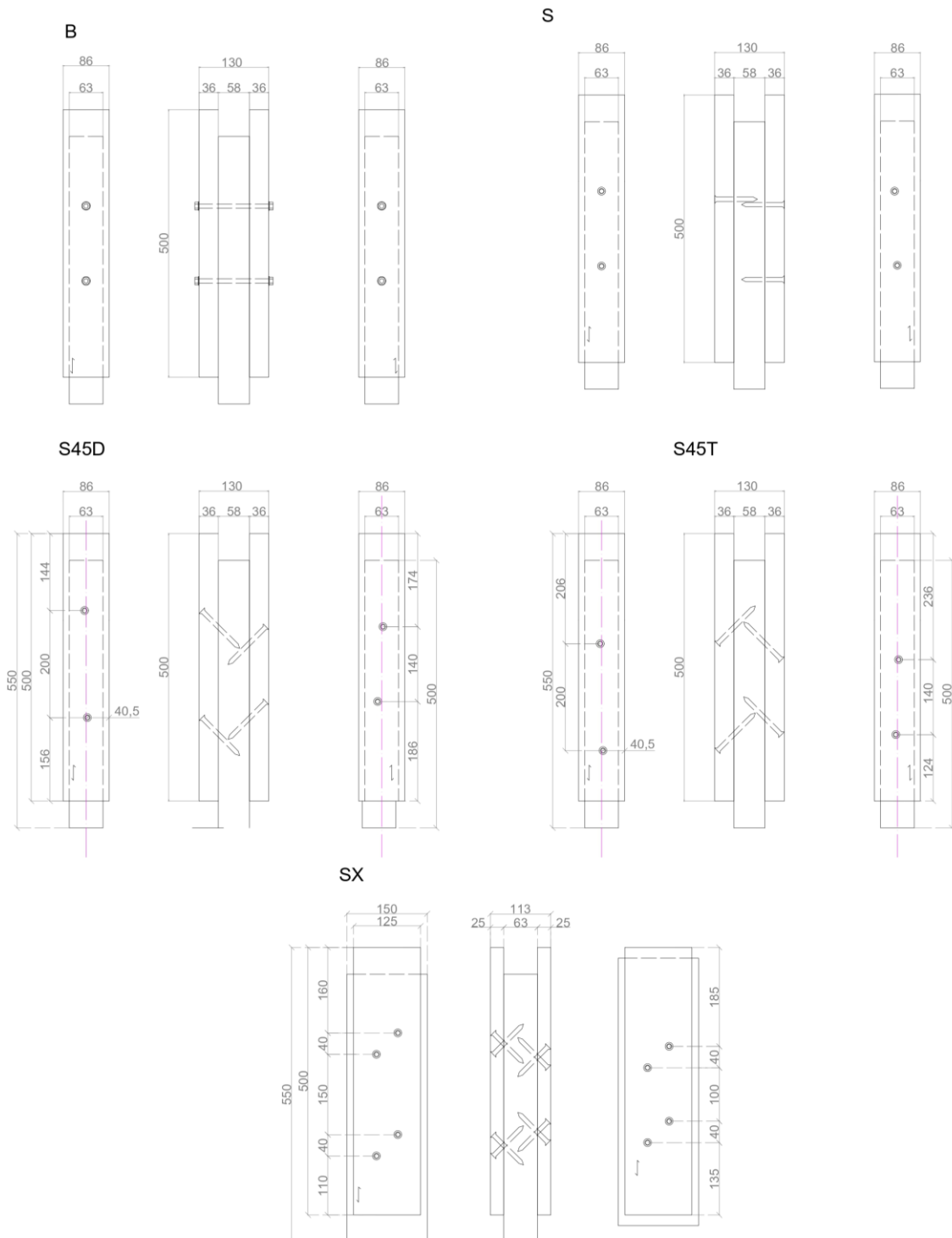
Figuur A.3: Schets voorstel 2 schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk



Figuur A.4: Schets voorstel 2 schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk

A.2 Voorstel 3

Figuur A.5 geeft de schets weer van alle configuraties van voorstel 3.



Figuur A.5: Schets voorstel 3 configuraties met Bouten $\alpha = 90^\circ$ (B), Schroeven $\alpha = 90^\circ$ (S), Schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-druk (S45D), Schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek (S45T), Gekruiste schroeven $\alpha = 45^\circ$ belast op afschuiving-trek en druk (SX)

Bijlage B Kenmerken

Tabel B.1: Kenmerken van configuratie B

ID hout element	Gewicht [g]	H [mm]	B [mm]	L [mm]	Volume [mm³]	Dichtheid [kg/m³]	Soort
B-M1a	884,5	87,1	37,5	500	1633175	541,58	CLS
B-M1b	2569	64,7	152,8	500	4939196	520,13	RND
B-M1c	885,5	87,1	37,5	500	1633175	542,20	CLS
B-M2a	1113	87,1	37,5	500	1633175	681,49	CLS
B-M2b	2698	64,7	152,8	500	4939196	546,24	RND
B-M2c	850	87,1	37,5	500	1633175	520,46	CLS
B-M3a	892,5	87,1	37,5	500	1633175	546,48	CLS
B-M3b	2701	64,7	152,8	500	4939196	546,85	RND
B-M3c	992,5	87,1	37,5	500	1633175	607,71	CLS
B-M4a	953,5	87,1	37,5	500	1633175	583,83	CLS
B-M4b	2826	64,7	152,8	500	4939196	572,16	RND
B-M4c	1067	87,1	37,5	500	1633175	653,33	CLS
B-C1a	690	88,6	38,0	500	1682546	410,09	CLS2
B-C1b	2519	64,7	152,8	500	4939196	510,00	RND
B-C1c	676,5	88,6	38,0	500	1682546	402,07	CLS2
B-C2a	712,5	88,6	38,0	500	1682546	423,47	CLS2
B-C2b	2636	64,7	152,8	500	4939196	533,69	RND
B-C2c	783,5	88,6	38,0	500	1682546	465,66	CLS2

Tabel B.2: Kenmerken van configuratie S

ID hout element	Gewicht [g]	H [mm]	B [mm]	L [mm]	Volume [mm³]	Dichtheid [kg/m³]	Soort
S-M1a	870	87,1	37,5	500	1633175	532,70	CLS
S-M1b	2540,5	64,7	152,8	500	4939196	514,35	RND
S-M1c	879,5	87,1	37,5	500	1633175	538,52	CLS
S-M2a	851,5	87,1	37,5	500	1633175	521,38	CLS
S-M2b	2647,5	64,7	152,8	500	4939196	536,02	RND
S-M2c	873	87,1	37,5	500	1633175	534,54	CLS
S-M3a	890	87,1	37,5	500	1633175	544,95	CLS
S-M3b	2653	64,7	152,8	500	4939196	537,13	RND
S-M3c	676	88,6	38,0	500	1682546	401,77	CLS2
S-M4a	837	87,1	37,5	500	1633175	512,50	CLS
S-M4b	2904	64,7	152,8	500	4939196	587,95	RND
S-M4c	843	87,1	37,5	500	1633175	516,17	CLS
S-C1a	696,5	88,6	38,0	500	1682546	413,96	CLS2
S-C1b	2574	64,7	152,8	500	4939196	521,14	RND
S-C1c	677	88,6	38,0	500	1682546	402,37	CLS2
S-C2a	689,5	88,6	38,0	500	1682546	409,80	CLS2
S-C2b	2692	64,7	152,8	500	4939196	545,03	RND
S-C2c	707	88,6	38,0	500	1682546	420,20	CLS2

Tabel B.3: Kenmerken van configuratie S45T

ID hout element	Gewicht [g]	H [mm]	B [mm]	L [mm]	Volume [mm³]	Dichtheid [kg/m³]	Soort
S45T-M1a	833	87,1	37,5	500	1633175	510,05	CLS
S45T-M1b	2734	64,7	152,8	500	4939196	553,53	RND
S45T-M1c	835,5	87,1	37,5	500	1633175	511,58	CLS
S45T-M2a	857,5	87,1	37,5	500	1633175	525,05	CLS
S45T-M2b	2799,5	64,7	152,8	500	4939196	566,79	RND
S45T-M2c	663,5	88,6	38,0	500	1682546	394,34	CLS2
S45T-M3a	654,5	88,6	38,0	500	1682546	388,99	CLS2
S45T-M3b	2422	64,7	152,8	500	4939196	490,36	RND
S45T-M3c	655	88,6	38,0	500	1682546	389,29	CLS2
S45T-M4a	853,5	88,6	38,0	500	1682546	507,27	CLS2
S45T-M4b	1864,5	64,7	152,8	500	4939196	377,49	RND
S45T-M4c	844	88,6	38,0	500	1682546	501,62	CLS2
S45T-C1a	873	88,6	38,0	500	1682546	518,86	CLS2
S45T-C1b	2315,5	64,7	152,8	500	4939196	468,80	RND
S45T-C1c	784	88,6	38,0	500	1682546	465,96	CLS2
S45T-C2a	740	88,6	38,0	500	1682546	439,81	CLS2
S45T-C2b	1859	64,7	152,8	500	4939196	376,38	RND
S45T-C2c	868,5	88,6	38,0	500	1682546	516,18	CLS2

Tabel B.4: Kenmerken van configuratie S45D

ID hout element	Gewicht [g]	H [mm]	B [mm]	L [mm]	Volume [mm³]	Dichtheid [kg/m³]	Soort
S45D-M1a	881,5	88,6	38,0	500	1682546	523,91	CLS2
S45D-M1b	2342,5	64,7	152,8	500	4939196	474,27	RND
S45D-M1c	782	88,6	38,0	500	1682546	464,77	CLS2
S45D-M2a	782	88,6	38,0	500	1682546	464,77	CLS2
S45D-M2b	1840,5	64,7	152,8	500	4939196	372,63	RND
S45D-M2c	861,5	88,6	38,0	500	1682546	512,02	CLS2
S45D-M3a	857	88,6	38,0	500	1682546	509,35	CLS2
S45D-M3b	1861,5	64,7	152,8	500	4939196	376,88	RND
S45D-M3c	895	88,6	38,0	500	1682546	531,93	CLS2
S45D-M4a	757,5	88,6	38,0	500	1682546	450,21	CLS2
S45D-M4b	2343,5	64,7	152,8	500	4939196	474,47	RND
S45D-M4c	850	88,6	38,0	500	1682546	505,19	CLS2
S45D-C1a	796	88,6	38,0	500	1682546	473,09	CLS2
S45D-C1b	1822,5	64,7	152,8	500	4939196	368,99	RND
S45D-C1c	776,5	88,6	38,0	500	1682546	461,50	CLS2
S45D-C2a	851	88,6	38,0	500	1682546	505,78	CLS2
S45D-C2b	2422	64,7	152,8	500	4939196	490,36	RND
S45D-C2c	805	88,6	38,0	500	1682546	478,44	CLS2

Tabel B.5: Kenmerken van configuratie SX

ID hout element	Gewicht [g]	H [mm]	B [mm]	L [mm]	Volume [mm³]	Dichtheid [kg/m³]	Soort
SX-M1a	2928,5	39,2	226,3	500	4439591	659,63	RND
SX-M1b	3428	74,5	219,0	500	8160488	420,07	RND
SX-M1c	2473	39,2	226,3	500	4439591	557,03	RND
SX-M2a	2603,5	39,2	226,3	500	4439591	586,43	RND
SX-M2b	3479,5	74,5	219,0	500	8160488	426,38	RND
SX-M2c	2529	39,2	226,3	500	4439591	569,65	RND
SX-M3a	2394	39,2	226,3	500	4439591	539,24	RND
SX-M3b	3482,5	74,5	219,0	500	8160488	426,75	RND
SX-M3c	1874,5	39,2	226,3	500	4439591	422,22	RND
SX-M4a	2282	39,2	226,3	500	4439591	514,01	RND
SX-M4b	3445	74,5	219,0	500	8160488	422,16	RND
SX-M4c	2871	39,2	226,3	500	4439591	646,68	RND
SX-C1a	2844,5	39,2	226,3	500	4439591	640,71	RND
SX-C1b	3441,5	74,5	219,0	500	8160488	421,73	RND
SX-C1c	2967	39,2	226,3	500	4439591	668,30	RND
SX-C2a	2038,5	39,2	226,3	500	4439591	459,16	RND
SX-C2b	3420,5	74,5	219,0	500	8160488	419,15	RND
SX-C2c	1933,5	39,2	226,3	500	4439591	435,51	RND

Bijlage C Bepaling vochtgehalte

Tabel C.1: Metingen voor het bepalen van de vochtigheid

	Dag	19/04/2023	20/04/2023	21/04/2023	22/04/2023
	Uur	17:12	16:24	17:09	13:08
<i>Proefstuk</i>	<i>Houtsoort</i>	<i>Gewicht 1</i> [g]	<i>Gewicht 2</i> [g]	<i>Gewicht 3</i> [g]	<i>Gewicht 4</i> [g]
VA1	CLS2	215	191,2	191,2	191,1
VA2	CLS2	211	188,8	188,6	188,6
VA3	CLS2	245,5	218,6	218,4	218,4
VA4	CLS2	199	177,6	177,4	177,4
VA5	CLS2	204	182,6	182,5	182,5
VA6	CLS2	231	207,3	207	207
VB1	RND	981	870	863,4	862,1
VB2	RND	901	796	790,8	790
VB3	RND	/	933,7	827	822,7
VB4	RND	/	1260,4	1102	1099,5
VB5	RND	996	886,6	877,6	876,2
VB6	RND	760,5	675,4	671,3	670,4
VC1	CLS1	199	177,8	177,9	177,9
VC2	CLS1	237	211,7	221,6	211,6
VC3	CLS1	236,5	211,7	211,5	211,5
VC4	CLS1	242,5	217,3	216,9	216,9
VC5	CLS1	237,5	212,6	212,4	212,4
VC6	CLS1	248,5	223,2	222,9	222,8

Tabel C.2: Bepaling van het vochtgehalte

Proefstuk	Vochtgehalte op 21/04/2023	Vochtgehalte op 22/04/2024
VA1	12,45%	12,51%
VA2	11,88%	11,88%
VA3	12,41%	12,41%
VA4	12,18%	12,18%
VA5	11,78%	11,78%
VA6	11,59%	11,59%
VB1	13,62%	13,79%
VB2	13,94%	14,05%
VB3	12,90%	13,49%
VB4	14,37%	14,63%
VB5	13,49%	13,67%
VB6	13,29%	13,44%
VC1	11,86%	11,86%
VC2	6,95%	12,00%
VC3	11,82%	11,82%
VC4	11,80%	11,80%
VC5	11,82%	11,82%
VC6	11,48%	11,54%

Bijlage D Rekennota's bepaling capaciteit

a) Rekennota voor de bouten:

Geometrie					
C24					
houtdikte element 1	t1	37,5 mm	Bout		
			boutdiameter	d	8 mm
houtdikte element 2	t2	152,8 mm	overhoeksmaat		
Hoek kracht - vezelrichting			bout	e head	14,38 mm
			effectieve sleutelwijken	s head	13 mm
hoek verbindingmiddel 1	alpha1	0 °	oppervlakte	Aeff	36,6 mm ²
hoek verbindingmiddel 2	alpha2	0 °	#bouten in een rij	n	2
			tussenafstand van bout in vezelrichting	a1	140 mm
			aantal rijen	n_rows	1
			aantal afschuifvlakken	n_sp	2
			buitenste diameter		
			sluitring	d sluitring	16 mm
			dikte sluitring	t sluitring	1,6 mm
Materialen					
C24					
Karakteristieke volumieke massa houtelement 1	$\rho, k, 1$	505 kg/m ³			
Karakteristieke volumieke massa houtelement 2	$\rho, k, 2$	502 kg/m ³			
Gemiddelde volumieke massa houtelement 1	$\rho, m, 1$	505 kg/m ³			
Gemiddelde volumieke massa houtelement 2	$\rho, m, 2$	502 kg/m ³			
karakteristieke druksterkte loodrecht op de vezelrichting	houtsoort	Naaldhout			
	fc,90cRk	2,5 N/mm ²			
Bout					
karakteristieke vloeisterkte	fy,k	320 N/mm ²			
karakteristieke treksterkte	fu,k	400 N/mm ²			
Omstandigheden					
Klimaatklasse		1 blijvend			
kmod,1		1			
kmod,2		1			
yM		1			
Berekening					
Stuiksterkte					
hoek belasting en vezelrichting	alpha,1	0 rad		alpha,2	0 rad
Karakteristieke stuiksterkte evenwijdig aan vezelrichting	fh,0,k1	38,10 N/mm ²		fh,0,k2	37,89 N/mm ²
Stuiksterkte	fh,a1,k	38,10 N/mm ²		fh,a2,k	37,89 N/mm ²
	k90	1,47			
karakteristieke stuiksterkte element 1	fh,1,k	38,1 N/mm ²			
karakteristieke stuiksterkte element 2	fh,2,k	37,9 N/mm ²			
verhouding stuiksterkte	beta	0,995			
Verbindingmiddel vloeimoment (My,Rk)					
	My,Rk	26743 Nmm			
Axiale uittreksterkte (Fax,Rk)					
	Fax,Rk	1131 N			
Sterkte van bout	Nt,Rk	11712 N			
Sterkte van sluitring	Bp,RK	16515 N			
gemiddelde diameter verbindingmiddel	dm	13,69 mm			
Hout druksterkte	Nc,90,Rk	1131			
	d sluitring	16 mm	= min(12x tsluitring; 4dbout)		19,2 ok

b) Rekennota voor schroeven:

Geometrie					
C24				Schroeven	
verankeringslengte houtelement 1 parallel op het afschuifvlak	s1	37,5 mm		n	2
verankeringslengte houtelement 2 parallel op het afschuifvlak	s2	82,5 mm	effectieve meewerkend aantal	nef	2
			(penetratie lengte)	d	8 mm
Lengte schroef	lengte schroef	120 mm		d1	5,4 mm
Schroefdraadlengte	lef	75 mm		dk	14,5 mm
hechtlengte	t1	37,5 mm		def	5,94 mm
hechtlengte	t2	82,5 mm			
penetratielengte	lpen	75,0 mm >6d			
			WAAR		
			hoek verbindingmiddel - vezelrichting		
			- houtelement 1	alpha1	90 °
	hoek Kracht t.o.v. vezel		- houtelement 2	alpha2	90 °
hoek verbindingmiddel 1	alpha1	0 °	tussenafstand van bout in vezelrichting	a1	140 mm
hoek verbindingmiddel 2	alpha2	0 °	aantal rijen	n_rows	2
			aantal afschuifvlakken	n_sp	1
Materialen					
C24				Schroeven	
Karakteristieke volumieke massa houtelement 1	$\rho,k,1$	505 kg/m ³	De karakteristieke doortrekparameter	fhead,k	10 N/mm ²
Karakteristieke volumieke massa houtelement 2	$\rho,k,2$	502 kg/m ³	Trekweerstand	Ftens, k	22000 N
Gemiddelde volumieke massa houtelement 1	$\rho,m,1$	505 kg/m ³			
Gemiddelde volumieke massa houtelement 2	$\rho,m,2$	502 kg/m ³			
	houtsoort	Naaldhout	Vloeimoment	My,Rk	20000 Nmm
	Fax2	ja			
Omstandigheden					
Klimaatklasse		1 blijvend			
kmod,1		1			
kmod,2		1			
yM		1			
Berekening					
Stuiksterkte					
hoek belasting en vezelrichting	alpha,1	0 rad	alpha,2	0 rad	
Karakteristieke stuiksterkte					
evenwijdig aan vezelrichting	fh,0,k1	39,2 N/mm ²	fh,0,k2	38,9 N/mm ²	
Stuiksterkte	fh,a1,k	39,2 N/mm ²	fh,a2,k	38,9 N/mm ²	
	k90	1,4391			
karakteristieke stuiksterkte element 1	fh,1,k	39,2 N/mm ²			
karakteristieke stuiksterkte element 2	fh,2,k	38,9 N/mm ²			
verhouding stuiksterkte	beta	0,99			
Verbindingmiddel vloeimoment (My,Rk)					
	My,Rk	20000 Nmm			
Axiale uittreksterkte (Fax,Rk)					
		5638 N			
Karakteristieke uittrekkracht van	Fax,Rk,1	11055			
	Fax,Rk,1	6<d<12			
		0,6<d1/d<0,75			
karakteristieke uittreksterkte loof	fax,k	20,05 N/mm ²			
	kd	1			
Doortreksterkte	Fax,Rk,2	5638 N			
bij fax,k horende volumieke mas	ρ,a	350 kg/m ³			
Treksterkte van de schroef	Ftens, k	44000 N			
		Karakteristieke trekweerstand van de schroef EN 14592			

Sterkte verbinding					
		Blass 90° - alpha	EC5 alpha		
	Hoek alpha (°)	0	90		
	Hoek alpha (rad)	0	1,57		
	Blass wrijvings- coefficient	μ	0,25		
	F_v,Rk_1 bezwijk- mechanisme	4456 N f			
	i	F_v,Rk(i),1 [N]	F_v,Rk(i),1 [kN]		
	a	8728	8,73		
	b	17348	17,35		
	c	7312	7,31		
	d	4826	4,83		
	e	7462	7,46		
	f	4456	4,46		
	EC 5	Johansen + koordeffect			
	F_v,Rk_2 bezwijk- mechanisme	4913 N f			
		Fv,Rk zonder uitreksterkte [N]	Fax,Rk/4 [N]	Beperking koordeffect 100% Fv,Rk,i [N]	Fv,Rk,i + koordeffect [N] [kN]
	a	8728	/	/	8728 8,73
	b	17348	/	/	17348 17,35
	c	5902	1409,6	5902	7312 7,31
	d	3587	1409,6	3587	4997 5,00
	e	6355	1409,6	6355	7765 7,76
	f	3503	1409,6	3503	4913 4,91
		Blass	EC5		
	i	F_v,Rk(i),1 [kN]	F_v,Rk(i),2 [kN]		
	a	8,73	8,73		
	b	17,35	17,35		
	c	7,31	7,31		
	d	4,83	5,00		
	e	7,46	7,76		
	f	4,46	4,91		
Het meewerkende aantal verbindingmiddelen, nef					
<i>- 1 rij evenwijdig aan de vezelrichting</i>					
	nef	2,00			
#bouten in een rij	n	2			
	a1	140 mm			
<i>- Voor meerdere rijen verbindingmiddelen evenwijdig aan de vezelrichting en meer dan één afschuifvlak</i>					
aantal rijen	n_rows	2			
aantal afschuifvlakken	n_sp	1			
	Betjka en Blass		EC5		
	F_v,Rk_1	4456 N	F_v,Rk_2	4913 N	
	F_v,Rk,Vb_1	17823 N	F_v,Rk,Vb_2	19651 N	
Rekenwaarde	Fv,Rd_1	17,82 kN	Fv,Rd_2	19,65 kN	
Axiale treksterkte van verbindingmiddelen					
Axiale belasting belastende verbindi	F_ax,Rd	5638 N			
Stijfheid					
verschuivingsmodulus					
1 verbindingmiddel	Kser	2918 N/mm		2,918 kN/mm	
gemiddelde dichtheid	ρ_m	503,4977656 kg/m ³			
Verschuivingsmodulus GGT	Kser_GGT	11671 N/mm		11,671 kN/mm	
Verschuivingsmodulus UGT	K_U	7781 N/mm		7,781 kN/mm	

c) Schuine schroeven belast op afschuiving-trek met $\alpha = 45^\circ$

Geometrie					
C24				Schroeven	
verankeringslengte houtelement 1 parallel op het afschuifvlak	s1	37,5 mm	aantal verbindingmiddelen		2
verankeringslengte houtelement 2 parallel op het afschuifvlak	s2	75,6 mm	effectieve meewerkend aantal	nef	1,87
			diameter verbindingmiddel	d	8 mm
			diameter schacht	d1	5,4 mm
Lengte schroef	ls	160 mm	diameter schroefkop	dh	14,5 mm
Schroefdraadlengte	lef	90 mm	effectieve diameter	def	5,94 mm
hechtlengte	t1	53,0 mm			
hechtlengte	t2	107,0 mm			
penetratielengte	lpen	90,0 mm	>6d		
			WAAR		
			hoek verbindingmiddel - vezelrichting		
hoek verbindingmiddel 1	alpha1	45 °	- houtelement 1	alpha1	45 °
			- houtelement 2	alpha2	45 °
hoek verbindingmiddel 2	alpha2	45 °	tussenafstand van bout in vezelrichting	a1	140 mm
			aantal rijen	n_rows	2
			aantal afschuifvlakken	n_sp	1
Materialen					
C24				Schroeven	
Karakteristieke volumieke massa houtelement 1	$\rho, k, 1$	505 kg/m ³	De karakteristieke doortrekparameter	fhead, k	10 N/mm ²
Karakteristieke volumieke massa houtelement 2	$\rho, k, 2$	502 kg/m ³	Trekweerstand	Ftens, k	22000 N
Gemiddelde volumieke massa houtelement 1	$\rho, m, 1$	505 kg/m ³			
Gemiddelde volumieke massa houtelement 2	$\rho, m, 2$	502 kg/m ³			
	houtsoort	Naaldhout	Vloeimoment	My, Rk	20000 Nmm
Omstandigheden					
Klimaatklasse		1 blijvend			
kmod,1		1			
kmod,2		1			
yM		1			
Berekening					
Stuiksterkte					
hoek belasting en vezelrichting	alpha,1	0,785 rad	alpha,2		0,785 rad
Karakteristieke stuiksterkte					
evenwijdig aan vezelrichting	fh,0,k1	39,2 N/mm ²	fh,0,k2		38,9 N/mm ²
Stuiksterkte	fh,a1,k	32,1 N/mm ²	fh,a2,k		31,9 N/mm ²
	k90	1,4391			
karakteristieke stuiksterkte elementen	fh,1,k	32,1 N/mm ²			
karakteristieke stuiksterkte elementen	fh,2,k	31,9 N/mm ²			
verhouding stuiksterkte	beta	0,99			
Verbindingmiddel vloeimoment (My,Rk)					
	My, Rk	20000 Nmm			
Axiale uittreksterkte (Fax,Rk)					
Karakteristieke uittrekkraft van de verbinding	Fax,Rk,1	13259 N			
		6<d<12			
		0,6<d1/d<0,75			
karakteristieke uittreksterkte loodrecht op de vezelrichting	fax,k	19,69 N/mm ²			
	kd	1			
Doortreksterkte bij fax,k horende volumieke massa	Fax,Rk,2	5261 N			
	ρ, a	350 kg/m ³			
Treksterkte van de schroef	Ftens, k	41053 N			
		Karakteristieke trekweerstand van de schroef EN 14592			

Sterkte verbinding		Blass	EC5		
		90° - alpha	alpha		
	Hoek alpha (°)	45	45		
	Hoek alpha (rad)	0,785398163	0,79		
	Methode van Betjka en Blass (Advanced theory Johansen)				
	wrijvings-coëfficiënt	μ	0,25		
	F_{v,Rk_1}	6113 N			
	bezwijk-mechanisme	f			
	i	F_{v,Rk(i),1}	F_{v,Rk(i),1}		
		[N]	[kN]		
	a	8780	8,78		
	b	15790	15,79		
	c	8944	8,94		
	d	6816	6,82		
	e	9087	9,09		
	f	6113	6,11		
	EC 5	Uittreksterkte			
	F_{v,Rk_2}	3720 N			
	bezwijk-mechanisme	c			
		F_{ax,Rk}			
		[N]	[kN]		
	a	/	/		
	b	/	/		
	c	3719,9	3,72		
	d	3719,9	3,72		
	e	3719,9	3,72		
	f	3719,9	3,72		
		Blass	EC5		
	i	F_{v,Rk(i),1}	F_{v,Rk(i),2}		
		[kN]	[kN]		
	a	8,78	/		
	b	15,79	/		
	c	8,94	3,72		
	d	6,82	3,72		
	e	9,09	3,72		
	f	6,11	3,72		
	Het meewerkende aantal verbindingsmiddelen, nef				
	- 1 rij evenwijdig aan de vezelrichting				
	nef	1,87			
	#bouten in een rij	n	2		
		a1	140 mm		
	- Voor meerdere rijen verbindingsmiddelen evenwijdig aan de vezelrichting en meer dan één afschuifvlak				
	aantal rijen	n_rows	2		
	aantal afschuifvlakken	n_sp	1		
		Betjka en Blass		EC5	
	karakteristieke sterkte per snede per verbindingmiddel	F _{v,Rk_1}	6113 N	F _{v,Rk_2}	3720 N
	De effectieve karakteristieke sterkte	F _{v,Rk,Vb_1}	22814 N	F _{v,Rk,Vb_2}	13883 N
	Rekenwaarde				
	S45T	F _{v,Rd_1}	22,81 kN	F _{v,Rd_2}	13,88 kN
		factor S45D	3,00		
	S45D	F _{v,Rd_1}	7,60 kN	F _{v,Rd_2}	4,63 kN
	Axiale treksterkte van verbindingsmiddelen				
	Axiale belasting belaste verbindingen	F _{ax,Rd}	5261 N		
	Stijfheid				
	verschuivingsmodulus	Kser	2918 N/mm	2,918 kN/mm	
	1 verbindingmiddel				
	gemiddelde dichtheid	ρ_m	503,5 kg/m ³		
	Verschuivingsmodulus GGT	Kser_GGT	10890 N/mm	10,890 kN/mm	
	Verschuivingsmodulus UGT	K_U	7260 N/mm	7,260 kN/mm	

d) Gekruiste schroeven

Geometrie					
C24				Schroeven	
verankeringslengte houtelement 1 parallel op het afschuifvlak	s1	39,2 mm	aantal verbindingmiddelen		2
verankeringslengte houtelement 2 parallel op het afschuifvlak	s2	31,5 mm	effectieve meewerkend aantal	nef	1,87
			diameter verbindingmiddel	d	8 mm
			diameter schacht	d1	5,4 mm
Lengte schroef	ls	100 mm	diameter schroefkop	dh	14,5 mm
Schroefdraadlengte	lef	60 mm	effectieve diameter	def	5,94 mm
hechtlengte	t1	55,4 mm			
hechtlengte	t2	44,6 mm			
penetratielengte	lpen	44,6 mm	>6d		
			WAAR		
			hoek verbindingmiddel - vezelrichting		
hoek verbindingmiddel 1	alpha1	45 °	- houtelement 1	alpha1	45 °
			- houtelement 2	alpha2	45 °
hoek verbindingmiddel 2	alpha2	45 °	tussenafstand van bout in vezelrichting	a1	140 mm
			aantal rijen	n_rows	4
			aantal afschuifvlakken	n_sp	1
Materialen					
C24				Schroeven	
Karakteristieke volumieke massa houtelement 1	$\rho, k, 1$	502 kg/m ³	De karakteristieke doortrekparameter	fhead, k	10 N/mm ²
Karakteristieke volumieke massa houtelement 2	$\rho, k, 2$	502 kg/m ³	Trekweerstand	Ftens, k	22000 N
Gemiddelde volumieke massa houtelement 1	$\rho, m, 1$	502 kg/m ³			
Gemiddelde volumieke massa houtelement 2	$\rho, m, 2$	502 kg/m ³			
	houtsoort	Naaldhout	Vloeimoment	My, Rk	20000 Nmm
Omstandigheden					
Klimaatklasse		1 blijvend			
kmod,1		1			
kmod,2		1			
yM		1			
Berekening					
Stuiksterkte					
hoek belasting en vezelrichting	alpha,1	0,785 rad	alpha,2		0,785 rad
Karakteristieke stuiksterkte					
evenwijdig aan vezelrichting	fh,0,k1	38,9 N/mm ²	fh,0,k2		38,9 N/mm ²
Stuiksterkte	fh,a1,k	31,9 N/mm ²	fh,a2,k		31,9 N/mm ²
	k90	1,4391			
karakteristieke stuiksterkte elementen	fh,1,k	31,9 N/mm ²			
karakteristieke stuiksterkte elementen	fh,2,k	31,9 N/mm ²			
verhouding stuiksterkte	beta	1,00			
Verbindingmiddel vloeimoment (My,Rk)					
	My, Rk	20000 Nmm			
Axiale uittreksterkte (Fax,Rk)					
Karakteristieke uittrekkraft van de verbinding	Fax,Rk,1	9205 N			
		6<d<12 0,6<d1/d<0,75			
karakteristieke uittreksterkte loodrecht op de vezelrichting	fax,k kd	20,50 N/mm ² 1			
Doortreksterkte bij fax,k horende volumieke massa	Fax,Rk,2 ρ, a	5236 N 350 kg/m ³			
Treksterkte van de schroef	Ftens, k	41053 N			
		Karakteristieke trekweerstand van de schroef EN 14592			

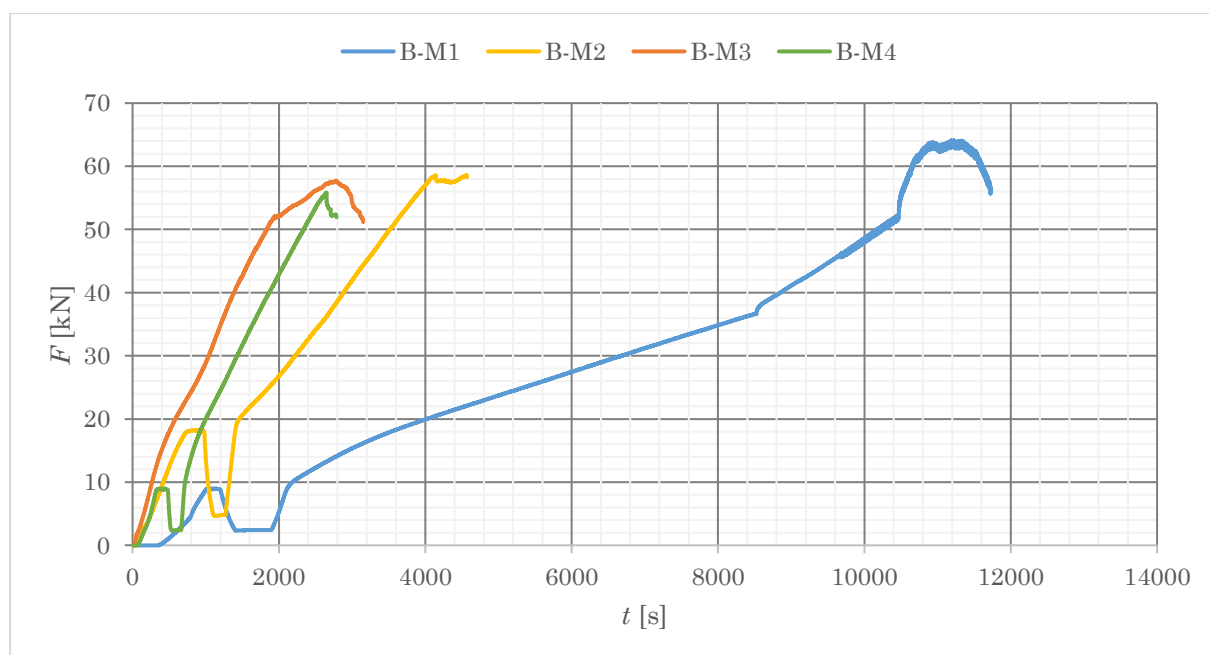
Sterkte verbinding		Blass	EC5		
		90° - alpha	alpha		
	Hoek alpha (°)	45	45		
	Hoek alpha (rad)	0,785398163	0,79		
	Methode van Betjka en Blass (Advanced theory Johansen)				
	wrijvings-coefficient	μ	0,25		
	F_v,Rk_1	6088 N			
	bezwijk-mechanisme	f			
	i	F_v,Rk(i),1 [N]	F_v,Rk(i),1 [kN]		
	a	8960	8,96		
	b	9679	9,68		
	c	7104	7,10		
	d	6851	6,85		
	e	7065	7,06		
	f	6088	6,09		
	EC 5	Uittreksterkte			
	F_v,Rk_2	3702 N			
	bezwijk-mechanisme	c			
		Fax,Rk			
		[N]	[kN]		
	a	/	/		
	b	/	/		
	c	3702,2	3,70		
	d	3702,2	3,70		
	e	3702,2	3,70		
	f	3702,2	3,70		
		Blass	EC5		
	i	F_v,Rk(i),1 [kN]	F_v,Rk(i),2 [kN]		
	a	8,96 /			
	b	9,68 /			
	c	7,10	3,70		
	d	6,85	3,70		
	e	7,06	3,70		
	f	6,09	3,70		
	Het meewerkende aantal verbindingmiddelen, nef				
	- 1 rij evenwijdig aan de vezelrichting				
	nef	1,87			
	#bouten in een rij	n	2		
	a1	140 mm			
	- Voor meerdere rijen verbindingmiddelen evenwijdig aan de vezelrichting en meer dan één afschuifvlak				
	aantal rijen	n_rows	4		
	aantal afschuifvlakken	n_sp	1		
		Betjka en Blass		EC5	
	karakteristieke sterkte per snede per verbindingmiddel	F_v,Rk_1	6088 N	F_v,Rk_2	3702 N
	De effectieve karakteristieke sterkte	F_v,Rk,Vb_1	45446 N	F_v,Rk,Vb_2	27634 N
	Rekenwaarde	Fv,Rd_1	45,45 kN	Fv,Rd_2	27,63 kN
	factor SX	1,25			
	SX	Fv,Rd_1	36,36 kN	Fv,Rd_2	22,11 kN
	Axiale treksterkte van verbindingmiddelen				
	Axiale belasting belaste verbindingen	F_ax,Rd	5236 N		
	Stijfheid				
	verschuivingsmodulus	Kser	2905 N/mm	2,905 kN/mm	
	1 verbindingmiddel				
	gemiddelde dichtheid	ρ_m	502,0 kg/m ³		
	Verschuivingsmodulus GGT	Kser_GGT	21682 N/mm	21,682 kN/mm	
	Verschuivingsmodulus UGT	K_U	14455 N/mm	14,455 kN/mm	

Bijlage E Belasting-tijddiagrammen ($F-t$)

In deze bijlage worden de belastings-tijddiagrammen van de monotone en cyclische testen weergegeven.

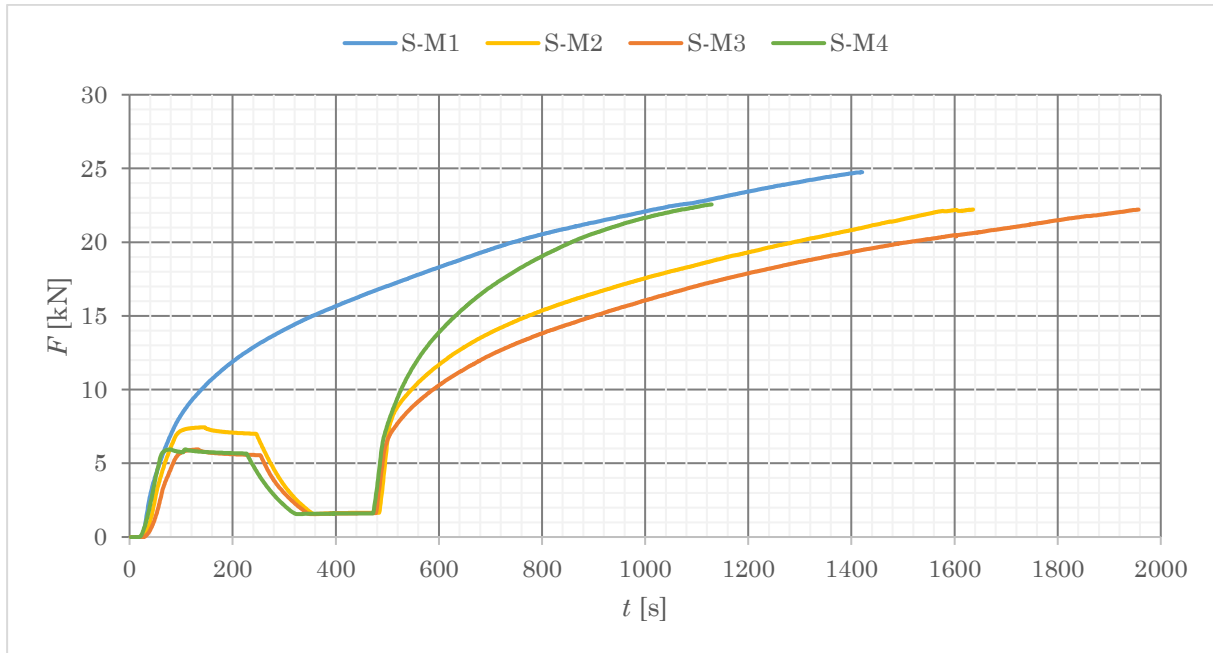
E.1 Monotone testen

Figuur E.1 tot en met figuur E.5 illustreren de belastings-tijddiagrammen van de monotone testen per configuratie.

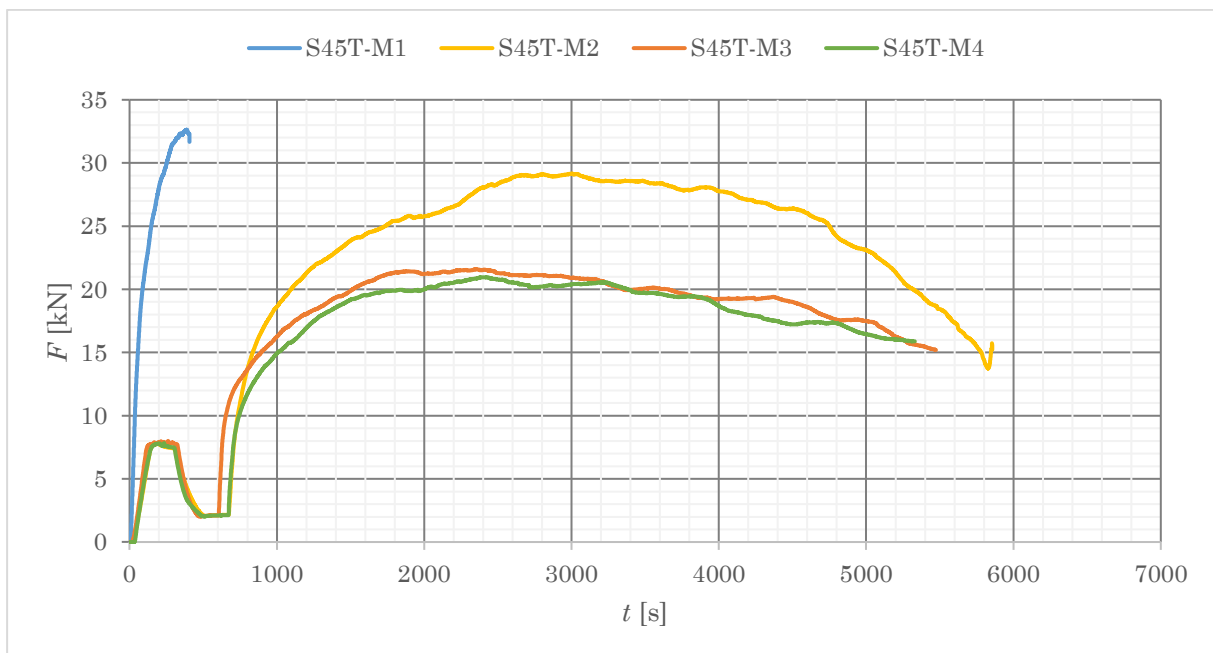


Figuur E.1: Belasting-tijddiagram ($F-t$) monotone testen van configuratie B

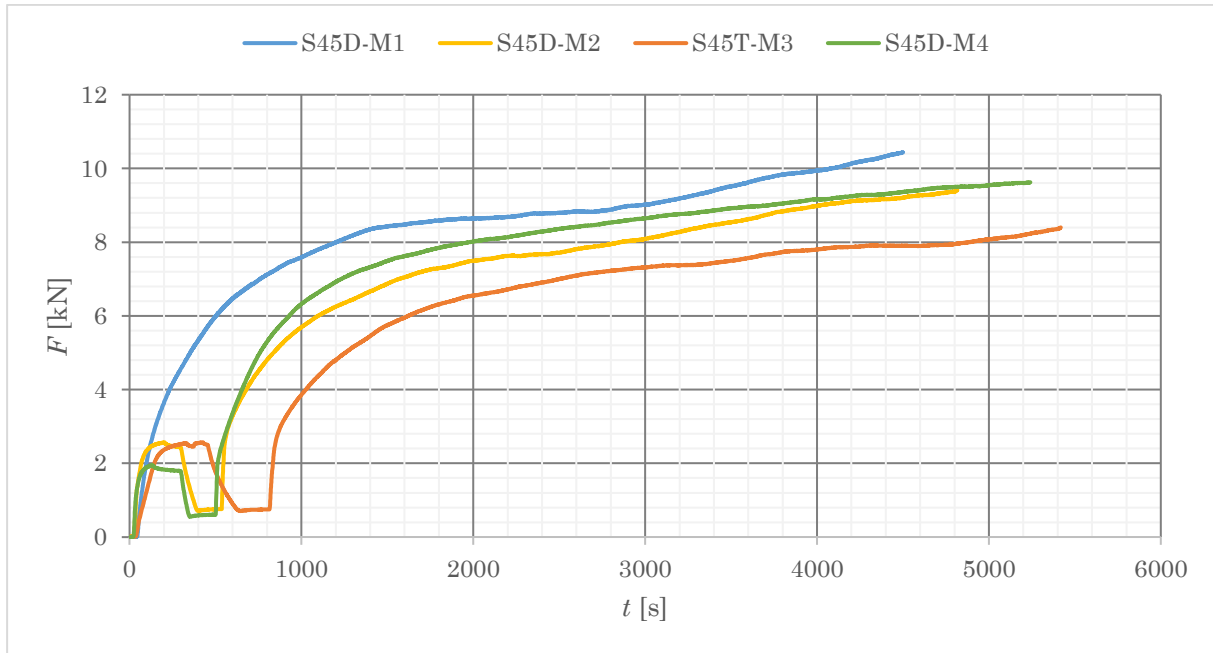
Tijdens de testen van proefstuk B-M1 werden er fouten ondervonden met betrekking tot de machine. Deze fouten zijn gecorrigeerd in de resultaten van de belastings-
vervormingsgrafieken. Het belastingstijddiagram, daarentegen, toont de oorspronkelijke gegevens zonder de correcties, omdat het diagram louter ter informatie dient.



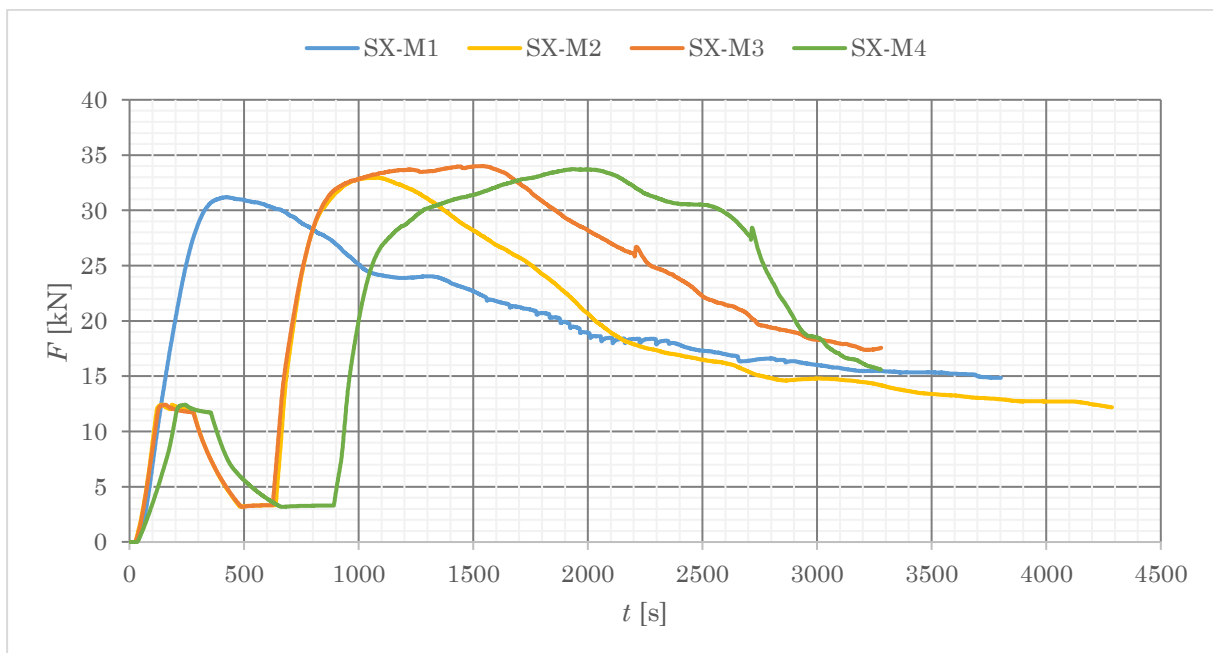
Figuur E.2: Belastings-tijddiagram (F-t) monotone testen van configuratie S



Figuur E.3: Belastings-tijddiagram (F-t) monotone testen van configuratie S45T



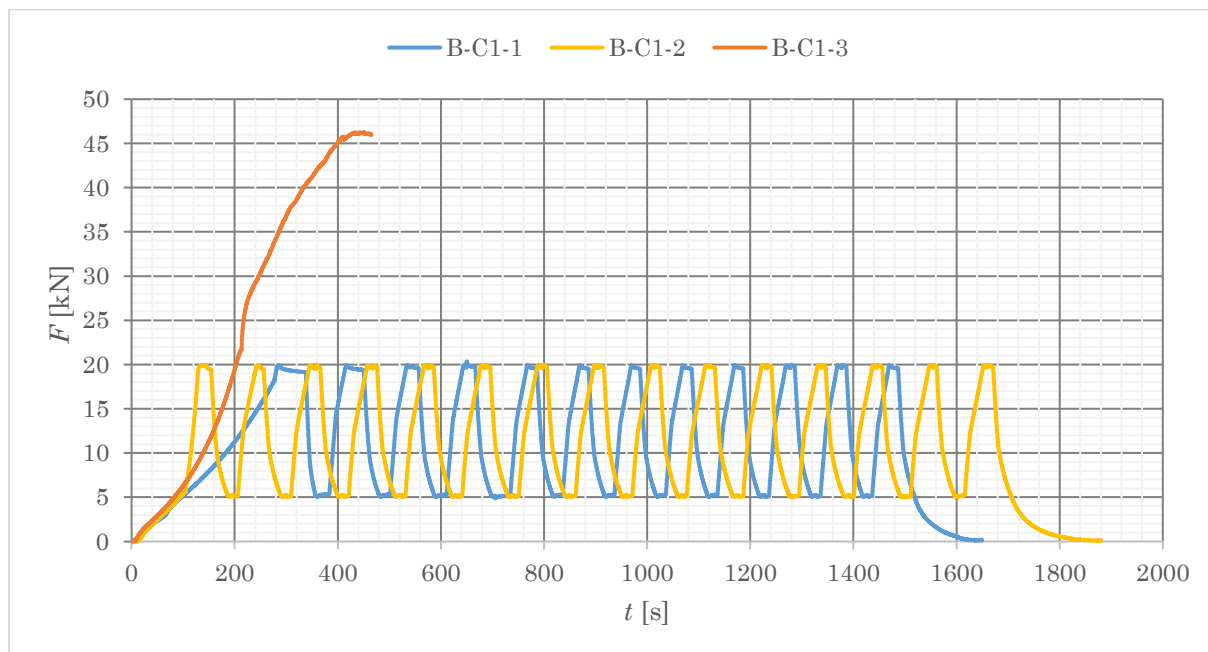
Figuur E.4: Belastings-tijddiagram (F - t) monotone testen van configuratie S45D



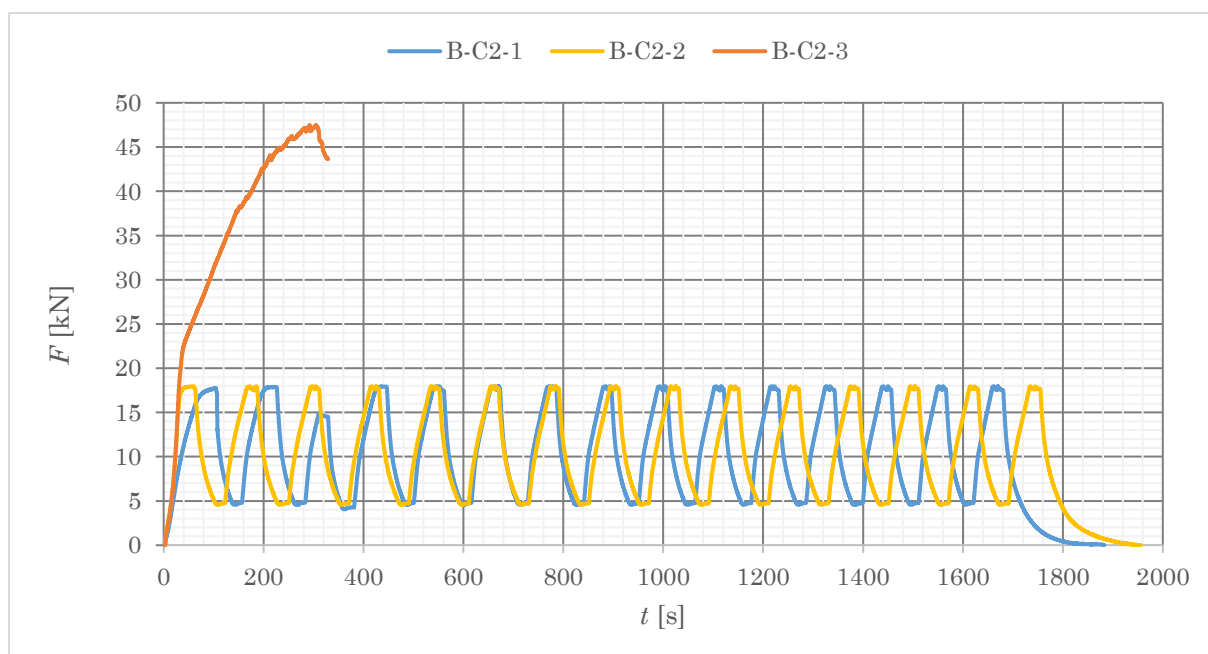
Figuur E.5: Belastings-tijddiagram (F - t) monotone testen van configuratie SX

E.2 Cyclische testen

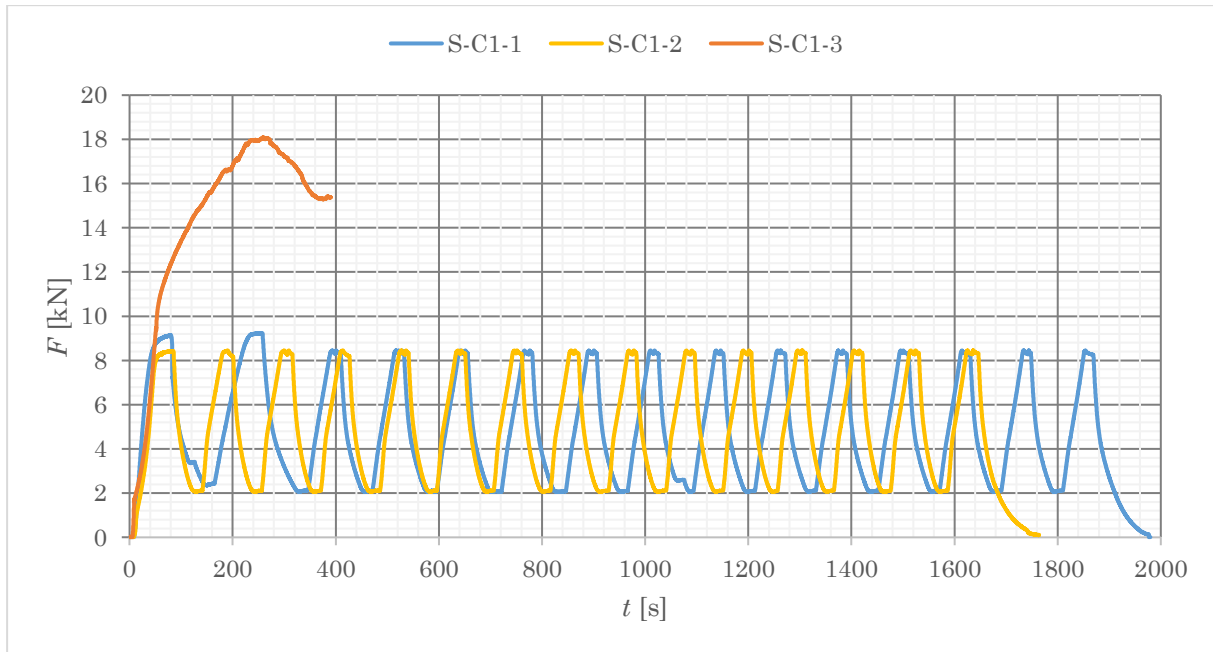
Figuur E.6 tot en met figuur E.12 illustreren de belastings-tijddiagrammen van de cyclische testen per proefstuk.



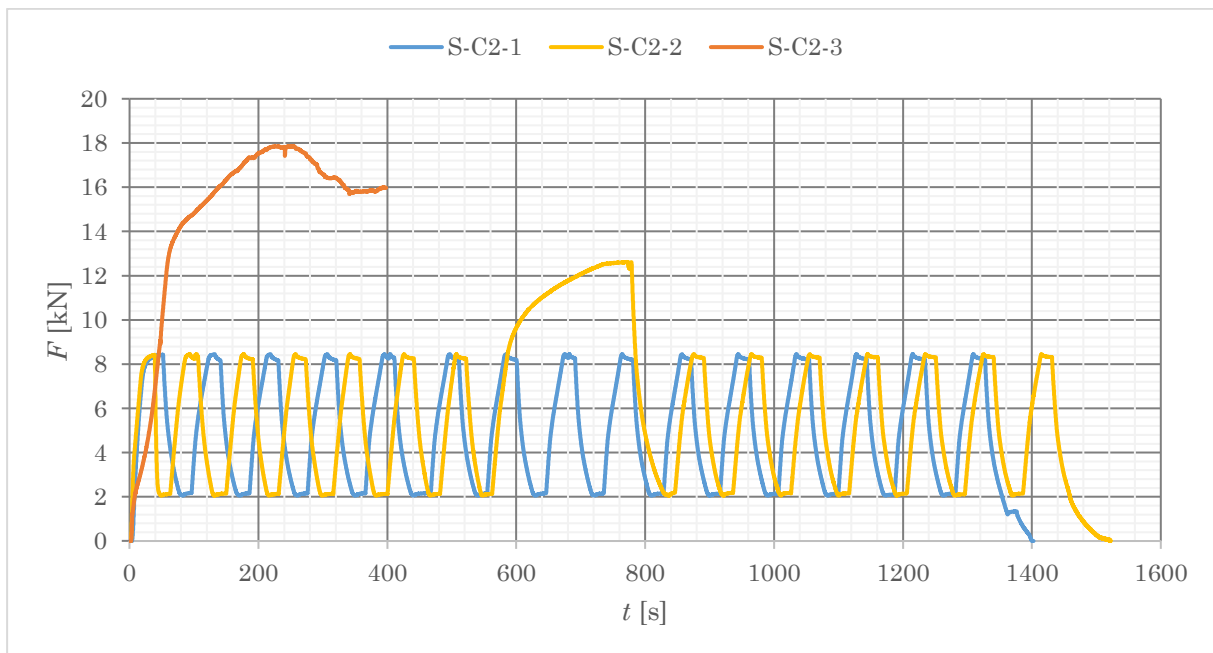
Figuur E.6: Belastings-tijddiagram (F-t) cyclisch testen van proefstuk B-C1



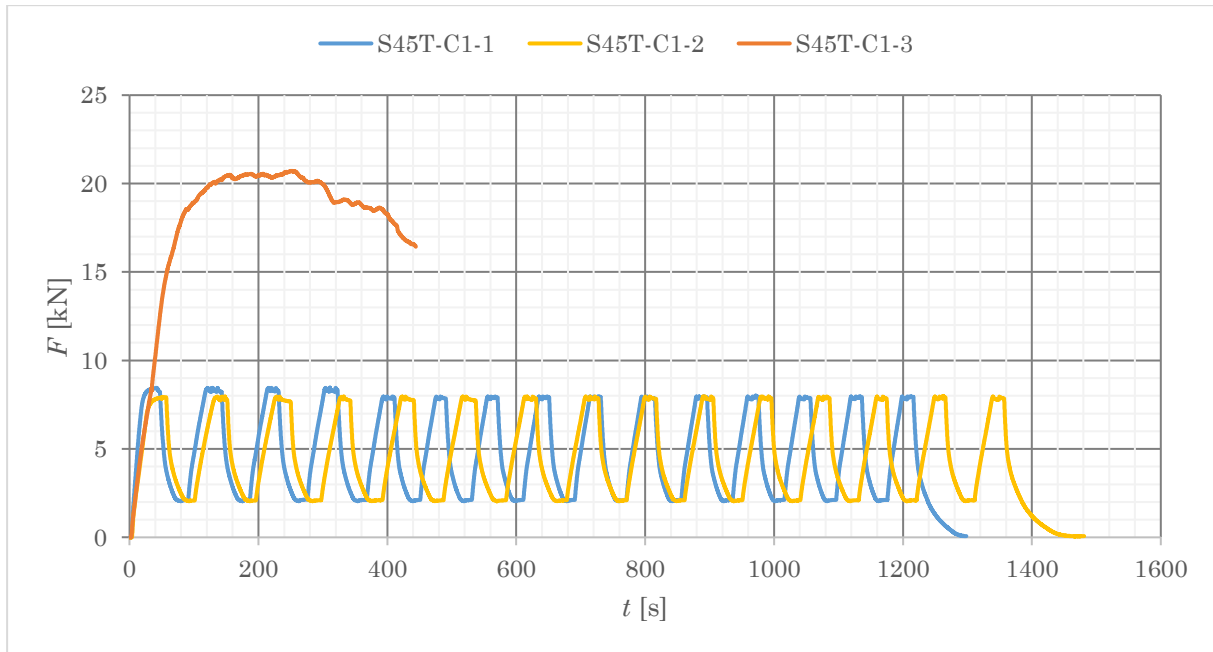
Figuur E.7: Belastings-tijddiagram (F-t) cyclisch testen van proefstuk B-C2



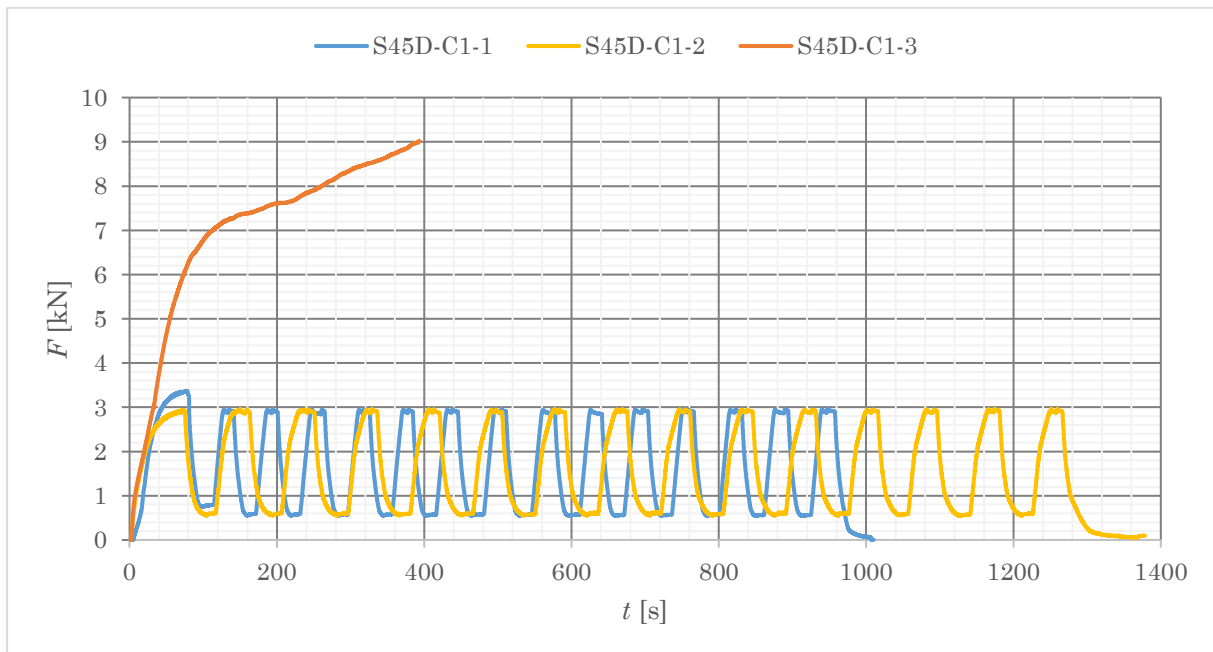
Figuur E.8: Belastings-tijddiagram (F - t) cyclisch testen van proefstuk S-C1



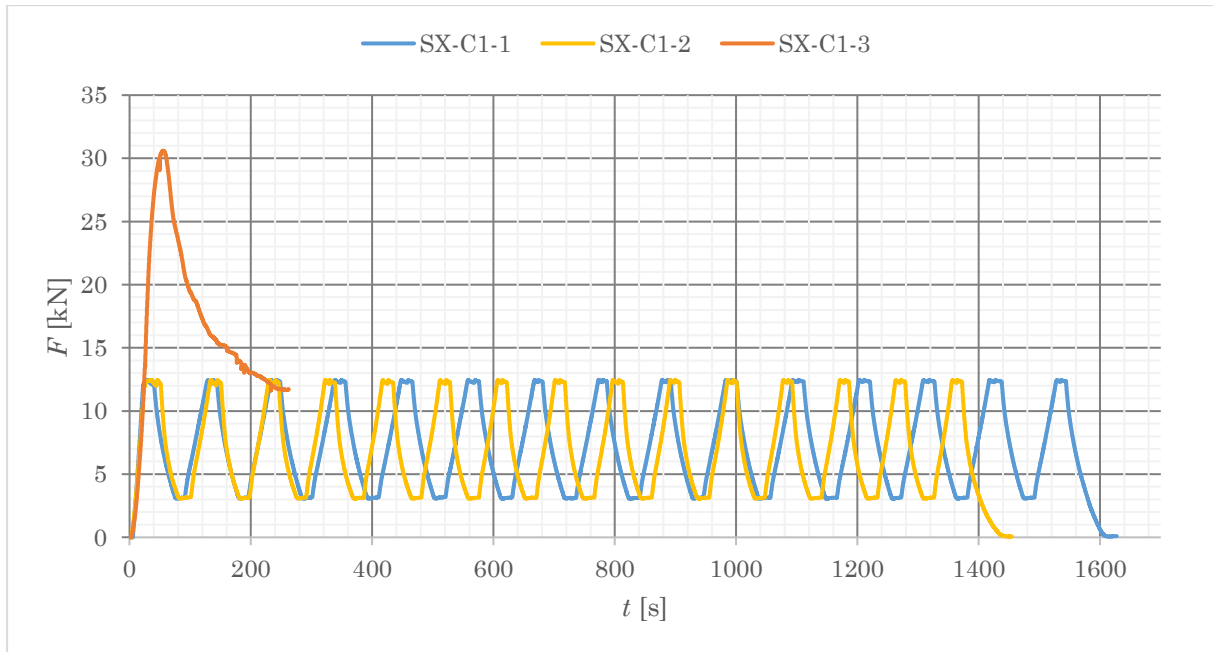
Figuur E.9: Belastings-tijddiagram (F - t) cyclisch testen van proefstuk S-C2



Figuur E.10: Belastings-tijddiagram cyclisch testen van proefstuk S45t-C1



Figuur E.11: Belastings-tijddiagram cyclisch testen van proefstuk S45D-C1



Figuur E.12: Belastings-tijddiagram cyclisch testen van proefstuk SX-C1

Bijlage F Bepaling stijfheid K_{ser}

De stijfheid van elk proefstuk werd bepaald aan de hand van formule x. Aangezien het niet altijd mogelijk was om de belastingen $0,4 F_{max}$ en $0,1 F_{max}$ te bereiken, werd er in de belastings-verplaatsingsdiagram bij het opnieuw belasten F_1 en F_2 gekozen als representatieve waarden voor respectievelijk $0,4 F_{max}$ en $0,1 F_{max}$. Daarbij werden de bijhorende verplaatsingen gezocht, aangeduid als v_1 en v_2 . Tabel F.1 geeft de belastingen en verplaatsingen weer voor de monotone testen, terwijl F.2 de bijhorende waarden weergeeft voor de cyclische testen.

Tabel F.1: Belasting en verplaatsing monotone testen voor K_{ser}

Proefstuk	F_1 [kN]	F_2 [kN]	v_1 [mm]	v_2 [mm]
<i>B-M1</i>	8,388	2,906	1,279	0,921
<i>B-M2</i>	16,045	5,933	5,397	4,695
<i>B-M3</i>	/	/	/	/
<i>B-M4</i>	8,463	2,508	2,891	2,523
<i>S-M1</i>	/	/	/	/
<i>S-M2</i>	7,100	2,062	0,860	0,689
<i>S-M3</i>	5,250	2,120	0,813	0,669
<i>S-M4</i>	5,335	2,056	0,524	0,397
<i>S45T-M1</i>	/	/	/	/
<i>S45T-M2</i>	7,275	2,640	1,377	1,074
<i>S45T-M3</i>	7,390	2,553	1,231	1,012
<i>S45T-M4</i>	7,299	2,615	1,468	1,163
<i>S45D-M1</i>	/	/	/	/
<i>S45D-M2</i>	2,366	0,892	0,900	0,779
<i>S45D-M3</i>	2,371	0,886	1,940	1,682
<i>S45D-M4</i>	1,824	0,822	0,588	0,525
<i>SX-M1</i>	/	/	/	/
<i>SX-M2</i>	11,166	3,733	1,198	0,883
<i>SX-M3</i>	11,012	3,807	1,197	0,880
<i>SX-M4</i>	10,667	3,917	1,959	1,494

Tabel F.2: Belasting en verplaatsing cyclische testen voor K_{ser}

<i>Proefstuk</i>	<i>F₁ [kN]</i>	<i>F₂ [kN]</i>	<i>v₁ [mm]</i>	<i>v₂ [mm]</i>
<i>B-C1-1</i>	17,136	8,720	2,531	2,214
<i>B-C1-2</i>	17,118	8,916	3,836	3,476
<i>B-C2-1</i>	16,008	6,027	10,878	10,394
<i>B-C2-2</i>	16,017	6,013	4,453	3,902
<i>S-C1-1</i>	7,513	3,005	4,374	3,859
<i>S-C1-2</i>	7,505	3,001	4,472	4,017
<i>S-C2-1</i>	7,502	3,018	2,170	1,843
<i>S-C2-2</i>	7,513	3,066	1,880	1,601
<i>S45T-C1-1</i>	7,003	2,538	1,809	1,508
<i>S45T-C1-2</i>	7,009	2,508	2,674	2,305
<i>S45D-C1-1</i>	2,517	1,016	2,620	2,478
<i>S45D-C1-2</i>	2,507	1,031	2,948	2,725
<i>SX-C1-1</i>	11,027	4,028	1,551	1,077
<i>SX-C1-2</i>	11,037	4,034	1,960	1,558