

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

Masterproef

Studie van nagel- en nietverbindingen: invloed van de (on)belaste randafstand op de sterkte van de verbinding

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

Jonas Rabaey

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

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

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

Masterproef

Studie van nagel- en nietverbindingen: invloed van de
(on)belaste randafstand op de sterkte van de verbinding

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

Jonas Rabaey

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

Woord vooraf

Eerst en vooral uit ik mijn dank aan zowel mijn interne als externe promotor prof. dr. Ir. Kurt de Proft. Hij stond steeds klaar met uitleg en advies over het mogelijke verdere verloop van het onderzoek. Hij was steeds bereid mijn vragen te beantwoorden en heeft de tijd genomen om tussentijdse resultaten te bespreken.

Ook verdienen een aantal mensen uit het CTIB zeker een pluim. Allereerst het onderzoekscentrum in het algemeen om mij de kans te geven om in het labo het uitvoeren van de proeven mogelijk te maken. Aan de mensen in het labo uit ik mijn dank om mij constant bij te staan tijdens het werken met de proefopstelling en het maken van de proefstukken. Zonder deze mogelijkheid had mijn thesis niet de meerwaarde gehad die hij nu heeft.

Mijn ouders gaven mij de kans om te studeren, hiervoor ook een dankbetuiging richting hen. Ook mijn vrienden mogen in dit dankwoord niet ontbreken. Iedereen stond steeds voor mij klaar en bleven mij de hele weg steunen ondanks de stressvolle periodes.

Jonas Rabaey

15-01-2015

Inhoudsopgave

I. Lijst van tabellen	5
II. Lijst van figuren	9
III. Lijst van afkortingen en symbolen	13
IV. Abstract [NL]	15
V. Abstract [EN]	17
1 Inleiding	19
1.1 Probleemstelling	19
1.2 Doelstelling	19
1.3 Opbouw onderzoek	20
2 Literatuurstudie	23
2.1 Plaatmaterialen	23
2.1.1 Soorten plaatmateriaal	23
2.1.2 Binnenklimaatklassen	23
2.2 Spaanplaat	25
2.2.1 Types spaanplaat	25
2.2.2 Sterkte- en stijfheideigenschappen spaanplaat	26
2.3 OSB	27
2.3.1 Samenstelling	27
2.3.2 Types OSB-plaat	27
2.3.3 Sterkte- en stijfheideigenschappen OSB	28
2.4 Houtverbindingen	29
2.4.1 Algemeen	29
2.5 Stiftvormige metalen verbindingsmiddelen	30
2.5.1 Nagels	30
2.5.2 Nietten	32
2.6 Sterkte van op afschuiving belaste verbinding	33
2.6.3 Johansen's yield model	34
2.7 Parameters sterkte van de verbinding	37
2.7.1 Stuiksterkte	37
2.7.2 Geometrische eigenschappen van het hout: diktes t_1 en t_2	39
2.7.3 Axiale uittreksterkte & koordeffect	40
2.7.4 Vloeimoment van het verbindingsmiddel	46
2.7.5 Brosse breuk - Minimum eind- en randafstanden	47
2.7.6 Meerdere verbindingsmiddelen in een verbinding	50
2.8 Rekenwaarde verbinding belast evenwijdig aan de vezelrichting	53
2.9 Stijfheid van de verbinding (UGT & BGT)	54

2.10	Voorgaand relevant onderzoek.....	57
2.10.1	Einfluss der Verbindungsmittelabstände auf die Tragfähigkeit von Wandtafeln.....	57
3	Resultaten	59
3.1	Berekenen van een karakteristieke waarde.....	59
3.2	Proeven op stuiksterkte van plaatmaterialen met variërende randafstanden 60	
3.2.1	Inleiding.....	60
3.2.2	Proefopstelling	60
3.2.3	Resultaten.....	65
3.2.4	Evaluatie van de resultaten	84
3.3	Proeven op uittrekcapaciteit van geprofileerde nagels	88
3.3.1	Inleiding.....	88
3.3.2	Proefopstelling	88
3.3.3	Uittrekcapaciteit van geprofileerde nagel.....	90
3.4	Proeven op stuikdruk met geprofileerde nagel 2,5mm.....	95
3.4.1	Inleiding.....	95
3.4.2	Proefopstelling	95
3.4.3	Resultaten stuikdruk met geprofileerde nagel 2,5 mm.....	96
3.5	Proeven op de sterkte van de verbinding met variërende (on)belaste randafstanden.....	107
3.5.1	Inleiding.....	107
3.5.2	Proefopstelling	107
3.5.3	Resultaten van de proeven	109
4	Berekening van de sterkte van een verbinding	129
4.1	Sterkte van de verbinding volgens Eurocode 5	129
4.2	Berekening genagelde plaat- houtverbinding	132
4.2.1	Berekening van de sterkte per verbindingsmiddel.....	132
4.2.2	Evaluatie berekende vs. experimentele resultaten	137
4.3	Berekening geniete plaat- houtverbinding.....	140
4.3.1	Berekening van de sterkte per verbindingsmiddel.....	140
4.3.2	Evaluatie berekende vs. experimentele resultaten	145
5	Conclusie	147
6	Bronnen	153
	Bijlage A.....	155
	Bijlage B.....	157

I. Lijst van tabellen

Tabel 1 minimum eind- en randafstanden voor nieten [EC5]	20
Tabel 2 Sterkte en stijfheidseigenschappen SP4 en SP5 (EN 312 en EN 12369-1)	26
Tabel 3 Sterkte en stijfheidseigenschappen OSB (EN 300 en EN 12369-1)	28
Tabel 4 Karakteristieke stuksterkte $f_{h,k}$ bij nagels [EC5]	38
Tabel 5 Vergelijkingen $f_{ax,k}$ in functie van de hecht lengte [EC5]	44
Tabel 6 EC5 vergelijkingen voor het vloemoment M_y, R_k [EC5]	46
Tabel 7 Minimum eind- en randafstanden voor een genagelde verbinding [EC5]	48
Tabel 8 Minimum eind- en randafstanden voor een geniete verbinding [EC5]	48
Tabel 9 Minimum eind- en randafstanden voor genagelde verbindingen in het kader van dit onderzoek.....	49
Tabel 10 Minimum eind- en randafstanden voor geniete verbindingen in het kader van dit onderzoek.....	49
Tabel 11 Waarden voor k_{ef} [EC5]	51
Tabel 12 Waarden voor K_{ser} voor verbindingmiddelen [EC5].....	55
Tabel 13 Invloed van randafstand en krachtrichting op de maximum kracht van de verbinding [10]	57
Tabel 14 Waarden voor k_s [11].....	59
Tabel 15 Overzicht gebruikte randafstanden voor test stuikdruk	60
Tabel 16 Minimale afmetingen proefstuk plaatmateriaal voor test stuikdruk	63
Tabel 17 Overzicht afmetingen proefstukken stuksterkte in functie van randafstand	64
Tabel 18 Resultaten randafstand 10d voor spaanplaat	66
Tabel 19 Resultaten randafstand 5d - 15d voor spaanplaat	68
Tabel 20 Resultaten randafstand 5d - 5d voor spaanplaat	71
Tabel 21 Resultaten randafstand 2d - 18d voor spaanplaat	73
Tabel 22 Resultaten randafstand 10d - 10d voor OSB.....	76
Tabel 23 Resultaten randafstand 5d - 15d voor OSB.....	78
Tabel 24 Resultaten randafstand 5d - 5d voor OSB	80
Tabel 25 Resultaten randafstand 2d - 18d voor OSB.....	82
Tabel 26 Verhouding stuksterktes spaanplaat ten opzichte van de referentie waarde op randafstand 10d	85
Tabel 27 Verhouding stuksterktes OSB ten opzichte van de referentie waarde op randafstand 10d	87
Tabel 28 Overzicht testseries uittrekcapaciteit	89
Tabel 29 Resultaten test op uittrekcapaciteit serie I	90
Tabel 30 Overzicht resultaten test op uittrekcapaciteit serie II.....	91
Tabel 31 Overzicht resultaten test op uittrekcapaciteit serie III.....	92
Tabel 32 Overzicht totaal aantal proefstukken uittrekcapaciteit voor geprofileerde nagel....	93
Tabel 33 Berekening uittreksterkte geprofileerde nagel.....	93
Tabel 34 Vergelijking geprofileerde nagel experimenteel/berekend.....	94
Tabel 35 Overzicht proefstukken stuikdruk volgens densiteit	96
Tabel 36 Overzicht serie 1, stuksterkte naaldhout	97

Tabel 37	Vergelijking experimenteel/berekend serie 1	98
Tabel 38	Overzicht serie 2, stuiksterkte naaldhout	99
Tabel 39	Vergelijking berekend/experimenteel serie 2	100
Tabel 40	Overzicht serie 3, stuiksterkte naaldhout	101
Tabel 41	berekend/experimenteel serie 3.....	101
Tabel 42	Overzicht serie 4, stuiksterkte naaldhout	103
Tabel 43	berekend/experimenteel serie 4.....	103
Tabel 44	Overzicht stuiksterkte Spaanplaat	106
Tabel 45	Berekend/experimenteel Spaanplaat	106
Tabel 46	Gegevens proefserie genagelde verbinding met randafstand 25 mm (10d)	109
Tabel 47	Gegevens proefserie genagelde verbinding met randafstand 17,5 mm (7d)	111
Tabel 48	Gegevens proefserie genagelde verbinding met randafstand 12,5 mm (5d)	112
Tabel 49	Gegevens proefserie genagelde verbinding met randafstand 7,5 mm (3d).....	114
Tabel 50	Minimum randafstanden genagelde plaat-houtverbindingen	115
Tabel 51	Verhouding sterktes genagelde verbindingen	116
Tabel 52	Verhouding experimentele en berekende sterkte per nagel in functie van de densiteit naaldhout (gemiddelde).....	117
Tabel 53	Gegevens proefserie geniete verbinding met randafstand 18 mm (10d)	118
Tabel 54	Gegevens proefserie geniete verbinding met randafstand 12,6 mm (7d)	120
Tabel 55	Gegevens proefserie geniete verbinding met randafstand 9 mm (5d)	121
Tabel 56	Gegevens proefserie geniete verbinding met randafstand 7,2 mm (4d).....	123
Tabel 57	Minimum randafstanden geniete plaat-houtverbindingen	124
Tabel 58	Verhouding sterkte geniete verbindingen	125
Tabel 59	Verhouding experimentele en berekende sterkte per niet in functie van de densiteit naaldhout (gemiddelde).....	126
Tabel 60	Overzicht sterkte verbinding volgens densiteit houtblokje	131
Tabel 61	Overzicht sterkte per verbindingsmiddel volgens densiteit houtblokje	131
Tabel 62	Berekening sterkte per nagel serie 1	132
Tabel 63	Berekening sterkte per nagel serie 2	134
Tabel 64	Berekening sterkte per nagel serie 3	135
Tabel 65	Berekening sterkte per nagel serie 4	136
Tabel 66	Overzicht karakteristieke resultaten per serie (sterkte per nagel).....	137
Tabel 67	Berekening sterkte per niet serie 1.....	140
Tabel 68	Berekening sterkte per niet serie 2.....	141
Tabel 69	Berekening sterkte per niet serie 3.....	142
Tabel 70	Berekening sterkte per niet serie 4.....	144
Tabel 71	Overzicht karakteristieke resultaten per serie (sterkte per niet)	145
Tabel 72	Resultaat stuiksterkte op het naaldhout (karakterisatieke densiteit)	147
Tabel 73	Resultaat sterkte per nagel in functie van de randafstand & vergelijking EC5.....	148
Tabel 74	Resultaat sterkte per niet in functie van de randafstand & vergelijking EC5	149
Tabel 75	Minimum (on)belaste randafstand nieten DIN 1052.....	150

Tabel 76 Minimum (on)belaste randafstand nieten DIN 1052 in het kader van dit onderzoek	150
Tabel 77 Experimentele resultaten sterkte per nagel bij proefserie 10d en 7d	157
Tabel 77 Experimentele resultaten sterkte per niet bij proefserie 10d en 7d	158

II. Lijst van figuren

Figuur 1 Onderzoek sterkte verbindingen (CTIB, dr. Ir. Kurt de Proft).....	19
Figuur 2 Beslissingsboom plaatmateriaal [1]	24
Figuur 3 Spaanplaat (P5)[2]	25
Figuur 4 Oriented Strand Board [3]	27
Figuur 5 Verbinding met nagels en nieten	29
Figuur 6 Verschillende types nagels [5]	30
Figuur 7 Nominale diameter en lengte voor nagels [5]	31
Figuur 8 Gebruikte nagels	31
Figuur 9 Geometrie van een niet [9].....	32
Figuur 10 Plastisch en reëel verloop nagel-hout [8]	34
Figuur 11 Bezwijkmechanismen enkel- en dubbelsnedig [8]	34
Figuur 12 Bezwijkmechanismen verduidelijking [9]	36
Figuur 13 Stift onderhevig aan een kracht [9]	37
Figuur 14 Stuksterkte op houtachtig materiaal [9]	38
Figuur 15 Metalen stiftvormige verbindingmiddelen met enkel- of dubbelsnedig afschuivingsvlak [9]	39
Figuur 16 verbinding met een stiftvormig verbindingmiddel en enkelsnedige afschuiving onderhevig aan een toenemende belasting [9]	40
Figuur 17 Bezwijkmechanismen bij axiale belasting [9].....	42
Figuur 18 Nageling loodrecht op de vezelrichting [9]	44
Figuur 19 Belasting nagel, vervorming nagel en buigmomenten volgens de tests in EN 409 [8]	46
Figuur 20 mogelijkheden voor bezwijken van het hout [7]	47
Figuur 21 Eind- en randafstand bevestigingsmiddel [9].....	47
Figuur 22 Rijen verbindingen evenwijdig t.o.v. de vezelrichting [9]	50
Figuur 23 Rijen verbindingen parallel t.o.v. de vezelrichting	50
Figuur 24 Toegestane uitsprong nagel voor een rij [EC5]	50
Figuur 25 Dimensies bij meerdere nieten [9]	52
Figuur 26 Voorbeeld dimensionering verbinding [9].....	53
Figuur 27 Typische kracht- verschuivingsgedrag bij metalen bevestigingsmiddelen [9]	54
Figuur 28 Ogenblikkelijke verschuiving in een verbinding [9].....	56
Figuur 29 Nagelverplaatsing bij beide randafstanden met $\alpha=90^\circ$ [10]	58
Figuur 30 Proefopstelling bepaling stuksterkte conform EN 383 [11].....	60
Figuur 31 Testmethode stukdruk conform ASTM D5764 [12]	61
Figuur 32 Testmethode stukdruk in het kader van dit onderzoek	61
Figuur 33 Gebruikte diameters stift	62
Figuur 34 Belastingprocedure beschreven in NBN ISO 6891 [13]	62
Figuur 35 Dimensies proefstuk zoals vermeld in <i>Tabel 15</i>	63
Figuur 36 Dimensies proefstuk zoals vermeld in <i>Tabel 16</i>	64

Figuur 37 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand $10d$ bij $\varnothing 2$ mm.....	65
Figuur 38 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand $10d$ bij $\varnothing 3$ mm.....	66
Figuur 39 Uitzicht proefstukken spaanplaat $10d$ na de test.....	67
Figuur 40 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand $5d - 15d$ bij $\varnothing 2$ mm.....	67
Figuur 41 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand $5d - 15d$ bij $\varnothing 3$ mm.....	68
Figuur 42 Brosse breuk proefstuk 5 randafstand $5d - 15d$ bij $\varnothing 2$ mm.....	69
Figuur 43 Uitzicht proefstukken spaanplaat $5d - 15d$ na de test.....	69
Figuur 44 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand $5d - 5d$ bij $\varnothing 2$ mm.....	70
Figuur 45 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand $5d - 5d$ bij $\varnothing 3$ mm.....	70
Figuur 46 Brosse breuk bij proefstukken spaanplaat met randafstand $5d - 5d$ bij $\varnothing 2$ mm..	71
Figuur 47 Uitzicht proefstukken spaanplaat $5d - 5d$ na de test bij $\varnothing 3$ mm.....	72
Figuur 48 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand $2d - 18d$ bij $\varnothing 2$ mm.....	72
Figuur 49 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand $2d - 18d$ bij $\varnothing 3$ mm.....	73
Figuur 50 Uitzicht proefstukken spaanplaat $2d - 18d$ na de test.....	74
Figuur 51 Probleem bij randafstand $2d - 2d$	74
Figuur 52 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand $10d - 10d$ bij $\varnothing 2$ mm.....	75
Figuur 53 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand $10d - 10d$ bij $\varnothing 3$ mm.....	75
Figuur 54 Uitzicht proefstukken OSB $10d - 10d$ na de test.....	76
Figuur 55 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand $5d - 15d$ bij $\varnothing 2$ mm.....	77
Figuur 56 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand $5d - 15d$ bij $\varnothing 3$ mm.....	77
Figuur 57 Uitzicht proefstukken OSB $5d - 15d$ na de test.....	78
Figuur 58 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand $5d - 5d$ bij $\varnothing 2$ mm.....	79
Figuur 59 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand $5d - 5d$ bij $\varnothing 3$ mm.....	79
Figuur 60 Brosse karakter proefstukken OSB bij randafstand $5d - 5d$ met $\varnothing 2$ mm.....	80
Figuur 61 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand $2d - 18d$ bij $\varnothing 2$ mm.....	81
Figuur 62 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand $2d - 18d$ bij $\varnothing 3$ mm.....	81
Figuur 63 Brosse karakter proefstukken OSB bij randafstand $2d - 18d$	82
Figuur 64 het knikken van het proefstuk OSB bij randafstand $2d$	83
Figuur 65 Falen van plaatmateriaal OSB bij randafstand $2d$	83
Figuur 66 Karakteristieke stuiksterkte spaanplaat.....	84
Figuur 67 Gemiddelde stuiksterkte spaanplaat.....	84

Figuur 68 Karakteristieke stuiksterkte OSB.....	86
Figuur 69 Gemiddelde stuiksterkte OSB	86
Figuur 70 Proefopstelling uittrekcapaciteit	88
Figuur 71 Minimale dimensies proefstukken uittrekcapaciteit	89
Figuur 72 Kracht in functie van de verplaatsing voor proefstukken serie I voor test op uittrekcapaciteit.....	90
Figuur 73 Toestand proefstukken serie I na uitvoeren test	90
Figuur 74 Kracht in functie van de verplaatsing voor proefstukken serie II voor test op uittrekcapaciteit.....	91
Figuur 75 Toestand proefstukken serie II na uitvoeren test	91
Figuur 76 Kracht in functie van de verplaatsing voor proefstukken serie III voor test op uittrekcapaciteit.....	92
Figuur 77 Toestand proefstukken serie III na uitvoeren test	92
Figuur 78 Proefopstelling stuikdruk 2,5 mm stift	95
Figuur 79 Test stuikdruk met geprofileerde nagel.....	95
Figuur 80 Kracht in functie van de verplaatsing voor hout van serie 1.....	96
Figuur 81 Proefstukken serie 1 stuikdruk	97
Figuur 82 Kracht in functie van de verplaatsing voor hout van serie 2.....	98
Figuur 83 Proefstukken serie 2 stuikdruk	99
Figuur 84 Kracht in functie van de verplaatsing voor hout van serie 3.....	100
Figuur 85 Proefstukken serie 3 stuikdruk	102
Figuur 86 Kracht in functie van de verplaatsing voor hout van serie 4.....	102
Figuur 87 Splijten van het hout door stuikdruk	102
Figuur 88 Proefstukken serie 4 stuikdruk	104
Figuur 89 Grafisch verloop karakteristieke en gemiddelde stuiksterkte in functie van dichtheid: Exp/EC5	104
Figuur 90 Kracht in functie van de verplaatsing voor spaanplaat	105
Figuur 91 Proefopstelling voor het testen van verbindingen	107
Figuur 92 Dimensionering proefstukken	108
Figuur 93 Kracht van de verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat $10d$	109
Figuur 94 Toestand genagelde proefstukken met randafstand $10d$	110
Figuur 95 Kracht van de verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat $7d$	110
Figuur 96 Toestand genagelde proefstukken bij randafstand $7d$	111
Figuur 97 Kracht van de verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat $5d$	112
Figuur 98 Toestand genagelde proefstukken met randafstand $5d$	113
Figuur 99 Kracht van de verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat $3d$	113
Figuur 100 Toestand genagelde proefstukken bij randafstand $3d$	114
Figuur 101 Staafdiagram karakteristieke sterktes genagelde verbindingen	115
Figuur 102 Staafdiagram gemiddelde sterktes genagelde verbindingen.....	116
Figuur 103 Verloop sterkte per nagel in functie van de randafstand.....	117

Figuur 104 Kracht van de geniete verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat $10d$	118
Figuur 105 Toestand geniete proefstukken bij randafstand $10d$	119
Figuur 106 Kracht van de geniete verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat $7d$	119
Figuur 107 Toestand geniete proefstukken bij randafstand $7d$	120
Figuur 108 Kracht van de geniete verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat $5d$	121
Figuur 109 Toestand geniete proefstukken bij randafstand $5d$	122
Figuur 110 Kracht van de geniete verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat $4d$	122
Figuur 111 Toestand geniete proefstukken met randafstand $4d$	123
Figuur 112 Staafdiagram karakteristieke sterktes geniete verbindingen	125
Figuur 113 Staafdiagram gemiddelde sterktes geniete verbindingen	125
Figuur 114 Verloop sterkte per niet in functie van de randafstand	126
Figuur 115 Bezwijkmechanisme d bij genagelde verbinding serie 1	133
Figuur 116 Bezwijkmechanisme f bij genagelde verbinding serie 1	133
Figuur 117 Bezwijkmechanisme d bij genagelde verbinding serie 2	135
Figuur 118 Bezwijkmechanisme d bij genagelde verbinding serie 3	136
Figuur 119 Karakteristieke sterkte per verbindingsmiddel in functie van de karakteristieke densiteit van het naaldhout	138
Figuur 120 Gemiddelde sterkte per verbindingsmiddel in functie van de gemiddelde densiteit van het naaldhout	139
Figuur 121 Gemiddelde sterkte per verbindingsmiddel in functie van de gemiddelde densiteit van het naaldhout, berekend door vergelijking 3-18	139
Figuur 122 Bezwijkmechanisme f bij geniete verbinding serie 1	141
Figuur 123 Bezwijkmechanisme f bij geniete verbinding serie 2	142
Figuur 124 Bezwijkmechanisme f bij geniete verbinding serie 3	143
Figuur 125 Bezwijkmechanisme f bij geniete verbinding serie 4	145
Figuur 126 Karakteristieke sterkte per niet in functie van de karakteristieke densiteit van het naaldhout	146
Figuur 127 Splitsen van het hout bij onvoldoende eindafstand	149
Figuur 128 Verticale component welke niet tot rekenregels behoort [9]	151
Figuur 129 Experimentele resultaten sterkte per nagel bij proefserie $10d$ en $7d$	157
Figuur 130 Experimentele resultaten sterkte per niet bij proefserie $10d$ en $7d$	158

III. Lijst van afkortingen en symbolen

EC5	Eurocode 5
d	diameter van het bevestigingsmiddel
θ	hoek waaronder de niet geschoten is
a_1	tussenafstand tussen bevestigingsmiddelen evenwijdig aan de vezelrichting in één rij
a_2	tussenafstand loodrecht op de vezelrichting tussen verbindingsmiddelen geplaatst in rijen
$a_{3,t}$	afstand tussen het verbindingsmiddel en het belaste eind
$a_{3,c}$	afstand tussen het verbindingsmiddel en het onbelaste eind
$a_{4,t}$	afstand tussen het verbindingsmiddel en het belaste rand
$a_{4,c}$	afstand tussen het verbindingsmiddel en het onbelaste eind
α	hoek tussen vezelrichting en de kracht
$f_{t,0,k}$	karacteristieke treksterkte volgens de vezelrichting
$f_{c,0,k}$	karacteristieke druksterkte volgens de vezelrichting
ρ_k	karacteristieke densiteit
$E_{t,0,mean}$	gemiddelde waarde elasticiteitsmodulus bij trekkracht volgens de vezelrichting
$E_{c,0,mean}$	gemiddelde waarde elasticiteitsmodulus bij drukkracht volgens de vezelrichting
$M_{y,Rk}$	vloeimoment van het bevestigingsmiddel
$f_{ax,k}$	karacteristieke uittreksterkte aan de puntzijde
$f_{head,k}$	karacteristieke doortreksterkte van de nagelkop
$f_{tens,k}$	karacteristieke treksterkte
$F_{v,ef,Rk}$	effectieve karakteristieke waarde van de verbinding onder laterale belasting
$F_{v,ef,Rd}$	effectieve rekenwaarde van de verbinding onder laterale belasting
n_{ef}	effectief meewerkend aantal nagels in de rij evenwijdig aan de vezelrichting
n	aantal nagels in een rij evenwijdig aan de vezelrichting
n_p	aantal overlappende nagels in een rij evenwijdig aan de vezelrichting
k_{ef}	exponent die afhankelijk is van de nagelafstand a_1 en wel of niet voorgeboord
$F_{v,Rk}$	karacteristieke sterkte per afschuivingsvlak van één verbindingsmiddel
λ	slankheid van het bevestigingsmiddel
t_i	houtdikte of de hechtlengte met i voor de waarde 1 of 2
$f_{h,i,k}$	karacteristieke stuiksterkte van het houten element i
d	diameter van het verbindingsmiddel

$M_{y,Rk}$	karakteristieke vloeimoment van het verbindingsmiddel
β	verhouding van de stuiksterkten van de elementen
$F_{ax,Rk}$	karakteristieke axiale uittreksterkte van het verbindingsmiddel
F_{max}	maximale kracht
d_h	diameter van de nagelkop
t_{pen}	hechtlengthte/lengte geprofileerd deel element met puntzijde
k_{mod}	modificatiefactor
γ_m	partiële veiligheidsfactor
f_u	treksterkte van het bevestigingsmiddel
$F_{v,Rd}$	rekenwaarde voor de sterkte per afschuivingsvlak van één verbindingsmiddel
r_{pl}	aantal rijen van verbindingsmiddelen evenwijdig aan de vezelrichting
K_{ser}	verschijvingsmodulus
ρ_m	gemiddelde dichtheid
K_u	ogenblikkelijke verschuivingsmodulus
BGT	bruikbaarheidsgrenstoestand
UGT	uiterste grenstoestand
u_{inst}	ogenblikkelijke slip

IV. Abstract [NL]

Studie van Nagel- en Nietverbindingen: De Invloed van de (on)belaste Randafstand op de Sterkte van de Verbinding

Promotoren: Prof. Dr. Ir. Kurt De Proft, Prof. Dr. Degée Herve

Student: Jonas Rabaey

Bedrijf: CTIB-TCHN

Trefwoorden:

Johansen; Eurocode 5; Stuksterkte; Minimum eind- en randafstanden; Sterkte bij enkelsnedige afschuiving

Bij het dimensioneren van houtconstructies zijn de verbindingen beslissend voor het draagvermogen van de globale structuur. Binnen het prenormatief onderzoeksproject, Connect-2-Wood, worden daarom de volgende twee stellingen onderzocht.

Stelling 1: De aanbevolen minimum (on)belaste randafstanden, conform Eurocode 5, zijn te conservatief voor genagelde en geniete verbindingen.

Stelling 2: De theoretische rekenregels conform Eurocode 5 voor de sterkte van de verbinding geven een te lage waarde in vergelijking met de gemeten sterkte van de verbinding in werkelijkheid.

Binnen de Eurocode 5 wordt de sterkte van de verbinding, gebaseerd op het werk van Johansen, bepaald door materiaal- en geometrische parameters zoals de stuksterkte en diktes van het materiaal, het vloeimoment en diameter van het bevestigingsmiddel en het optredend koordeffect. Door middel van experimenteel onderzoek wordt de invloed van afnemende randafstanden op de stuksterkte van het materiaal alsook de uittrekcapaciteit van het bevestigingsmiddel gemeten. Deze meetresultaten zullen vervolgens de basis vormen voor het verdere experimentele onderzoek naar de sterkte van verbinding met variabele randafstanden. Deze gemeten waarden worden nadien vergeleken met de theoretische berekende sterkte van de verbinding conform Eurocode 5.

Uit de analyse blijkt uiteindelijk dat de sterkte van de verbinding welke experimenteel bekomen wordt, significant hoger ligt dan de theoretisch berekende waarde conform Eurocode 5. Er kan geconcludeerd worden dat de aanbevolen minimum (on)belaste randafstanden voor nagels en nieten zeker te conservatief blijken en herzien moeten worden. Verder onderzoek naar de oorzaak van het verschil in sterkte tussen experimenteel en theoretisch bekomen waarden is aan te bevelen.

V. Abstract [EN]

Study of Nailed and Stapled Connections

The Influence of the (un)loaded Edge Distances to the Joint Strength

Promotoren: Prof. Dr. Ir. Kurt De Proft, Prof. Dr. Degée Herve

Student: Jonas Rabaey

Institute: CTIB-TCHN

Keywords:

Johansen; Eurocode 5; Embedment strength; Minimum edge and end distances; Load-carrying capacity per shear plane

When dimensioning timber structures, the joints are crucial to the load bearing capacity of the structure as a whole. Therefore two theses will be researched during the pre-normative research project, aptly named 'Connect-2-Wood'. Thesis 1: The recommended minimum (un)loaded edge distances, conform Eurocode 5, are too conservative for nailed and stapled joints. Thesis 2: The design codes conform Eurocode 5 concerning the load-carrying capacity of the joint provides a value that is too low compared to the actual measured capacity of the joint.

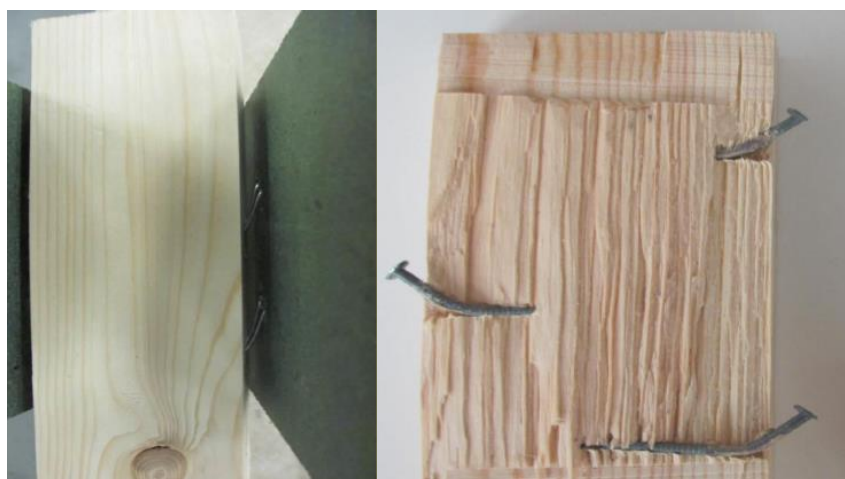
The load-carrying capacity of a joint within Eurocode 5, based on the work of Johansen, is determined by the parameters of the material and the geometrics, such as the embedment strength, the thickness of the material, the yield moment, the diameter of the fastener and the occurring rope effect. The influence of decreased edge and end distances on the embedment strength of the material as well as the withdrawal capacity of the fastener is measured by means of experimental research. These measured results will then form the basis for further experimental research into the load-carrying capacity of a joint with variable edge distances. Afterwards, these results will be compared to the theoretically calculated strength of the joint conform Eurocode 5.

In the end, analysis shows that the load-carrying capacity of the joint is significantly higher during the experiments than the theoretically calculated values conform Eurocode 5. Therefore, one can conclude that the recommended minimum edge distances for nails and staples are far too conservative and need reviewing. Further research into the cause of the difference in strength between actual experimental testing and theoretical values is recommended.

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

De berekening van hout op houtverbindingen wordt gedaan door de in EC5 opgenomen rekenregels. Uit de praktijk blijkt nu dat deze berekende resultaten op basis van de regels uit de EC5 zeer conservatief zijn. Eerder onderzoek, gedaan door dr. Ir Kurt De Proft binnen het project Connect-2-Wood, bevestigt deze resultaten. In het algemene kader van de herziening van EC5 dient het hoofdstuk rondom verbindingen te worden herzien. Als startbasis voor dit onderzoek blijkt dat er nog nauwelijks eerder experimenteel onderzoek gedaan werd op hout met zeer slanke metalen verbindingsmiddelen. Voor de Belgische houtskeletbouwmarkt is dit onderzoek belangrijk aangezien de verbindingen hier bestaan uit niet- en nagelverbindingen.



$F_{k,berekend} (N)$	849	759	703	1101	985	972
$F_{k,gemetten} (N)$	1084	1084	980	1254	1254	1086
<i>berekend/gemetten</i>	0,78	0,70	0,72	0,88	0,79	0,90

Figuur 1 Onderzoek sterkte verbindingen (CTIB, dr. Ir. Kurt de Proft)

1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is om een analyse te doen van hout op houtverbindingen. Deze analyse zal gedaan worden op basis van experimenteel onderzoek. De invloed van een aantal parameters die voorkomen bij het dimensioneren of berekenen van een verbinding zullen worden onderzocht. Uit een mogelijke relatie tussen het experimenteel resultaat en de invloed, zal getracht worden om uiteindelijk een conclusie te trekken.

1.3 Opbouw onderzoek

Om voor de neutrale lezer een duidelijk kader te scheppen alvorens over te gaan naar relevant onderzoek uit het verleden, worden er eerst kort een aantal zaken besproken. De verschillende plaatmaterialen die in het experimenteel onderzoek zullen voorkomen, zijn beknopt beschreven. Vervolgens worden de berekeningsregels besproken die in de EC5 zijn opgenomen. De uiteindelijke vergelijkingen voor het berekenen van de sterkte van een verbinding bestaan uit een aantal parameters die invloed hebben op de uiteindelijke sterkte van de verbinding. De stuiksterkte van het gebruikte materiaal, het vloeimoment van het verbindingsmiddel, de uittrekcapaciteit van het verbindingsmiddel en de geometrische dimensies van de verbinding zijn elk van belang. Hier wordt kort en krachtig hun betekenis en eventuele meetprocedure uitgelegd.

Het uitgangspunt van deze onderzoeken zal vooral leunen op het analyseren van de invloed van de (on)belaste randafstanden op de uiteindelijke sterkte van het materiaal en de verbinding. Ook worden andere zaken zoals als de uittrekcapaciteit van het bevestigingsmiddel onderzocht. Het blijkt vooral dat in het geval van nieten, de randafstanden zeer conservatief zijn. *Tabel 1* geeft de minimum rand- en eindafstanden volgens de EC5.

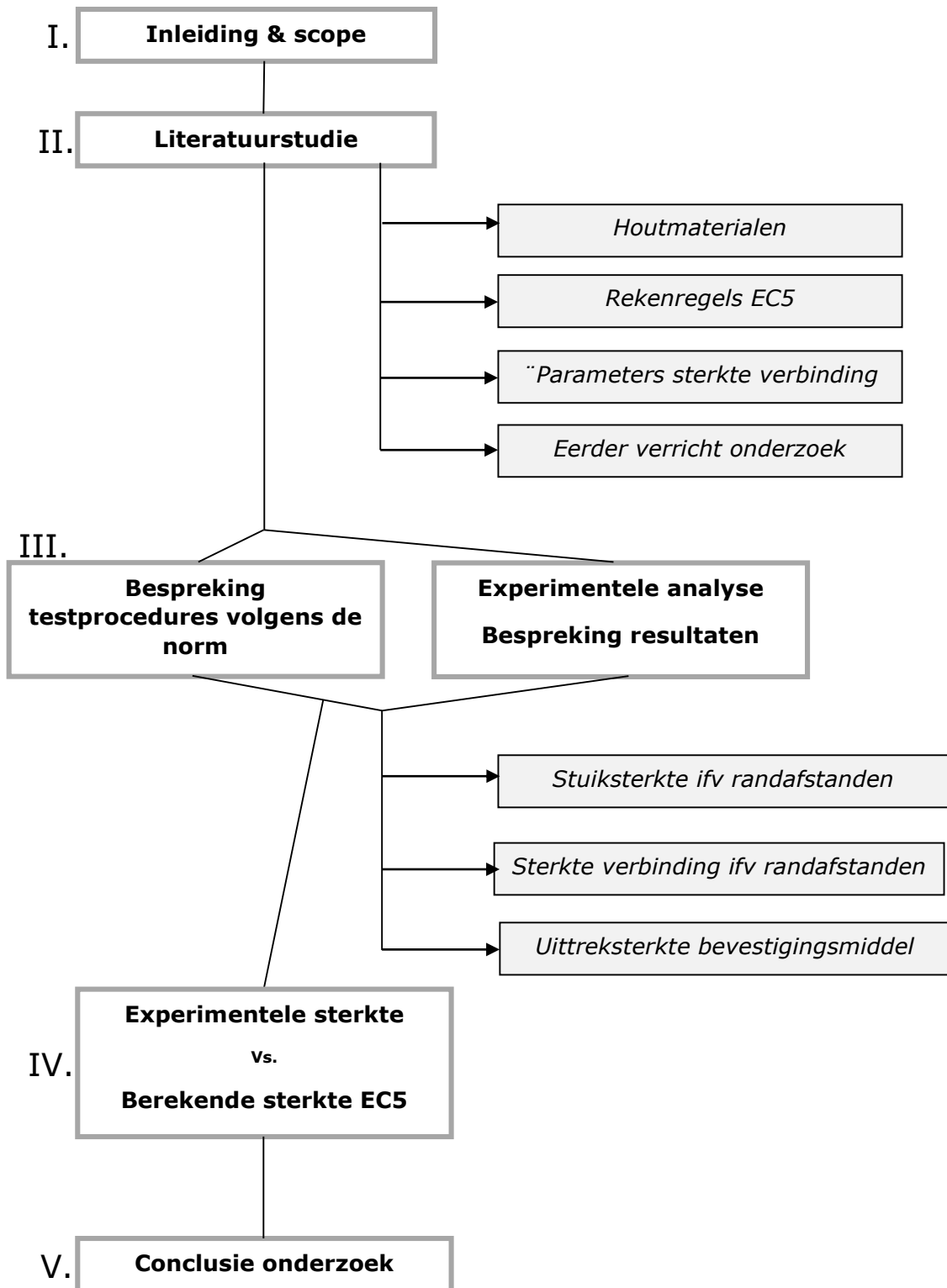
Tabel 1 minimum eind- en randafstanden voor nieten [EC5]

Algemeen: Minimum eind- en randafstanden		
Nieten		
Afstand	Hoek	Minimale tussen-, eind- en randafstand
a_1 Voor $\theta \geq 30^\circ$ Voor $\theta < 30^\circ$	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(10 + 5 \cos\alpha)d$ $(15 + 5 \cos\alpha)d$
a_2	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$15d$
$a_{3,t}$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(15 + 5 \cos\alpha)d$
$a_{3,c}$	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$15d$
$a_{4,t}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$(15 + 5 \sin\alpha)d$
$a_{4,c}$	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$10d$

Het onderzoek van de invloed van de randafstanden begint bij het experimenteel testen van de stuiksterkte van plaatmaterialen, rekening houdend met een afnemende randafstand. Hier zal getracht worden een verband te schetsen die bepalend zal zijn voor verder experimenteel onderzoek bij verbindingen. Bij het testen van de verbindingen, zal ook een afnemende randafstand onderzocht worden. De relatie randafstand en sterkte van de verbindingen is datgene wat van belang is.

Ook zal er steeds een vergelijking gemaakt worden tussen het bekomen experimentele resultaat en de berekende sterkte van de verbinding volgens rekenregels uit de EC5. Deze thesis sluit af met een conclusie van de verkregen resultaten uit de verschillende experimenten.

1.3.1 Schematisch overzicht materproef



2 Literatuurstudie

2.1 Plaatmaterialen

2.1.1 Soorten plaatmateriaal

Er is tegenwoordig een uitgebreide keuze aan plaatmaterialen beschikbaar. Elk soort plaatmateriaal onderscheidt zich van de rest door uitlopende prestaties en toepassingsgebieden. Elk plaattype heeft een specifieke opbouw en samenstelling en zal zowel voor de fysische als mechanische prestaties bepalend zijn. De vier meest voorkomende plaattypes zijn de volgende:

- Spaanplaat
- OSB (Oriented Strand Board)
- Multiplex
- MDF (Medium Density Board)

De prestaties van de platen kunnen sterk verschillen al naargelang van de gebruikte houtsoort, het lijmtypen, de lijmhoeveelheid, de eventuele toeslagstoffen en de volumieke massa. Gewoonlijk gaat men ervan uit dat de mechanische sterkte van de platen toeneemt met hun volumieke massa.

De CE-markering van plaatmaterialen voor de bouw gebeurt volgens de norm NBN EN 13986. Deze markering verwijst naar het plaattype en zijn technische klasse. Verschillende plaattypes kunnen niet in elke situatie gebruikt worden. Het organigram, dat gebaseerd is op de beslissingsboom van het CEN TC 112, geeft aan welke technische plaatklassen gebruikt kunnen worden voor een voorzien praktijktoepassing. In onderstaand organigram zijn de relevante plaatmaterialen binnen deze thesis gefilterd.

Een rij vertegenwoordigt het soort plaatmateriaal, spaanplaat of OSB. De kolommen stellen op hun beurt een aantal verschillende plaattypes voor die onder gelijkaardige omstandigheden gebruikt kunnen worden. De kolommen stellen op hun beurt een aantal verschillende plaattypes voor die onder gelijkaardige omstandigheden gebruikt kunnen worden. Een leeg vakje duidt aan dat er voor de betreffende plaatfamilie en de voorziene toepassing geen specifieke technische klasse voorzien is. In dit geval kan er gekozen worden om een ander plaattype te gebruiken of binnen dezelfde familie te kiezen voor een plaat met betere prestaties (meestal diegene die links van het desbetreffende vakje in het organigram staat). Wanneer een bepaalde plaat nog niet kan voldoen aan een voorziene toestand, wordt dit aangegeven door een vakje met een rood kruis [1].

2.1.2 Binnenklimaatklassen

De technische klasse van de plaat is afhankelijk van het milieu waarin deze toegepast wordt. In de norm NBN EN 1995-1-1 wordt een bepaald onderscheid in de milieus gemaakt.

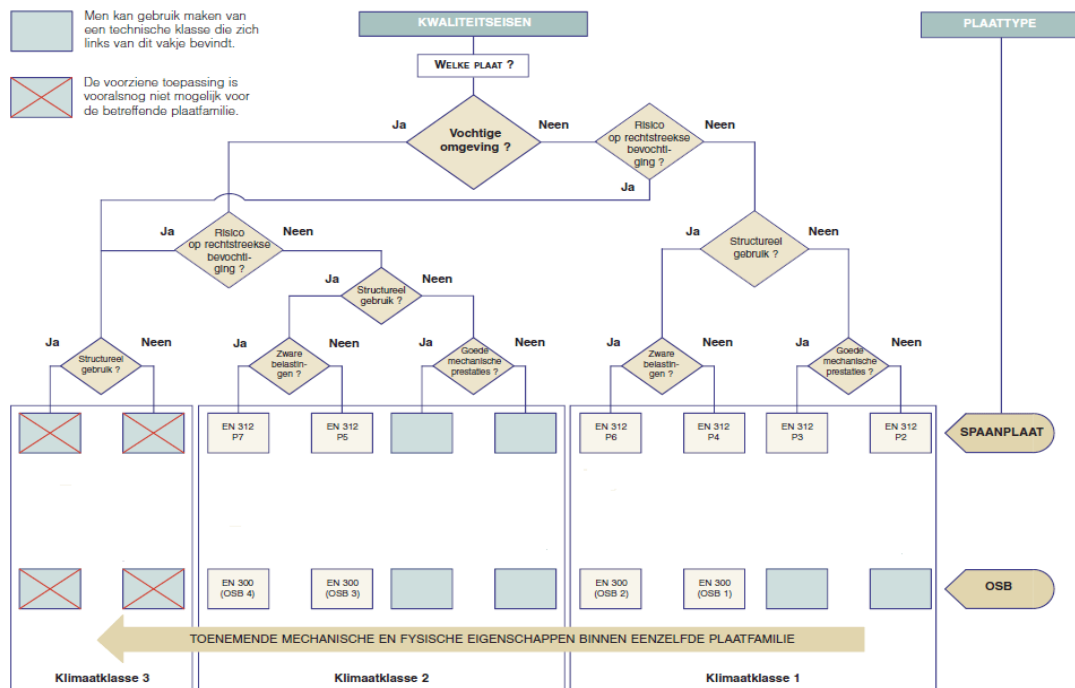
- Klimaatklasse 1 (droog milieu): milieu gekenmerkt door een vochtgehalte in het materiaal dat overeenkomt met een temperatuur van 20°C en een relatieve vochtigheid die slechts enkele weken van het jaar hoger is dan 65%.

Dit plaattype is ook geschikt voor gebruik in de risicoklasse voor biologische aantasting 1 volgens de norm NBN EN 335-3.

- Klimaatklasse 2 (vochtig milieu): milieu gekenmerkt door een vochtgehalte in het materiaal dat overeenkomt met een temperatuur van 20°C en een relatieve vochtigheid die slechts enkele weken van het jaar hoger is dan 85%. Dit plaattype is ook geschikt voor gebruik in de risicoklasse voor biologische aantasting 1 en 2 volgens de norm NBN EN 335-3.
- Klimaatklasse 3 (buitenmilieu): milieu waar de relatieve vochtigheid nog hoger ligt dan in voorgaande klimaatklassen. Een plaattype voor gebruik in een buitenmilieu is eveneens geschikt voor gebruik in de risicoklassen voor biologische aantasting 1, 2 en 3 volgens de norm NBN EN 335-3

In het organigram wordt naast de klimaatklassen, een onderscheid gemaakt tussen platen voor structurele en niet-structurele toepassingen:

- Structurele platen: deze platen kunnen worden aangeduid als 'werkende' platen. Deze zijn bestemd voor het ontwerp en de constructie van gebouwonderdelen die belastingen moeten kunnen overdragen zoals muren, vloeren, windverbanden, daken en I-profielen. Er wordt ook een onderscheid gemaakt tussen gewone structurele platen en platen die zware belastingen moeten opnemen.
- Niet-structurele platen: deze platen worden onder meer gebruikt voor de uitvoering van meubels of als materiaal voor afwerking. Ze kunnen verder onderverdeeld worden in platen met goede en beperkte mechanische prestaties.



Figur 2 Beslissingsboom plaatmateriaal [1]

2.2 Spaanplaat

Spaanplaat is een houtachtig materiaal dat opgebouwd is uit kleine deeltjes hout (spanen), waarvan de onderlinge hechting wordt verzekerd door een organisch bindmiddel. Tegenwoordig is de productie van spaanplaat sterk geëvolueerd. Waar spaanplaat vroeger 70 tot 100% vers hout bevatte, wordt zij op de dag vandaag gemaakt uitgaande van 60 tot 70% recyclagehout. Door het beperkte gebruik aan lijm beantwoorden de meeste spaanplaten wel aan de geldende Europese normen voor kwalificatie E1 in verband met de formaldehyde uitwasemingen [2].

- E1: formaldehydegehalte ≤ 8 mg per 100 g droog materiaal
- E2: formaldehydegehalte > 8 en ≤ 40 mg per 100 g droog materiaal

2.2.1 Types spaanplaat

Volgens NBN EN 312 zijn er zeven types spaanplaat gedefinieerd:

- P1: platen voor algemene toepassingen in droge omstandigheden
- P2: platen voor binneninrichtingen in droge omstandigheden
- P3: Niet structurele platen voor vochtige omstandigheden
- P4: Structurele platen voor droge omstandigheden
- P5: Structurele platen voor vochtige omstandigheden
- P6: Structurele platen voor industriële toepassingen in droge omstandigheden
- P7: Structurele platen voor industriële toepassingen in vochtige omstandigheden



Figuur 3 Spaanplaat (P5)[2]

De P1, P2 en P3 type spaanplaat worden in het algemeen gebruikt voor meubelindustrie. Spaanplaattypes P4-P7 zijn bedoeld voor het ontwerp en constructie van dragende structuren zoals wanden, vloer, dak en I-profielen. Voor droge omstandigheden kan de P4 spaanplaat gebruikt worden. Wanneer er vochtproductie tijdens of na de bouwphase kan optreden, wordt er gekozen voor de P5 spaanplaat. Deze is herkenbaar aan zijn groen gekleurd oppervlak.

2.2.2 Sterkte- en stijfheidseigenschappen spaanplaat

Voor P4 en P5 zijn volgens EN 312 en EN 12369-1 minimale rekenwaarden vastgelegd. De sterkte-eigenschappen zijn afhankelijk van het type spaanplaat en de dikte ervan. *Tabel 2* vermeldt de rekenwaarden van spaanplaat welke binnen deze thesis van belang zijn.

Tabel 2 Sterkte en stijfheidseigenschappen SP4 en SP5 (EN 312 en EN 12369-1)

Eigenschappen sectie	Karakteristieke sterkte (N/mm ²)		Karakteristieke densiteit (kg/m ³)	Gemiddelde elasticiteitsmodulus (N/mm ²)	
	Trek of druk evenwijdig met de vezelrichting			Trek of druk evenwijdig met de vezelrichting	
Dikte (mm)	$f_{t,0,k}$	$f_{c,0,k}$	ρ_k	$E_{t,0,mean}$	$E_{c,0,mean}$
Spaanplaat P4: structuurplaat in droge omstandigheden					
> 6 - 13	8,9	12,0	650	1800	1800
> 13 - 20	7,9	11,1	600	1700	1700
> 20 - 25	6,9	9,6	550	1600	1600
> 25 - 32	6,1	9,0	550	1400	1400
> 32 - 40	5,0	7,6	500	1200	1200
> 40	4,4	6,1	500	1100	1100
Spaanplaat P5: structuurplaat in vochtige omstandigheden					
> 6 - 13	9,4	12,7	650	2000	2000
> 13 - 20	8,5	11,8	600	1900	1900
> 20 - 25	7,4	10,3	550	1800	1800
> 25 - 32	6,6	9,8	550	1500	1500
> 32 - 40	5,6	8,5	500	1400	1400
> 40	5,5	7,8	500	1300	1300
De 5% karakteristieke waarden voor de stijfheid E_k zal genomen worden als 0.8 de gemiddelde hoeveelheid welke in de tabel gegeven staat.					



Trek of druk evenwijdig aan de vezelrichting

$f_{t,0,k}$, $f_{c,0,k}$ en $E_{t,0,mean}$, $E_{c,0,mean}$

2.3 OSB

OSB staat voor Oriented Strand Board. 'Oriented' wil zeggen dat de spanen bij de productie 'gericht' worden gestrooid, meestal in drie lagen. In beide buitenlagen, samen 50% van de plaatdikte, worden de schaafspanen gericht gestrooid in de lengterichting van de plaat. In de middenlaag worden de spanen dwars of willekeurig gericht. 'Strands' zijn schaafspanen, soms ook houtscheven genoemd.



Figuur 4 Oriented Strand Board [3]

2.3.1 Samenstelling

De verschillende lagen houtscheven zijn vervolgens onderling door een bindmiddel verbonden. OSB bestaat dus naast 97% hout ook uit 2,5-3% lijm en soms een kleine hoeveelheid paraffine en/of andere toeslagstoffen. In OSB/4 wordt doorgaans meer lijm (ca. 9%) gebruikt. De toegepaste lijmen zijn fenolformaldehydelijm, isocyanaatlijmen (MDI- of PMDI-lijm) en melanine-ureumfenolformaldehydelijm. Meestal worden de platen met één type lijm vervaardigd. Sommige producten gebruiken voor OSB/3 en OSB/4 alleen nog maar PMDI-lijm. Door het beperkte gebruik aan lijm beantwoorden de meeste OSB platen wel aan de geldende Europese normen voor kwalificatie E1 in verband met de formaldehyde uitwasemingen. Waarschuwing: HERHALING (lijm)

- E1: formaldehydegehalte ≤ 8 mg per 100 g droog materiaal
- E2: formaldehydegehalte > 8 en ≤ 40 mg per 100 g droog materiaal

Platen met klasse E2 worden nauwelijks meer toegepast. OSB die vervaardigd wordt met isocyanaatlijm krijgt automatisch klasse E1 toegewezen. Als toeslagstoffen worden brandvertragende of schimmelwerende middelen toegepast. Paraffine wordt gebruikt om de plaat waterafstotender te maken. Doorgaans zijn de platen verkrijgbaar in diktes van 8-25 mm [3][4].

2.3.2 Types OSB-plaat

OSB platen worden onderverdeeld in vier klassen:

- OSB/1: voor algemeen gebruik in droge omstandigheden
- OSB/2: voor dragende constructies in droge omstandigheden
- OSB/3: voor dragende constructies in natte omstandigheden

- OSB/4: voor zware dragende constructies in droge of vochtige omstandigheden

2.3.3 Sterkte- en stijfheidseigenschappen OSB

Voor OSB/2, OSB/3 en OSB/4 zijn volgens EN 300 en EN 12369-1 minimale rekenwaarden vastgelegd. De sterkte-eigenschappen zijn afhankelijk van het type OSB en de dikte ervan. *Tabel 3* vermeldt de rekenwaarden van OSB welke binnen deze thesis van belang zijn.

Tabel 3 Sterkte en stijfheidseigenschappen OSB (EN 300 en EN 12369-1)

Eigenschappen sectie	Karakteristieke sterkte (N/mm ²)		Karakteristieke dichtheid (kg/m ³)	Gemiddelde elasticiteitsmodulus (N/mm ²)	
	Trek of druk evenwijdig met de vezelrichting			Trek of druk evenwijdig met de vezelrichting	
Dikte (mm)	$f_{t,0,k}$	$f_{c,0,k}$	ρ_k	$E_{t,0,mean}$	$E_{c,0,mean}$
OSB/2 & OSB/3					
> 6 - 10	9,9	15,9	550	3800	3000
> 10 - 18	9,4	15,4	550	3800	3000
> 18 - 25	9,0	14,8	550	3800	3000
OSB/4					
> 6 - 10	11,9	18,1	550	4300	3200
> 10 - 18	11,4	17,6	550	4300	3200
> 18 - 25	10,9	17,0	550	4300	3200
De 5% karakteristieke waarden voor de stijfheid E_k zal genomen worden als 0.85 de gemiddelde hoeveelheid welke in de tabel gegeven staat.					



Trek of druk evenwijdig aan de vezelrichting

$f_{t,0,k}$, $f_{c,0,k}$ en $E_{t,0,mean}$, $E_{c,0,mean}$

2.4 Houtverbindingen

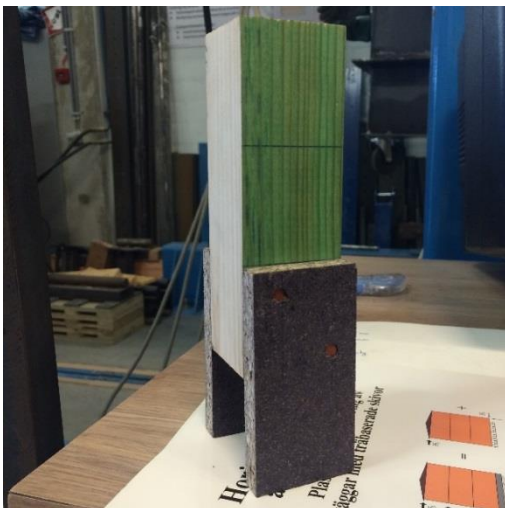
2.4.1 Algemeen

Houtverbindingen zijn een essentieel onderdeel binnen diverse houtconstructies. Je vindt ze in alle meubel-, schrijn- en timmerwerk. Timmerwerk, een onderdeel waar toch grote aandacht gaat naar de stabiliteit van de houtstructuur. De rol die de verbinding speelt in de algemene sterkte van de constructie is niet te onderschatten. De sterkte van de houtstructuur is normaal bepaald door de sterkte van de verbindingen: Hun stijfheid zal een grote invloed hebben op de verplaatsingen die de structuur ondergaat, en de geometrische eigenschappen van de onderdelen zullen eerder worden bepaald door de fysische eigenschappen van de verbinding dan door de mechanische eigenschappen van de verschillende houtmaterialen.

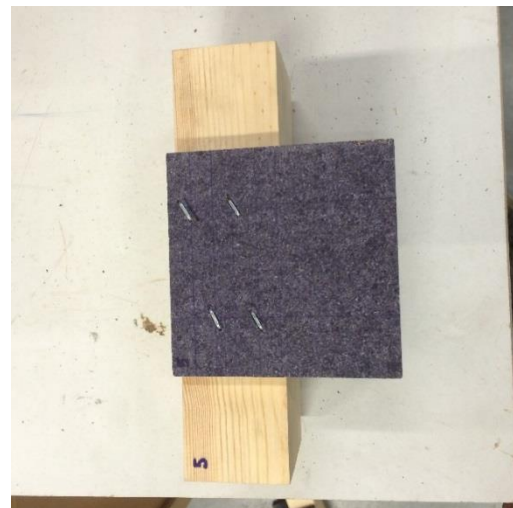
De meest voorkomende vorm binnen hout- op houtverbindingen is van het mechanische type:

- Verbindingen met metalen verbindingmiddelen;
 - Nagels
 - Schroeven
 - Deuvels
 - Bouten
 - Nieten

In deze thesis wordt de nadruk gelegd op hout- op houtverbindingen met nagels en nieten, met andere woorden: stiftvormige metalen verbindingmiddelen met geringe diameters.



(a) *Verbinding met nagels*



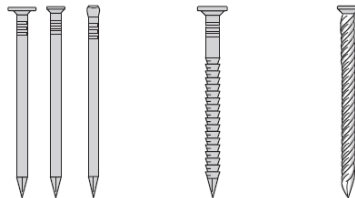
(b) *Verbinding met nieten*

Figuur 5 Verbinding met nagels en nieten

2.5 Stiftvormige metalen verbindingmiddelen

2.5.1 Nagels

Het gebruik van nagels is één van de meest gebruikte werkwijze voor het bevestigen van houten onderdelen in de houtskeletbouw. Nagels zijn slanke recht- vormige verbindingmiddelen, en verkrijgbaar in verschillende soorten lengtes, dwarsdoorsneden en afwerkingen. De meest gebruikte nagel is de heldere, vlotte, uit staaldraad vervaardigde gladde nagel. Deze nagel heeft een cirkelvormige doorsnede en is vervaardigd uit draad met een minimale treksterkte van 600 N/mm^2 . Nagels kunnen gewoon glad, geëtsd, gegalvaniseerd, verzinkt of polymeer gecoat zijn. De gewenste afwerking hangt af van de omgeving waarin het verbindingmiddel gebruikt wordt. In *figuur 6* zijn enkele types van nagels afgebeeld.



Figuur 6 Verschillende types nagels [5]

Genagelde verbindingen zijn eenvoudig te vormen en zijn uitermate geschikt voor licht belaste constructies waarbij verbindingen gevormd uit behoorlijk dunne onderdelen. Nagelverbindingen worden gewoonlijk gebruikt bij wand-, vloer- en dakstructuren.

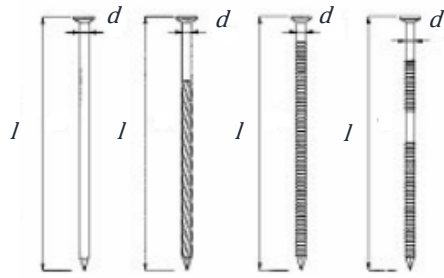
De mechanische eigenschappen van de nagel, zowel onder zijdelingse als uittrekkende belasting, kunnen verbeterd worden door mechanische vervorming van de schacht van de nagel om te vormen tot een ringvormige geringde of spiraalvormige schroefdraad schacht. Zulke nagels hebben een beduidende hogere uittrekweerstand dan gladde nagels met dezelfde geometrische eigenschappen.

2.5.1.1 Geometrie en vereisten

Nagels worden, zoals eerder aangehaald, vervaardigd uit staaldraad met een minimale treksterkte van 600 N/mm^2 bepaald volgens de EN 10218-1. De draad moet worden getrokken uit zowel niet- gelegeerd stalen staven geproduceerd volgens EN 10016 of uit draad, getrokken uit roestvast stalen staven, geproduceerd volgens EN 10088. Andere staalsoorten mogen worden gebruikt indien zij kunnen aantonen dat het staal ten minste gelijkwaardige mechanische eigenschappen heeft zoals het staal vermeld in bovengenoemde normen.

De nominale diameter d , van een spijker mag niet minder zijn dan 1,9 mm en mag niet groter zijn dan 8,0 mm.

Deze nominale diameter is de minimale buitenste dwarsdoorsnede van het niet geprofileerde deel. Voor een grafisch beeld is *figuur 7* een hulpmiddel [5].



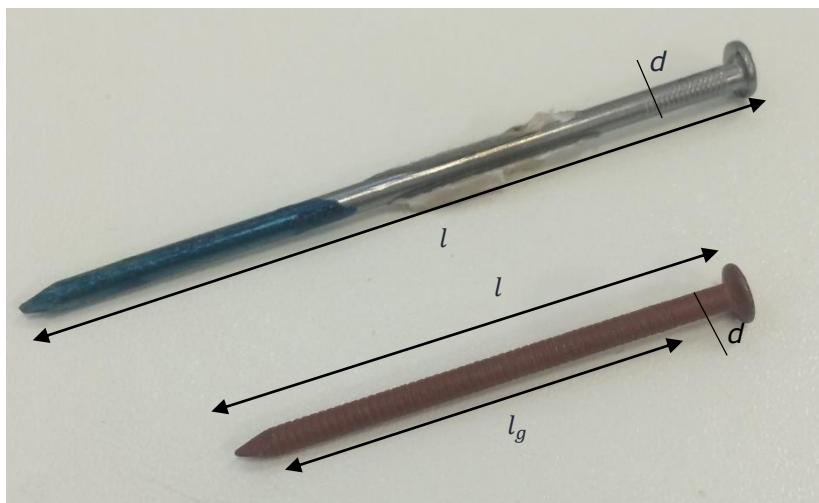
Figuur 7 Nominale diameter en lengte voor nagels [5]

2.5.1.2 Mechanische eigenschappen van de verbindingsmiddelen

Om de mechanische sterkte van nagels aan te duiden, worden de volgende kenmerkende eigenschappen in de EC5 gebruikt:

- Karakteristiek vloeimoment $M_{y,Rk}$
- Karakteristieke uittreksterkte $f_{ax,k}$
- Karakteristieke doortreksterkte $f_{head,k}$
- Karakteristieke treksterkte $f_{tens,k}$

Voor alle types van nagels, zowel geprofileerde als gladde nagels, wordt het karakteristieke vloeimoment $M_{y,Rk}$ van de nagel bepaald zoals beschreven in EN 409. De karakteristieke uittreksterkte $f_{ax,k}$ en de doortreksterkte $f_{head,k}$ kunnen experimenteel worden bepaald zoals beschreven in respectievelijk EN 1382 en EN 1383. In deze laatste staat ook de testprocedure beschreven voor het experimenteel verkrijgen van de treksterkte $f_{tens,k}$. In verdere hoofdstukken zal elk relevant mechanisch kenmerk apart uitgebreid besproken worden.



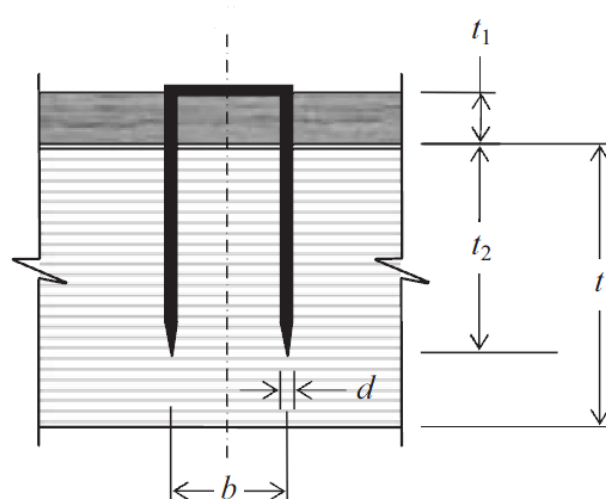
Figuur 8 Gebruikte nagels

2.5.2 Nieten

Omdat nieten en nagels gelijkaardige kenmerken hebben, zal de berekening van de sterkte van een geniete verbinding gelijkaardig zijn aan die met nagels. De regels toegepast op nagels conform EC5 zijn van toepassing op (quasi-) ronde of rechthoekige nieten met afgeschuinde uiteinden met een al dan niet symmetrische punt. De rekenwaarde van één niet met bepaalde diameter zal gelijk zijn aan twee keer de rekenwaarde van een nagel met diezelfde diameter mits aan de geometrische eisen voldaan wordt.

2.5.2.1 Geometrie en vereisten

Nieten worden gemaakt van staaldraad met een minimumtreksterkte van 800 N/mm^2 . Voor de berekening van de diameter zal de vierkantswortel genomen worden van het product van beide afmetingen. Zoals te zien in *figuur 9* bestaat een niet uit twee benen en een rug.



Figuur 9 Geometrie van een niet [9]

De rug b van de niet behoort ten minste $6d$ te zijn terwijl de hechtlengthe t_2 minstens $14d$ moet zijn. Een andere geometrische eis is dat de rug van de niet een hoek maakt met de vezelrichting groter dan 30° . Indien hieraan niet voldaan wordt, zal de rekenwaarde op afschuiving vermenigvuldigd moeten worden met een factor $0,7$.

2.5.2.2 Mechanische eigenschappen van nieten

Om de mechanische sterkte van nagels aan te duiden worden dezelfde kenmerkende eigenschappen gebruikt als diegene voor nagels.

2.6 Sterkte van op afschuiving belaste verbinding

2.6.1 Sterkte van de verbinding

Zoals eerder vermeld, wordt in moderne houtstructuren het draagvermogen van de gehele structuur vaak bepaald door de verbindingen met stiftvormige verbindingsmiddelen. Over het algemeen bestaat een structuur uit meerdere verbindingsmiddelen. Bij een verbinding met meerdere verbindingsmiddelen kan men vaststellen dat de effectieve sterkte van de verbinding lager ligt dan wanneer men de sterkte van de verbinding berekent door de sterkte van één enkel verbindingsmiddel te vermenigvuldigen met het aantal verbindingsmiddelen.

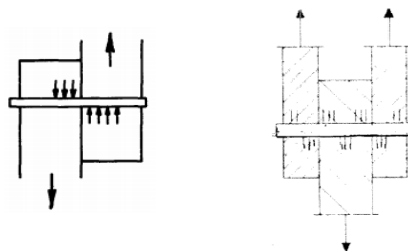
Om hiermee rekening te houden, wordt het begrip 'aantal effectief meewerkende verbindingsmiddelen' (n_{ef}) geïntroduceerd. Dit aantal is lager dan het totaal aantal verbindingsmiddelen (n) in een verbinding. De effectieve karakteristieke sterkte $F_{v,ef,Rk}$ van geplaatste verbindingsmiddelen die evenwijdig aan de vezelrichting én in één rij staan, zijn opgenomen als volgt:

$$F_{v,ef,Rk} = n_{ef} \cdot F_{v,Rk} \quad (2-1)$$

Door voorgaande uitdrukking wordt rekening gehouden met het feit dat de sterkte van een verbinding ($F_{v,ef,Rk}$) met meer dan één verbindingsmiddel van hetzelfde type en afmeting (n), kleiner kan zijn dan de som van de sterkte van elk verbindingsmiddel afzonderlijk ($F_{v,Rk}$). Dit fenomeen wordt in een later hoofdstuk verder uitgelegd.

2.6.2 Sterkte van één verbindingsmiddel: op afschuiving belaste nagels

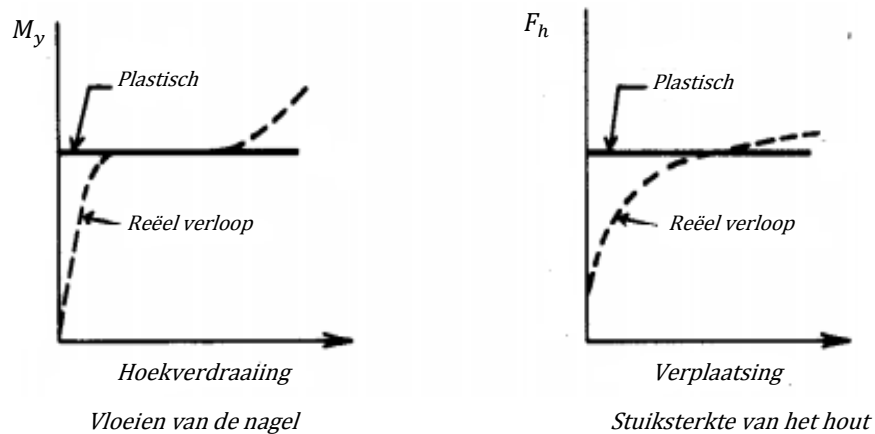
$F_{v,Rk}$ is een begrip dat al doorheen de jaren veel bestudeerd werd. In de meeste ontwerpmethodes wordt er gesproken van het zogenaamde Johansen's Yield Model [6][7]. Het ontwerp is gebaseerd op het werk van K. W. Johansen, beginnend in 1941. Deze 'simpele' theorie gaat ervan uit dat het falen niet gebeurt door brosse breuk zoals het splijten van het hout, maar door vloeien van het bevestigingsmiddel. Men gaat ervan uit dat wanneer voldaan wordt aan de minimale houtafmetingen/eind- en randafstanden, falen door brosse breuk niet voorkomt. We kunnen bij verbindingen onderscheid maken tussen twee soorten afschuivingen: enkel- of dubbelsnedig. In *figuur 10* zien we het verschil tussen een zogenaamde enkel- of dubbelsnedige afschuiving.



Figuur 10 Enkel- en dubbelsnedige afschuiving [EC5]

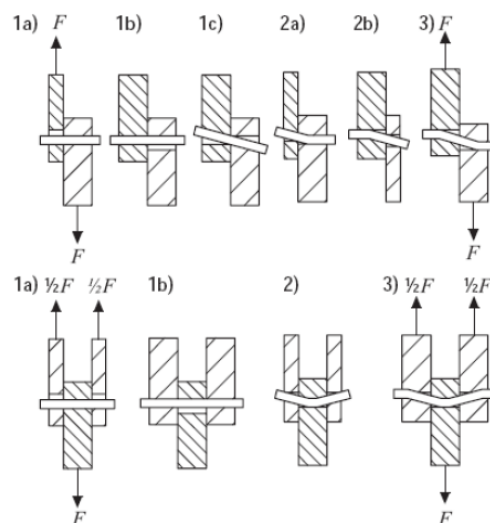
2.6.3 Johansen's yield model

Zoals eerder vermeld, veronderstelt het yield model dat zowel het stiftvormige verbindingsmiddel onder buiging als het hout onder stuikdruk toegeven onder een volledige plastische verplaatsing. Onderstaande grafieken geven het plastische en reële verloop van beide materialen weer.



Figuur 10 Plastisch en reëel verloop nagel-hout [8]

De mogelijke bezwijkmechanismen voor zowel enkel- en dubbelsnedig zijn in *figuur 11* weergegeven. Bij een enkelsnedige verbinding, zal de stift ofwel recht blijven (mechanisme 1) ofwel buigen in één of twee scharnierpunten (mechanisme 2 en 3 respectievelijk). Voor dubbelsnedige afschuiving, komt bezwijkmechanisme 1 overeen met een translatiebeweging van de stift in de zijdelingse materialen of in het middelste materiaal. In bezwijkmechanisme 2 komen twee scharnierpunten voor in het middelste materiaal terwijl de stift recht blijft in de zijdelingse materialen. In bezwijkmechanisme 3 zijn er vier scharnierpunten gevormd binnen de stift: twee in het middelste materiaal en één in elk zijdelings deel [8].



Figuur 11 Bezwijkmechanismen enkel- en dubbelsnedig [8]

Afhankelijk van het mogelijk bezwijkmechanisme wordt de sterkte van één verbindingsmiddel ($F_{v,Rk}$) bepaald door één van onderstaande vergelijkingen. Omdat bij het ontwerp niet gekend is welk bezwijkmechanisme precies gaat optreden, dient men de minimum waarde uit onderstaande formules te nemen.

- Voor verbindingsmiddelen die enkelsnedig werken:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2-2) \\ \frac{f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2-3) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2-4) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2-5) \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2-6) \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2-7) \end{array} \right.$$

- Voor verbindingsmiddelen die dubbelsnedig werken:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2-8) \\ \frac{0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2-9) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2-10) \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (2-11) \end{array} \right.$$

Met:

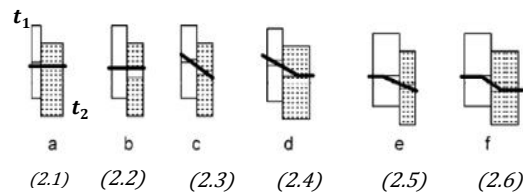
$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$$

Waarin:

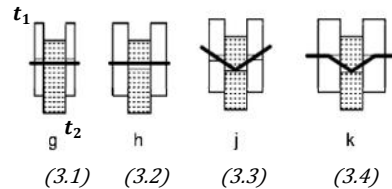
$F_{v,Rk}$	karakteristieke sterkte per snede en per verbindingsmiddel
t_i	dikte van het hout of de hecht lengte met i voor de waarde 1 of 2
$f_{h,i,k}$	karakteristieke stuiksterkte van het houten element i
d	diameter van het verbindingsmiddel
$M_{y,Rk}$	karakteristieke vloeimoment van het verbindingsmiddel
β	verhouding van de stuiksterkten van de elementen
$F_{ax,Rk}$	karakteristieke axiale uittreksterkte van het verbindingsmiddel

Figuur 12 dient ter verduidelijking om de verschillende bezwijk-mechanismen te linken met hun corresponderende formule. De hechtlengthe van het bevestigingsmiddel in het middelste materiaal wordt aangeduid met t_2 . De dikte van het zijdelingse element krijgt de benaming t_1 . De verhouding tussen de stuksterkte van beide materialen wordt weergegeven door β . Wanneer de verbinding bestaat uit één enkel materiaal is β natuurlijk "1". Het belang van deze factor is om de verhouding van twee verschillende stuksterktes van materialen in rekening te brengen. In deze thesis zullen enkel verbindingen onderhevig aan enkelsnedige afschuiving behandeld worden.

Enkelsnedige afschuiving



Dubbelsnedige afschuiving



Figuur 12 Bezwijkmechanismen verduidelijking [9]

Uit voorgaande vergelijking wordt duidelijk welke parameters de sterkte van een verbindingsmiddel bepalen. In verdere hoofdstukken wordt elke parameter afzonderlijk besproken. Verder dienen nog bepaalde correcties doorgevoerd worden op het zogenaamd koordeffect. In de uitdrukkingen op voorgaande pagina is de eerste term aan de rechterzijde de sterkte volgens de theorie van Johansen (zoals eerder veelvuldig besproken), terwijl de tweede term $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$ de bijdrage is van het koordeffect. Meer uitleg over het koordeffect is terug te vinden in het desbetreffende hoofdstuk. De bijdrage aan sterkte ten gevolge van dit koordeffect behoort volgens de EC5 te zijn beperkt tot de volgende percentages van het Johansendeel:

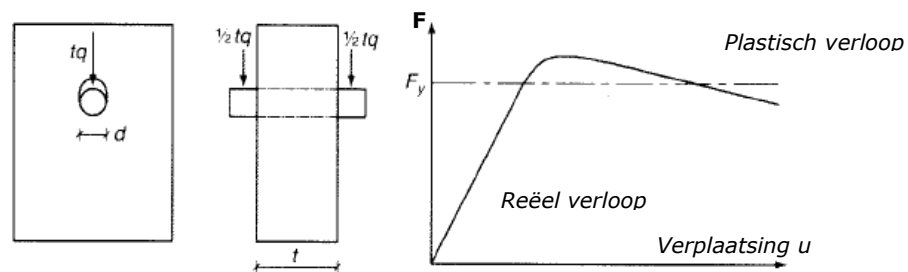
- Ronde gladde nagels : 15%
- Vierkante gladde of geprofileerde nagels : 25%
- Andere (behandelde) nagels : 50%
- Schroeven : 100%
- Bouten : 25%
- Deuvels : 0%

Bij verbindingsmiddelen die enkelsnedig werken, wordt voor de karakteristieke uittreksterkte $F_{ax,Rk}$ de kleinste uittreksterkte genomen van de twee elementen waaruit de verbinding bestaat.

2.7 Parameters sterkte van de verbinding

2.7.1 Stuiksterkte

Bij het belasten van de verbinding zal het stiftvormige verbindingsmiddel zich gedragen als een "balk" die lateraal belast wordt door een constante contactdruk gedefinieerd als de lading "q" per eenheidslengte. De relatie tussen de contactdruk en de verplaatsing wordt duidelijk wanneer men *figuur 14* bekijkt. Het stiftvormige verbindingselement zit doorheen het houten element en is onderhevig aan een bepaalde kracht "F". *Figuur 13* geeft eveneens een algemeen beeld van het kracht-verplaatsingsdiagram. In het begin is er een lineaire relatie tussen de kracht en de verplaatsing, gevolgd door een gebogen beweging waarna de kracht lichtelijk afneemt terwijl de verplaatsing toeneemt.



Figuur 13 Stift onderhevig aan een kracht [9]

De stuiksterkte is dus de sterkte tegen de gemiddelde drukspanning bij maximale belasting in een stuk hout onder invloed van een stijf lineair bevestigingsmiddel. Verder is de as van het verbindingsmiddel loodrecht tot het houtoppervlak en wordt hij loodrecht belast door een kracht. De stuiksterkte wordt bijgevolg gedefinieerd door:

$$f_h = \frac{F_{max}}{d \cdot t} \quad (2-12)$$

Waarin:

f_h	stuiksterkte van het materiaal
F_{max}	maximale kracht
d	diameter van de stift
t	dikte van het houten element

Met "stuik" wordt de afstand aangeduid die de stift drukt doorheen het houten materiaal. Vanwege het complexe cellulaire karakter van houten materialen is de stuiksterkte (sterkte tegen inbedding) geen materiaaleigenschap. Het is meer een systeemeigenschap die afhangt van een combinatie van verschillende factoren, zoals het type verbindingsmiddel dat gekozen wordt en het soort materiaal.

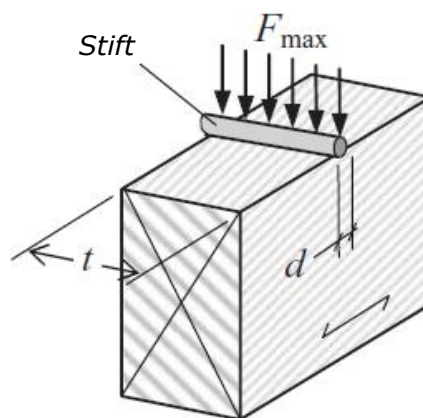
Uit resultaten van experimenteel onderzoek door verschillende onderzoekers doorheen de jaren zijn er vergelijkingen voor de karakteristieke stuijsterkte $f_{h,k}$ bekomen. Deze vergelijkingen zijn afhankelijk van het gekozen hout of op hout gebaseerd materiaal en de verschillende metalen stiftvormige verbindingsmiddelen.

Samengevat kunnen we stellen dat de stuijsterkte eerst en vooral afhangt van de weerstand tegen het inbedden van de stift in het houten element (en daardoor van de densiteit ρ van het hout) en van de hoek α tussen de kracht en de vezelrichting. Natuurlijk speelt de diameter van de gekozen stift ook een belangrijke rol. In onderstaande *tabel 4* zijn de vergelijkingen te vinden die binnen EC5 voor de berekening van de karakteristieke stuijsterkte gelden wanneer men nagels of nieten gebruikt.

Tabel 4 Karakteristieke stuijsterkte $f_{h,k}$ bij nagels [EC5]

Voorwaarde	$f_{h,k}$ (N/mm ²)	
Voor Hout of LVL verbindingen met nagels tot 8 mm diameter		
Niet voorgeboord	$f_{h,k} = 0.082 \rho_k d^{-0.3}$	(2-13)
Voorgeboord	$f_{h,k} = 0.082(1 - 0.01d)\rho_k$	(2-14)
Voor paneel- op houtverbindingen met nagels waarvan de diameter van de nagelkop ten minste 2d betreft en het paneelmateriaal is:		
Multiplex	$f_{h,k} = 0.11 \rho_k d^{-0.3}$	(2-15)
Hardboard	$f_{h,k} = 30 d^{-0.3} t^{0.6}$	(2-16)
Spaanplaat en OSB	$f_{h,k} = 65 d^{-0.7} t^{0.1}$	(2-17)

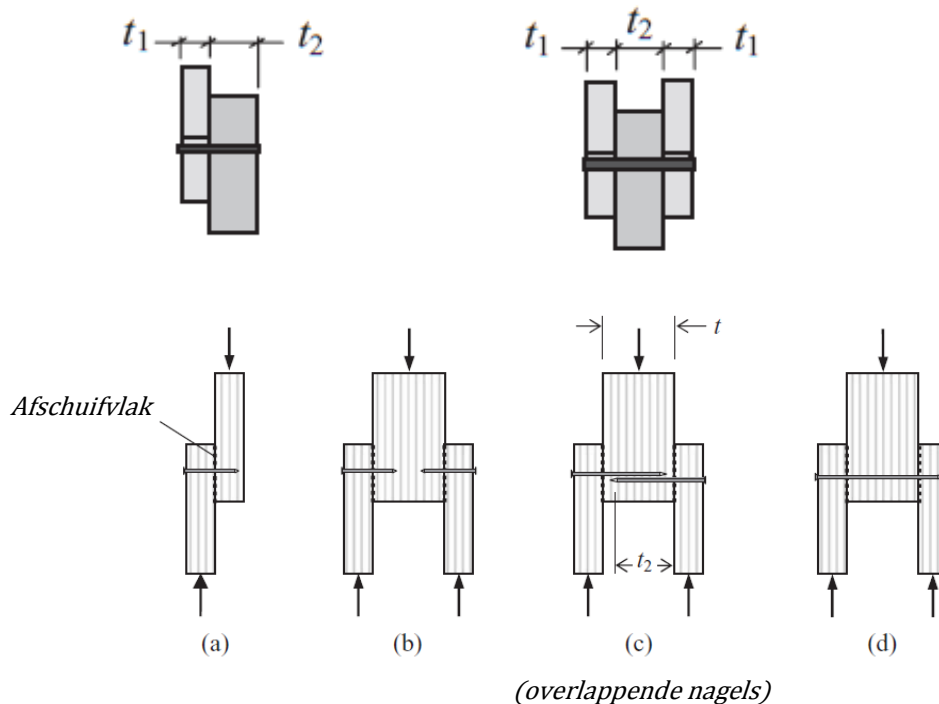
d is de diameter van de nagel, bout, niet of deugel (in mm). ρ_k is de karakteristieke volumieke massa van het hout (in kg/m³). t is de plaatdikte (mm)



Figuur 14 Stuijsterkte op houtachtig materiaal [9]

2.7.2 Geometrische eigenschappen van het hout: diktes t_1 en t_2

Bij een verbinding worden de onderdelen benoemd als zijnde onderdeel 1 en onderdeel 2. Onderstaande *figuur 15* verklaart nog eens de situatie wanneer een paneel- op houtverbinding verbinding gevormd wordt door twee onderdelen te bevestigen met nagels of nieten.



Verbindingen (a), (b) en (c) zijn voorbeelden van enkelsnedige afschuiving met één afschuivingsvlak per verbindingsmiddel. Wanneer nagels gebruikt worden, kunnen deze overlappen zoals te zien in (c). verbinding (d) is een voorbeeld van dubbelsnedige afschuiving met twee afschuivingsvlakken per verbindingsmiddel

Figuur 15 Metalen stiftvormige verbindingsmiddelen met enkel- of dubbelsnedig afschuivingsvlak [9]

Voor nagels of nieten kunnen we dus stellen:

- t_1 is:
 - De dikte van het materiaal waar de nagel met de kopzijde is in enkelsnedige afschuiving
 - De minimum dikte van de materialen waar de nagel met de kopzijde zit bij dubbelsnedige afschuiving
- t_2 is:
 - Het aandeel van de dikte van het materiaal waar de puntzijde van de nagel zit bij enkelsnedige afschuiving
 - De dikte van het middelste materiaal bij een verbinding bij dubbelsnedige afschuiving

'Het aandeel van de dikte van het materiaal waar de puntzijde van de nagel zit' is de afstand t_2 die de nagel in dat betreffende materiaal zit terwijl t_1 de gehele dikte van het materiaal is waar de kop in zit [9].

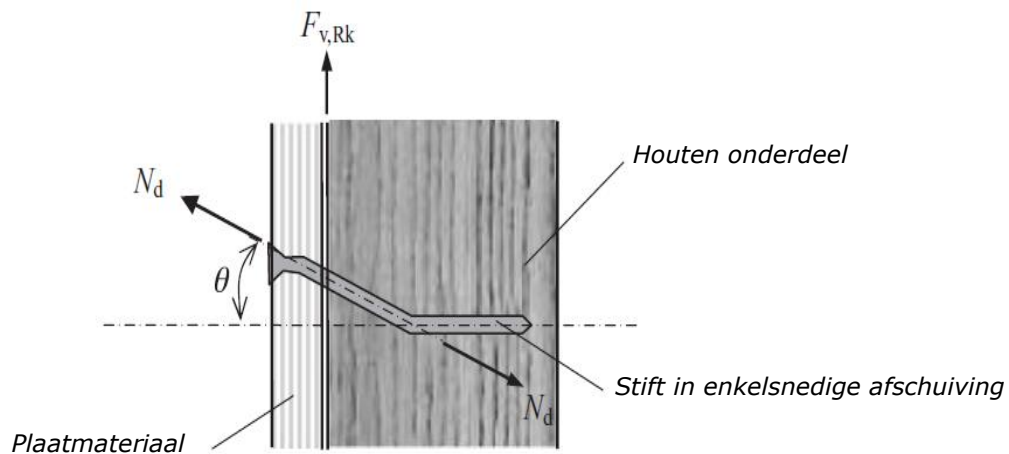
2.7.3 Axiale uittreksterkte & koordeffect

2.7.3.1 Het koordeffect

De traditionele vergelijkingen volgens Johansen voor elk bezwijkmechanisme kunnen worden afgeleid voor verbindingen in enkel- en dubbelsnedige afschuiving door het gebruik maken van statische analyse of door de methode van virtuele arbeid. De methode van virtuele arbeid wordt gebruikt in de plastische analyse van staalstructuren. Om de vergelijkingen te vereenvoudigen, kan de verhouding van de karakteristieke stuksterkte van het tweede onderdeel in de verbinding ($f_{h,2,k}$) tot de karakteristieke stuksterkte van het eerste onderdeel ($f_{h,1,k}$) geschreven worden als:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (2-18)$$

Bij het afleiden van de oorspronkelijke vergelijkingen werd de wrijvingskracht, die tussen de delen van de verbinding aanwezig is, alsook de uittreksterkte van de verbindingsmiddelen genegeerd. In de EC5 worden de vergelijkingen van Johansen gezien als de basisvergelijkingen om de sterkte van de verbinding te bepalen. Bij de bezwijkmechanismen waar het vloeien van het bevestigingsmiddel voorkomt, zijn de vergelijkingen aangepast om het wrijving- en uittrekeffect in te rekenen.



Figuur 16 verbinding met een stiftvormig verbindingsmiddel en enkelsnedige afschuiving onderhevig aan een toenemende belasting [9]

Figuur 16 kan helpen om de optredende effecten te begrijpen. Denk aan een enkelsnedige afschuiving bij een typische paneel- op houtverbinding. Deze verbinding komt tot stand door een enkele stiftvormige bevestigingsmiddel uit metaal.

Er wordt nu verondersteld dat onder een laterale afschuivingskracht (evenwijdig met de vezelrichting van het hout) op de verbinding, het bevestigingsmiddel begint te vloeien in zowel het plaatmateriaal als in het hout.

Het bevestigingsmiddel ondervindt een rotatie gelijk aan hoek θ , zoals te zien op *figuur 16* en de wrijvingscoëfficiënt tussen het plaat- en houtmateriaal is gelijk aan μ . Doordat het verbindingsmiddel onderworpen is aan buiging, zal ook deze een trekkracht N_d ondergaan door het uittrekeffect tijdens het belasten. Deze kracht kan ontleed worden in twee componenten:

- Een verticale component: $N_d \cdot \sin(\theta)$
- Een horizontale component: $N_d \cdot \cos(\theta)$

De horizontale component drukt het plaatmateriaal in het hout en biedt dus een bijkomende weerstandskracht ' $\mu N_d \cdot \cos(\theta)$ ' dat geïntroduceerd wordt ten gevolge van wrijving. De kracht binnen de verbinding zal vervolgens gelijk zijn aan de som van alle verticale componenten in de verbinding:

$$F_{v,rk} = N_d \cdot (\sin(\theta) + \mu \cdot \cos(\theta)) + \text{Johansen's deel } (F_{y,rk}) \quad (2-19)$$

Bij het bezwijken van de verbinding zal N_d de terugtrekkingscapaciteit zijn van het verbindingsmiddel. In de EC5 is daarom de component ' $\mu \cdot N_d \cdot \cos(\theta) = \frac{F_{ax,rk}}{4}$ ' opgenomen met $F_{ax,rk}$ de uittreksterkte van het verbindingsmiddel. De wrijvingscoëfficiënt μ is in het geval van hout 0,25. De verticale component ' $N_d \cdot \sin(\theta)$ ' is niet in de vergelijkingen opgenomen omdat men niet zeker is van de bijdrage in weerstand tegen afschuiving. Wanneer al deze effecten in rekening gebracht worden, kunnen we $F_{v,rk}$ schrijven als:

$$F_{v,rk} = 1,05/1,15 \cdot \text{Johansen's deel} + \frac{\text{uittrekcapaciteit}}{4} \quad (2-20)$$

In EC5 worden factoren gebruikt van 1,05 waar het verbindingsmiddel gedeeltelijk vloeit en 1,15 waar het volledig vloeit om de verschillende veiligheidsfactoren van de gebruikte materialen (staal en hout) uit te middelen. Dit is nodig omdat de karakteristieke waarde nog dient vermenigvuldigd te worden met de modificatiefactor en gedeeld door de veiligheidsfactor voor houten verbindingen. De uitwerking van deze factoren is behandeld in de *Bijlage A* Om onderscheid te maken tussen het Johansen's deel en de combinatie van uittrekking en wrijvingskrachten binnen een verbinding, wordt de laatste term aangeduid als het koordeffect. Binnen EC5 wordt hier alleen maar naar gerefereerd als de term ' $\frac{F_{ax,rk}}{4}$ ' die de bijdrage aanduidt van dit effect.

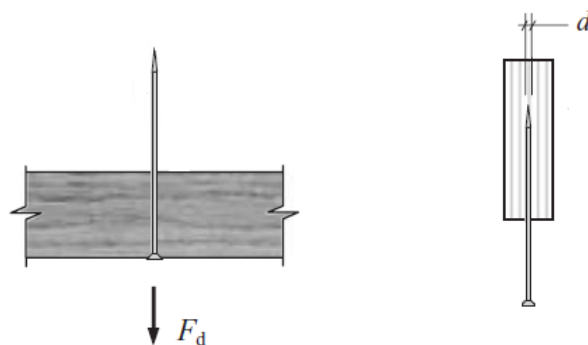
Zoals eerder vermeld, is $F_{ax,rk}$ de karakteristieke axiale uittreksterkte van het bevestigingsmiddel zoals gedefinieerd binnen EC5 [9].

2.7.3.2 Axiale uittreksterkte/ uittrekcapaciteit van het bevestigingsmiddel

De uittrekcapaciteit van axiaal belaste nagels, $F_{ax,Rk}$, is afhankelijk van het type nagel of het type niet dat gebruikt wordt. Gladde ronde nagels geven het minst sterk resultaat terwijl bij geprofileerde nagels de uittrekcapaciteit sterk vergroot wordt doordat ze behandeld zijn. Echter, onafhankelijk van het type, worden nagels niet beschouwd in staat te zijn om axiale belasting in kops hout op te nemen. Sterker nog, EC5 verbiedt het gebruik van gladde nagels bij axiale belasting bij permanente of langdurige belasting. Indien geprofileerde nagels gebruikt worden, mag alleen het geprofileerde deel van de nagel in rekening genomen worden bij het bepalen van de sterkte.

Er zijn twee mogelijke bezwijkmechanismen bij axiale belasting:

- Het uittrekken van de puntzijde van de nagel uit het hout
- Het doorponsen van de nagelkop doorheen het plaatmateriaal.



(a) Uittrekken van puntzijde uit hout (b) Doorponsen kop nagel

Figuur 17 Bezwijkmechanismen bij axiale belasting [9]

Nagels kunnen loodrecht op de vezelrichting of schuin in het hout genageld worden. Schuine nageling wordt in het kader van deze thesis niet behandeld. Voor nagels overeenstemmend met EN 14592, wordt alleen het geprofileerde gedeelte van de nagel geacht de axiale belasting over te dragen. Bijgevolg draagt alleen de doortreksterkte van de nagelkop bij aan de capaciteit tegen het doorponsen. Bij gladde nagels zal de uittreksterkte door de hechtlengthte van de puntzijde bepaald worden, terwijl de doortreksterkte zowel de sterkte tegen doorponsen als de schachtwrijvingsweerstand op de nagelkop in rekening kan brengen.

Wanneer een nagel of een niet belast wordt door een axiale kracht F_d , zal aan de volgende voorwaarde moeten voldaan worden:

$$F_d \leq F_{ax,Rd} \quad (2-21)$$

De rekenwaarde voor de uittreksterkte van de nagel of van het been van de niet $F_{ax,Rd}$ is bekomen uit de volgende vergelijking:

$$F_{ax,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot F_{ax,Rk}}{\gamma_m} \quad (2-22)$$

De karakteristieke uittreksterkte $F_{ax,Rk}$ van de nagel of van het been van de niet wordt vervolgens bepaald door de kleinste van de waarden gevonden uit de volgende uitdrukkingen:

- Voor andere dan gladde nagels (EN 14592)

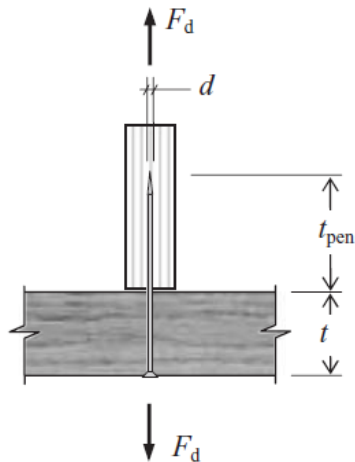
$$F_{ax,Rk} = \min \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 \end{cases} \quad (2-23)$$

- Voor gladde nagels:

$$F_{ax,Rk} = \min \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 + f_{ax,k} \cdot d \cdot t \end{cases} \quad (2-24)$$

Waarin:

$f_{ax,k}$	karakteristieke uittreksterkte aan de puntzijde
$f_{head,k}$	karakteristieke doortreksterkte van de nagelkop
d	diameter van de nagel of niet
t	dikte van het element dat de kopzijde bevat
d_h	diameter van de nagelkop
t_{pen}	hechtlengthte/lengte geprofileerd deel element met puntzijde



Figuur 18 Nageling loodrecht op de vezelrichting [9]

Waarden voor de karakteristieke uittreksterkte $f_{ax,k}$ en de karakteristieke doortreksterkte $f_{head,k}$ kunnen bepaald worden door experimentele testen. Wanneer het gaat over gladde nagels, kunnen eventueel ook vergelijkingen uit de EC5 geraadpleegd worden. In tabel 5 zijn ook de correctiefactoren opgenomen in functie van de hechtlengte t_{pen} .

Tabel 5 Vergelijkingen $f_{ax,k}$ in functie van de hechtlengte [EC5]

Voorwaarde	Vergelijking
	$f_{ax,k} = 20 \times 10^{-6} \rho_k^2$ (2-25)
Gladde nagels: Hechtlengte ten minste 12d	$f_{head,k} = 70 \times 10^{-6} \rho_k^2$ (2-26)
Gladde nagels: Hechtlengte < 12d	$f_{ax} = factor * (...)$ $factor = \left(\left(\frac{t_{pen}}{4d} \right) - 2 \right)$ (2-27)
Gladde nagels: Hechtlengte = 8d	$f_{ax} = factor * (...)$ $factor = 0$
Geprofileerde nagels: Hechtlengte ten minste 8d	<i>Niet opgenomen in EC5</i>
Geprofileerde nagels: Hechtlengte te minste 6d	$f_{ax} = factor * (...)$ $factor = \left(\left(\frac{t_{pen}}{2d} \right) - 3 \right)$ (2-28)

De karakteristieke uittreksterkte $f_{ax,k}$ en de karakteristieke doortreksterkte $f_{head,k}$ kunnen in het geval van gladde nagels berekend worden door vergelijkingen die in de EC5 zijn opgenomen.

- $f_{ax,k} = 20 \times 10^{-6} \rho_k^2$ (2-29)

- $f_{head,k} = 70 \times 10^{-6} \rho_k^2$ (2-30)

Waarin:

ρ_k volumieke massa van het hout

Uit *tabel 5* blijkt ook dat wanneer de hecht lengte kleiner is als $12d$, de uittreksterkte van de nagel f_{ax} lineair verminderd moet worden door te vermenigvuldigen met een correctiefactor. Wanneer de hecht lengte van de gladde nagel $8d$ of minder bedraagt, zal deze correctiefactor 0 bedragen.

Deze factor zorgt er dan voor dat de uittrekcapaciteit van de nagel nul zal bedragen. Dezelfde procedure moet gevolgd worden bij de doortreksterkte.

Bij geprofileerde nagels moet het geprofileerde gedeelte minstens $6d$ bedragen. De minimum hecht lengte moet eveneens ten minste $6d$ bedragen. Wanneer een geprofileerde nagel een hecht lengte van $8d$ bereikt, wordt de volledige uittreksterkte bereikt. Wanneer deze hecht lengte niet gehaald wordt, dient de uittreksterkte te zijn vermenigvuldigd met de bijhorende correctiefactor zoals beschreven in *tabel 5*. Er zijn in EC5 geen vergelijkingen opgenomen om de karakteristieke uittreksterkte te berekenen van geprofileerde nagels. Er wordt wel door de EC een minimum waarde voor de uittreksterkte van geprofileerde nagels vermeld. Men spreekt pas over geprofileerde nagels wanneer zij een geprofileerde lengte bezitten van minimum $4,5d$ en een karakteristieke uittreksterkte $f_{ax,k} \geq 6N/mm^2$ behalen bij hout met een karakteristieke densiteit van $350 kg/m^3$ bij testcondities ($20^\circ C$ en $65\% RV$). Er kan dus altijd veilig gerekend worden met $f_{ax,k} = 6 N/mm^2$ wanneer geprofileerde nagels gebruikt worden.

2.7.3.3 Beperking bijdrage koordeffect

Zoals eerder aangegeven, zal er een beperking op het aandeel $\frac{F_{ax,rk}}{4}$ doorgevoerd worden in functie van het soort bevestigingsmiddel. De grenswaarde wanneer deze beperking in werking treedt, wordt aangegeven door een percentage op het Johansen's deel ($F_{y,rk}$), die eventueel versterkt wordt door een wrijvingsfactor bij het optreden van het koordeffect. Dit grenspercentage wordt in de EC5 gegeven voor elk soort bevestigingsmiddel:

$$percentage \leq \left\{ \begin{array}{ll} 15\% & \text{voor ronde nagels} \\ 25\% & \text{voor vierkante nagels} \\ 50\% & \text{voor andere nagels} \\ 100\% & \text{voor schroeven} \\ 25\% & \text{voor bouten} \\ 0\% & \text{voor deuvels} \end{array} \right\}$$

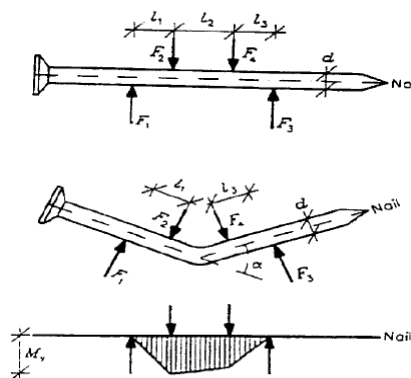
2.7.4 Vloeimoment van het verbindingsmiddel

In de originele vergelijkingen van Johansen werd aangenomen dat het vloeimoment het moment was op de elasticiteitsgrens van het verbindingsmiddel en dat deze verkregen werd door vermenigvuldiging van de vloeigrens met de elasticiteitsmodulus van dat verbindingsmiddel. Dit gaf een onderste grenswaarde. In daaropvolgende ontwikkeling van deze theorie door andere onderzoekers werd de elastoplastische sterktemethode gebruikt. Deze methode houdt rekening met de hoeveelheid rotatie bij bezwijking van verschillende soorten verbindingsmiddelen, de treksterkte van het verbindingsmiddel en de variatie in materiaalsterkte [9]. Vanuit deze onderzoeken naar het karakteristieke vloeimoment $M_{y,Rk}$ voor verschillende soorten metalen verbindingsmiddelen zijn in EC5 volgende vergelijkingen opgenomen:

Tabel 6 EC5 vergelijkingen voor het vloeimoment $M_{y,Rk}$ [EC5]

Verbindingsmiddel	$M_{y,Rk}$ (Nmm)
Nagels	
Voor ronde nagels	$0.3 f_u d^{2.6}$ (2-31)
Voor vierkante en geprofileerde nagels	$0.45 f_u d^{2.6}$ (2-32)
Nieten	$150 d^3$ (2-33)
Bouten	$0.3 f_{u,k} d^{2.6}$ (2-34)
Deuvels	Zelfde als voor bouten
Schroeven	
$d \leq 6$ mm	Zelfde als voor nagels
$d > 6$ mm	Zelfde als voor bouten

d is de diameter van de nagel, bout, niet of deuvel (in mm). f_u is de treksterkte van de nageldraad (in N/mm²). $f_{u,k}$ is de karakteristieke treksterkte van de bout (of schroef) (in N/mm²)

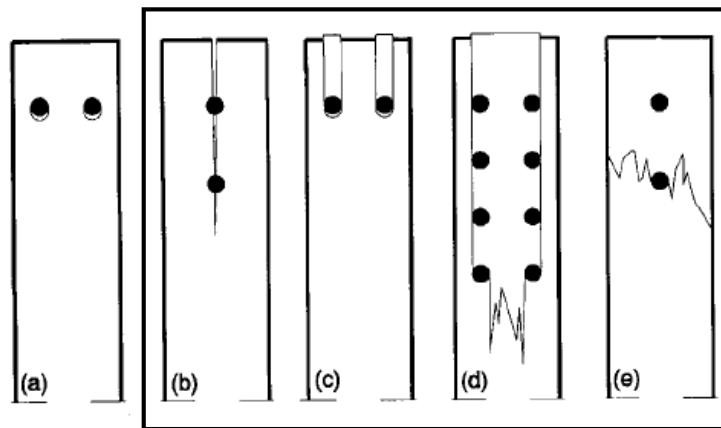


Figuur 19 Belasting nagel, vervorming nagel en buigmomenten volgens de tests in EN 409 [8]

In *figuur 19* is het principe uitgelegd: De testmethoden trachten de invloed van afschuiving en het effect van het schuintrekken van de reactiekrachten te verminderen. Het vloeimoment is het maximum moment voor een rotatie α , minder dan 45° . Voor dunne stiften werkt deze methode uiterst goed.

2.7.5 Brosse breuk - Minimum eind- en randafstanden

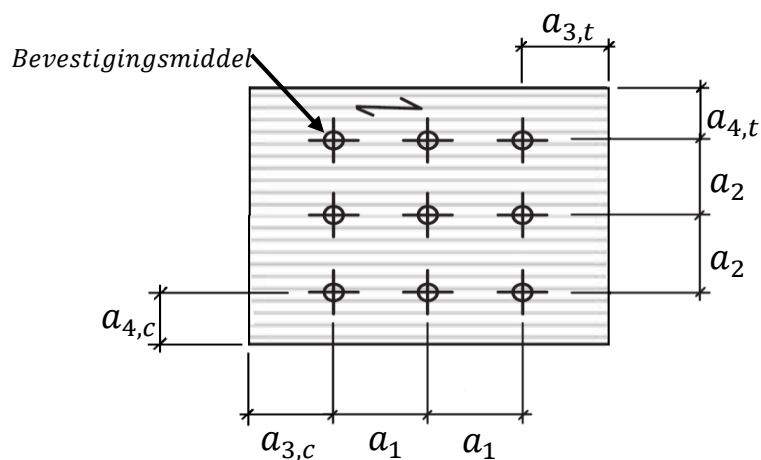
De vergelijkingen komend uit de EC5, welke de sterkte bepalen van één verbindingsmiddel die op afschuiving belast is, zijn enkel geldig wanneer er geen sprake is van vroegtijdig spijten of scheuren van het hout. Het spijten of scheuren van het hout zal leiden tot falen door middel van brosse breuk.



Falen door brosse breuk

Figuur 20 mogelijkheden voor bezwijken van het hout [7]

Om zoveel mogelijk het risico op brosse breuk te vermijden heeft men in de EC5 minimum eind- en randafstanden voor stiftvormige verbindingsmiddelen geïntroduceerd. Deze waarden zijn bekomen uit experimentele resultaten door de jaren heen. De minimum eind- en randafstanden welke van toepassing kunnen zijn in het kader van deze thesis worden vermeld in *tabel 7*. De hoek ten opzichte van de vezelrichting waaronder de belasting (α) werkt is in dit geval 90° [9].



Figuur 21 Eind- en randafstand bevestigingsmiddel [9]

Tabel 7 Minimum eind- en randafstanden voor een genagelde verbinding [EC5]

Algemeen: Minimum eind- en randafstanden		
Nagels		
Afstand	Niet-voorgeboord	
	$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	$420 \text{ kg/m}^3 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$
a_1	$d < 5\text{mm}: (5 + 5 \cos\alpha)d$ $d \geq 5\text{mm}: (5 + 5 \cos\alpha)d$	$(7 + 8 \cos\alpha)d$
a_2	$5d$	$7d$
$a_{3,t}$	$(10 + 5 \cos\alpha)d$	$(10 + 5 \cos\alpha)d$
$a_{3,c}$	$10d$	$15d$
$a_{4,t}$	$d < 5\text{mm}: (5 + 2 \sin\alpha)d$ $d \geq 5\text{mm}: (5 + 5 \sin\alpha)d$	$d < 5\text{mm}: (7 + 2 \sin\alpha)d$ $d \geq 5\text{mm}: (7 + 5 \sin\alpha)d$
$a_{4,c}$	$5d$	$7d$

Tabel 8 Minimum eind- en randafstanden voor een geniete verbinding [EC5]

Algemeen: Minimum eind- en randafstanden		
Nieten		
Afstand	Hoek	Minimale tussen-, eind- en randafstand
	a_1 Voor $\theta \geq 30^\circ$ Voor $\theta < 30^\circ$	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$
a_2	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$15d$
$a_{3,t}$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(15 + 5 \cos\alpha)d$
$a_{3,c}$	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$15d$
$a_{4,t}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$(15 + 5 \sin\alpha)d$
$a_{4,c}$	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$10d$

Voor paneel- op houtverbindingen met nagels of nieten mogen de minimum afstanden (a_1 en a_2) vanuit tabel 7 en tabel 8 vermenigvuldigd worden met 0,85. De afstanden naar de randen blijven onveranderd zolang er in de EC5 niet vermeld wordt dat ze wijzigen. Onderstaande tabel is vervolgens ingevuld in functie van dit onderzoek. De hoek α (90°) en de verminderingsfactor (0,85) zijn in tabel 9 en 10 verwerkt.

Tabel 9 Minimum eind- en randafstanden voor genagelde verbindingen in het kader van dit onderzoek

Algemeen: Minimum eind- en randafstanden		
Nagels		
Afstand	Niet-voorgeboord	
	$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	$420 \text{ kg/m}^3 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$
a_1	$0,85 \cdot 5d$	$0,85 \cdot 7d$
a_2	$0,85 \cdot 5d$	$0,85 \cdot 7d$
$a_{3,t}$	$10d$	$10d$
$a_{3,c}$	$10d$	$15d$
$a_{4,t}$	$7d$	$9d$
$a_{4,c}$	$5d$	$7d$

Tabel 10 Minimum eind- en randafstanden voor geniete verbindingen in het kader van dit onderzoek

Algemeen: Minimum eind- en randafstanden		
Nieten		
Afstand	Hoek	Minimale tussen-, eind- en randafstand
	a_1 Voor $\theta \geq 30^\circ$ Voor $\theta < 30^\circ$	90°
		$15d$
a_2	90°	$15d$
$a_{3,t}$	90°	$15d$
$a_{3,c}$	90°	$15d$
$a_{4,t}$	90°	$20d$
$a_{4,c}$	90°	$10d$

2.7.6 Meerdere verbindingmiddelen in een verbinding

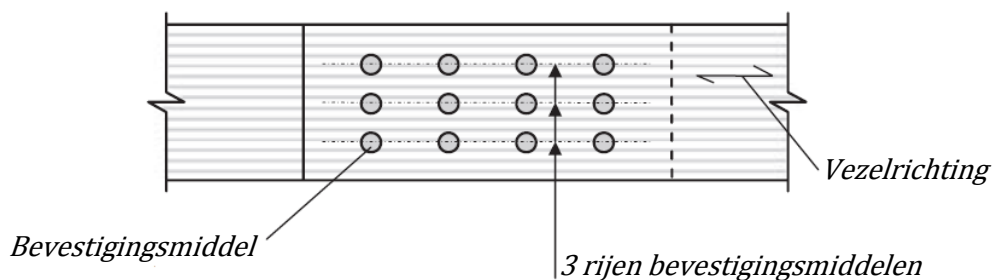
In EC5 worden het aantal verbindingmiddelen die op één lijn liggen evenwijdig aan de vezelrichting gedefinieerd als een rij verbindingmiddelen parallel aan de vezelrichting. Wanneer er bv. maar één enkele nagel in die rij zit, zal de sterkte van deze enkele nagel verantwoordelijk zijn voor de sterkte tegen afschuiving voor die rij per afschuivingsvlak. Wanneer men nu "r" aantal rijen heeft, zal de rekenwaarde van de verbinding evenwijdig aan de vezelrichting per afschuifvlak het volgende zijn:

$$\begin{aligned} \text{Rekenwaarde van de verbinding tegen laterale belasting per afschuifvlak} \\ = r \times \text{rekenwaarde van het verbindingmiddel per afschuifvlak} \end{aligned}$$

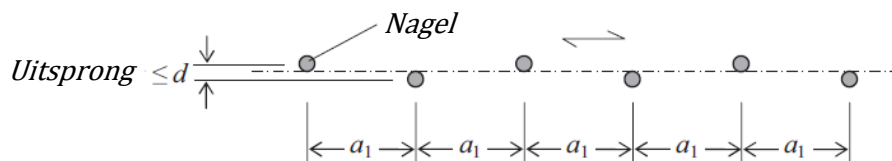
Wanneer er meer als één verbindingmiddel per rij evenwijdig aan de vezelrichting aanwezig is, zal de sterkte van die rij afhankelijk zijn van de stijfheid van het verbindingmiddel en de sterkte van het materiaal tegen de stuik van deze verbindingmiddelen. De effectieve karakteristieke sterkte van een rij verbindingmiddelen evenwijdig aan de vezelrichting, $F_{v,ef,Rk}$, is volgens EC5 gelijk aan:

$$F_{v,ef,Rk} = n_{ef} \cdot F_{v,Rk} \quad (2-35)$$

In deze vergelijking is $F_{v,ef,Rk}$ de effectieve karakteristieke sterkte per afschuivingsvlak met één rij verbindingmiddelen. Het effectief aantal meewerkende verbindingmiddelen in die rij per afschuifvlak is gelijk aan $n_{ef} \cdot F_{v,Rk}$ is, zoals eerder besproken, de karakteristieke sterkte van één verbindingmiddel per afschuifvlak.



Figuur 22 Rijen verbindingen evenwijdig t.o.v. de vezelrichting [9]



Figuur 24 Toegestane uitsprong nagel voor een rij [EC5]

2.7.6.1 Effectief aantal nagels

Het effectief aantal meewerkende nagels in een verbinding is afhankelijk van het type verbindingsmiddel en de krachtrichting t.o.v. de vezelrichting. Alle nagels die minder als een afstand 'd' loodrecht van de vezelrichting verspringen, zullen tot dezelfde rij behoren. Wanneer de verspringing meer dan 'd' ten opzichte van de vezelrichting bedraagt, spreken we over meerdere rijen [9].

Voor een rij nagels in een verbinding evenwijdig aan de vezelrichting:

- Enkele nagels in enkel- of dubbelsnedige afschuiving:

$$n_{ef} = n^{k_{ef}} \quad (2-36)$$

- Bij overlappende nagels:

$$n_{ef} = n_p^{k_{ef}} \quad (2-37)$$

Waarin:

n_{ef}	effectief meewerkend aantal nagels in de rij evenwijdig aan de vezelrichting
n	aantal nagels in een rij evenwijdig aan de vezelrichting
n_p	aantal overlappende nagels in een rij evenwijdig aan de vezelrichting
k_{ef}	exponent die afhankelijk is van de nagelafstand a_1 en wel of niet voorgeboord

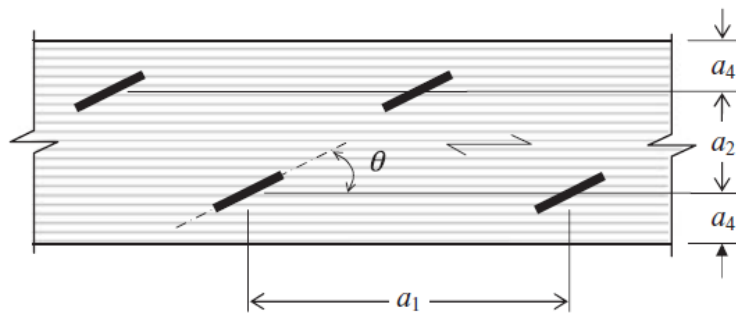
Waarden voor k_{ef} zijn gegeven in *Tabel 11*.

Tabel 11 Waarden voor k_{ef} [EC5]

Algemeen: Minimum eind- en randafstanden		
Afstand	Vorgeboord	Niet-vorgeboord
$a_1=14d$	1.0	1.0
$a_1=12d$	0.925	0.925
$a_1=10d$	0.85	0.85
$a_1=9d$	0.8	0.8
$a_1=8d$	0.75	0.75
$a_1=7d$	0.7	0.7
$a_1=4d$	0.5	-

2.7.6.2 Effectief aantal nieten

Wanneer een verbinding geniet wordt, is n gelijk aan twee keer het aantal nieten in de rij evenwijdig aan de vezelrichting. Wanneer de hoek die het centrum van de niet maakt met de vezelrichting van het hout groter is dan 30° , zal vergelijking (16) gelden. Wanneer deze hoek kleiner is dan 30° zal eerder genoemde vergelijking nog geldig zijn, maar dient de sterkte van de verbinding tegen afschuiving van één verbindingsmiddel te worden vermenigvuldigd met factor $0,7$. Voor meerdere nieten in een rij wordt n_{ef} bepaald zoals bij nagels.



Figuur 25 Dimensies bij meerdere nieten [9]

2.8 Rekenwaarde verbinding belast evenwijdig aan de vezelrichting

De rekenwaarde voor de sterkte per snede en per verbindingsmiddel, $F_{v,Rd}$, wordt bekomen door volgende bewerking:

$$F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_m} \quad (2-38)$$

Waarin:

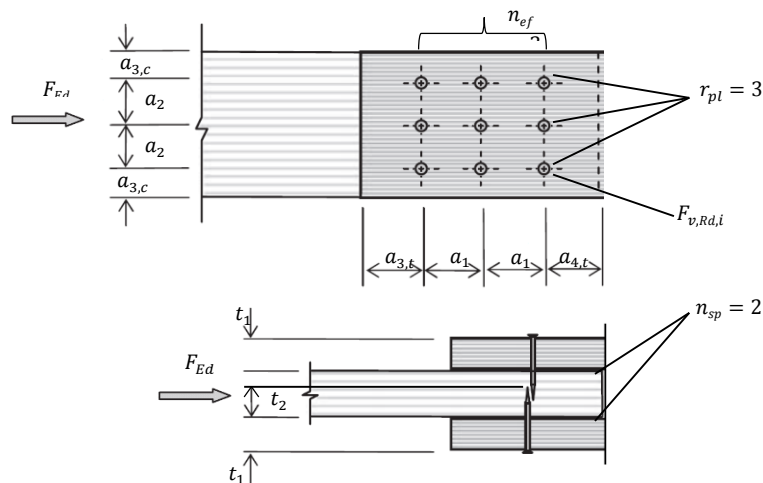
$F_{v,Rd}$	rekenwaarde voor de sterkte per afschuivingsvlak van één verbindingsmiddel
$F_{v,Rk}$	karacteristieke sterkte per afschuivingsvlak van één verbindingsmiddel
γ_m	partiele veiligheidsfactor voor verbindingen ($\gamma_m = 1,3$)
k_{mod}	modificatiefactor, wanneer hout bestaat uit twee houten elementen $k_{mod,1}$ en $k_{mod,2}$, zal de waarde in bovenstaande vergelijking bekomen worden door volgende bewerking: $k_{mod} = \sqrt{k_{mod,1} \cdot k_{mod,2}}$ (EC5)

Voor een verbinding die uit r_{pl} rijen van verbindingsmiddelen evenwijdig aan de vezelrichting bestaat, met n verbindingsmiddelen met dezelfde diameter op gelijke afstand van elkaar binnen elke rij, waarvan de rekenwaarde voor de sterkte per verbindingsmiddel per afschuifvlak $F_{v,Rd}$ bedraagt, zal de effectieve rekenwaarde van de verbinding volgens onderstaande vergelijking zijn:

$$F_{v,ef,Rd} = n_{sp} \cdot r_{pl} \cdot n_{ef} \cdot F_{v,Rd} \quad (2-39)$$

Waarin:

$F_{v,ef,Rd}$	effectieve rekenwaarde van de verbinding onder laterale belasting
n_{sp}	aantal afschuifvlakken in de verbinding
r_{pl}	aantal rijen van verbindingsmiddelen evenwijdig aan de vezelrichting
n_{ef}	effectief meewerkend aantal nagels in de rij evenwijdig aan de vezelrichting

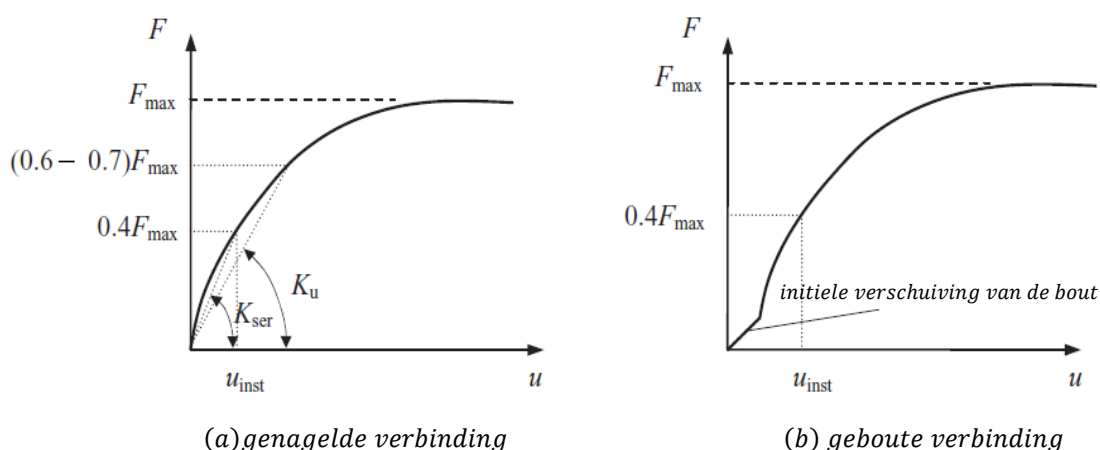


Figuur 26 Voorbeeld dimensionering verbinding [9]

2.9 Stijfheid van de verbinding (UGT & BGT)

Omwille van toegelaten toleranties in het assembleren van een verbinding, of door vloeien van het bevestigingsmiddel en/of het gedrag van het hout in een verbinding, of een combinatie van voorgaande factoren, zullen verbindingen gevormd door metalen stiftvormige verbindingsmiddelen onderhevig zijn aan 'slip'. De hoeveelheid 'slip' of simpelweg verschuiving, zal afhangen van het type verbindingsmiddel dat gebruikt wordt. Een typische belasting- verschuivingscurve voor een genagelde en geboute verbinding is te zien in *figuur 27*.

Hout heeft een relatief lage stijfheids- sterkteverhouding, wat leidt tot redelijk flexibele constructies. Hoewel het belang van de criteria die de sterkte van de verbinding bepalen, verzekerd wordt door een goed ontwerp, zal voor de meeste structuren het niet naleven van de stijfheidscriteria de meest voorkomende oorzaak zijn voor de problemen die parten spelen tijdens de levensduur van de houtstructuur.



Legenda:

F_{max} is de maximum belasting op de verbinding
 u_{inst} is de verschuiving bij BGT

Figuur 27 Typische kracht- verschuivingsgedrag bij metalen bevestigingsmiddelen [9]

De stijfheid van de verbinding is gedefinieerd als de verhouding van de laterale belasting per afschuivingsvlak gedeeld door zijn verschuiving. Door deze relatie kan de verschuiving bij elke belasting bepaald worden. In EC5 is deze stijfheidseigenschap aangeduid als de verschuivingsmodulus. Er worden voor de stijfheid verschillende grenswaarden gegeven voor zowel de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT), K_{ser} als voor de uiterste grenstoestand (UGT), K_u . Er wordt geen specifieke grenswaarde gegeven voor de verschuiving van de verbinding. Het is aan de ontwerper om te bepalen wat voor de constructie acceptabel is.

In EC5 wordt de verschuivingsmodulus voor het ontwerp binnen BGT, K_{ser} genomen als de secansmodulus van het kracht- verplaatsingsdiagram bij een kracht die 40% van de maximaal opneembare kracht door de verbinding bedraagt. In *figuur 25a* is dit te zien voor een genagelde verbinding. Het is te zien dat het gebruik van deze lineaire relatie tot de grenswaarde, een redelijk goede benadering geeft van het werkelijke kracht- verschuivingsgedrag van het verbindingsmiddel. Uit de resultaten van vele experimenten op verbindingen blijkt dat de ogenblikkelijke verschuiving bij ongeveer 40% van de maximum opneembare kracht geverifieerd is door verschillende onderzoekers [9].

In EC5 wordt volgende tabel gegeven voor de berekening van K_{ser} bij hout- houtverbindingen en paneel- op houtverbindingen:

Tabel 12 Waarden voor K_{ser} voor verbindingsmiddelen [EC5]

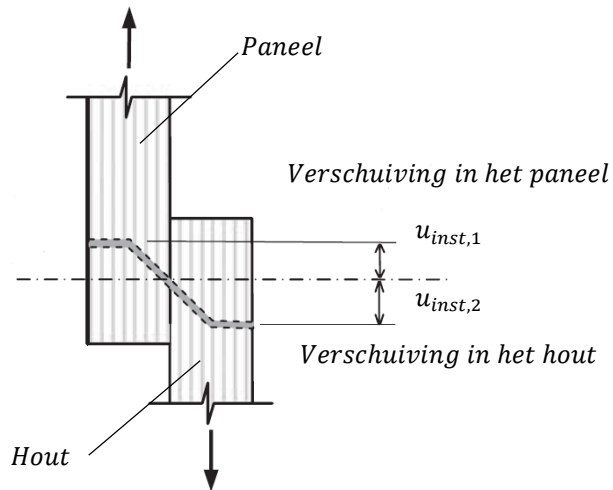
Type verbindingsmiddel	BGT verschuivingsmodulus K_{ser} [N/mm]
Nagels	
Niet voorgeboord	$\rho_m^{1.5} \cdot d^{0.8} / 30$
Vorgeboord	$\rho_m^{1.5} \cdot d / 23$
Nieten	$\rho_m^{1.5} \cdot d^{0.8} / 80$
Schroeven	$\rho_m^{1.5} \cdot d / 23$
Bouten	$\rho_m^{1.5} \cdot d / 23$
Deuvels	$\rho_m^{1.5} \cdot d / 23$

K_{ser} is gebaseerd op de diameter van het bevestigingsmiddel d (in mm) en de gemiddelde densiteit ρ_m (in kg/m³). Bij het gebruik van hetzelfde hout- of plaatmateriaal voor elke verbinding, zal gerekend worden met de gemiddelde densiteit. Wanneer bij die verbinding verschillende densiteiten van hout- of plaatmaterialen voorkomen, wordt ρ_m bepaald volgens onderstaande formule:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1} \cdot \rho_{m,2}} \quad (2-40)$$

De ogenblikkelijke slip binnen de verbinding, u_{inst} , is een sommatie van de verschuivingen in de respectievelijke onderdelen waaruit de verbinding bestaat. Voor een enkelsnedige afschuiving van een paneel- op houtverbinding zal de ogenblikkelijke verschuiving zich ontwikkelen zoals te zien op *figuur 28*. De totale ogenblikkelijke verschuiving van de verbinding zal zijn:

$$u_{inst} = u_{inst,1} + u_{inst,2} \quad (2-41)$$



Figuur 28 Ogenblikkelijke verschuiving in een verbinding [9]

In het geval van de ogenblikkelijke verschuivingsmodulus K_u bij uiterste grenstoestand, wordt de secansmodulus genomen van het kracht-verplaatsingsdiagram voor een kracht die 60 tot 70% is van de maximaal opneembare kracht, zoals te zien op *figuur 25*. Uit experimentele testresultaten is gebleken dat voor ontwerpdoeleinden onderstaande formule voor K_u mag gebruikt worden:

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad (2-42)$$

Waarin K_{ser} de ogenblikkelijke verschuivingsmodulus per afschuivingsvlak en verbindingsmiddel is. Bij UGT berekeningen is het alleen noodzakelijk om de verplaatsing van de structurele elementen binnen de structuur te bepalen waar een mogelijke verplaatsing kan leiden tot onaanvaardbare gevolgen [9].

2.10 Voorgaand relevant onderzoek

2.10.1 Einfluss der Verbindungsmittelabstände auf die Tragfähigkeit von Wandtafeln.

Werk door: M.H. Kessel, M. Huse, R. Augustin

Binnen dit onderzoek wordt deels gefocust op verbindingen met platen uit gipskarton. Als bevestigingsmiddel werd gekozen voor nagels met diameter 2,1 en 2,5 mm. We kunnen dus stellen dat dit onderzoek geldt als een leidraad voor deze thesis aangezien er bij slanke verbindingmiddelen onderzocht wordt wat de invloed is van de randafstanden.

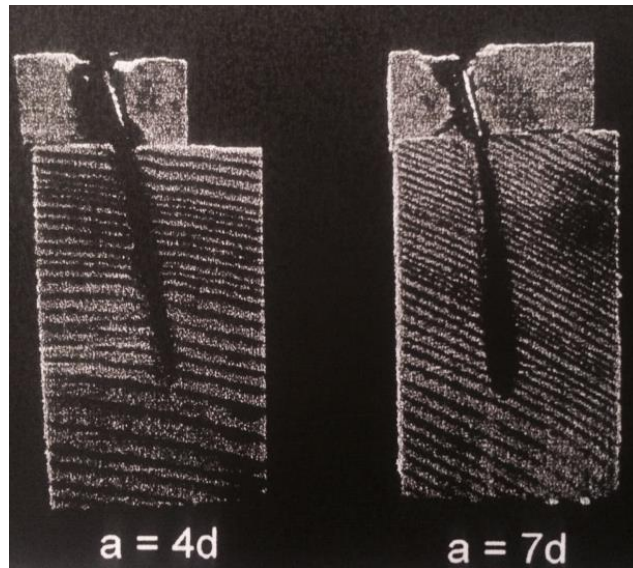
Eerst wordt de stuiksterkte van de gipskartonplaten experimenteel getest in functie van afnemende randafstanden en verschillende belastingshoeken. Men concludeerde dat een randafstand groter of gelijk aan 4 keer de nageldiameter resulteert in voldoende weerstand tegen stuikdruk. Hoe hoger de randafstand, hoe hoger de stuiksterkte. Voor de stijfheden vond men geen duidelijke relatie tussen de resultaten en de variabele randafstand.

Een daarop volgend experiment was het onderzoek op verbindingen met deze gipskartonplaten. Er werd geconcludeerd dat proefstukken met een dikte groter of gelijk van 15 mm en een randafstand kleiner dan 4 keer de diameter wel nog enige bruikbare resultaten leverde. Bij slankere platen resulteerde deze kleiner wordende randafstand in het falen door splijten van het hout. Het splijten van het hout is falen door brosse breuk en dient vermeden te worden. Bijgevolg wordt de randafstand bij 4 en 7 keer de diameter genomen om deze met elkaar te vergelijken. De invloed van deze randafstanden en de krachtrichting op de maximum kracht F_{max} is onder *tabel 11* vereenvoudigd samengevat [10].

Tabel 13 Invloed van randafstand en krachtrichting op de maximum kracht van de verbinding [10]

krachtrichting	a = 7d	a = 4d
$\alpha = 0^\circ$	100%	100%
$\alpha = 90^\circ$	70%	55%

Men kan stellen dat bij een laterale belasting op de verbinding, de afname van de randafstand resulteert in een vermindering van de maximum kracht die werkt op de verbinding.



Figuur 29 Nagelverplaatsing bij beide randafstanden met $a=90^\circ$ [10]

2.10.2 Andere bronnen

Verder valt op dat in andere papers vooral onderzoek gedaan wordt naar diameters gaande van 2,65 tot 8, wanneer het gaat over nagels. Het effect van de variërende randafstand bij houtverbindingen met slanke verbindingsmiddelen, zoals nieten, is nauwelijks te vinden. De minimum randafstanden, zoals vermeld in de EC5, dienen voor deze slanke verbindingsmiddelen, zeker eens nader onderzocht te worden. Zoals eerder vermeld, blijken deze aan de conservatieve kant te liggen.

3 Resultaten

3.1 Berekenen van een karakteristieke waarde

Van een reeks metingen dient de karakteristieke 5-percentiel waarde voor verbindingsmiddelen en houtachtige materialen te zijn berekend via NBN EN 14358 op basis van het aantal proefstukken [11].

De gemiddelde waarde \bar{y} en de standaard deviatie s_y voor de stochastische variabele $y = \ln m$ zal bepaald worden volgens:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln m_i \quad (3-1)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2} \quad (3-2)$$

De karakteristieke waarde wordt vervolgens bepaald door:

$$m_k = \exp(\bar{y} - k_s s_y) \quad (3-3)$$

Wanneer s_y minder bedraagt dan 0,05 wordt s_y gelijkgesteld aan 0,05 in de vergelijking voor de bepaling van m_k .

De waarde voor k_s is in functie van het aantal proefstukken. *Tabel 14* geeft de verschillende waarden voor k_s .

Tabel 14 Waarden voor k_s [11]

<i>Aantal proefstukken</i> <i>n</i>	<i>Factor</i> <i>k_s</i>
3	3,15
5	2,48
10	2,10
15	1,99
20	1,93
30	1,87
50	1,81
100	1,76
500	1,71
∞	1,65

3.2 Proeven op stuiksterkte van plaatmaterialen met variërende randafstanden

3.2.1 Inleiding

Op basis van het verrichte werk van M.H. Kessel wordt voor twee soorten plaatmateriaal de invloed van de randafstand op de stuiksterkte van het materiaal onderzocht. De gebruikte plaatmaterialen voor de vervaardiging van de proefstukken zijn OSB en spaanplaat, respectievelijk met 15 mm en 12 mm dikte. De stuiksterkte zal voor beide plaatmaterialen onderzocht worden voor twee verschillende diameters stift met telkens voor elke stift vijf verschillende randafstanden.

De verschillende combinaties voor randafstand zijn weergegeven in *Tabel 15*.

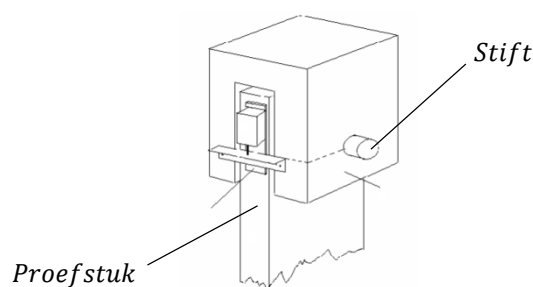
Tabel 15 Overzicht gebruikte randafstanden voor test stuikdruk

Series (-)	10d-10d	15d-5d	5d-5d	18d-2d	2d-2d
\emptyset 2 mm stift					
OSB	20-20	30-10	10-10	36-4	4-4
Spaanplaat	20-20	30-10	10-10	36-4	4-4
\emptyset 3 mm stift					
OSB	30-30	45-15	15-15	54-6	6-6
Spaanplaat	30-30	45-15	15-15	54-6	6-6

3.2.2 Proefopstelling

3.2.2.1 Testmethode stuikdruk EN 383

De stuiksterkte van het plaatmateriaal wordt bepaald door de testmethode beschreven in EN 383. *Figuur 30* geeft de algemene proefopstelling weer.

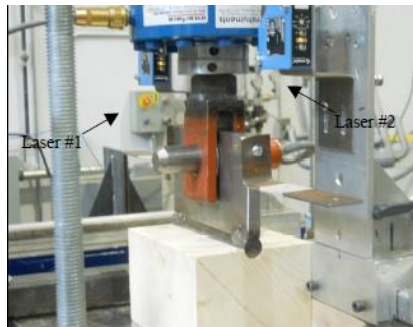


Figuur 30 Proefopstelling bepaling stuiksterkte conform EN 383 [11]

Het probleem bij deze testmethode is dat bij het gebruik van slanke stiften, deze eerder gaan buigen onder toenemende kracht, dan dat het proefstuk faalt door zijn maximale kracht. Omwille van dit probleem leent een alternatieve methode zich meer om de stuiksterkte van de materialen te onderzoeken voor slanke verbindingsmiddelen.

3.2.2.2 Alternatieve methode

Omwille van het buigen van de stift bij steeds slanker wordende stiften, is aangeraden om de test op stuikdruk te laten uitvoeren op een alternatieve methode. De test op stuikdruk wordt in landen zoals Canada uitgevoerd zoals beschreven in ASTM D5764. De proefopstelling is weergegeven in *Figuur 31*.



Figuur 31 Testmethode stuikdruk conform ASTM D5764 [12]

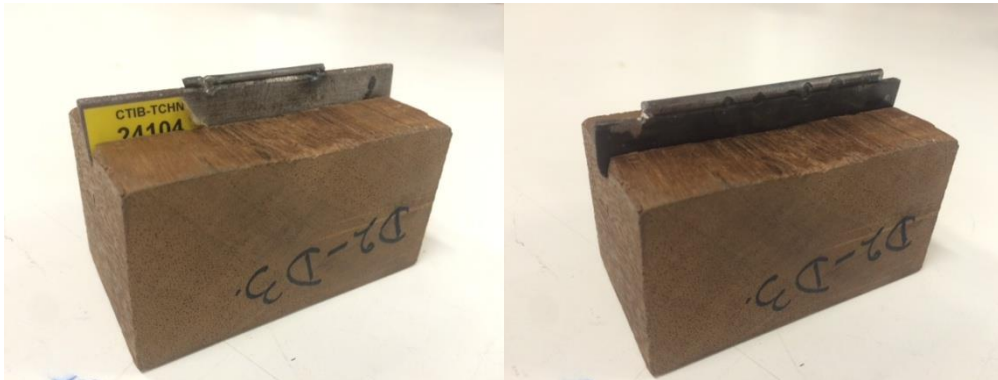
De proefopstelling die gebruikt werd in dit onderzoek wijkt lichtelijk af van bovenstaande testmethode. De stift wordt niet op voorhand in het proefstuk op zijn halve hoogte ingedrukt. *Figuur 32* geeft de proefopstelling weer die in dit onderzoek gebruikt is.



Figuur 32 Testmethode stuikdruk in het kader van dit onderzoek

De proefstukken worden getest met een constante drukbelasting (N/s). De belasting wordt vervolgens uitgezet in functie van het gemiddelde van de verplaatsingen. De verplaatsingen d_1 en d_2 worden opgemeten door middel van laserapparatuur. Het proefstuk wordt langs beide zijden ook belemmerd om bij eventuele grote krachten zich te verplaatsen.

In het kader van dit onderzoek wordt de stuikdruk getest met twee verschillende diameters van stiften. Beide stiften worden weergegeven in *Figuur 33*.

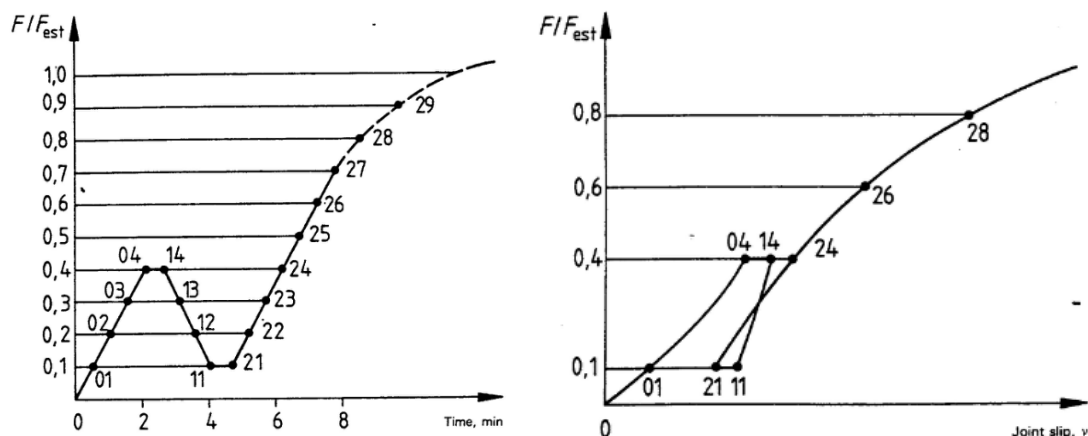


Figuur 33 Gebruikte diameters stift

3.2.2.3 Belastingprocedure ISO 6981

In de norm NBN ISO 6981 wordt de belastingprocedure voor het testen op stuikdruk besproken. De drukbank die gebruikt wordt voor deze testen beschikt op het tijdstip van uitvoering niet over de nodige software om deze belastingprocedure uit te voeren.

Figuur 34 geeft de belastingprocedure en het bijhorende kracht-verplaatsingsdiagram zoals beschreven in ISO 6891. Hierbij dient bij de start van de test, een geschatte maximum kracht F_{est} vooropgesteld te worden. Deze kan nadien nog gecorrigeerd worden indien de afwijking op het resultaat te groot wordt.



Figuur 34 Belastingprocedure beschreven in NBN ISO 6891 [13]

De stuiksterkte wordt berekend met behulp van de maximum belasting F_{max} of de kracht die overeen komt bij een gemiddelde verplaatsing van 5 mm. Welke hiervan als eerste plaatsvindt, is bepalend voor de berekening.

3.2.2.4 Voorbehandeling

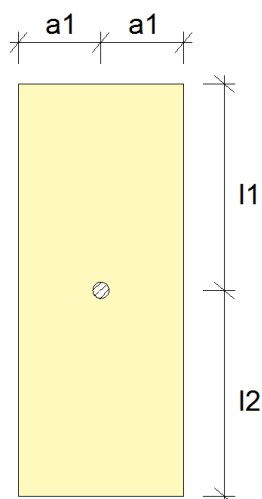
De proefstukken worden vervaardigd uit hout of houtachtige materialen met een evenwichtsvochtgehalte bij (20 ± 2) °C en (65 ± 5) % betrekkelijke luchtvochtigheid. Na vervaardiging worden de proefstukken opgeslagen bij dezelfde omstandigheden.

3.2.2.5 Vervaardiging proefstukken

Zoals beschreven in EN 383 dienen de proefstukken te voldoen aan de minimale afmetingen zoals vermeld in *Tabel 16* en *Figuur 35*.

Tabel 16 Minimale afmetingen proefstuk plaatmateriaal voor test stuikdruk

<i>Minimale afmetingen: Plaatmateriaal</i>	
a_1	$5d$
l_1	$20d$
l_2	$20d$



Figuur 35 Dimensies proefstuk zoals vermeld in Tabel 15

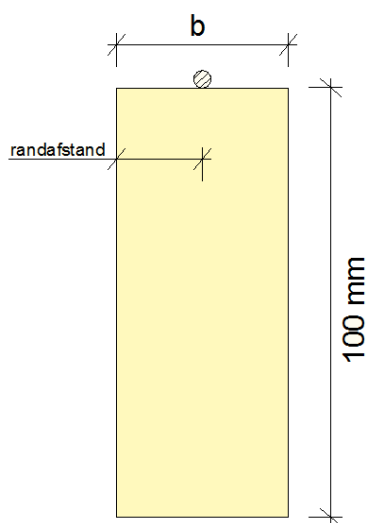
Omdat het de proefopstelling afwijkt van de methode beschreven in EN 383, worden de minimale afmetingen niet onmiddellijk in rekening genomen. De afmeting a_1 is ook juist de parameter welke moet variëren per proefserie.

De proefstukken gebruikt in dit onderzoeken worden wel vervaardigd in functie van de gebruikte diameter stift. De hoogte wordt voor elk proefstuk hetzelfde gehouden om ervoor te zorgen dat deze geen invloed heeft op het resultaat. *Tabel 17* geeft een overzicht van de verschillende dimensies per serie.

Tabel 17 Overzicht afmetingen proefstukken stuiksterkte in functie van randafstand

Series (-)	h (mm)	b (mm)	t (mm)
\varnothing 2 mm stift			
OSB/Spaanplaat			
10d-10d	100	40	15/12
15d-5d	100	40	15/12
5d-5d	100	20	15/12
18d-2d	100	40	15/12
2d-2d	100	8	15/12
\varnothing 3 mm stift			
OSB/Spaanplaat			
10d-10d	100	60	15/12
15d-5d	100	60	15/12
5d-5d	100	30	15/12
18d-2d	100	60	15/12
2d-2d	100	12	15/12

Figuur 35 zoals eerder weergegeven, kan in functie van dit onderzoek, worden omgevormd tot Figuur 36.



Figuur 36 Dimensies proefstuk zoals vermeld in Tabel 16

3.2.3 Resultaten

3.2.3.1 Berekening

De stuiksterkte kan berekend worden door gebruik van één van volgende formules:

$$f_h = \frac{F_{max}}{d \cdot t} \quad (3-4)$$

$$f_h = \frac{F_{5mm}}{d \cdot t} \quad (3-5)$$

De stijfheid kan volgens EN 26891 bepaald worden aan de hand van de verplaatsingen gemeten bij 10% en 40% van de geschatte maximum kracht. In dit geval wordt uit deze 'stijfheid' vervolgens de beddingconstante k berekend.

$$k_{ser,1} = \frac{F_{0,4} - F_{0,1}}{d_{0,4} - d_{0,1}} \quad (3-6)$$

$$k = \frac{k_{ser,1}}{d \cdot t} \quad (3-7)$$

De juiste afmetingen van de gebruikte stiften zijn:

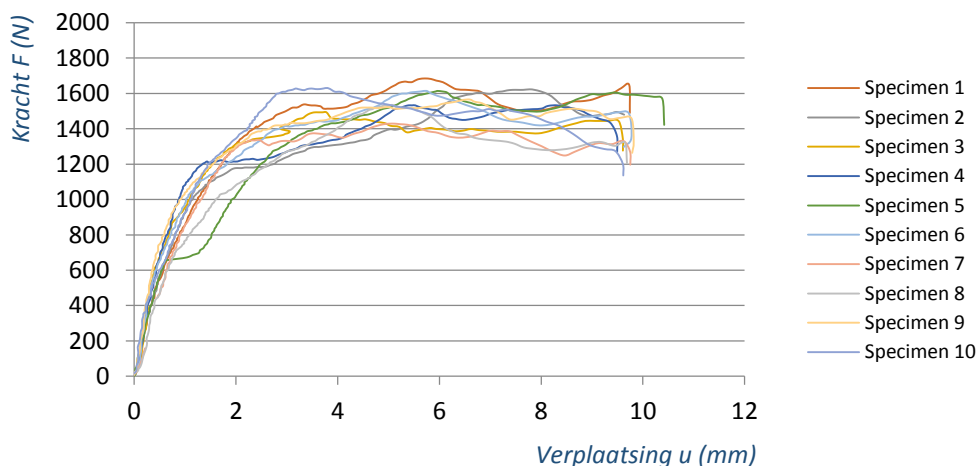
- Ø 2 stift = 2,14 mm
- Ø 3 stift = 3,48 mm

Voor het gemak zal steeds naar de afgeronde waarde verwezen worden. In de berekeningen wordt echter gerekend met de effectieve waarde.

3.2.3.2 Resultaten Spaanplaat

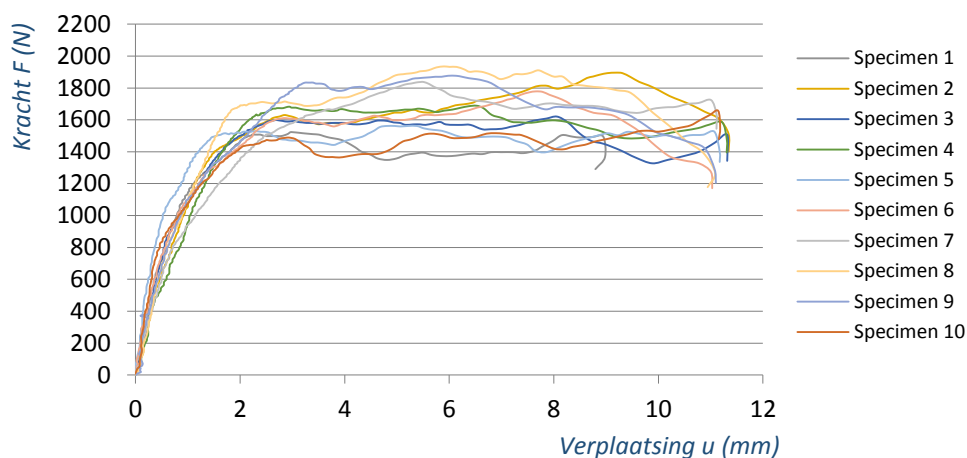
3.2.3.2.1 Randafstand $10d - 10d$

Figuur 37 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken spaanplaat met randafstand $10d$ wanneer de 2 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 37 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand $10d$ bij Ø 2 mm

Figuur 38 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken spaanplaat met randafstand $10d$ wanneer de 3 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 38 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand $10d$ bij $\varnothing 3$ mm

Tabel 18 Resultaten randafstand $10d$ voor spaanplaat

Specimen	t (mm)	\varnothing stift (mm)	ρ (kg/m ³)	Fmax (N)	F _{5mm} (N)	kser1 (N/mm)	k (N/mm)	Fh (N/mm ²)
$\varnothing 2$								
1	12	2,14	723	1623,7	1395,5	1046,3	40,7	54,3
2	12	2,14	750	1492,5	1421,7	1846,5*	71,9*	58,1
3	12	2,14	724	1532,2	1486,5	1555,0*	60,6	57,9
4	12	2,14	785	1614,6	1519,7	997,5	38,8	59,2
5	12	2,14	736	1614,6	1568,2	1396,7	54,4	61,1
6	12	2,14	732	1428,4	1427,9	1020,0	39,7	55,6
7	12	2,14	712	1535,2	1529,4	1017,5	39,6	59,6
8	12	2,14	734	1565,7	1522,7	1793,4*	69,8*	59,3
9	12	2,14	719	1629,8	1535,1	921,3	35,9	63,5
10	12	2,14	722	1684,8	1626,5	928,6	36,2	65,6
$\varnothing 3$								
1	12	3,48	729	1523,01	1359,45	1655,3	39,6	36,5
2	12	3,48	727	1895,37	1645,1	1074,6	25,7	39,4
3	12	3,48	733	1620,68	1582,43	1614,8	38,7	37,9
4	12	3,48	729	1687,83	1657,34	1013,3	24,3	39,7
5	12	3,48	728	1592,69	1561,57	2218,8*	53,1*	37,4
6	12	3,48	730	1779,39	1599,32	1432,9	34,3	38,3
7	12	3,48	721	1837,38	1804,95	1119,7	26,8	43,2
8	12	3,48	737	1935,05	1881,04	1296,6	31,0	45,0
9	12	3,48	722	1877,06	1833,93	1262,0	30,2	43,9
10	12	3,48	724	1657,31	1440,46	2358,0*	56,5*	34,5
karacteristiek:								
		$\varnothing 2$	660	-	-	-	-	52,7
		$\varnothing 3$	655	-	-	-	-	32,9
gemiddeld:								
		$\varnothing 2$	734	-	-	1046,9*	40,8*	59,4
		$\varnothing 3$	726	-	-	1308,6*	31,3*	39,6

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,89 bij \varnothing 2 mm en 0,83 bij \varnothing 3 mm.

Het valt op dat bepaalde metingen nogal afwijken op vlak van stijfheid. Omwille van de grote afwijking op dit vlak, zijn deze metingen niet opgenomen in de berekening van de gemiddelde stijfheid. De resultaten op vlak van sterkte zijn wel vergelijkbaar.

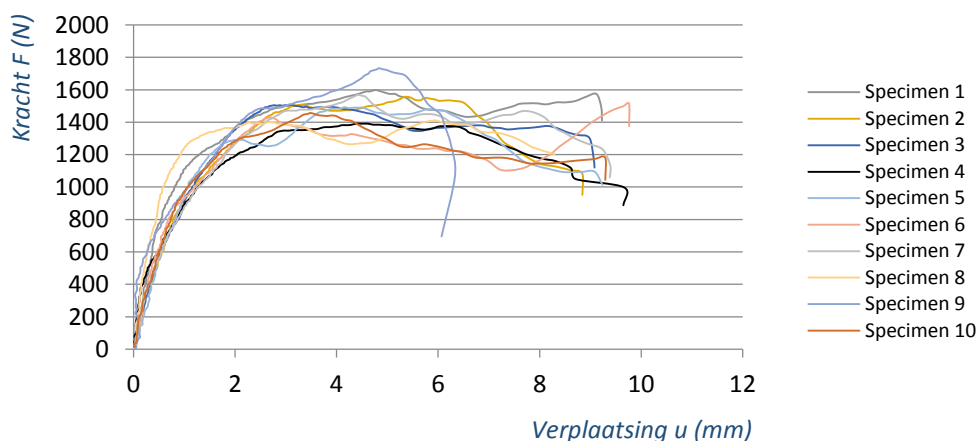
Figuur 39 geeft een duidelijk voorbeeld hoe de proefstukken op het einde van de test uitzagen. Er trad geen brossre breuk op na het behalen van de maximum belasting.



Figuur 39 Uitzicht proefstukken spaanplaat 10d na de test

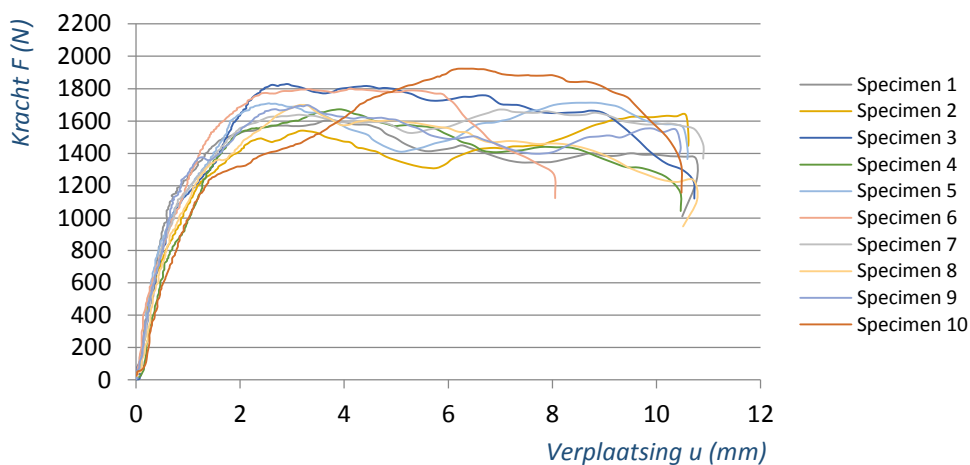
3.2.3.2.2 Randafstand 5d - 15d

Figuur 40 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken spaanplaat met randafstand 5d - 15d wanneer de 2 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 40 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand 5d - 15d bij \varnothing 2 mm

Figuur 41 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken spaanplaat met randafstand $5d - 15d$ wanneer de 3 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 41 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand $5d - 15d$ bij $\varnothing 3$ mm

Tabel 19 Resultaten randafstand $5d - 15d$ voor spaanplaat

Specimen	t (mm)	\varnothing stift (mm)	ρ (kg/m ³)	Fmax (N)	F _{5mm} (N)	kser1 (N/mm)	k (Nmm)	Fh (N/mm ²)
$\varnothing 2$								
1	12	2,14	743	1599,3	1578,8	1868,2*	72,7*	62,3
2	12	2,14	742	1556,6	1522,8	985,8	38,4	60,6
3	12	2,14	722	1507,8	1411,4	1046,8	40,8	55,0
4	12	2,14	719	1391,8	1382,6	1201,0	46,8	54,2
5	12	2,14	718	1492,5	1447,1	1180,1	46,0	58,1
6	12	2,14	725	1513,9	1279,4	1279,4	49,8	49,8
7	12	2,14	735	1568,8	1449,9	985,2	38,4	61,1
8	12	2,14	726	1410,1	1316,1	2050,0*	79,8*	51,3
9	12	2,14	723	1629,8	1535,1	921,3	35,9	63,5
10	12	2,14	728	1455,9	1207,9	1085,3	42,3	47,0
$\varnothing 3$								
1	12	3,48	714	1523,01	1359,45	1669,4	40,0	38,4
2	12	3,48	717	1895,37	1645,1	1719,3	41,2	32,5
3	12	3,48	716	1620,68	1582,43	1619,2	38,8	43,8
4	12	3,48	707	1687,83	1657,34	1543,7	37,0	40,1
5	12	3,48	710	1592,69	1561,57	2321,2*	55,6*	34,0
6	12	3,48	712	1779,39	1599,32	1646,0	39,4	43,1
7	12	3,48	718	1837,38	1804,95	1952,7*	46,8*	37,3
8	12	3,48	716	1935,05	1881,04	1731,6	41,5	40,7
9	12	3,48	718	1877,06	1833,93	1848,6	44,3	40,6
10	12	3,48	711	1657,31	1440,46	1148,4*	27,5*	42,9
karakteristiek:		$\varnothing 2$	655	-	-	-	-	44,5
		$\varnothing 3$	643	-	-	-	-	31,7
gemiddeld:		$\varnothing 2$	731	-	-	1085,6*	42,3*	56,3
		$\varnothing 3$	724	-	-	1682,5*	40,3*	39,3

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,79 bij \varnothing 2 mm en 0,81 bij \varnothing 3 mm.

Opnieuw worden metingen met een grote afwijking in stijfheid niet meegenomen in de berekening van de gemiddelde stijfheid.

Uit de grafiek valt op dat één van de metingen bij \varnothing 2 mm nogal afwijkt van de rest. Proefstuk 5 behaalt wel een aanvaardbare waarde als maximum kracht maar kent nadien een steile daling. Na het bereiken van de maximum belasting treedt er brosser breuk op. Dit fenomeen is goed te zien in *Figuur 42* waarop de toestand van proefstuk 5 visueel te zien is.



Figuur 42 Brosser breuk proefstuk 5 randafstand 5d - 15d bij \varnothing 2 mm

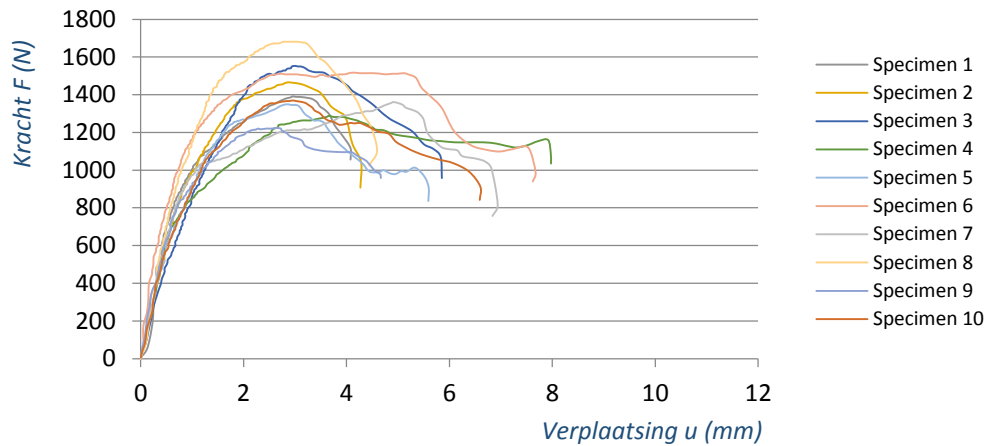
Figuur 43 geeft dan weer een duidelijk voorbeeld hoe de rest van de proefstukken op het einde van de test uitzagen. Er trad geen brosser breuk op na het behalen van de maximum belasting.



Figuur 43 Uitzicht proefstukken spaanplaat 5d -15d na de test

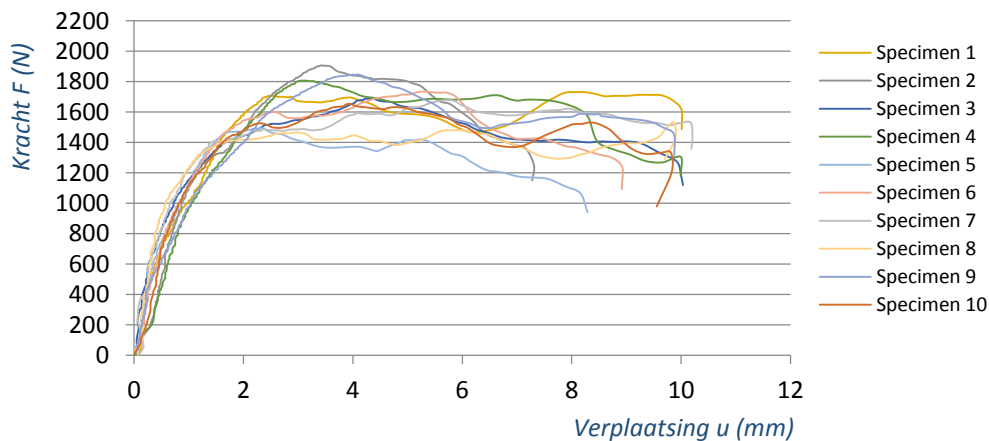
3.2.3.2.3 Randafstand 5d - 5d

Figuur 44 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken spaanplaat met randafstand 5d - 5d wanneer de 2 mm stift gebruikt wordt



Figuur 44 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand 5d - 5d bij \varnothing 2 mm

Figuur 45 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken spaanplaat met randafstand 5d - 5d wanneer de 3 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 45 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand 5d - 5d bij \varnothing 3 mm

Wat onmiddellijk opvalt in vergelijking met voorgaande reeks, is dat bij het gebruik van de 2 mm stift, de verplaatsing bij breuk minder bedraagt dan bij randafstand 5d-15d. Er treedt vaker brossse breuk op na het behalen van de maximum belasting. Bij het testen van de 3 mm stift blijft het optreden van brossse breuk uit. Het grafische verloop geeft niet de typische curve van brossse breuk weer.

Tabel 20 Resultaten randafstand 5d - 5d voor spaanplaat

Specimen	t (mm)	Ø stift (mm)	ρ (kg/m ³)	F _{max} (N)	F _{5mm} (N)	k _{ser1} (N/mm)	k (Nmm)	F _h (N/mm ²)
Ø2								
1	12	2,14	721	1391,8	-	2152,7*	83,8*	54,2
2	12	2,14	716	1465,0	-	1268,1	49,4	57,0
3	12	2,14	736	1553,5	1239,2	902,8	35,2	60,5
4	12	2,14	729	1288,0	1186,0	1290,0	50,2	50,2
5	12	2,14	713	1349,0	-	1159,7	45,2	52,5
6	12	2,14	720	1516,9	-	1638,5*	63,8*	59,1
7	12	2,14	733	1361,3	-	1437,9	56,0	53,0
8	12	2,14	740	1681,7	-	1520,2*	59,2*	65,5
9	12	2,14	708	1223,9	-	1313,1	51,1	47,7
10	12	2,14	727	1370,4	-	1203,9	46,9	53,4
Ø3								
1	12	3,48	708	1730,5	1586,9	1516,4	36,3	38,8
2	12	3,48	713	1907,6	1801,4	1514,3	36,3	45,7
3	12	3,48	703	1687,8	1632,9	1847,5	44,2	40,4
4	12	3,48	714	1806,9	1669,2	1136,2	27,2	43,3
5	12	3,48	705	1492,5	1413,1	2033,2*	48,7*	35,7
6	12	3,48	714	1733,6	1715,3	1706,5	40,9	41,1
7	12	3,48	705	1678,7	1625,6	2211,1*	52,9*	38,9
8	12	3,48	717	1480,3	1398,2	3989,0*	95,5*	33,5
9	12	3,48	697	1846,5	1734,3	1002,4	24,0	44,2
10	12	3,48	717	1654,2	1624,4	1709,6	40,9	39,6
karakteristiek:		Ø2	652	-	-	-	-	45,2
		Ø3	639	-	-	-	-	32,8
gemiddeld:		Ø2	729	-	-	1225,1*	47,7*	55,3
		Ø3	721	-	-	1490,4*	39,8*	40,1

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,82 bij Ø 2 mm en 0,82 bij Ø 3 mm.

Opnieuw worden metingen met een bepaalde afwijking in stijfheid niet meegenomen in de berekening van de gemiddelde stijfheid.

Er kan vastgesteld worden dat de metingen bij Ø 2 mm vaak onderhevig zijn aan brosse breuk. Dit fenomeen is goed te zien in *Figuur 46* waarop de toestand van een proefstuk uit deze serie is afgebeeld.



Figuur 46 Brosse breuk bij proefstukken spaanplaat met randafstand 5d - 5d bij Ø 2 mm

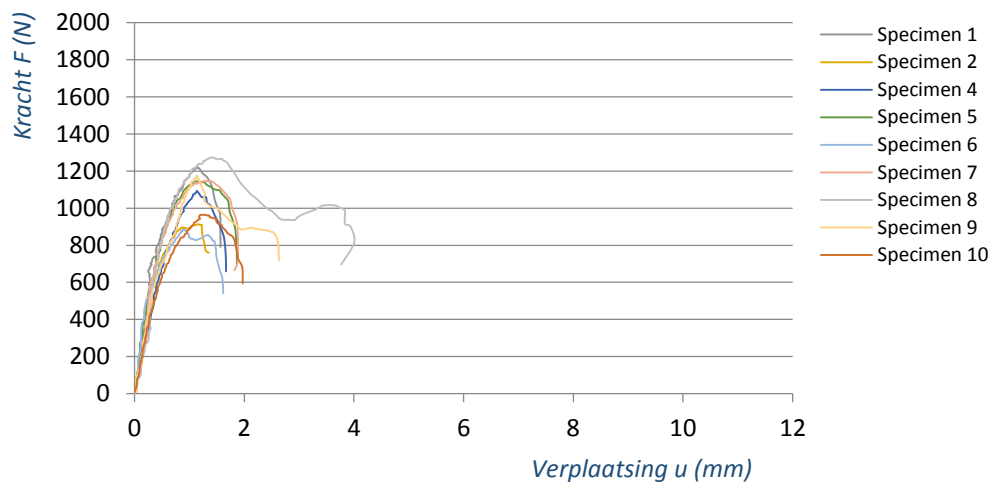
Figuur 47 geeft dan weer een duidelijk voorbeeld hoe de rest van de proefstukken uitzagen op het einde van de test bij $\varnothing 3 \text{ mm}$. Hier trad hier geen brosse breuk op. De scheur die op de afbeelding te zien is, ontstond op het einde van de test.



Figuur 47 Uitzicht proefstukken spaanplaat 5d -5d na de test bij $\varnothing 3 \text{ mm}$

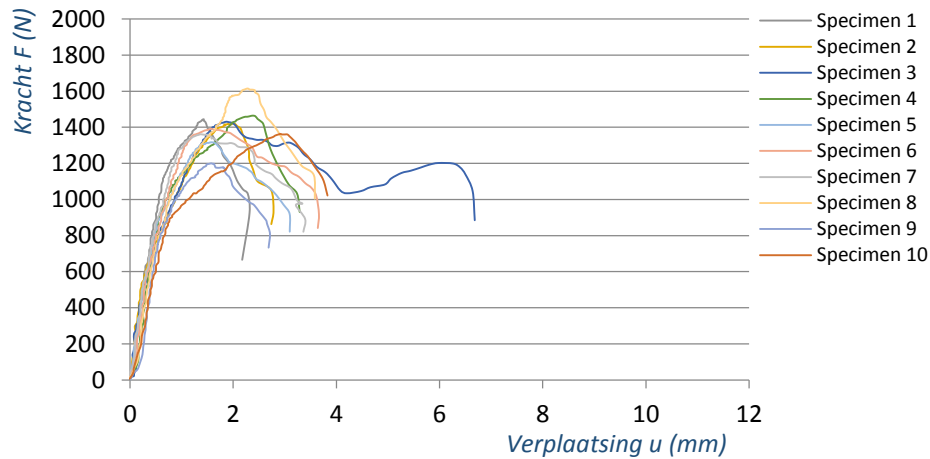
3.2.3.2.4 Randafstand 18d - 2d

Figuur 48 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken spaanplaat met randafstand 2d - 18d wanneer de 2 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 48 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand 2d - 18d bij $\varnothing 2 \text{ mm}$

Figuur 49 op volgende pagina geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken spaanplaat met randafstand 2d - 18d wanneer de 3 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 49 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk spaanplaat met randafstand $2d - 18d$ bij $\varnothing 3$ mm

Bij de afname van de kleinste randafstand tot $2d$ valt onmiddellijk op dat in alle proefstukken brosse breuk ervaren werd na het behalen van een maximum belasting.

Tabel 21 Resultaten randafstand $2d - 18d$ voor spaanplaat

Specimen	t (mm)	\varnothing stift (mm)	ρ (kg/m ³)	Fmax (N)	F _{5mm} (N)	kser1 (N/mm)	k (Nmm)	Fh (N/mm ²)
$\varnothing 2$								
1	12	2,14	734	1217,8	-	-	-	47,4
2	12	2,14	720	912,6	-	-	-	35,5
3	12	2,14	731	1016,4	-	-	-	39,6
4	12	2,14	722	1092,7	-	-	-	42,5
5	12	2,14	711	1144,6	-	-	-	44,6
6	12	2,14	728	885,1	-	-	-	34,5
7	12	2,14	746	1147,6	-	-	-	44,7
8	12	2,14	725	1272,7	-	-	-	49,6
9	12	2,14	722	1175,1	-	-	-	45,8
10	12	2,14	723	964,5	-	-	-	37,6
$\varnothing 3$								
1	12	3,48	708	1444,9	-	-	-	34,6
2	12	3,48	713	1424,0	-	-	-	34,1
3	12	3,48	703	1432,4	-	-	-	34,3
4	12	3,48	714	1465,8	-	-	-	35,1
5	12	3,48	705	1315,4	-	-	-	31,5
6	12	3,48	714	1390,6	-	-	-	33,3
7	12	3,48	705	1361,4	-	-	-	32,6
8	12	3,48	717	1616,1	-	-	-	38,7
9	12	3,48	697	1198,5	-	-	-	28,7
10	12	3,48	717	1365,6	-	-	-	32,7
karakteristiek:		$\varnothing 2$	654	-	-	-	-	32,2
		$\varnothing 3$	651	-	-	-	-	28,5
gemiddeld:		$\varnothing 2$	730	-	-	-	-	42,2
		$\varnothing 3$	721	-	-	-	-	33,6

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,76 bij $\varnothing 2\text{ mm}$ en 0,85 bij $\varnothing 3\text{ mm}$.

De berekende stijfheden vertonen onbetrouwbare resultaten. Omwille van deze reden zijn ze niet mee opgenomen in de resultatentabel.

Figuur 50 geeft dan weer een duidelijk voorbeeld hoe de rest van de proefstukken op het einde van de test uitzagen.

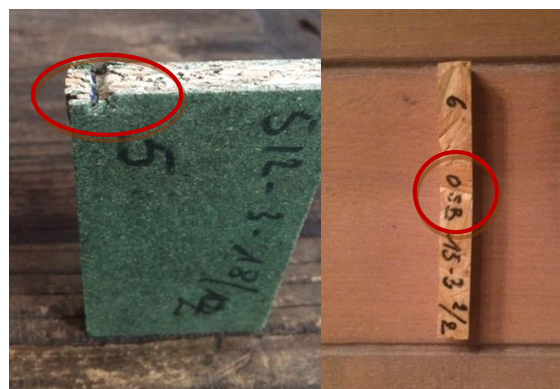


Figuur 50 Uitzicht proefstukken spaanplaat 2d -18d na de test

3.2.3.2.5 Opmerkingen

Zoals aangehaald in de inleiding van dit hoofdstuk, zou ook een proefserie met randafstand 2d- 2d getest worden. Deze is niet uitgebreid behandeld omdat bij het testen van de eerste proefstukken blijkt dat deze bijna allemaal bezwijken door het knikken van het plaatmateriaal. De slankheid van de proefstukken is hier de oorzaak voor. Verder is uit de proefserie met randafstand 2d – 18d ook gebleken dat 2d als afstand te kort blijkt. Wanneer de stift het plaatmateriaal begint in te drukken, is het resterende materiaal tot de rand te miniem om niet volledig mee ingedrukt te worden. Dit leidt onmiddellijk ook tot falen door brosse breuk.

Het knikfenomeen is te zien in *Figuur 51-1* terwijl het probleem van te kleine randafstanden afgebeeld is in *Figuur 51-2*.

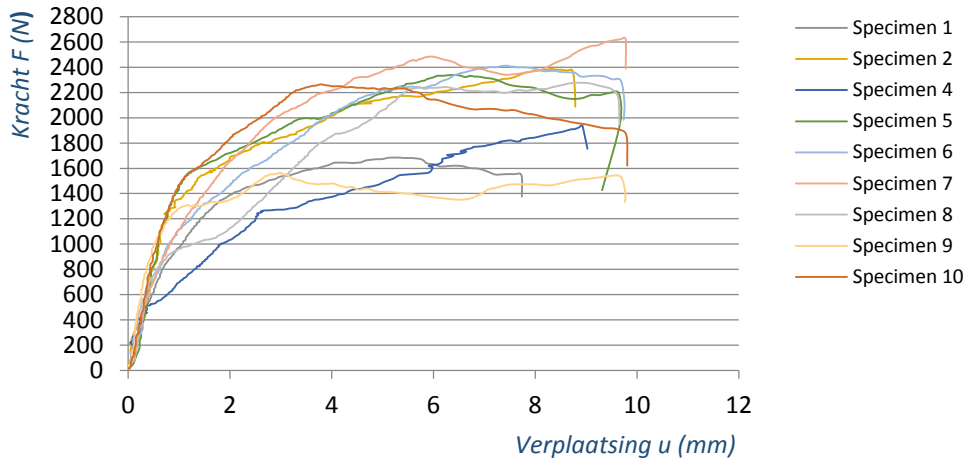


Figuur 51 Probleem bij randafstand 2d - 2d

3.2.3.3 Resultaten OSB

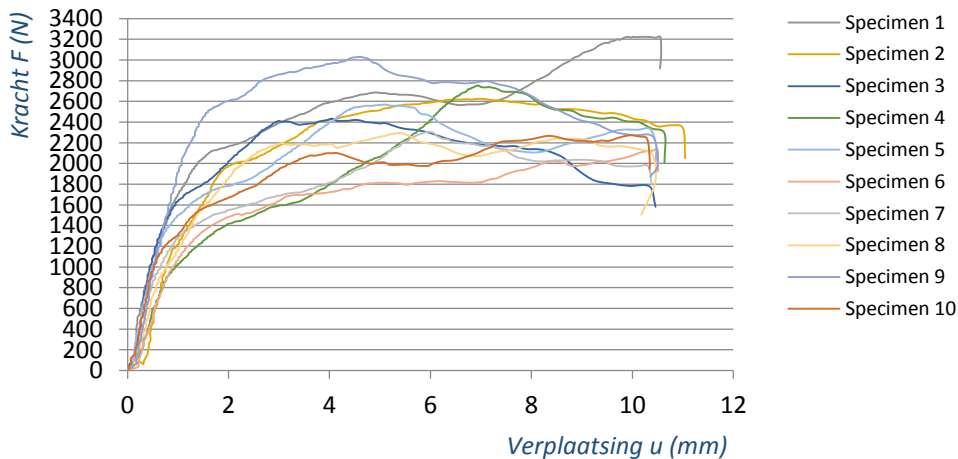
3.2.3.3.1 Randafstand $10d - 10d$

Figuur 52 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken OSB met randafstand $10d - 10d$ wanneer de 2 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 52 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand $10d - 10d$ bij $\varnothing 2$ mm

Figuur 53 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken OSB met randafstand $10d - 10d$ wanneer de 3 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 53 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand $10d - 10d$ bij $\varnothing 3$ mm

Onmiddellijk kan men stellen dat OSB veel meer onderhevig is aan spreiding in de resultaten, maar wel een hoger maximum belasting dan de spaanplaat behaalt. De stijfheid zal ook enkel berekend worden met waardes die realistisch lijken. De stijvere resultaten zullen niet mee in rekening gebracht worden voor het berekenen van de gemiddelde stijfheid en beddingsconstante.

Tabel 22 Resultaten randafstand 10d - 10d voor OSB

Specimen	t (mm)	Ø stift (mm)	ρ (kg/m³)	Fmax (N)	F,5mm (N)	kser1 (N/mm)	k (Nmm)	Fh (N/mm²)
Ø2								
1	15	2,14	596	1684,8	1673,5	1222,0	38,1	52,1
2	15	2,14	624	2386,8	2147,4	1361,3	42,4	66,9
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	15	2,14	609	1941,2	1486,2	512,6*	16,0*	46,3
5	15	2,14	625	2337,9	2194,0	2073,6*	64,6*	68,4
6	15	2,14	639	2411,2	2219,0	1283,8	40,0	69,1
7	15	2,14	615	2624,8	2369,8	1129,0	35,2	73,8
8	15	2,14	620	2276,9	2060,3	1007,8	31,4	64,2
9	15	2,14	605	1562,7	1414,0	2831,3*	88,2*	48,7
10	15	2,14	634	2264,7	2231,7	2032,5*	63,3*	70,6
Ø3								
1	15	3,48	611	3223,05	2681,5	2128,4	40,8	51,4
2	15	3,48	630	2624,8	2514,73	2103,3	40,3	48,2
3	15	3,48	600	2432,55	2387,24	2793,1	53,5	46,6
4	15	3,48	606	2753,0	2066,4	966,5*	18,5*	39,6
5	15	3,48	605	2568,89	2565,6	2215,2	42,4	49,1
6	15	3,48	615	2127,33	1813,0	1447,4*	27,7*	34,7
7	15	3,48	571	2307,4	2043,3	2103,6	40,3	39,1
8	15	3,48	590	2295,2	2258,7	1614,4	30,9	43,3
9	15	3,48	591	3030,8	2945,0	2472,5	47,4	58,1
10	15	3,48	594	2273,8	2009,2	2388,4	45,8	38,5
karakteristiek:		Ø2	551	-	-	-	-	43,1
		Ø3	541	-	-	-	-	31,9
gemiddeld:		Ø2	619	-	-	1200,8*	37,4*	62,2
		Ø3	601	-	-	2227,4*	42,7*	44,9

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,69 bij Ø 2 mm en 0,71 bij Ø 3 mm.

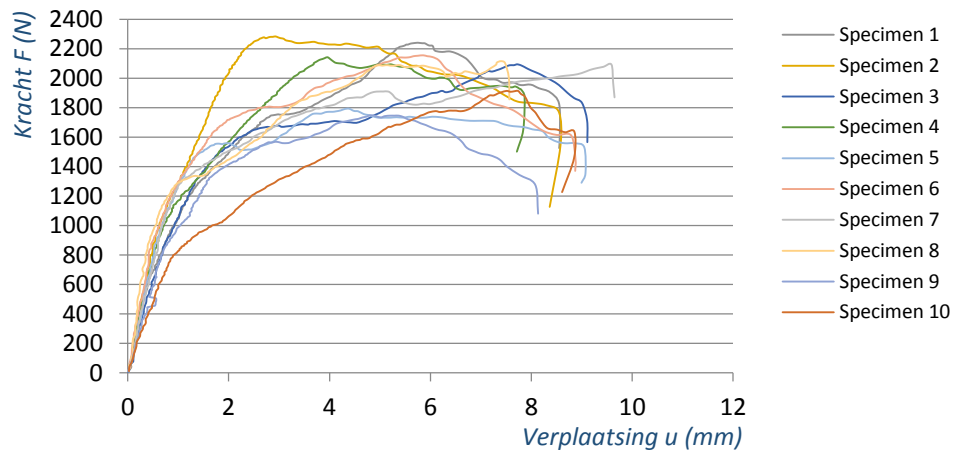
Figuur 54 geeft een duidelijk beeld hoe de proefstukken op het einde van de test uitzagen.



Figuur 54 Uitzicht proefstukken OSB 10d - 10d na de test

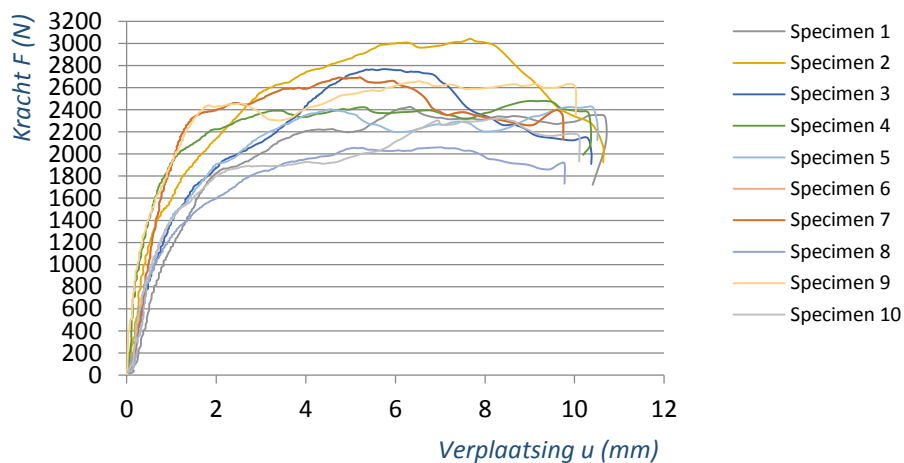
3.2.3.3.2 Randafstand 5d - 15d

Figuur 55 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken OSB met randafstand 5d - 15d wanneer de 2 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 55 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand 5d - 15d bij \varnothing 2 mm

Figuur 56 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken OSB met randafstand 5d - 15d wanneer de 3 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 56 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand 5d - 15d bij \varnothing 3 mm

Opnieuw is een grote spreiding op de stijfheid en de sterkte aan te merken. Deze grote spreiding zal typerend zijn voor het OSB-plaatmateriaal in verdere reeksen.

Tabel 23 Resultaten randafstand 5d - 15d voor OSB

Specimen	t (mm)	Ø stift (mm)	ρ (kg/m³)	Fmax (N)	F,5mm (N)	kser1 (N/mm)	k (Nmm)	Fh (N/mm²)
Ø2								
1	15	2,14	641	2240,3	2111,4	1120,1	34,9	65,8
2	15	2,14	602	2283,0	2202,3	1817,6	56,6	71,1
3	15	2,14	605	2093,8	1766,3	1912,6	59,6	55,0
4	15	2,14	604	2142,6	2093,8	1491,6	46,5	65,2
5	15	2,14	559	1794,7	1733,6	1798,6	56,0	55,9
6	15	2,14	620	2154,8	2094,4	1802,9	56,2	65,2
7	15	2,14	621	2093,8	1910,6	1409,5	43,9	59,5
8	15	2,14	608	2115,1	2087,1	2152,7*	67,1*	65,1
9	15	2,14	565	1748,9	1735,4	1230,9	38,3	54,5
10	15	2,14	595	1913,7	1631,4	857,3*	26,7*	50,8
Ø3								
1	15	3,48	610	2426,4	2204,9	1491,6	28,6	42,2
2	15	3,48	607	3043,0	2866,3	2384,3	45,7	54,9
3	15	3,48	607	2768,3	2721,2	1542,7	29,6	52,1
4	15	3,48	651	2481,4	2406,4	3978,7*	76,2*	46,1
5	15	3,48	618	2423,4	2364,7	2099,0	40,2	45,3
6	15	3,48	598	1928,9	1628,6	1824,5	35,0	31,2
7	15	3,48	616	2692,0	2688,3	2522,3	48,3	51,5
8	15	3,48	608	2060,2	2046,2	2482,9	47,6	39,2
9	15	3,48	621	2658,4	2542,1	3218,2*	61,7*	48,7
10	15	3,48	611	2319,6	1967,9	1991,3	38,1	37,7
karakteristiek:		Ø2		-	-	-	-	48,1
		Ø3		-	-	-	-	30,8
gemiddeld:		Ø2	602	-	-	1573,0	49,0	61,5
		Ø3	615	-	-	2042,3	39,1	44,9

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,78 bij Ø 2 mm en 0,69 bij Ø 3 mm.

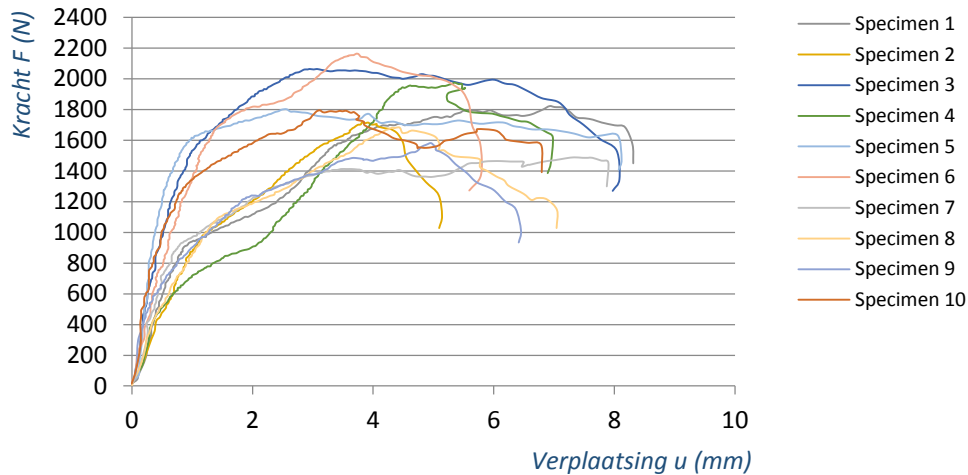
Figuur 57 geeft een duidelijk beeld hoe de proefstukken op het einde van de test uitzagen. De proefstukken bij Ø 2 mm ondergaan een mindere verplaatsing bij breuk omwille van het feit dat het plaatmateriaal begint te scheuren.



Figuur 57 Uitzicht proefstukken OSB 5d - 15d na de test

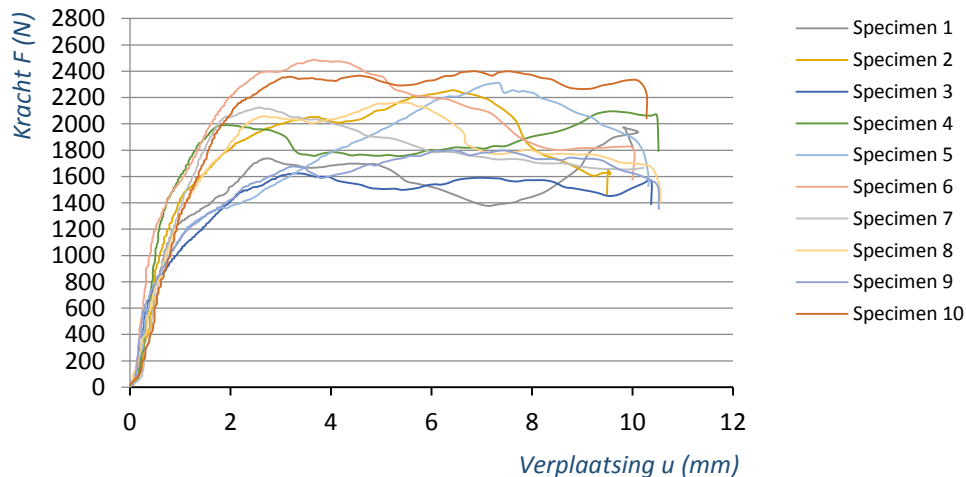
3.2.3.3.3 Randafstand 5d - 5d

Figuur 58 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken OSB met randafstand 5d - 5d wanneer de 2 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 58 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand 5d - 5d bij \varnothing 2 mm

Figuur 59 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken OSB met randafstand 5d - 5d wanneer de 3 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 59 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand 5d - 5d bij \varnothing 3 mm

De 2 mm stift typeert opnieuw voor zowel de sterkte als de stijfheid, een grote spreiding op de resultaten. Niet alle resultaten voor de stijfheid zullen gebruikt worden in de berekening van de gemiddelde waarde.

Aan het grafische verloop van de resultaten valt ook af te leiden dat hier meer gevallen voorkomen waar brosse breuk optreedt na het bereiken van de maximum belasting.

Tabel 24 Resultaten randafstand 5d - 5d voor OSB

Specimen	t (mm)	Ø stift (mm)	ρ (kg/m³)	Fmax (N)	F _{5mm} (N)	kser1 (N/mm)	k (Nmm)	Fh (N/mm²)
Ø2								
1	15	2,14	624	1822,1	1749,8	1343,3	41,8	54,5
2	15	2,14	577	1715,3	1278,6	968,1	30,2	53,4
3	15	2,14	606	2063,2	2018,1	2327,0*	72,5*	64,3
4	15	2,14	602	1974,7	1942,8	535,2*	16,7*	60,5
5	15	2,14	618	1800,8	1703,4	3715,1*	115,7*	56,1
6	15	2,14	616	2164,0	2011,1	1360,9	42,4	67,4
7	15	2,14	613	1489,4	1363,4	1584,5	49,4	42,5
8	15	2,14	596	1681,7	1626,4	951,9	29,7	52,4
9	15	2,14	623	1581,0	1567,5	1277,4	39,8	49,3
10	15	2,14	593	1794,7	1558,2	3044,5*	94,8*	55,9
Ø3								
1	15	3,48	586	1971,7	1677,7	1981,3	61,7	32,1
2	15	3,48	588	2255,5	2104,2	2535,0*	79,0*	40,3
3	15	3,48	580	1623,4	1506,3	2335,2*	72,7*	31,1
4	15	3,48	577	2096,9	1759,1	2740,3*	85,4*	33,7
5	15	3,48	576	2307,2	1952,3	1435,6	44,7	37,4
6	15	3,48	615	2487,3	2359,4	3238,2*	100,9*	47,7
7	15	3,48	607	2124,5	1897,5	2073,0	64,6	40,7
8	15	3,48	618	2161,1	2155,9	1436,7	44,8	41,3
9	15	3,48	602	1795,7	1701,7	2018,9	62,9	32,6
10	15	3,48	627	2399,1	2322,9	1605,7	50,0	44,5
karakteristiek:		Ø2	546	-	-	-	-	41,8
		Ø3	538	-	-	-	-	27,7
gemiddeld:		Ø2	607	-	-	1247,7*	38,9*	55,6
		Ø3	598	-	-	1758,5*	54,8*	38,1

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,75 bij Ø 2 mm en 0,73 bij Ø 3 mm.

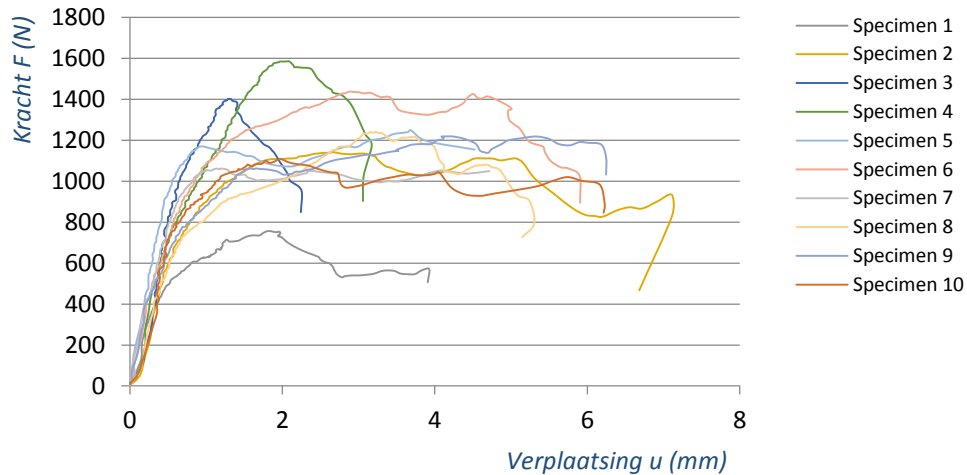
Figuur 60 laat het brosse karakter zien van de proefstukken bij Ø 2 mm.



Figuur 60 Brosse karakter proefstukken OSB bij randafstand 5d - 5d met Ø 2 mm

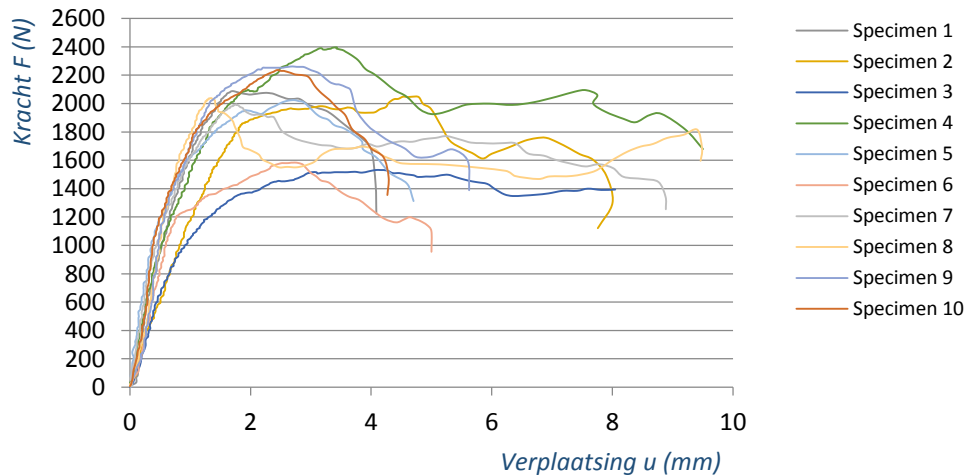
3.2.3.3.4 Randafstand $18d - 2d$

Figuur 61 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken OSB met randafstand $2d - 18d$ wanneer de 2 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 61 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand $2d - 18d$ bij $\varnothing 2$ mm

Figuur 62 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor 10 proefstukken OSB met randafstand $2d - 18d$ wanneer de 3 mm stift gebruikt wordt.



Figuur 62 Kracht in functie van de gemiddelde verplaatsing voor het proefstuk OSB met randafstand $2d - 18d$ bij $\varnothing 3$ mm

Bij de afname van de kleinste randafstand tot $2d$ valt onmiddellijk op dat in veel gevallen brose breuk optreedt na het behalen van een maximum belasting. In tegenstelling tot bij spaanplaat, gebeurt dit niet in alle gevallen.

Tabel 25 Resultaten randafstand 2d - 18d voor OSB

Specimen	t (mm)	Ø stift (mm)	ρ (kg/m ³)	F _{max} (N)	F _{5mm} (N)	k _{ser1} (N/mm)	k (Nmm)	F _h (N/mm ²)
Ø2								
1	15	2,14	594	757,6	-	-	-	23,6
2	15	2,14	604	1142,8	1107,5	1654,5	51,5	35,6
3	15	2,14	619	1399,6	-	2240,6*	69,8*	43,6
4	15	2,14	625	1582,5	-	1756,2	54,7	49,3
5	15	2,14	614	1248,7	1085,0	-	-	38,9
6	15	2,14	585	1438,1	1354,6	-	-	44,8
7	15	2,14	558	1062,5	-	1493,8	46,5	33,1
8	15	2,14	631	1239,1	969,4	1558,2	48,5	38,6
9	15	2,14	624	1216,6	1200,5	1424,1	44,4	37,4
10	15	2,14	594	1107,5	1258,3	1639,2	51,1	34,5
Ø3								
1	15	3,48	603	2088,0	-	2296,8	44,0	40,0
2	15	3,48	612	2046,2	1957,5	1191,8*	22,8*	39,2
3	15	3,48	645	1534,7	1487,7	1548,8	29,7	29,4
4	15	3,48	624	2396,0	1926,2	1880,3	36,0	45,9
5	15	3,48	613	2025,4	-	2772,4	53,1	38,8
6	15	3,48	610	1581,7	-	2131,7	40,8	30,3
7	15	3,48	605	1994,0	1753,9	2451,5	47,0	38,2
8	15	3,48	624	2041,0	1571,2	2228,9	42,7	39,1
9	15	3,48	639	2260,3	1628,6	2718,2	52,1	43,3
10	15	3,48	597	2239,4	-	2990,4*	57,3*	42,9
karakteristiek:		Ø2	544	-	-	-	-	24,3
		Ø3	556	-	-	-	-	28,3
gemiddeld:		Ø2	605	-	-	1587,7*	49,5*	37,9
		Ø3	617	-	-	2253,6*	43,2*	38,7

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,64 bij Ø 2 mm en 0,73 bij Ø 3 mm.

Figuur 63 laat het brosse karakter zien van de proefstukken bij randafstanden tot 2d.



Figuur 63 Brosse karakter proefstukken OSB bij randafstand 2d - 18d

3.2.3.3.5 Opmerkingen

Zoals bij de opmerkingen van spaanplaat werd besproken leent een randafstand tot $2d$ zich niet om degelijke stuiksterktes van het materiaal te behalen. Omdat in voorgaande reeks $2d - 18d$ nog voldoende materiaal langs één kant zit, volgt hieruit nog relatief voldoende sterkte.

Bij proefstukken met randafstand $2d - 2d$ kunnen twee oorzaken voor het bezwijken van het materiaal worden gedefinieerd. Enerzijds zijn er proefstukken die door knik falen, zoals geschetst in *Figuur 64*. Anderzijds is brossse breuk de oorzaak voor het bezwijken van het plaatmateriaal.



Figuur 64 het knikken van het proefstuk OSB bij randafstand $2d$

In *Figuur 65* is goed te zien dat er nauwelijks een verplaatsing zou kunnen plaatsvinden omdat het resterende materiaal langs de randen onmiddellijk scheurt of wordt platgedrukt door de stift.

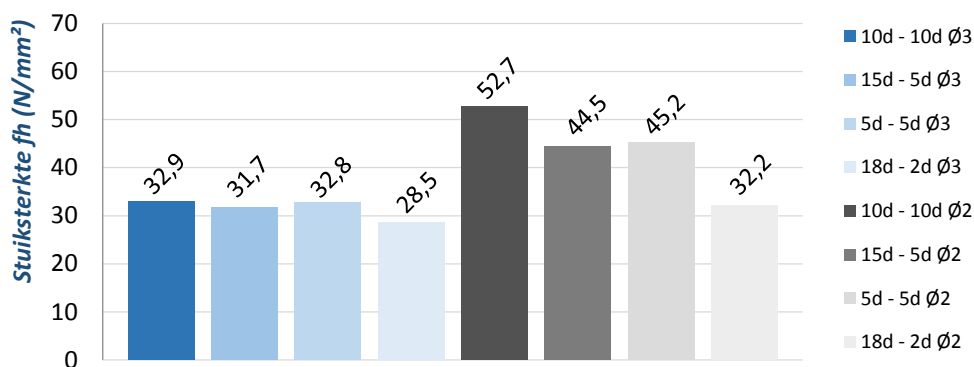


Figuur 65 Falen van plaatmateriaal OSB bij randafstand $2d$

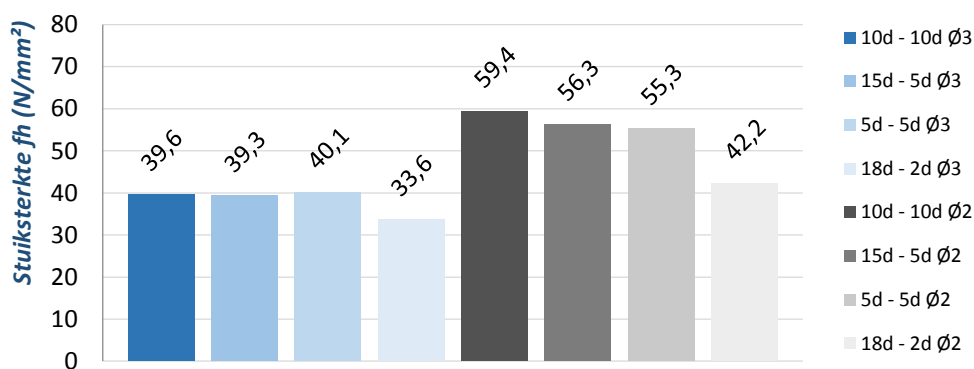
3.2.4 Evaluatie van de resultaten

3.2.4.1 Conclusie Spaanplaat

In het geval van de spaanplaat kan geconcludeerd worden dat grafisch voor zowel de karakteristieke als de gemiddelde waarde eenzelfde trend tot stand komt. Bij het gebruik van de dunste stift wordt gezien op *Figuur 66* en *Figuur 67* dat bijna identiek hetzelfde verloop behaald wordt. Wanneer de 3 mm stift wordt gebruikt volgt een lichte afwijking ten opzichte van de referentieafstand 10d.



Figuur 66 Karakteristieke stuiksterkte spaanplaat



Figuur 67 Gemiddelde stuiksterkte spaanplaat

Als eerste opmerking kan vermeld worden dat het optreden van brossse breuk niet bijdraagt tot een vermindering in stuiksterkte bij een randafstand tot 5d. De meest voorkomende vorm van brossse breuk bij plaatmaterialen is het scheuren van het plaatmateriaal bij een toenemende belasting. Door de scheurvorming ontstaat er een steile daling van de kracht-verplaatsingscurve nadat de maximum belasting bereikt is. Dit fenomeen is besproken bij het grafische verloop van elke proefserie. Er wordt steeds een voldoende maximum belasting gehaald die rond de verwachte waarde ligt.

In *Tabel 26* wordt de procentuele verhouding van een stuijsterkte op bepaalde randafstand gegeven tot de waarde op de referentieafstand van $10d$. Hier kan duidelijk worden gezien dat de afwijking tussen karakteristiek en gemiddeld bij $\emptyset 3$ mm maar maximaal 3,6% bedraagt. Buiten het feit dat de karakteristieke waarde bij $\emptyset 2$ mm een maximum afwijking kent van 13,7%, kan gezegd worden dat de stuijsterkte bij een randafstand tot $5d$ rond de referentiewaarde blijft hangen. Bij $\emptyset 3$ mm bedraagt de afwijking van de karakteristieke stuijsterkte op randafstand $5d$ maar maximaal 3,6%. Wanneer hierna naar de gemiddelde stuijsterkte gekeken wordt, bedraagt de afwijking zelfs bij $\emptyset 2$ mm nog maar 6,9% tot $5d$.

Tabel 26 Verhouding stuijsterktes spaanplaat ten opzichte van de referentie waarde op randafstand $10d$

<i>Verhouding $F_{h,i} / F_{h,10d}$</i>				
	<i>10d - 10d</i>	<i>15d - 5d</i>	<i>5d - 5d</i>	<i>18d - 2d</i>
Karakteristiek				
$\emptyset 2$	100,0%	84,4%	85,8%	61,1%
$\emptyset 3$	100,0%	96,4%	99,7%	86,6%
Gemiddeld				
$\emptyset 2$	100,0%	98,1%	93,1%	71,0%
$\emptyset 3$	100,0%	99,2%	101,3%	84,8%

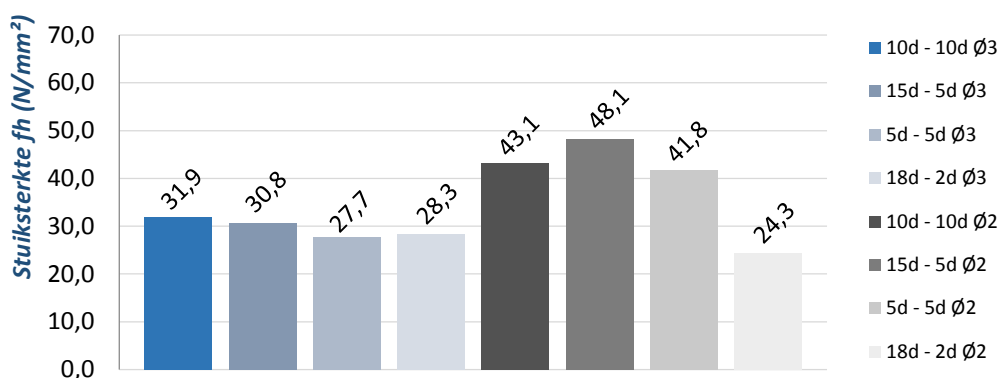
De afwijking in stuijsterkte, wanneer de randafstand verminderd wordt tot $2d$, is wel significant hoger. De maximum afwijking bedraagt hier op basis van karakteristieke waardes zelfs 38,9%. In vergelijking met de klassieke spreiding van hout is dit een wezenlijk verschil.

Als eindconclusie voor de invloed van de randafstand op de stuijsterkte van spaanplaat kan dus gesteld worden dat bij een randafstand tot $5d$ geen significant verschil in stuijsterkte op te merken valt wanneer de gemiddelde waardes vergeleken worden. Het verschil in sterkte is hier niet veel groter dan de klassieke spreiding waar men mee te maken heeft bij het gebruik van hout als materiaal. Deze spreiding bedraagt in het geval van houten plaatmaterialen 10-15%. De gemiddelde waardes lenen zich beter bij het stellen van een conclusie aangezien een sterk afwijkende waarde het resultaat minder beïnvloedt. Pas bij een vermindering van de randafstand vanaf $5d$ neemt de stuijsterkte af, tot op een punt waar brossse breuk altijd optreedt en zorgt dat het plaatmateriaal vroegtijdig faalt.

Het doel zal nu zijn om voor een genagelde en geniete verbinding de invloed van de randafstand tot de sterkte opnieuw te onderzoeken. We kijken of de sterkte opnieuw dezelfde blijft tot $5d$ als randafstand. De vermindering van de randafstand wordt hier ook onderzocht. Uit de testen op stuijdruk blijkt dat een randafstand van $2d$ te klein is. Daarom zal voor genagelde verbindingen de kleinste randafstand $3d$ en voor geniete verbindingen $4d$ bedragen.

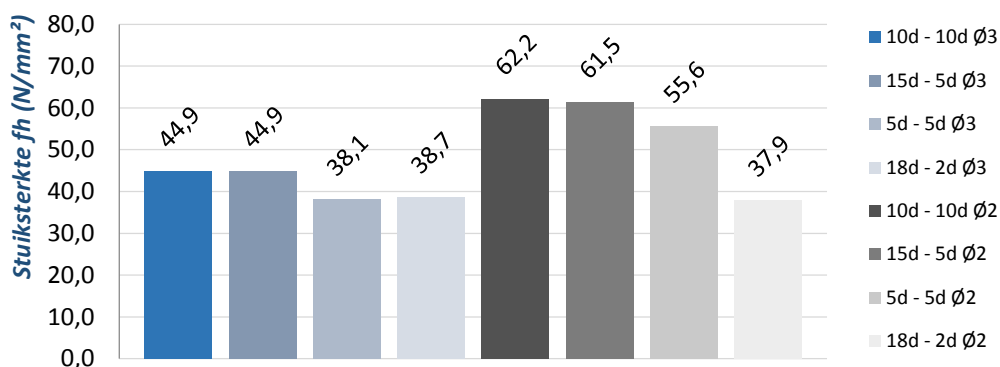
3.2.4.2 Conclusie OSB

In *Figuur 68* en *Figuur 69* zijn respectievelijk de karakteristieke en gemiddelde stuiksterktes van OSB bij verschillende randafstanden weergegeven. Het valt op dat er toch bepaalde verschillen zijn wanneer deze grafieken vergeleken worden met die van spaanplaat.



Figuur 68 Karakteristieke stuiksterkte OSB

In tegenstelling tot de gevonden resultaten van spaanplaat valt bij OSB een verschil op te merken tussen de reeks *5d – 15d* en *5d – 5d*. In het geval van OSB maakt het dus uit of beide randafstanden dezelfde vermindering in afstand hebben ondergaan. Telkens worden er hogere stuiksterktes gevonden wanneer er zich nog voldoende materiaal aan één zijde van de plaat bevindt.



Figuur 69 Gemiddelde stuiksterkte OSB

In *Tabel 27* wordt de procentuele verhouding van een stuiksterkte op bepaalde randafstand gegeven tot de waarde op de referentieafstand van *10d*. Bij het gebruik van de $\text{Ø } 3 \text{ mm}$ stift is de verhouding tot de referentiewaarde voor de gemiddelde en karakteristieke waarde maar licht afwijkend.

Voor de dunnere stift zijn grotere verschillen tussen beide waardes te vinden. Het is ook opmerkelijk dat voor OSB de resultaten van randafstand $5d - 5d$ en $18d - 2d$ niet meer dan 1,9% van elkaar verschillen bij $\emptyset 3 \text{ mm}$.

Tabel 27 Verhouding stuiksterktes OSB ten opzichte van de referentie waarde op randafstand $10d$

Verhouding $F_{h,i} / F_{h,10d}$				
	$10d - 10d$	$15d - 5d$	$5d - 5d$	$18d - 2d$
Karakteristiek				
$\emptyset 2$	100,0%	111,6%	97,0%	56,4%
$\emptyset 3$	100,0%	96,6%	86,8%	88,7%
Gemiddeld				
$\emptyset 2$	100,0%	98,8%	89,3%	60,7%
$\emptyset 3$	100,0%	100,1%	84,9%	86,3%

Als conclusie voor de invloed van de randafstand op de stuiksterkte van OSB kan dus gesteld worden dat de daling in stuiksterkte bij een randafstand tot $5d$ niet altijd beperkt blijft. Bij het gebruik van de grootste diameter stift is er weinig verschil in stuiksterkte tussen $5d$ en $2d$ als kleinste randafstanden. Pas bij de $\emptyset 2 \text{ mm}$ stift valt er een verschil op te merken wanneer de randafstand van $5d$ tot $2d$ verminderd wordt.

Als eindconclusie van dit deelonderzoek kan vermeld worden dat de gebruikte diameter stift een zekere invloed heeft gehad op het resultaat bij een bepaalde randafstand. Bij de afname van de diameter werd de kleinst gekozen randafstand steeds minder geschikt voor het verlenen van de nodige stuiksterkte van het materiaal.

3.3 Proeven op uittrekcapaciteit van geprofileerde nagels

3.3.1 Inleiding

De uittrekcapaciteit speelt een belangrijke rol in de sterkte van de verbinding op afschuiving. Omwille van deze reden zijn twee reeksen proeven uitgevoerd. Omdat de EC5 geen rekenregels voorlegt om $f_{ax,k}$ te berekenen bij geprofileerde nagels, dient deze waarde experimenteel bepaald te worden. Ook voor de nieten wordt de uittrekcapaciteit getest. Deze wordt vergeleken met de berekende waarde uit de Eurocode.

De uittrekcapaciteit wordt berekend door onderstaande vergelijking:

- Geprofileerde nagels

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 \end{array} \right. \quad (3-8)$$

- Nieten (per been)

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 + f_{ax,k} \cdot d \cdot t \end{array} \right. \quad (3-9)$$

In deze formules zitten de karakteristieke uittreksterkte en de karakteristieke doortreksterkte. Deze kunnen experimenteel bepaald worden via EN 1382 en EN 1383.

3.3.2 Proefopstelling

De uittreksterkte van verbindingsmiddelen uit houten verbindingen wordt gemeten zoals beschreven in EN 1382. De meting voor de doortreksterkte is beschreven in EN 1383. Omdat het niet mogelijk was om deze testen apart te doen, is er getracht om via experimenteel onderzoek direct de $F_{ax,Rk}$ te bekomen voor een reeks proefstukken.

De proefopstelling is afgebeeld in *Figuur 70*.



Figuur 70 Proefopstelling uittrekcapaciteit

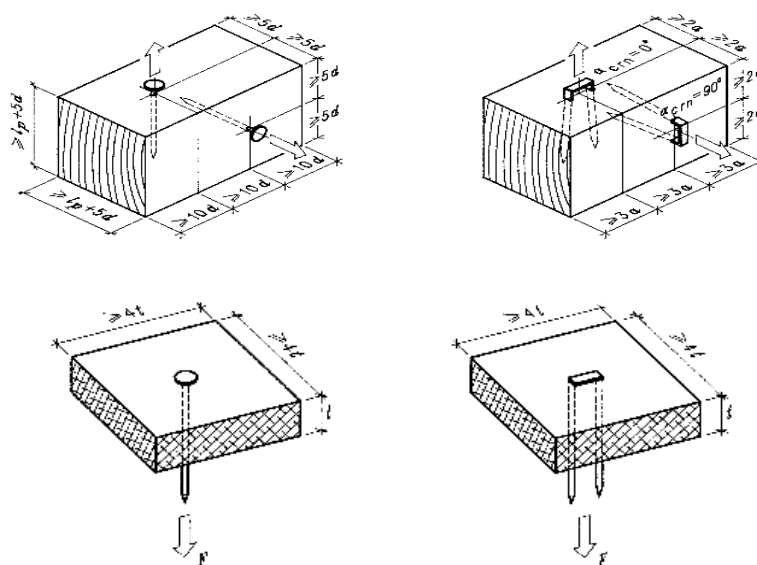
In plaats van aan het bevestigingsmiddel te trekken, is het houtblok onderhevig aan een toenemende drukkracht. De verbinding kan falen op twee verschillende manieren. Het bevestigingsmiddel wordt uit het hout getrokken zodat de uittreksterkte van het bevestigingsmiddel in het hout bepalend is, oftewel wordt de kop van het bevestigingsmiddel door het plaatmateriaal getrokken waardoor de doortreksterkte van het bevestigingsmiddel in de plaat bepalend is.

3.3.2.1 Voorbehandeling

De proefstukken worden vervaardigd uit hout of houtachtige materialen met een evenwichtsvochtgehalte bij $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ en $(85 \pm 5)\%$ betrekkelijke luchtvochtigheid. Na vervaardiging moeten de proefstukken minstens één week opgeslagen worden bij $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ en $(65 \pm 5)\%$ betrekkelijke vochtigheid. Er zijn geen andere vochtigheidsvoorbehandelingen gebruikt.

3.3.2.2 Vervaardiging van de proefstukken

De afmetingen van de proefstukken dienen te voldoen aan de combinatie van regels die beschreven worden in de normen voor het testen van de uittrek- en doortreksterkte. Belangrijk is dat voldoende hechtlengthte van het bevestigingsmiddel gegarandeerd wordt. De proefstukken dienen te zijn vervaardigd zodat zij beantwoorden aan de minimale dimensies zoals te zien in *Figuur 71*.



Figuur 71 Minimale dimensies proefstukken uittrekcapaciteit

Tabel 28 Overzicht testseries uittrekcapaciteit

Series (-)	n test	ρ_k (kg/m ³) Hout	ρ_m (kg/m ³) Hout	ρ_k (kg/m ³) Plaat
Nagel-2,5-I	5	425	497	720
Nagel-2,5-II	5	445	495	720
Nagel-2,5-III	5	332	393	720

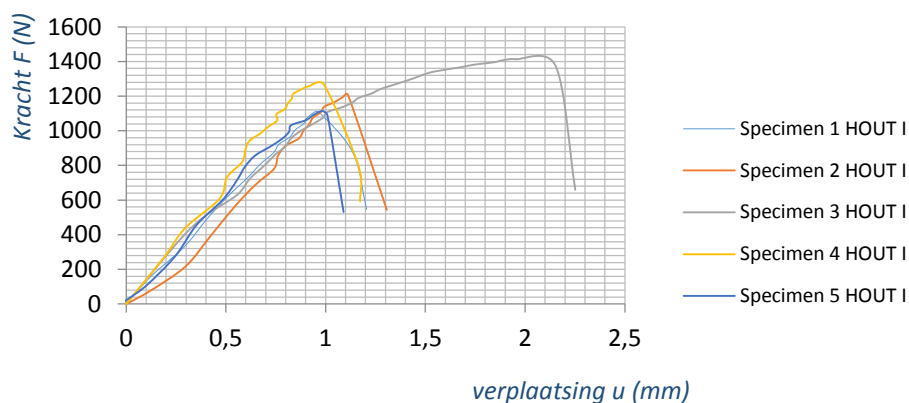
3.3.3 Uittrekcapaciteit van geprofileerde nagel

3.3.3.1 Resultaten geprofileerde nagel

De resultaten van de test op uittrekcapaciteit voor 5 proefstukken van serie I zijn in *Tabel 29* en *Figuur 72* weergegeven.

Tabel 29 Resultaten test op uittrekcapaciteit serie I

<i>Testserie I</i>			
<i>Specimen (-)</i>	ρ (kg/m ³) <i>plaat</i>	ρ (kg/m ³) <i>Hout</i>	<i>Fmax (N)</i>
1	555	444	1107,9
2	534	502	1208,6
3	556	498	1423,1
4	558	514	1266,6
5	553	511	1114,0
		ρ_k 426	<i>Fax,Rk</i> 949,87
		ρ_m 497	<i>Fax,Rm</i> 1224,1



Figuur 72 Kracht in functie van de verplaatsing voor proefstukken serie I voor test op uittrekcapaciteit

De toestand van de proefstukken uit serie I na uitvoeren van de test is weergegeven in *Figuur 73*. Hierop is duidelijk te zien dat de geprofileerde nagel uit het gebruikte hout zal worden getrokken.

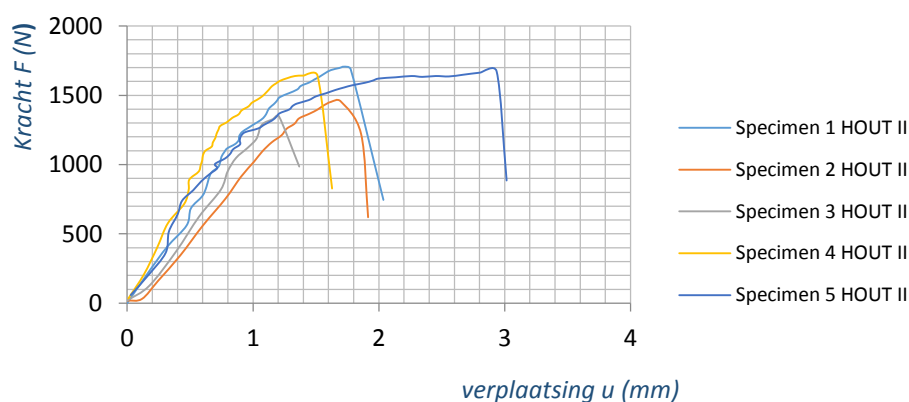


Figuur 73 Toestand proefstukken serie I na uitvoeren test

De resultaten van de test op uittrekcapaciteit voor 5 proefstukken van serie II zijn in Tabel 30 en Figuur 74 weergegeven.

Tabel 30 Overzicht resultaten test op uittrekcapaciteit serie II

<i>Testserie II</i>			
<i>Specimen (-)</i>	ρ (kg/m ³) plaat	ρ (kg/m ³) Hout	<i>Fmax (N)</i>
1	553	519	1706,1
2	550	473	1455,9
3	558	494	1349,0
4	551	476	1642,0
5	543	516	1672,6
		ρ_k 445	<i>Fax,Rk</i> 1213,7
		ρ_m 496	<i>Fax,Rm</i> 1565,1



Figuur 74 Kracht in functie van de verplaatsing voor proefstukken serie II voor test op uittrekcapaciteit

De toestand van de proefstukken uit serie II na uitvoeren van de test is weergegeven in Figuur 75. Hierop is duidelijk te zien dat de geprofileerde nagel uit het gebruikte hout zal worden getrokken.

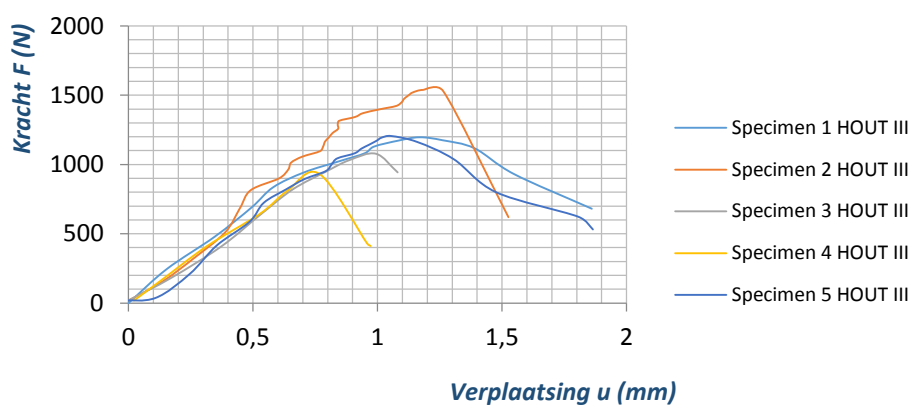


Figuur 75 Toestand proefstukken serie II na uitvoeren test

De resultaten van de test op uittrekcapaciteit voor 5 proefstukken van serie III zijn in *Tabel 31* en *Figuur 76* weergegeven.

Tabel 31 Overzicht resultaten test op uittrekcapaciteit serie III

<i>Testserie III</i>			
<i>Specimen (-)</i>	ρ (kg/m ³) plaat	ρ (kg/m ³) Hout	<i>Fmax (N)</i>
1	539	373	1196,4
2	554	383	1538,3
3	560	441	1077,4
4	547	396	930,9
5	558	376	1205,6
		ρ_k 333	<i>Fax,Rk</i> 746,4
		ρ_m 394	<i>Fax,Rm</i> 1189,7



Figuur 76 Kracht in functie van de verplaatsing voor proefstukken serie III voor test op uittrekcapaciteit

De toestand van de proefstukken uit serie III na uitvoeren van de test is weergegeven in *Figuur 77*. Hierop is duidelijk te zien dat de geprofileerde nagel uit het gebruikte hout zal worden getrokken.



Figuur 77 Toestand proefstukken serie III na uitvoeren test

3.3.3.2 Evaluatie uittrekcapaciteit geprofileerde nagel

De karakteristieke waarde kan ook worden berekend via NBN EN 14358 op basis van 15 proefstukken. Alle proefstukken worden opgesomd in *Tabel 32*. De bijdrage van het koordeffect wordt hierin ook vermeld.

Tabel 32 Overzicht totaal aantal proefstukken uittrekcapaciteit voor geprofileerde nagel

Specimen (-)	F_{max} (N)	ρ (kg/m ³)
I-1	1107,90	444
I-2	1208,60	502
I-3	1423,10	498
I-4	1266,60	514
I-5	1114,00	511
II-1	1706,10	519
II-2	1455,90	473
II-3	1349,00	494
II-4	1642,00	476
II-5	1672,60	516
III-1	1196,40	373
III-2	1538,30	383
III-3	1077,40	441
III-4	930,90	396
III-5	1205,60	376
$F_{ax,Rk}$	911,80	ρ_k 358
$F_{ax,Rk/4}$	227,90	ρ_m 461
$F_{ax,Rm}$	1326,30	
$F_{ax,Rm/4}$	331,60	

Op basis van deze karakteristieke waarde kan de karakteristieke uittreksterkte berekend worden.

$$F_{ax,Rk} = \min \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 \end{cases} \quad (3-10)$$

Het minimum aandeel zal bepaald worden door de uittreksterkte van de geprofileerde nagel in het houtblok. De berekening voor de karakteristieke uittreksterkte van de geprofileerde nagel wordt gegeven in *Tabel 33*.

Tabel 33 Berekening uittreksterkte geprofileerde nagel

Berekening uittreksterkte geprofileerde nagel	
d (mm)	2,50
t_{pen} (mm)	33,00
Plaat: Multiplex	
t (mm)	17,00
Uittrekcapaciteit	
$F_{ax,Rk}$ (N)	$f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen}$
$F_{ax,Rk}$ (N)	911,80
Uittreksterkte	
$f_{ax,k}$ (N/mm ²)	$f_{ax,k} = F_{ax,Rk} / (d \cdot t_{pen})$
$f_{ax,k}$ (N/mm ²)	11,00

Uit de berekeningen volgt dat de geprofileerde nagel een karakteristieke uittreksterkte bezit van 11 N/mm^2 . Wat volgt in *Tabel 34* is een berekening om aan te tonen wat de winst in uittrekcapaciteit is wanneer men kies voor een behandelde nagel in plaats van een gladde nagel met dezelfde diameter. Ook wordt de berekening gedaan met de minimum uittreksterkte die de EC5 (Appendix C) geeft voor geprofileerde nagels indien geen proeven op uittreksterkte voorhanden zijn ($f_{ax,k} = 6 \text{ N/mm}^2$).

Tabel 34 Vergelijking geprofileerde nagel experimenteel/berekend

Berekening uittreksterkte geprofileerde nagel		
	Gladde nagel	Geprofileerde nagel EC5
d (mm)	2,50	2,50
d_h (mm)	6,00	6,00
t_{pen} (mm)	33,00	33,00
Plaat: Multiplex		
t (mm)	17,00	17,00
ρ_k (kg/m ³)	500,00	500,00
Hout		
ρ_k (kg/m ³)	358,00	358,00
Uittreksterkte		
$f_{ax,k}$ (N/mm ²)	$f_{ax,k} = 20 \times 10^{-6} \rho_k^2$	Minimum waarde [EC5]
$f_{ax,k}$ (N/mm ²)	2,60	6,00
Doortreksterkte		
$f_{head,k}$ (N/mm ²)	$f_{head,k} = 70 \times 10^{-6} \rho_k^2$	–
$f_{head,k}$ (N/mm ²)	17,5	-
Uittrekcapaciteit		
$F_{ax,Rk}$ (N)	$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 \end{array} \right.$	
Minimum	211,50	495,00
	738,90	-
$F_{ax,Rk}$ (N)	211,50	495,00
$F_{ax,Rk}/4$ (N)	52,90	123,80
$F_{ax,Rk}$ (N) exp	911,80	
ber/exp	0,23	0,54

Wanneer geprofileerde nagels gebruikt worden, is onmiddellijk het verschil in sterkte tegen uittrekking zichtbaar. Omdat de Eurocode (Appendix C) naast de minimumwaarde voor $f_{ax,k}$ van geprofileerde nagels (6 N/mm^2) geen richtlijnen geeft voor de berekening hiervan, is het altijd aangeraden om de karakteristieke uit- en doortreksterkte van geprofileerde nagels experimenteel te bepalen. Het verschil in uittrekcapaciteit met de minimum waarde kwam in dit onderzoek neer op 46,0%. Het loont ook om te kiezen voor een geprofileerde nagel in plaats van een gladde nagel. De gladde nagel haalt maar 23,0% van de experimentele uittrekcapaciteit van de geprofileerde nagel wanneer hij berekend wordt via de rekenregels van EC5.

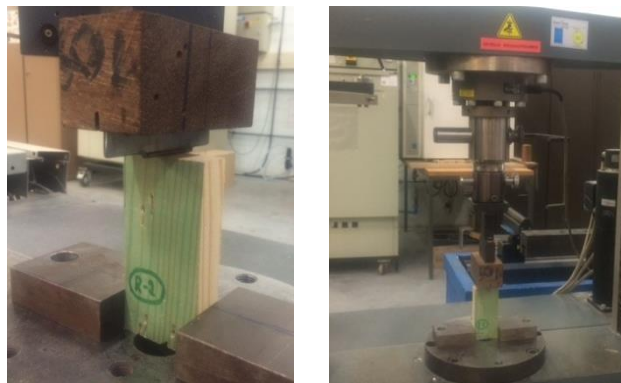
3.4 **Proeven op stuikdruk met geprofileerde nagel 2,5mm**

3.4.1 Inleiding

Om in het deel 'berekening van de sterkte van de verbinding' over genoeg experimentele waarden te beschikken, dient de stuiksterkte van het gebruikte naaldhout en spaanplaat nog experimenteel bepaald te worden. De proeven op stuikdruk zullen gebeuren met een stift welke gelijkaardig is aan de gebruikte geprofileerde nagel in de verbinding.

3.4.2 Proefopstelling

De proefopstelling is gelijkaardig aan diegene gebruikt in 3.1. De proefopstelling is nog eens afgebeeld in *Figuur 78*.



Figuur 78 Proefopstelling stuikdruk 2,5 mm stift

Om een zo realistisch mogelijke waarde voor de stuiksterkte te verkrijgen die gebruikt kan worden in de vergelijkingen van Johansen, is de geprofileerde nagel zelf gebruikt als stift om de test op stuikdruk uit te voeren. *Figuur 79* laat de stift zien welke gebruikt wordt om de proef uit te voeren.



Figuur 79 Test stuikdruk met geprofileerde nagel

3.4.2.1 Voorbehandeling

De proefstukken worden vervaardigd uit hout of houtachtige materialen met een evenwichtsvochtgehalte bij (20 ± 2) °C en (65 ± 5) % betrekkelijke luchtvochtigheid. Na vervaardiging worden de proefstukken opgeslagen bij dezelfde omstandigheden.

3.4.2.2 Vervaardiging van de proefstukken

De houtblokjes naaldhout waaruit de verbindingen bestaan, worden gerangschikt volgens hun densiteit. De onderverdeling onderscheidt vier verschillende series. Van elke serie zal de stuiksterkte van het hout bepaald worden. Een overzicht van deze onderverdeling is weergegeven in *Tabel 35*.

Tabel 35 Overzicht proefstukken stuikdruk volgens densiteit

<i>Serie (-)</i>	ρ_k (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	<i>n proefstukken</i>
<i>Stift 2,5 mm</i>			
1	392	455	10
2	455	550	10
3	580	645	10
4	659	733	10

Voor de spaanplaat worden 10 proefstukken gezaagd uit eenzelfde plaat. Elk proefstuk heeft een afmeting van 50 mm x 210 mm x 12 mm.

3.4.3 Resultaten stuikdruk met geprofileerde nagel 2,5 mm

3.4.3.1 Stuiksterkte hout in functie van verschillende densiteit

3.4.3.1.1 Berekening stuiksterkte hout

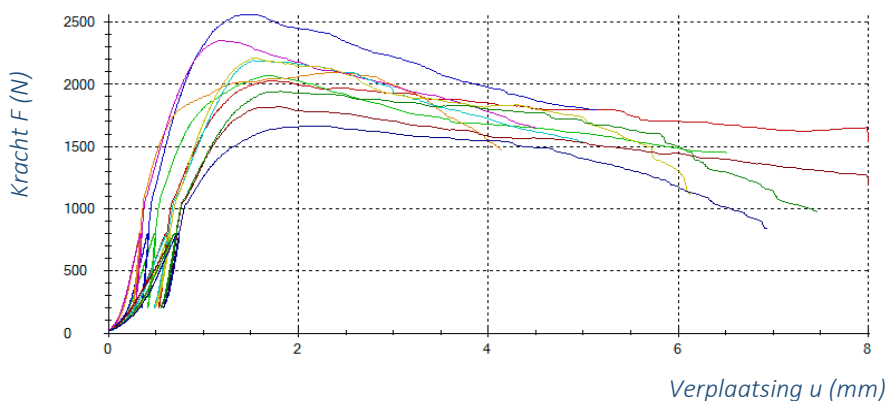
De stuiksterkte voor hout kan berekend worden door gebruik van één van volgende formules:

$$f_h = \frac{F_{max}}{d \cdot t} \quad (3-11)$$

$$f_h = \frac{F_{5mm}}{d \cdot t} \quad (3-12)$$

3.4.3.1.2 Stuiksterkte Serie 1

Figuur 80 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor de houten proefstukken van serie 1.



Figuur 80 Kracht in functie van de verplaatsing voor hout van serie 1

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,76.

Tabel 36 Overzicht serie 1, stuksterkte naaldhout

Serie 1: Hout $\rho_k = 392 \text{ kg/m}^3$

Specimen	\emptyset (mm)	l (mm)	b (mm)	t (mm)	G (g)	ρ (kg/m ³)	Fmax (N)	Fh (N/mm ²)
1	2,5	104,99	50,99	19,90	46,74	439	2069,84	41,6
2	2,5	105,14	50,68	21,17	51,37	455	2069,84	39,1
3	2,5	103,74	50,82	19,95	46,12	438	2560,68	51,3
4	2,5	104,04	50,12	21,40	50,42	452	2095,93	39,2
5	2,5	104,84	50,18	20,08	50,85	481	2348,83	46,8
6	2,5	103,46	50,82	19,71	43,02	415	1663,87	33,8
7	2,5	103,48	50,73	21,59	53,64	473	2214,03	41,0
8	2,5	103,6	50,87	20,09	44,69	422	1818,67	36,2
9	2,5	103,83	51,04	21,81	51,47	445	2026,87	37,2
10	2,5	104,89	50,27	21,88	60,81	527	1942,34	35,5
					ρ_k	392	$F_{h,k}$	30,5
					ρ_m	455	$F_{h,m}$	40,2

Verder kan de karakteristieke stuksterkte van hout ook berekend worden door volgende formule uit EC5:

$$f_{h,k} = 0.082 \rho_k d^{-0.3} \quad (3-13)$$

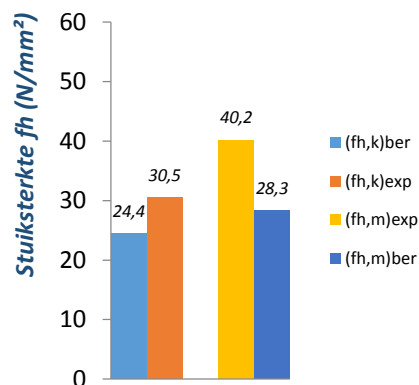
Deze formule laat toe om een vergelijking te maken tussen de berekende waarde en de experimentele waarde. Tabel 37 geeft de vergelijking tussen de experimentele en de berekende stuksterkte. Figuur 81 geeft de 10 gebruikte proefstukken weer.



Figuur 81 Proefstukken serie 1 stukdruk

Tabel 37 Vergelijking experimenteel/berekend serie 1

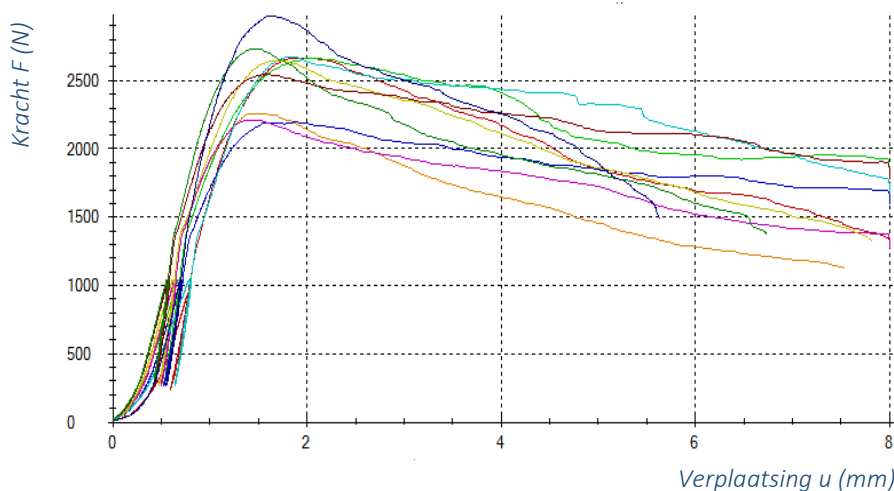
	ρ (kg/m ³)	F_h (N/mm ²)
(exp)k	392	30,5
(EC5)k	392	24,4
(ber/exp)k	-	0,80
(exp)m	455	40,2
(EC5)m	455	28,3
(ber/exp)m	-	0,70



Als conclusie voor deze serie kan gesteld worden dat voor de karakteristieke stuiksterkte, de rekenregel uit EC5 voor een onderschatting van 20% zorgt wanneer men de berekende met de experimentele karakteristieke waarde vergelijkt. Voor de verhouding van beide gemiddelde waarden ligt de onderschatting zelfs nog hoger.

3.4.3.1.3 Stuiksterkte Serie 2

Figuur 82 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor de houten proefstukken van serie 2.



Figuur 82 Kracht in functie van de verplaatsing voor hout van serie 2

De karakteristieke waarde voor de stuiksterkte wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,81.

Tabel 38 geeft een overzicht van de resultaten voor 10 proefstukken voor serie 2.

Tabel 38 Overzicht serie 2, stuiksterkte naaldhout

Serie 2: Hout $\rho_k = 455 \text{ kg/m}^3$

Specimen	\varnothing (mm)	l (mm)	b (mm)	t (mm)	G (g)	ρ (kg/m ³)	F _{max} (N)	F _h (N/mm ²)	
1	2,5	103,45	50,90	19,66	57,51	556	2666,61	54,3	
2	2,5	104,89	50,96	21,06	62,61	556	2970,13	56,4	
3	2,5	103,58	50,79	21,25	60,39	540	2666,43	50,2	
4	2,5	103,72	50,68	19,71	66,25	639	2195,59	44,6	
5	2,5	105,14	50,31	21,33	54,95	487	2258,38	42,4	
6	2,5	104,91	50,81	19,84	53,60	507	2212,98	44,6	
7	2,5	103,72	51,08	21,09	70,35	630	2671,48	50,7	
8	2,5	104,24	50,76	20,00	58,17	550	2645,21	52,9	
9	2,5	104,86	50,76	20,99	56,23	503	2543,64	48,5	
10	2,5	104,82	51,21	20,01	57,70	537	2732,88	54,6	
						ρ_k	455	F_{h,k}	40,4
						ρ_m	550	F_{h,m}	49,9

Bij een toename van de karakteristieke dichtheid tot 455 kg/m^3 , stijgt ook de stuiksterkte van het materiaal. Het is geen garantie dat de proefstukken met de hoogste dichtheid ook zorgen voor de hoogste stuiksterkte.

Figuur 83 geeft de 10 gebruikte proefstukken weer.

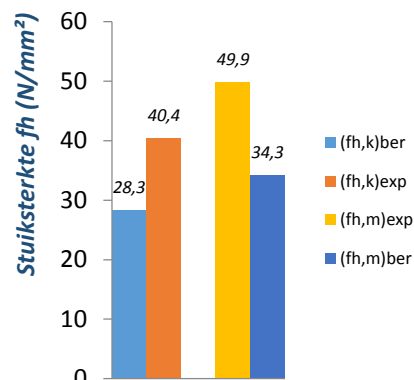


Figuur 83 Proefstukken serie 2 stuikdruk

Tabel 39 geeft de vergelijking tussen de experimentele en de berekende stuiksterkte weer voor serie 2.

Tabel 39 Vergelijking berekend/experimenteel serie 2

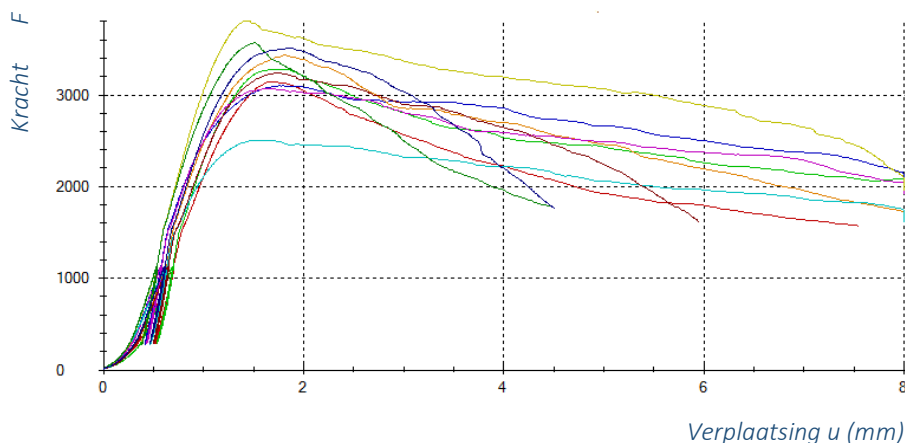
	ρ (kg/m^3)	F_h (N/mm^2)
(exp)k	455	40,4
(EC5)k	455	28,3
(ber/exp)k	-	0,70
(exp)m	550	49,4
(EC5)m	550	34,3
(ber/exp)m	-	0,69



Als conclusie voor serie 2 kan gesteld worden dat de onderschatting van de karakteristieke stuiksterkte alleen maar toeneemt. Deze bedraagt 30% voor hout met een gemiddelde dichtheid van $550 kg/m^3$. De onderschatting van de gemiddelde stuiksterkte is vergeleken met voorgaande serie niet onderhevig aan veranderingen.

3.4.3.1.4 Stuiksterkte Serie 3

Figuur 84 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor de houten proefstukken van serie 3.



Figuur 84 Kracht in functie van de verplaatsing voor hout van serie 3

Bovenstaande grafiek laat zien dat de spreiding op de resultaten beperkt blijft wanneer proefstuk 6 buiten beschouwing gelaten wordt. Proefstuk 6 is tevens ook het hout met de laagste dichtheid in deze reeks. Om te stellen dat deze lagere dichtheid de oorzaak is voor de lagere stuiksterkte is te voorbarig. De dichtheid van proefstuk 4 verschilt niet veel van proefstuk 6 en behaalt de gemiddelde stuiksterkte van de reeks.

Tabel 40 geeft een overzicht van de resultaten voor 10 proefstukken voor serie 2.

Tabel 40 Overzicht serie 3, stuksterkte naaldhout

Serie 3: Hout $\rho_k = 580 \text{ kg/m}^3$

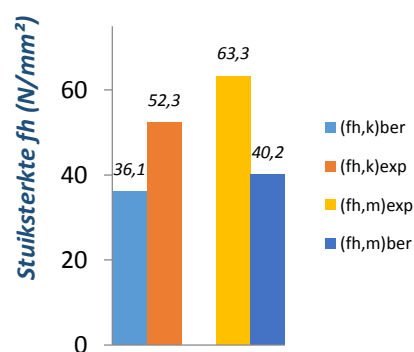
Specimen	\varnothing (mm)	l (mm)	b (mm)	t (mm)	G (g)	ρ (kg/m ³)	F _{max} (N)	F _h (N/mm ²)	
1	2,5	103,96	50,35	19,84	70,39	678	3145,27	63,4	
2	2,5	103,83	50,04	21,24	70,86	642	3278,85	61,7	
3	2,5	104,76	50,37	19,89	67,92	647	3098,48	62,3	
4	2,5	104,77	50,13	21,50	69,58	616	3431,21	63,8	
5	2,5	103,39	50,30	19,88	65,54	634	3061,25	61,6	
6	2,5	104,75	50,65	19,79	63,51	605	2507,97	50,7	
7	2,5	103,40	50,05	21,29	75,77	688	3807,61	71,5	
8	2,5	104,00	50,60	19,98	66,37	631	3243,71	64,9	
9	2,5	103,96	50,36	21,35	73,4	657	3564,97	66,8	
10	2,5	104,68	50,16	21,31	73,03	653	3507,22	65,8	
						ρ_k	580	F_{h,k}	52,3
						ρ_m	645	F_{h,m}	63,3

De karakteristieke waarde voor de stuksterkte wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,83.

Tabel 41 geeft de vergelijking tussen de berekende en de experimentele waardes.

Tabel 41 berekend/experimenteel serie 3

	ρ (kg/m ³)	F _h (N/mm ²)
(exp)k	580	52,3
(EC5)k	580	36,1
(ber/exp)k	-	0,69
(exp)m	645	63,3
(EC5)m	645	40,2
(ber/exp)m	-	0,64



De onderschatting blijft opnieuw dezelfde als in vorige series. Voor de gemiddelde stuksterkte neemt hij wel toe. Voor hout met een gemiddelde dichtheid van 645 kg/m^3 bedraagt de onderschatting 36%.

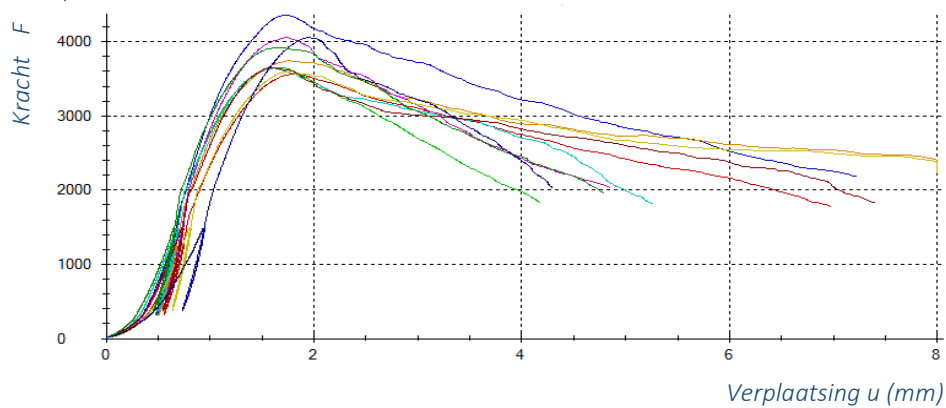
Figuur 85 op volgende pagina geeft de 10 gebruikte proefstukken weer.



Figuur 85 Proefstukken serie 3 stuikdruk

3.4.3.1.5 Stuiksterkte Serie 4

Figuur 86 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor de houten proefstukken van serie 4.



Figuur 86 Kracht in functie van de verplaatsing voor hout van serie 4

Bovenstaande grafiek laat zien dat de spreiding beperkt blijft voor deze serie. Wel valt op dat de verplaatsing bij breuk zeer verschillend is. De korte verplaatsing bij breuk duidt op het beginnen splijten van het hout. Kort nadat de maximum kracht bereikt is, begint het hout licht te splijten. In de andere gevallen wordt een grotere verplaatsing behaald doordat er geen brossse breuk plaatsvindt.



Figuur 87 Splijten van het hout door stuikdruk

Tabel 42 geeft een overzicht van de resultaten voor 10 proefstukken voor serie 2.

Tabel 42 Overzicht serie 4, stuiksterkte naaldhout

Serie 4: Hout $\rho_k = 659 \text{ kg/m}^3$

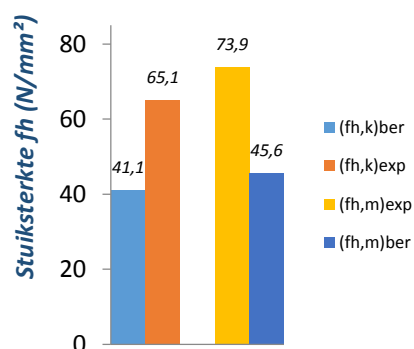
Specimen	\varnothing (mm)	l (mm)	b (mm)	t (mm)	G (g)	ρ (kg/m ³)	F _{max} (N)	F _h (N/mm ²)	
1	2,5	103,64	50,29	21,27	77,6	700	3557,00	66,9	
2	2,5	103,74	50,11	19,98	76,65	738	3650,4	73,1	
3	2,5	104,38	51,12	21,16	85,37	756	4352,41	82,3	
4	2,5	104,46	51,16	19,74	80,21	760	3739,11	75,8	
5	2,5	103,69	50,02	21,45	82,36	740	4053,76	75,6	
6	2,5	103,50	51,09	19,19	72,05	710	3642,75	75,9	
7	2,5	104,88	50,30	21,25	85,28	761	3587,26	67,5	
8	2,5	104,95	50,07	19,80	73,42	706	3652,83	73,8	
9	2,5	103,69	50,37	21,33	80,62	724	3917,74	73,5	
10	2,5	104,74	50,44	21,73	84,04	732	4052,54	74,6	
						ρ_k	659	F_{h,k}	65,1
						ρ_m	733	F_{h,m}	73,9

De karakteristieke waarde voor de stuiksterkte wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,88.

Tabel 43 geeft de vergelijking tussen de berekende en de experimentele waarden.

Tabel 43 berekend/experimenteel serie 4

	ρ (kg/m ³)	F _h (N/mm ²)
(exp)k	659	65,1
(EC5)k	659	41,1
(ber/exp)k	-	0,63
(exp)m	733	73,9
(EC5)m	733	45,6
(ber/exp)m	-	0,62



In deze laatste reeks neemt de onderschatting op de karakteristieke stuiksterkte nog eens toe. Voor hout met een karakteristieke dichtheid van 659 kg/m³ resulteert het gebruik van de vergelijking voor stuiksterkte uit de EC5 in een onderschatting van 37% in vergelijking met 'de werkelijkheid'.

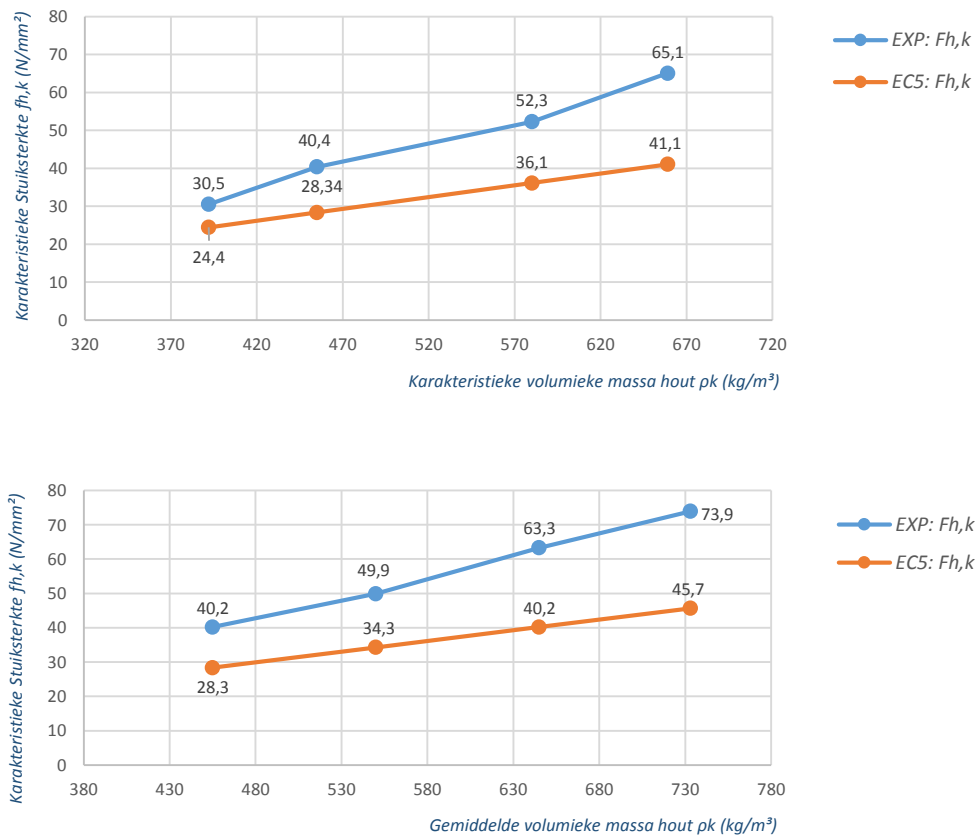
Figuur 88 geeft de 10 gebruikte proefstukken weer.



Figuur 88 Proefstukken serie 4 stuikdruk

3.4.3.2 Evaluatie resultaten stuiksterkte naaldhout

Figuur 89 geeft het grafisch verloop weer van de stuiksterkte voor verschillende densiteiten.



Figuur 89 Grafisch verloop karakteristieke en gemiddelde stuiksterkte in functie van densiteit: Exp/EC5

Het grafisch verloop volgens de EC5 vergelijking is lineair bij een toename van de densiteit. Dit is logisch omdat de stuiksterkte bepaald wordt door een vergelijking met als de karakteristieke densiteit als enige variabele. Wanneer deze curve nu vergeleken wordt met de experimentele curve, is de hellingsgraad van de experimentele curve telkens groter dan de berekende curve. Dit zorgt ervoor dat de onderschatting bij een toename van densiteit, steeds zal toenemen.

Door het uitvoeren van deze reeks proeven, worden experimentele waarden verkregen voor de stuiksterkte van het naaldhout welke gebruikt wordt in de genagelde en geniete verbindingen. De experimentele stuiksterkte zal gebruikt worden voor de sterkte van de verbinding te berekenen volgens de vergelijkingen van Johansen uit EC5.

3.4.3.3 Stuiksterkte spaanplaat met stift 2,5 mm

3.4.3.3.1 Berekening stuiksterkte spaanplaat

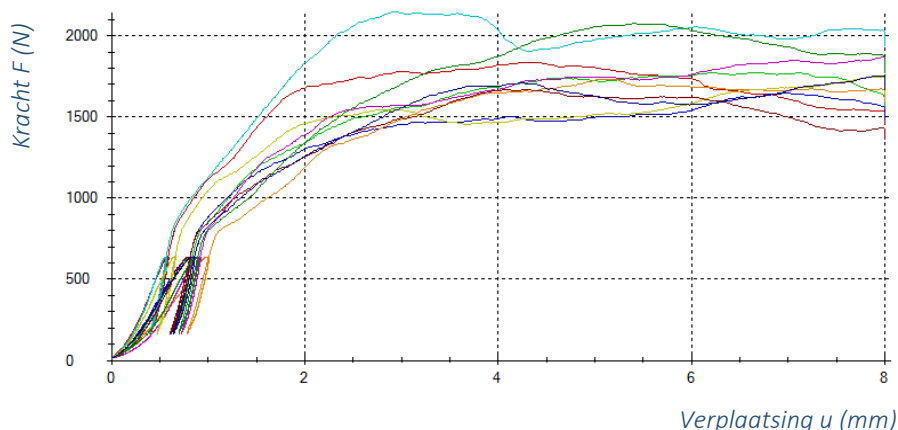
De stuiksterkte van plaatmateriaal kan berekend worden door het gebruik van één van volgende formules.

$$f_h = \frac{F_{max}}{d \cdot t} \quad (3-14)$$

$$f_h = \frac{F_{5mm}}{d \cdot t} \quad (3-15)$$

3.4.3.3.2 Stuiksterkte spaanplaat

Figuur 90 geeft de kracht weer in functie van de verplaatsing voor spaanplaat van 12 mm.



Figuur 90 Kracht in functie van de verplaatsing voor Spaanplaat

Tabel 44 Overzicht stuiksterkte Spaanplaat

Spaanplaat 12 mm								
Specimen	\varnothing (mm)	l (mm)	b (mm)	t (mm)	G (g)	ρ (kg/m ³)	Fmax (N)	Fh (N/mm ²)
1	2,5	99,33	49,36	11,97	42,81	729	1834,85	61,3
2	2,5	99,17	49,50	11,98	42,23	718	1774,32	59,2
3	2,5	99,17	49,46	11,96	42,78	729	1646,65	55,1
4	2,5	99,45	49,66	11,98	42,18	713	1734,67	57,9
5	2,5	99,26	49,42	11,98	42,73	727	1870,34	62,4
6	2,5	99,46	49,31	11,97	45,86	781	2148,81	71,8
7	2,5	99,30	49,39	11,96	42,02	716	1747,02	58,4
8	2,5	99,31	49,46	11,95	42,6	726	1667,87	55,8
9	2,5	99,38	49,57	12,00	42,89	726	2076,62	69,2
10	2,5	99,28	49,41	12,01	42,19	716	1756,06	58,5
					ρ_k	655	Fh,k	50,6
					ρ_m	728	Fh,m	61,0

De karakteristieke waarde voor de stuiksterkte wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,83.

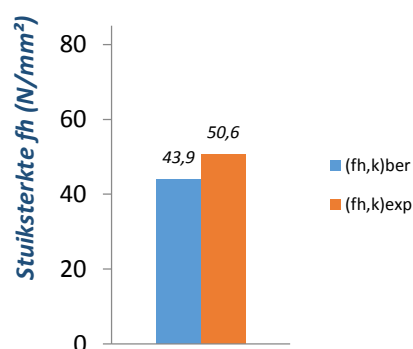
Verder kan de karakteristieke stuiksterkte van hout ook berekend worden door volgende formule uit EC5:

$$f_{h,1,k} = 65 d^{-0.7} t^{0.1} \quad (3-16)$$

Deze formule laat toe om een vergelijking te maken tussen de berekende waarde en de experimentele waarde. De vergelijking tussen is weergegeven in Tabel 45.

Tabel 45 Berekend/experimenteel Spaanplaat

	d (mm)	t (mm)	Fh (N/mm ²)
(exp)k	2,5	12	50,60
(EC5)k	2,5	12	43,88
(ber/exp)k	-		0,87



Door het uitvoeren van deze reeks proeven, worden experimentele waardes verkregen voor de stuiksterkte van het plaatmateriaal welke gebruikt wordt in de genagelde en geniete verbindingen. De experimentele stuiksterkte zal gebruikt worden voor de sterkte van de verbinding te berekenen volgens EC5.

3.5 Proeven op de sterkte van de verbinding met variërende (on)belaste randafstanden.

3.5.1 Inleiding

De experimenten in het hoofdstuk 'strijksterkte in functie van variërende (on)belaste randafstand' toonden aan dat bij het gebruik van de spaanplaat een herkenbaar verloop kon opgemerkt worden bij afnemende randafstand. De strijksterkte was min of meer hetzelfde voor een randafstand gaande van $10d - 5d$. Pas wanneer de randafstand verminderd werd tot $2d$ ontstond er een wezenlijk verschil in sterkte. Uit voorgaande proeven valt ook te concluderen dat randafstanden lager of rond de $2d$ te laag zijn. Er ontstond namelijk in vele gevallen eerder falen door brosse breuk. Omwille van deze reden wordt de randafstand voor genagelde verbindingen begrensd tot op $3d$ en voor geniete verbindingen op $4d$.

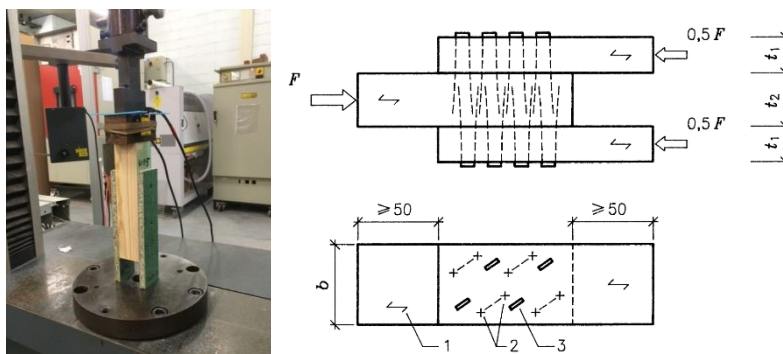
Om nu dezelfde lijn door te trekken naar de sterkte van de verbindingen, wordt opnieuw de randafstand als variabele parameter genomen. Er worden zowel geniete als genagelde verbindingen getest. Elke proefserie zal 10 proefstukken bevatten.

Uit de experimentele resultaten wordt afgeleid of de minimum (on)belaste randafstanden uit EC5 voor genagelde of geniete verbindingen niet te conservatief zijn. De karakteristieke sterkte van het verbindingsmiddel wordt voor elke proefserie met variabele randafstand berekend. Wanneer deze sterktes met elkaar vergeleken worden, zal duidelijk worden hoe de sterkte evolueert bij een dalende randafstand. Uiteindelijk zullen deze sterktes vergeleken worden met de sterkte van de verbinding zoals berekend uit EC5. EN 1995-1-1 (EC5) laat toe de sterkte van een verbinding te berekenen op basis van de formules van Johansen. Het resultaat van de berekening is de karakteristieke sterkte van de verbinding. Hieruit wordt pas echt duidelijk in hoeverre mate de Eurocode een onderschatting blijkt te zijn in vergelijking met de praktijk.

Eerst zullen de proefmethode en de proefresultaten worden voorgesteld. In een verder deel van dit hoofdstuk worden de experimentele resultaten vergeleken met de berekeningen aan de hand van Eurocode 5.

3.5.2 Proefopstelling

De proefopstelling wordt voorgesteld in *Figuur 91*.



Figuur 91 Proefopstelling voor het testen van verbindingen

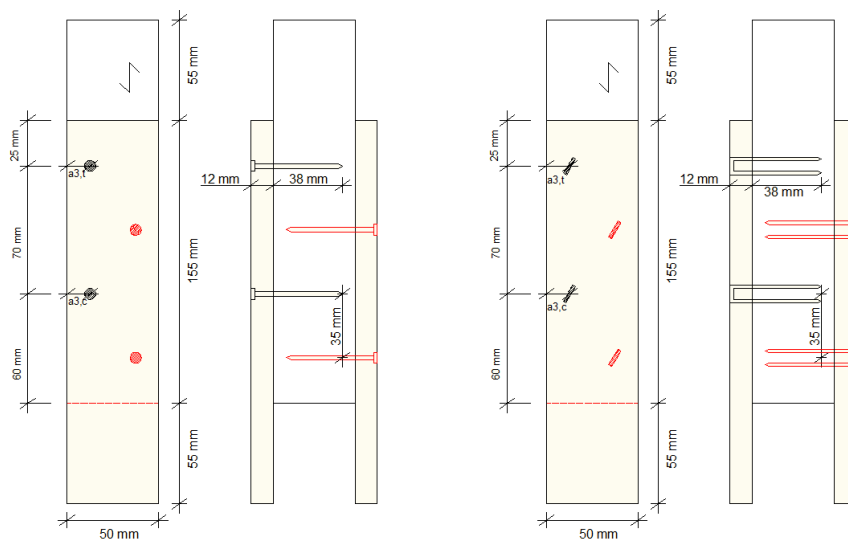
De proef wordt uitgevoerd onder een drukbelasting. Het proefstuk dient op een stabiele ondergrond geplaatst te zijn. Door de toenemende drukbelasting zal enkelsnedige afschuiving optreden in het vlak tussen plaatmateriaal en het hout. Op basis van

3.5.2.1 Voorbehandeling

De proefstukken worden vervaardigd uit hout of houtachtige materialen met een evenwichtsvochtgehalte bij $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ en $(85 \pm 5)\%$ betrekkelijke luchtvochtigheid. Na vervaardiging moeten de proefstukken minstens één week opgeslagen bij $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ en $(65 \pm 5)\%$ betrekkelijke vochtigheid. Er zijn geen andere vochtigheidsvoorbehandelingen gebruikt.

3.5.2.2 Vervaardiging van de proefstukken

Twee stukken plaatmateriaal (Spaanplaat) van $50\text{ mm} \times 210\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ worden verbonden door middel van nieten of nagels met een houten balk van $50\text{ mm} \times 210\text{ mm} \times 45\text{ mm}$. De houten balk is naaldhout waarbij de densiteit sterk varieert. De nieten hebben een rechthoekige sectie van $1,71\text{ mm} \times 1,87\text{ mm}$ en een beenlengte van 50 mm . De gebruikte geprofileerde nagel heeft een diameter van $2,5\text{ mm}$ en een totale lengte van 50 mm . De tussenafstand van de verbindingsmiddelen is altijd 70 mm . Een schematische schets van beide proefstukken wordt voorgesteld in *Figuur 92*.



Figuur 92 Dimensionering proefstukken

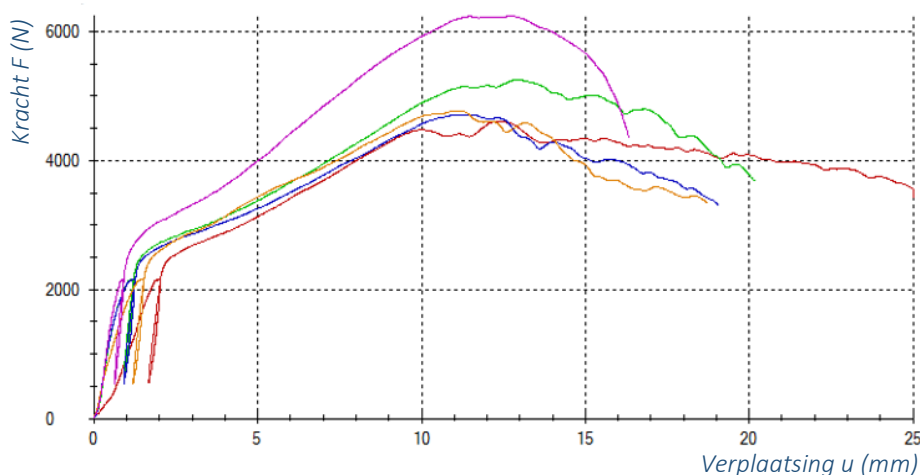
Normaal gezien horen de bevestigingsmiddelen lichtelijk uit te steken boven het oppervlak nadat zij ingedreven werden. Deze vervaardigingstechniek was niet mogelijk. Het indrijven van zowel de nieten als de nagels werd gedaan op basis van perslucht of patronen. In het geval van nieten, worden deze onder een hoek van 60° in het plaatmateriaal gedreven. NBN EN 1381 schrijft voor dat deze hoek 30° of 60° dient te zijn.

3.5.3 Resultaten van de proeven

3.5.3.1 Genagelde verbindingen

3.5.3.1.1 (on)belaste randafstand = 10d

Figuur 93 geeft de kracht in functie van de verplaatsing weer voor de verbinding van een houten balkje met spaanplaat waar de randafstand 25 mm bedraagt. De grafiek toont het verloop van proefstukken 6-10.



Figuur 93 Kracht van de verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat 10d

We merken op dat alleen proefstuk 10 een verschillend grafisch verloop kent. Wanneer we naar de bekomen sterktes kijken, valt op dat de densiteit van het hout een oorzaak kan zijn voor de hogere sterktes van de verbindingen. Voor een (on)belaste randafstand van 25 mm was geen brosse breuk aan te merken vooraleer de maximum kracht bereikt werd. Pas bij het toelaten van grote verplaatsingen trad bij bv. proefstuk 10 brosse breuk op.

Tabel 46 Gegevens proefserie genagelde verbinding met randafstand 25 mm (10d)

Testserie N-10d (25 mm)					
Specimen (-)	ρ (kg/m ³) plaat 1	ρ (kg/m ³) plaat 2	ρ (kg/m ³) Hout	Fmax (N)	
1	729	707	522	4760,1	
2	711	710	585	6241,4	
3	712	706	568	5780,1	
4	714	709	539	6010,0	
5	714	713	471	4811,9	
6	719	722	483	4611,5	
7	718	729	479	5256,3	
8	717	702	516	4717,9	
9	710	723	448	4779,0	
10	724	730	667	6245,6	
ρ_k	645	644	408	Fv,Rk	4060,5
ρ_m	717	715	528	Fv,Rm	5321,4

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,76.

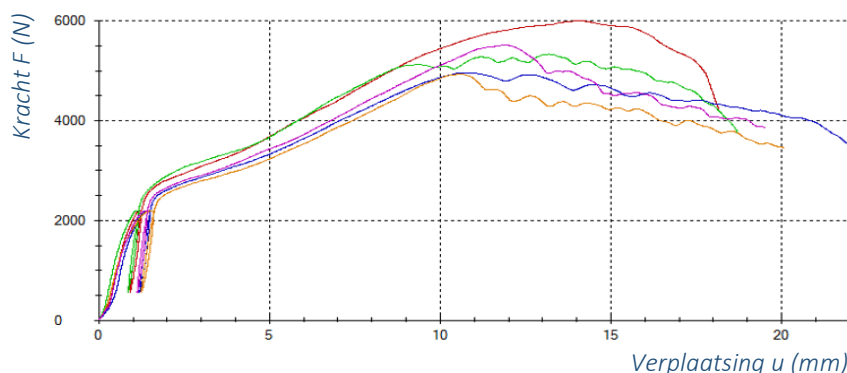
Figuur 94 toont de toestand van de proefstukken na het uitvoeren van de test.



Figuur 94 Toestand genagelde proefstukken met randafstand 10d

3.5.3.1.2 (on)belaste randafstand = 7d

Figuur 95 geeft de kracht in functie van de verplaatsing weer voor de verbinding van een houten balkje met spaanplaat waar de randafstand 17,5 mm bedraagt. De grafiek toont het verloop van proefstukken 6-10.



Figuur 95 Kracht van de verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat 7d

We merken op dat slechts proefstuk 6 een lichte afwijking van grafisch verloop kent. Wanneer we naar de bekomen sterktes kijken valt op dat de densiteit van het hout een relatie heeft tot de bekomen sterkte van de verbinding. Hout met een densiteit rond de 650 kg/m^3 staat in deze proefserie garant voor sterktes boven de 6 kN. Voor een (on)belaste randafstand van 17,5 mm was eveneens geen brossre breuk aan te

merken vooraleer de maximum kracht bereikt werd. Pas bij het toelaten van grote verplaatsingen trad bij bv. proefstuk 6 brosse breuk op.

Tabel 47 Gegevens proefserie genagelde verbinding met randafstand 17,5 mm (7d)

<i>Testserie N-7d (17,5 mm)</i>						
<i>Specimen (-)</i>	ρ (kg/m ³) <i>plaat 1</i>	ρ (kg/m ³) <i>plaat 2</i>	ρ (kg/m ³) <i>Hout</i>			
1	721	713	499		5230,9	
2	699	714	450		4942,0	
3	721	718	489		4820,4	
4	718	717	649		6278,8	
5	716	723	639		6231,6	
6	726	730	673		6006,4	
7	744	739	498		5336,3	
8	715	730	501		4951,5	
9	719	726	472		4939,2	
10	737	722	504		5511,5	
	ρ_k	649	651	391	F_v, R_k	4364,8
	ρ_m	721	723	537	F_v, R_m	5424,9

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,80.

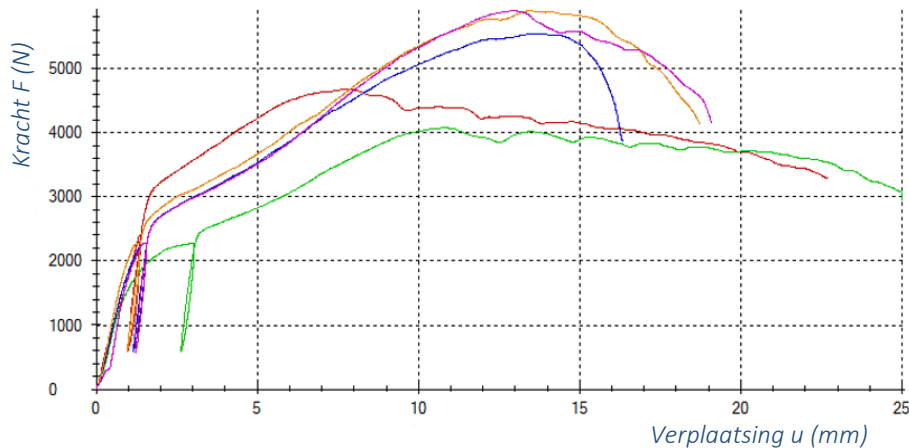
Figuur 96 toont de toestand van de proefstukken na het uitvoeren van de test.



Figuur 96 Toestand genagelde proefstukken bij randafstand 7d

3.5.3.1.3 (on)belaste randafstand = 5d

Figuur 97 geeft de kracht in functie van de verplaatsing weer voor de verbinding van een houten balkje met de spaanplaat waar de randafstand 12,5 mm bedraagt. De grafiek toont het verloop van proefstukken 6-10.



Figuur 97 Kracht van de verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat 5d

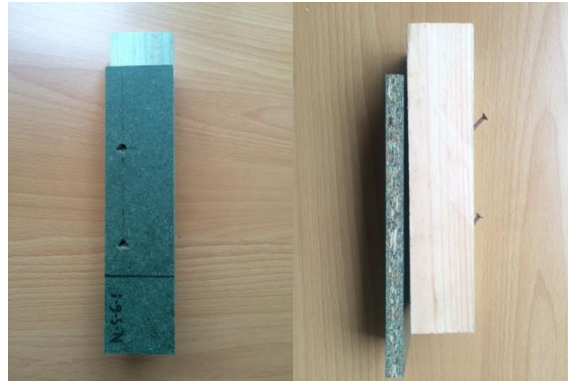
We merken op dat proefstukken 6 en 7 een grafisch verloop kennen dat duidt op ductiel gedrag. Bij andere proefstukken zal na het bereiken van de maximum kracht, de verbinding verder falen door brosse breuk. Dit is grafisch af te leiden uit de steile daling waaraan de curve onderhevig is nadat de maximum kracht bereikt wordt. Net als in voorgaande proefseries is de dichtheid van het hout bepalend voor de sterkte van de verbinding. Voor een (on)belaste randafstand van 12,5 mm was eveneens geen brosse breuk aan te merken vooraleer de maximum kracht bereikt werd.

Tabel 48 Gegevens proefserie genagelde verbinding met randafstand 12,5 mm (5d)

Testserie N-5d (12,5 mm)						
Specimen (-)	ρ (kg/m ³) plaat 1	ρ (kg/m ³) plaat 2	ρ (kg/m ³) Hout		Fmax (N)	
1	709	706	638		5820,5	
2	717	711	572		5637,3	
3	716	715	599		6073,5	
4	714	722	624		6307,3	
5	723	715	475		4614,8	
6	720	713	421		4673,0	
7	716	718	437		4071,1	
8	714	705	661		5542,0	
9	696	718	720		5895,7	
10	708	727	569		5895,3	
	ρ_k	649	651	385	Fv,Rk	3993,2
	ρ_m	713	715	571	Fv,Rm	5453,1

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,73.

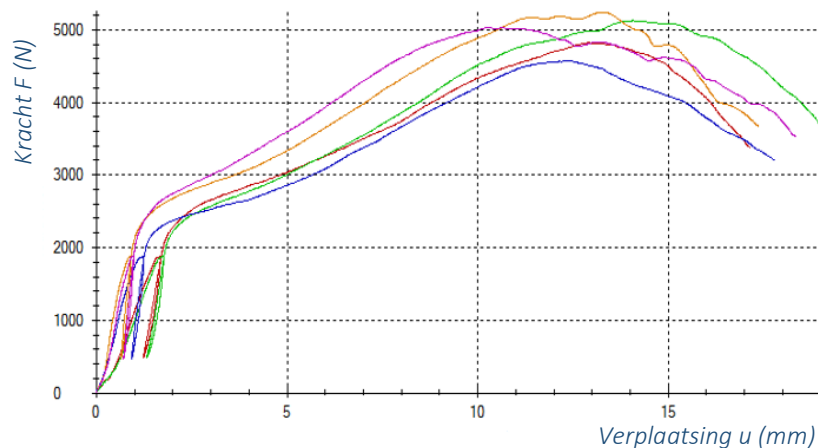
Figuur 98 toont de toestand van de proefstukken na het uitvoeren van de test.



Figuur 98 Toestand genagelde proefstukken met randafstand 5d

3.5.3.1.4 (on)belaste randafstand = 3d

Figuur 99 geeft de kracht in functie van de verplaatsing weer voor de verbinding van een houten balkje met spaanplaat waar de randafstand 7,5 mm bedraagt. De grafiek toont het verloop van proefstukken 6-10.



Figuur 99 Kracht van de verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat 3d

We merken op dat het grafisch verloop van deze proefstukken onderling niet verschillend is. Net als in voorgaande proefseries is de densiteit van het hout bepalend voor de sterkte van de verbinding. Bij de vervaardiging van deze proefstukken waren sommige plaatmaterialen al lichtelijk beschadigd door de korte randafstand vooraleer zij hun maximum belasting ervaren hadden.

Wat hier opvalt is dat deze gevallen van brosse breuk geen enkele directe invloed hadden op de behaalde sterkte van de verbinding.

Tabel 49 Gegevens proefserie genagelde verbinding met randafstand 7,5 mm (3d)

<i>Testserie N-3d (7,5 mm)</i>						
<i>Specimen (-)</i>	ρ (kg/m ³) plaat 1	ρ (kg/m ³) plaat 2	ρ (kg/m ³) Hout		<i>Fmax (N)</i>	
1	705	713	430		4619,5	
2	713	719	713		4783,9	
3	723	710	665		4158,1	
4	725	736	506		5534,3	
5	711	718	483		4619,5	
6	713	714	578		4820,2	
7	721	713	515		5126,4	
8	707	725	513		4565,0	
9	713	712	542		5238,6	
10	719	710	552		5027,4	
	ρ_k	649	651	398	<i>Fv,Rk</i>	4073,3
	ρ_m	715	717	550	<i>Fv,Rm</i>	4849,3

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,84.

Figuur 100 toont de toestand van de proefstukken na het uitvoeren van de test.



Figuur 100 Toestand genagelde proefstukken bij randafstand 3d

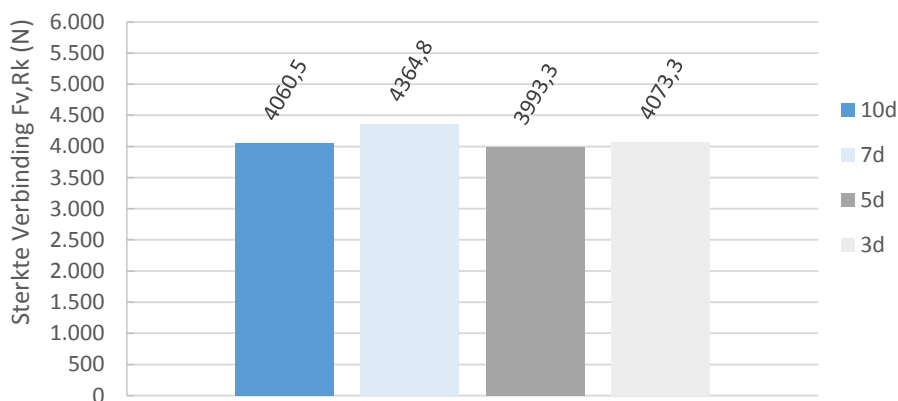
3.5.3.2 Evaluatie afnemende (on)belaste randafstand bij genagelde verbindingen

Om uiteindelijk de resultaten te kunnen evalueren, dienen terug de minimum randafstanden, voorgesteld door EC5, voor ogen genomen te worden. Voor de onbelaste rand stelt de EC5 een minimum afstand van 5 keer de diameter van het verbindingsmiddel voor. Voor de belaste rand is deze minimum afstand zelfs opgevoerd tot $7d$.

Tabel 50 Minimum randafstanden genagelde plaat-houtverbindingen

Minimum randafstanden	
Afstand	Nagels
$a_{4,t}$ (belast)	$7d$
$a_{4,c}$ (onbelast)	$5d$

Wanneer vervolgens de resultaten grafisch langs elkaar weergegeven worden, zien we dat de karakteristieke sterkte van de verbinding nauwelijks verschilt tussen de waarden gevonden voor $10d$, $5d$ en $3d$. De karakteristieke waarde bij de proefserie $7d$ ligt zelfs iets hoger dan de rest. Op basis van deze resultaten zou dus gesteld kunnen worden dat voor de karakteristieke sterktes, de afnemende (on)belaste randafstand tot $3d$, geen invloed heeft op de uiteindelijk sterkte van de verbinding.

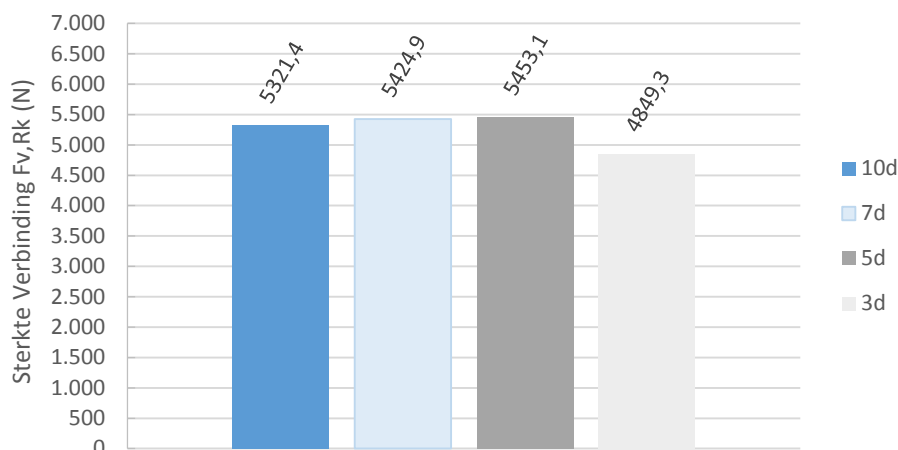


Figuur 101 Staafdiagram karakteristieke sterktes genagelde verbindingen

Omdat de karakteristieke waarde altijd zwaar onderhevig kan zijn aan enkele zwakke resultaten (grote spreiding), worden ook de gemiddelde sterktes van elke proefserie met elkaar vergeleken.

De gemiddelde sterkte van de verbinding is niet zo onderhevig aan een eventuele grote spreiding tussen de resultaten. We zien op *Figuur 102* dat de gemiddelde sterkte van de verbinding voor $10d$, $7d$ en $5d$ praktisch dezelfde is.

Hier kan wel een daling in sterkte opgemerkt worden wanneer de randafstand verminderd wordt tot 3d.



Figuur 102 Staafdiagram gemiddelde sterktes genagelde verbindingen

Een procentuele verhouding tussen de bekomen resultaten, zowel karakteristiek als gemiddeld, wordt weergegeven in *Tabel 51*. Voor de karakteristieke waarden kan dus gesteld worden dat de sterkte niet meer dan -1,7% verschilt bij een afname van de randafstand wanneer deze vergeleken wordt met de sterkte behaald door een EC5 aanvaarde randafstand (10d). De proefserie met randafstand 7d scoort +7,5% vergeleken met de reeks 10d.

We zien voor de gemiddelde sterktes van de proefseries met verschillende randafstanden een daling van 8,9% wanneer we de randafstand verlagen naar 3d. De gemiddelde sterkte van de verbinding verschilt voor de rest van de reeksen niet meer dan 2,5%.

Tabel 51 Verhouding sterktes genagelde verbindingen

k/m	10d	7d	5d	3d
k	4060,5	4364,8	3993,2	4073,3
	100,0%	107,5%	98,3%	100,3%
m	5321,4	5424,9	5453,1	4849,3
	100,0%	101,9%	102,5%	91,1%

Uiteindelijk kunnen we dus stellen dat de sterkte op basis van de karakteristieke waarden niet verlaagt bij een afname van de (on)belaste randafstand.

Zelfs wanneer we onder de minimum randafstanden (7d en 5d) gaan, wordt dezelfde karakteristieke sterkte bekomen als wanneer 10d als randafstand gebruikt wordt. Op basis van de gemiddelde waarden moet wel opgemerkt worden dat de afname in randafstand van 5d naar 3d wel een daling in gemiddelde sterkte teweeg brengt.

Omdat de dichtheid van het naaldhout doorheen de series onderhevig is aan grote spreiding, dient er best een bijkomende vergelijking gemaakt te worden waar rekening gehouden wordt met de dichtheid. Er wordt aan de hand van alle experimentele resultaten van serie *10d* en *7d* een vergelijking bekomen. Met deze vergelijking kan de sterkte per nagel geschat worden in functie van de dichtheid van het hout. De uitwerking van deze vergelijking is bijgevoegd in *Bijlage B*.

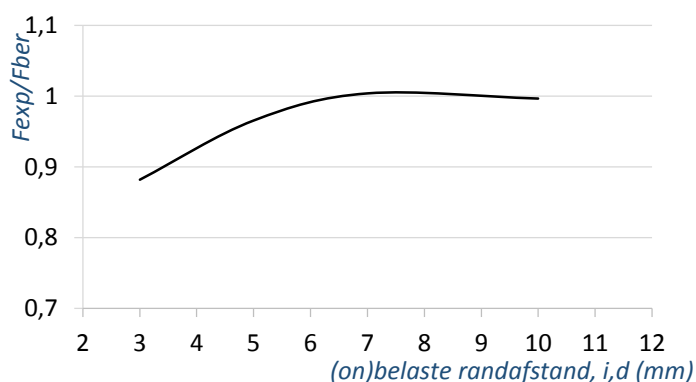
De vergelijking om de sterkte per nagel te voorspellen in functie van de dichtheid:

$$F_{v,R} = 1,7883 \rho + 390,82 \quad (3-17)$$

Om vervolgens opnieuw een evaluatie te doen voor gemiddelde waarden, wordt de sterkte per nagel berekend op basis van de gemiddelde dichtheid van elke serie. De vergelijking wordt dus de volgende:

$$F_{v,Rm} = 1,7883 \rho_m + 390,82 \quad (3-18)$$

Figuur 103 toont het grafische verloop welke volgt uit de verhouding tussen de experimentele sterkte en de berekende sterkte volgens bovenstaande formule



Figuur 103 Verloop sterkte per nagel in functie van de randafstand

Tabel 52 Verhouding experimentele en berekende sterkte per nagel in functie van de dichtheid naaldhout (gemiddelde)

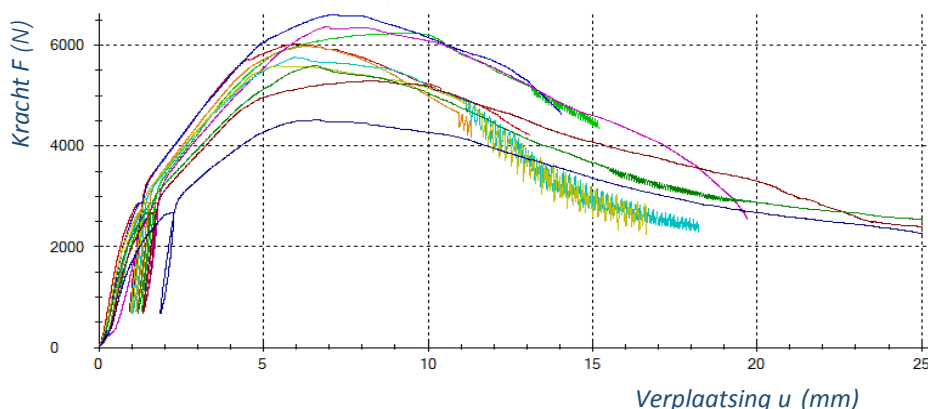
<i>m</i>	<i>10d</i>	<i>7d</i>	<i>5d</i>	<i>3d</i>
ρ_m	528	537	571	550
<i>exp</i>	1330,4	1356,2	1363,3	1212,3
<i>ber</i>	1335,0	1351,1	1411,9	1374,4
<i>exp/ber</i>	100,0%	100,0%	96,5%	88,0%

Er kan een daling in sterkte opgemerkt worden vanaf randafstand *7d*. Vooraleer we zouden kunnen stellen dat *3d* niet geschikt is als randafstand door de daling in sterkte, dient eerst de sterkte van deze verbinding vergeleken te worden met de sterkte van de verbinding berekend met de vergelijkingen uit EC5.

3.5.3.3 Geniete verbindingen

3.5.3.3.1 (on)belaste randafstand = 10d

Figuur 104 geeft de kracht in functie van de verplaatsing weer voor de geniete verbinding van een houten balkje met spaanplaat waar de randafstand 18 mm bedraagt. De grafiek toont het verloop van proefstukken 1-10.



Figuur 104 Kracht van de geniete verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat 10d

Uit de grafiek kunnen drie soorten curves afgeleid worden. Het zaagtand-patroon komt voor wanneer de nieten (luidruchtig) uit het hout worden getrokken en een ductiel verloop kennen. Daarnaast kennen sommige proefstukken ook een ductiel verloop zonder dat het zaagtand-patroon grafisch voorkomt. Dit verloop laat ook grote verplaatsingen toe tot breuk. Als laatste zijn er proefstukken die semi-brosse breuk ervaren en een redelijke verplaatsing ondergaan. Bij deze proefstukken wordt de niet doorheen het plaatmateriaal geponst.

Tabel 53 Gegevens proefserie geniete verbinding met randafstand 18 mm (10d)

<i>Testserie S-10d (18 mm)</i>						
<i>Specimen (-)</i>	ρ (kg/m ³) <i>plaat 1</i>	ρ (kg/m ³) <i>plaat 2</i>	ρ (kg/m ³) <i>Hout</i>		<i>Fmax (N)</i>	
1	727	712	472		6017,0	
2	725	710	525		6238,9	
3	729	713	525		6606,9	
4	718	732	434		5984,3	
5	729	709	513		6369,2	
6	707	725	476		5755,5	
7	720	725	442		5590,5	
8	701	701	544		5294,2	
9	705	711	502		5589,9	
10	716	716	450		4523,1	
	ρ_k	646	644	411	F_v, R_k	4592,0
	ρ_m	718	715	488	F_v, R_m	5796,9

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,79.

Figuur 105 toont de toestand van de proefstukken na het uitvoeren van de test.

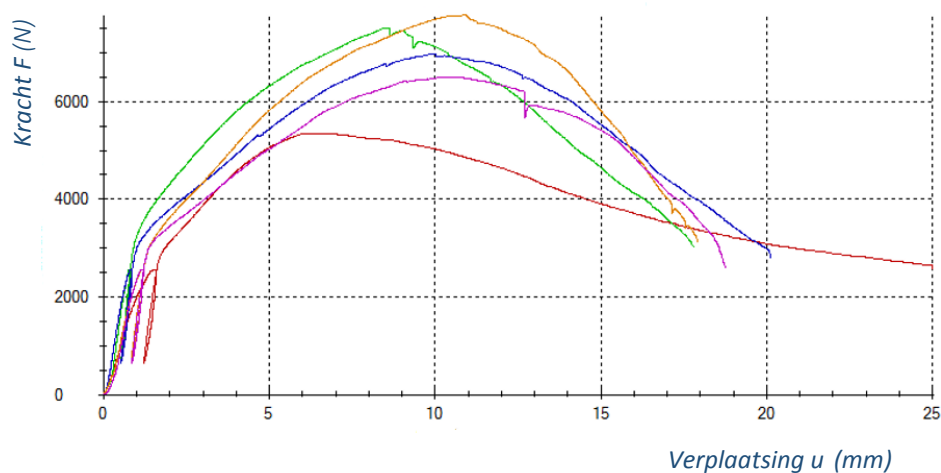


Figuur 105 Toestand geniete proefstukken bij randafstand 10d

Bij dit proefstuk valt goed op dat de nieten uit het houtblok worden getrokken. Als grafisch verloop had dit proefstuk ook een zaagtand-patroon bij het kracht-verplaatsingsdiagram na het bereiken van de maximum belasting.

3.5.3.3.2 (on)belaste randafstand = 7d

Figuur 106 geeft de kracht in functie van de verplaatsing weer voor de geniete verbinding van een houten balkje met spaanplaat waar de randafstand 12,6 mm bedraagt. De grafiek toont het verloop van proefstukken 6-10.



Figuur 106 Kracht van de geniete verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat 7d

Opnieuw kunnen verschillende curves worden afgeleid. De curve die semi-bros gedrag weergeeft is te verklaren door de proefstukken waar de nieten lichtelijk doorheen het plaatmateriaal geponst worden.

De proefstukken waar de nagel uit het hout wordt getrokken kennen een ductiel verloop en laten grotere verplaatsingen toe.

Tabel 54 Gegevens proefserie geniete verbinding met randafstand 12,6 mm (7d)

<i>Testserie S-7d (12,6 mm)</i>						
Specimen (-)	ρ (kg/m ³) plaat 1	ρ (kg/m ³) plaat 2	ρ (kg/m ³) Hout		Fmax (N)	
1	723	714	536		6671,5	
2	720	728	575		7125,0	
3	732	721	514		7093,0	
4	710	711	644		7478,0	
5	718	721	653		7459,3	
6	708	711	462		5347,1	
7	710	718	734		7512,1	
8	708	729	751		6979,6	
9	719	722	673		7770,4	
10	714	726	652		6493,8	
	ρ_k	645	648	439	Fv,Rk	5546,6
	ρ_m	716	720	619	Fv,Rm	6993,0

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,79.

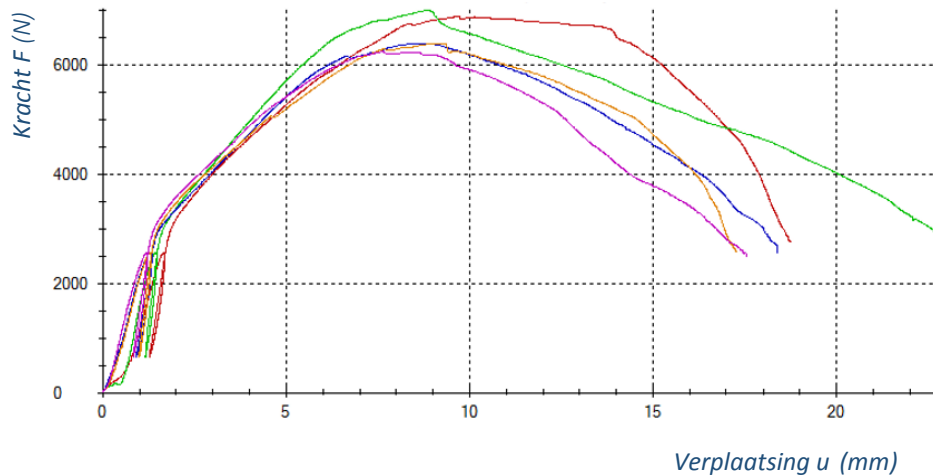
Figuur 107 toont de toestand van de proefstukken na het uitvoeren van de test. Grafisch is dit proefstuk weergegeven als de rode curve. Aan het verloop van deze curve is te zien dat het proefstuk een grote verplaatsing toelaat en zich ductiel gedraagt. Het ductiel gedrag slaat op het trekken van de niet uit het hout.



Figuur 107 Toestand geniete proefstukken bij randafstand 7d

3.5.3.3.3 (on)belaste randafstand = 5d

Figuur 108 geeft de kracht in functie van de verplaatsing weer voor de geniete verbinding van een houten balkje met spaanplaat waar de randafstand 9 mm bedraagt. De grafiek toont het verloop van proefstukken 6-10.



Figuur 108 Kracht van de geniete verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat 5d

Bij een verdere vermindering van de randafstand worden weer beide verlopen opnieuw weergegeven. Proefstukken waar de nieten doorheen de plaat geponst worden, ondergaan nog altijd een acceptabele verplaatsing. Het zaagtand-patroon is bij proefstuk 6-10 niet te zien. Men zou kunnen stellen dat deze curve alleen voorkomt bij het ductiel gedrag van een proefstuk met een houtdensiteit die relatief laag is ($\leq 500 \text{ kg/m}^3$). Daar de densiteit van het hout voor deze proefstukken hoog is, komt dit verschijnsel niet voor.

Tabel 55 Gegevens proefserie geniete verbinding met randafstand 9 mm (5d)

Testserie S-5d (9 mm)					
Specimen (-)	ρ (kg/m ³) plaat 1	ρ (kg/m ³) plaat 2	ρ (kg/m ³) Hout	F_{max} (N)	
1	717	722	511	6282,2	
2	716	714	436	7583,7	
3	705	724	680	7582,5	
4	715	710	681	6080,8	
5	726	717	470	5625,4	
6	722	710	604	6890,7	
7	734	717	609	7007,5	
8	730	731	646	6399,3	
9	743	743	631	6398,6	
10	738	726	626	6254,8	
ρ_k	652	649	420	F_v, R_k	5377,9
ρ_m	725	721	589	F_v, R_m	6610,6

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,81.

Figuur 109 toont de toestand van de proefstukken na het uitvoeren van de test.

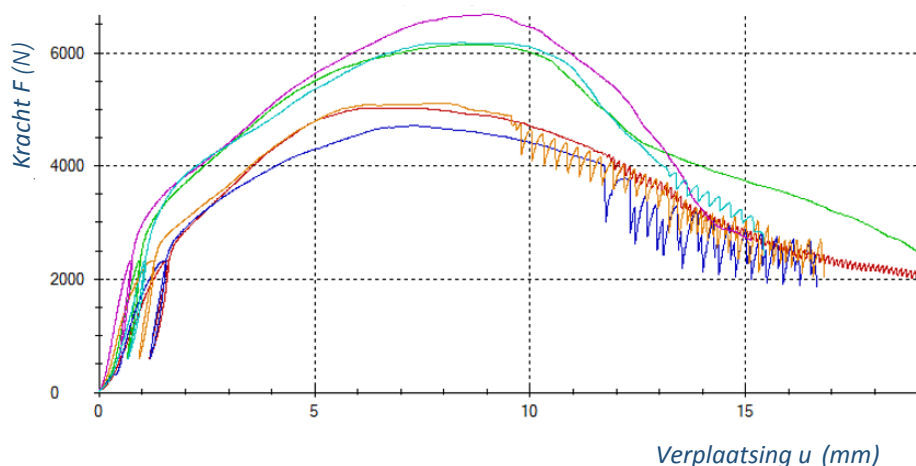


Figuur 109 Toestand geniete proefstukken bij randafstand 5d

Op het proefstuk is goed te zien dat bij het plaatmateriaal brosse breuk optreedt na het bereiken van de maximum belasting. Deze brosse breuk treedt op omdat de randafstand dermate klein wordt. Ondanks dat brosse breuk meer frequent optreedt, wordt er geen opvallend lagere sterkte gevonden voor deze proefstukken.

3.5.3.3.4 (on)belaste randafstand = 4d

Figuur 110 geeft de kracht in functie van de verplaatsing weer voor de geniete verbinding van een houten balkje met spaanplaat waar de randafstand 7,2 mm bedraagt. De grafiek toont het verloop van proefstukken 5-10.



Figuur 110 Kracht van de geniete verbinding in functie van de verplaatsing voor de verbinding hout/spaanplaat 4d

Bij deze proefserie keert opnieuw het zaagtand-patroon terug voor proefstukken 5-10. In *Tabel 56* kan de dichtheid van het hout voor deze proefstukken teruggevonden worden. De dichtheid van deze proefstukken ligt, zoals eerder vermeld onder een bepaalde waarde. Opnieuw kennen de proefstukken waar de niet uit het hout getrokken wordt, een ductiel gedrag. De proefstukken waar de niet doorheen het plaatmateriaal pons, ervaren opnieuw het verschijnsel van brosse breuk. Telkens wanneer de niet doorheen de plaat geponsd wordt, begint het plaatmateriaal rondom de niet te scheuren. Bij deze laagste randafstand kan grafisch wel gezien worden dat de verplaatsing is afgenomen in vergelijking met voorgaande series, wanneer brosse breuk optreedt.

Tabel 56 Gegevens proefserie geniete verbinding met randafstand 7,2 mm (4d)

Testserie S-4d (7,2 mm)

<i>Specimen (-)</i>	ρ (kg/m ³) <i>plaat 1</i>	ρ (kg/m ³) <i>plaat 2</i>	ρ (kg/m ³) <i>Hout</i>		<i>Fmax (N)</i>	
1	726	719	425		5058,7	
2	732	737	472		6171,1	
3	727	726	447		5332,5	
4	711	724	515		5757,4	
5	714	708	423		5018,2	
6	732	714	592		6146,4	
7	711	724	438		4706,4	
8	720	698	463		5111,2	
9	714	720	678		6679,6	
10	720	711	773		6178,8	
	ρ_k	649	646	328	F_v, R_k	4367,3
	ρ_m	721	718	523	F_v, R_m	5616,0

De karakteristieke waarde wordt berekend via NBN EN 14358 op basis van 10 proefstukken. De verhouding karakteristieke waarde / gemiddelde waarde bedraagt 0,78.

Figuur 111 toont de toestand van één de proefstukken, die ductiel gedrag vertoont, na het uitvoeren van de test.



Figuur 111 Toestand geniete proefstukken met randafstand 4d

Zelfs bij deze kleinst gekozen randafstand zijn er bepaalde proefstukken, zoals hierboven afgebeeld, waar geen sprake is van brosse breuk. Afhankelijk van de densiteit van het naaldhout, worden voldoende maximum belastingen behaald. Er valt tevens geen opmerkelijk verschil op te merken tussen de bereikte sterkte van de proefstukken met/zonder brosse breuk.

3.5.3.4 Evaluatie afnemende (on)belaste randafstand bij geniete verbindingen

Om uiteindelijk de resultaten voor de geniete verbindingen te kunnen evalueren, dienen terug de minimum randafstanden, voorgesteld door EC5, voor ogen genomen te worden. Voor de onbelaste rand stelt de EC5 een minimum afstand van 10 keer de diameter van het verbindingsmiddel voor. Voor de belaste rand is deze minimum afstand zelfs opgevoerd tot $20d$.

Tabel 57 Minimum randafstanden geniete plaat-houtverbindingen

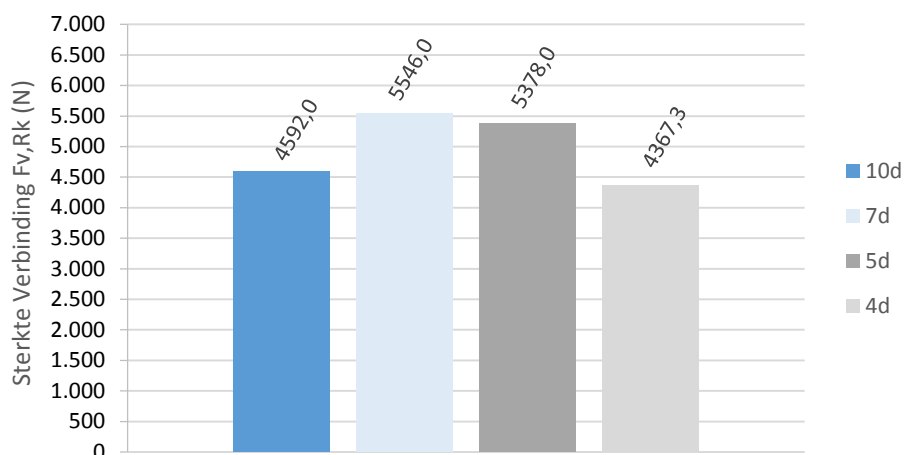
<i>Minimum randafstanden</i>	
<i>Afstand</i>	<i>Nieten</i>
$a_{4,t}$ (<i>belast</i>)	$20d$
$a_{4,c}$ (<i>onbelast</i>)	$10d$

Wanneer vervolgens de resultaten grafisch langs elkaar weergegeven worden, zien wel dat de karakteristieke sterkte van de verbinding in twee verschillende delen kan opgesplitst worden. Enerzijds hebben we de karakteristieke sterkte van $10d$ en $4d$ welke niet veel van elkaar verschillen. Anderzijds liggen de karakteristieke sterktes van $7d$ en $5d$ niet ver van elkaar af. Wat opvalt, is dat er tussen deze twee delen een opmerkelijk groot verschil in sterkte is.

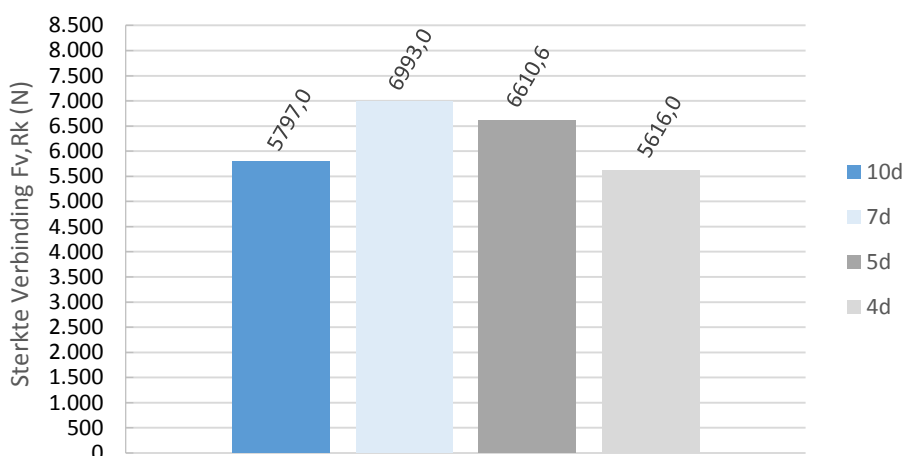
Wanneer nu de gemiddelde sterktes van elke proefserie met elkaar vergeleken worden, kan dezelfde conclusie als voorheen getrokken worden. De gemiddelde sterkte van de verbinding heeft onderling dezelfde verhouding als de karakteristieke sterkte. We zien op *Figuur 113* dat de gemiddelde sterkte van de verbinding voor $10d$ opnieuw in de buurt van $4d$ ligt.

Dit verschil valt relatief eenvoudig te verklaren wanneer de gemiddelde densiteit van het hout van elke serie in rekening gebracht wordt. Voor $10d$ en $4d$ ligt de gemiddelde densiteit rond de 500 kg/m^3 . Dit in tegenstelling tot $7d$ en $5d$ waar de gemiddelde densiteit al gemakkelijk rond de 600 kg/m^3 ligt.

Deze grote spreiding in densiteit zorgt voor moeilijkheden om de bekomen resultaten te vergelijken.



Figuur 112 Staafdiagram karakteristieke sterktes geniete verbindingen



Figuur 113 Staafdiagram gemiddelde sterktes geniete verbindingen

Een procentuele verhouding tussen de bekomen resultaten, zowel karakteristiek als gemiddeld, wordt weergegeven in *Tabel 58*. Voor de karakteristieke waarden kan gesteld worden dat de sterkte tussen *10d* en *4d* verschilt met $-4,9\%$ terwijl *7d* en *5d* gemakkelijk tot $+20,8\%$ verschillen ten opzichte van *10d*. Voor de gemiddelde waarden kan een soortgelijke conclusie getrokken worden.

Wanneer we dus nu de afname in randafstand willen evalueren, zien we dat een vermindering in randafstand tot *4d* leidt tot een daling van $-4,9\%$ in sterkte wanneer we de karakteristieke waarde bij *10d* voor ogen houden. Gemiddeld zitten we tussen deze randafstanden met een daling van $-3,1\%$ in sterkte.

Tabel 58 Verhouding sterkte geniete verbindingen

k/m	10d	7d	5d	4d
k	4592,0	5546,6	5377,9	4367,3
	100,0%	120,8%	117,1%	95,1%
m	5796,9	6993,0	6610,6	5616,0
	100,0%	120,6%	114,0%	96,9%

Het is onlogisch dat de serie welke als referentie dient, zoveel lager ligt dan de series 7d en 5d. Zoals eerder vermeld ligt de oorzaak bij het grote verschil in densiteit van het naaldhout. De vervaardiging van de proefstukken is altijd volledig willekeurig verlopen en zorgt hier (ongewild) voor een groot verschil. Om nu toch een zo goed mogelijke evaluatie te doen, dient opnieuw een vergelijking opgesteld te worden die de densiteit in rekening brengt. Deze vergelijking dient dus ervoor om de sterkte per niet in te schatten in functie van de densiteit van het hout.

De vergelijking wordt opnieuw bepaald van alle experimentele resultaten van serie 10d en 7d. Met deze vergelijking kan de sterkte van de verbinding geschat worden in functie van de densiteit van het hout. De uitwerking van deze vergelijking is bijgevoegd in *Bijlage B*.

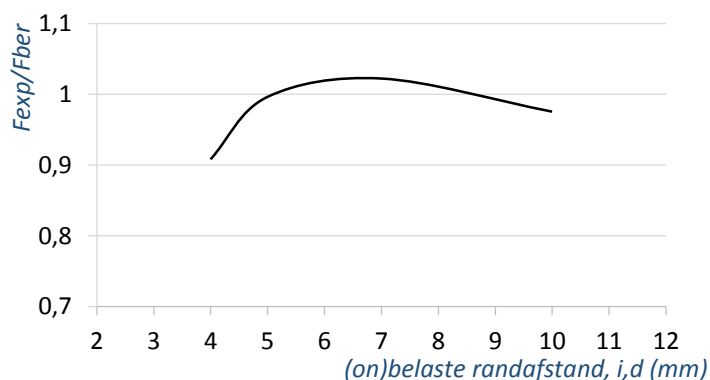
De vergelijking om de sterkte per niet te voorspellen in functie van de densiteit:

$$F_{v,R} = 1,716 \rho + 648,33 \quad (3-19)$$

Om vervolgens opnieuw een evaluatie te doen voor gemiddelde waarden, wordt de sterkte per niet berekend op basis van de gemiddelde densiteit van elke serie. De vergelijking wordt dus de volgende:

$$F_{v,Rm} = 1,716 \rho_m + 648,33 \quad (3-20)$$

Figuur 114 toont het grafische verloop welke volgt uit de verhouding tussen de experimentele sterkte en de berekende sterkte volgens bovenstaande formule



Figuur 114 Verloop sterkte per niet in functie van de randafstand

Tabel 59 Verhouding experimentele en berekende sterkte per niet in functie van de densiteit naaldhout (gemiddelde)

<i>m</i>	10d	7d	5d	4d
ρ_m	488	619	589	523
<i>exp</i>	1449,2	1748,3	1652,7	1404,0
<i>ber</i>	1485,7	1710,5	1659,1	1545,8
<i>exp/ber</i>	97,5%	102,0%	99,6%	90,8%

Uit *Tabel 59* kan geconcludeerd worden dat het verschil in sterkte bij de minste randafstand *4d* beperkt blijft tot ongeveer 10%. Vooraleer gesteld kan worden dat randafstanden tot *4d* acceptabel zouden zijn als minimum randafstand, dient eerst nog de berekening van de sterkte van de verbinding volgens EC5 te gebeuren. Deze berekende waarde zal vergeleken worden met de sterkte behaald bij deze randafstanden. Wel kan al vermeld worden dat randafstanden tot *7d* of *5d* geen daling in sterkte teweegbrengen.

4 Berekening van de sterkte van een verbinding

4.1 Sterkte van de verbinding volgens Eurocode 5

4.1.1 Rekenregels EN 1995-1-1

De berekening van de sterkte van een verbinding kan gebeuren aan de hand van rekenregels opgegeven in EN 1995-1-1 (EC5). Deze rekenregels zijn echter enkel geldig voor verbindingen tussen hout en houtachtige plaatmaterialen.

De resultaten van verbindingen uit voorgaande proeven worden nu gerangschikt volgens hun volumieke massa. Hierdoor kan een nauwkeurigere vergelijking gemaakt worden tussen de berekende en experimentele waarde. We onderscheiden twee soorten berekende sterktes van verbindingen:

- De berekende sterkte van de verbinding volgens Eurocode 5 vergelijkingen
- De berekende sterkte van de verbinding volgens Eurocode 5 vergelijkingen met karakteristieke/gemiddelde waarden uit voorgaande experimenten voor de materiaalparameters.

Volgens Johansen wordt de sterkte van de verbinding bepaald door de minimum waarde uit één van volgende vergelijkingen:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (4-1) \\ \frac{f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (4-2) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (4-4) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (4-5) \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (4-6) \end{array} \right.$$

Bovenstaande vergelijkingen bevatten een aantal materiaalparameters welke berekend worden door hun eigen rekenregels of experimenteel bepaald worden.

De karakteristieke stuiksterkte van het hout kan experimenteel via EN 383 bepaald worden of berekend worden volgens onderstaande formule uit EC5:

$$f_{h,2,k} = 0.082 \rho_k d^{-0.3} \quad (4-7)$$

De karakteristieke stuiksterkte van spaanplaat kan experimenteel via EN 383 bepaald worden of berekend worden volgens onderstaande formule uit EC5:

$$f_{h,1,k} = 65 d^{-0.7} t^{0.1} \quad (4-8)$$

De factor β geeft de verhouding weer tussen bovenstaande stuiksterktes:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (4-9)$$

Het karakteristieke vloeimoment kan experimenteel bepaald worden door EN 409 of berekend worden volgens onderstaande rekenregels:

- Geprofileerde nagels:

$$M_{y,Rk} = 0,45 f_u d^{2,6} \quad (4-10)$$

- Nieten:

$$M_{y,Rk} = 150 d^3 \quad (4-11)$$

Als laatste dient nog de uittrekkcapaciteit bepaald te worden. Deze kan berekend worden met onderstaande formule:

- Geprofileerde nagels

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 \end{array} \right. \quad (4-12)$$

- Nieten (per been)

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 + f_{ax,k} \cdot d \cdot t \end{array} \right. \quad (4-13)$$

In deze formules zitten de karakteristieke uittreksterkte en de karakteristieke doortreksterkte. Deze kunnen experimenteel bepaald worden via EN 1382 en EN 1383 of kunnen per been van een niet met minimale hecht lengte van $12d$ berekend worden via:

$$f_{ax,k} = 20 \times 10^{-6} \rho_k^2 \quad (4-14)$$

$$f_{head,k} = 70 \times 10^{-6} \rho_k^2 \quad (4-15)$$

Voor de uittrekkcapaciteit van de geprofileerde nagel wordt alleen gerekend met de experimenteel bepaalde karakteristieke/gemiddelde waarde (3.3). De EC5 geeft alleen een minimum waarde voor uittreksterkte $f_{ax,k}$ wanneer geprofileerde nagels gebruikt worden.

De bijdrage van het koordeffect moet in elk geval begrensd worden. Voor geprofileerde nagels wordt deze begrensd tot 50% van het Johansen's deel. Voor de nieten stellen we dit gelijk aan 15% (hetzelfde als ronde gladde nagels).

Verder rest enkel nog de parameter d , welke duidt op de diameter van het gebruikte verbindingsmiddel.

Voor de geprofileerde nagel is dit simpelweg de diameter. Voor de nieten met een rechthoekige nietsectie $b_n \times h_n$ is de diameter gegeven door:

$$d = \sqrt{b_n \cdot h_n} \quad (4-16)$$

4.1.2 Overzicht experimentele resultaten volgens densiteit

Door de onderverdeling van de verbindingen volgens de densiteit van het hout, worden er vier verschillende categorieën opgemaakt. Elke serie bevat 10 proefstukken waarvan de densiteit van het gebruikte houtblokje zich rondom de richtwaarde van zijn serie bevindt. Telkens zal van elke serie de karakteristieke en gemiddelde sterkte berekend worden. *Tabel 60* geeft een overzicht van de experimentele karakteristieke/gemiddelde sterkte per soort verbinding in functie van de densiteit van het naaldhout. Er moet wel rekening gehouden worden met het feit dat er steeds verschillende randafstanden gebruikt zijn.

Tabel 60 Overzicht sterkte verbinding volgens densiteit houtblokje

<i>Serie (-)</i>	ρ_k (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	F_v, R_k (N)	F_v, R_m (N)
<i>Nagels</i>				
1	392	455	4434,42	4940,04
2	455	550	4232,55	5455,62
3	580	645	4452,39	5847,31
4	659	733	4214,19	5339,79
<i>Nieten</i>				
1	392	455	4300,46	5765,63
2	455	550	5101,96	6302,86
3	580	645	5787,34	6956,14
4	659	733	5791,87	6952,36

Elke serie wordt apart vergeleken met de sterkte berekend door de vergelijkingen in de EC5. Voor de genagelde verbindingen kan een uitgebreide analyse gedaan worden doordat een aantal materiaalparameters eerder al experimenteel bepaald werden. Deze experimentele waardes kunnen evenzeer in de Johansen vergelijkingen ingevuld worden. Voor de geniete verbindingen zal de vergelijking enkel gebeuren met de vergelijkingen uit EC5 omdat niet genoeg materiaalparameters experimenteel bepaald werden. Wanneer we het overzicht omvormen om nu de sterkte per verbindingsmiddel weer te geven, komen we tot volgende tabel:

Tabel 61 Overzicht sterkte per verbindingsmiddel volgens densiteit houtblokje

<i>Serie (-)</i>	ρ_k (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	F_v, R_k (N)	F_v, R_m (N)
<i>Sterkte per Nagel</i>				
1	392	455	1108,60	1235,01
2	455	550	1058,14	1363,91
3	580	645	1113,10	1461,83
4	659	733	1053,55	1334,95
<i>Sterkte per Niet</i>				
1	392	455	1075,12	1441,41
2	455	550	1275,50	1575,72
3	580	645	1446,84	1739,04
4	659	733	1447,97	1738,10

Voor de berekening van de nieten is het belangrijk dat men weet dat de minimum sterkte die uit de Johansen vergelijkingen komt, de sterkte van één been is. Om vervolgens de sterkte van één enkele niet te kennen, dient men de sterkte van het nietbeen gewoon te verdubbelen.

4.2 Berekening genagelde plaat- houtverbinding

4.2.1 Berekening van de sterkte per verbindingsmiddel

4.2.1.1 Berekening sterkte per nagel serie 1

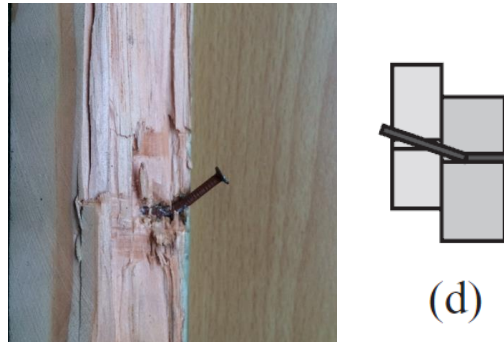
In Tabel 62 zijn de berekeningen weergegeven die dienen tot het bekomen van de sterkte per verbindingsmiddel voor serie 1: hout met een karakteristieke dichtheid van 392 kg/m^3 .

Tabel 62 Berekening sterkte per nagel serie 1

Serie 1					
Nagel	Karakt.		Karakt. (exp)		Gemiddeld
$d \text{ (mm)}$	2,5	$d \text{ (mm)}$	2,5	$d \text{ (mm)}$	2,5
$M_{y,Rk} \text{ (Nmm)}$	2924	$M_{y,Rk} \text{ (Nmm)}$	2924	$M_{y,Rk} \text{ (Nmm)}$	2924
Plaat					
$t_1 \text{ (mm)}$	12	$t_1 \text{ (mm)}$	12	$t_1 \text{ (mm)}$	12
$\rho_m \text{ (kg/m}^3\text{)}$	720	$\rho_m \text{ (kg/m}^3\text{)}$	720	$\rho_m \text{ (kg/m}^3\text{)}$	720
$f_{h,1,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$f_{h,1,k} = 65 d^{-0.7} t^{0.1}$	$f_{h,1,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$ experimenteel		$f_{h,1,m} \text{ (N/mm}^2\text{)}$ experimenteel	
$f_{h,1,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	43,88	$f_{h,1,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	50,60	$f_{h,1,m} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	60,98
Hout					
$t_2 \text{ (mm)}$	38	$t_2 \text{ (mm)}$	38	$t_2 \text{ (mm)}$	38
$\rho_k \text{ (kg/m}^3\text{)}$	392	$\rho_k \text{ (kg/m}^3\text{)}$	392	$\rho_m \text{ (kg/m}^3\text{)}$	455
$f_{h,2,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$f_{h,2,k} = 0.082 \rho_k d^{-0.3}$	$f_{h,2,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$ experimenteel		$f_{h,2,m} \text{ (N/mm}^2\text{)}$ experimenteel	
$f_{h,2,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	24,43	$f_{h,2,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	30,45	$f_{h,2,m} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	40,17
Capaciteit					
β	0,56	β	0,60	β	0,66
(2.1)	1316,40	(2.1)	1517,78	(2.1)	1829,30
(2.2)	2320,85	(2.2)	2892,96	(2.2)	3816,16
(2.3)	853,99	(2.3)	1049,63	(2.3)	1362,86
(2.4)	572,96	(2.4)	648,10	(2.4)	761,81
(2.5)	924,86	(2.5)	1121,40	(2.5)	1435,90
(2.6)	667,42	(2.6)	745,58	(2.6)	841,51
$F_{joh} \text{ (N)}$	572,96	$F_{joh} \text{ (N)}$	648,10	$F_{joh} \text{ (N)}$	761,81
Koordeffect					
$F_{ax,Rk} \text{ (N)}$ experimenteel		$F_{ax,Rk} \text{ (N)}$ experimenteel		$F_{ax,Rm} \text{ (N)}$ experimenteel	
$F_{ax,Rk} \text{ (N)}$	911,80	$F_{ax,Rk} \text{ (N)}$	911,80	$F_{ax,Rm} \text{ (N)}$	1326,30
$F_{ax,Rk}/4 \text{ (N)}$	227,95	$F_{ax,Rk}/4 \text{ (N)}$	227,95	$F_{ax,Rm}/4 \text{ (N)}$	331,60
$0,05 \cdot F_{joh} \text{ (N)}$	28,65	$0,05 \cdot F_{joh} \text{ (N)}$	32,00	$0,05 \cdot F_{joh} \text{ (N)}$	38,05
$F_{v,berekend} \text{ (N)}$	829,56	$F_{v,berekend} \text{ (N)}$	908,05	$F_{v,Rm,berekend} \text{ (N)}$	1131,46
$F_{v,gemeten} \text{ (N)}$	1108,60	$F_{v,gemeten} \text{ (N)}$	1108,60	$F_{v,Rm,gemeten} \text{ (N)}$	1235,01
ber/exp	0,75	ber/exp	0,82	ber/exp	0,92

Uit de berekening kan afgeleid worden dat de bijdrage van het koordeffect niet begrensd moest worden. In alle drie de gevallen is het steeds bezwijkmechanisme *d* welke bepalend is voor de sterkte van de verbinding. Deze komt goed overeen met de manier waarop de proefstukken in deze reeks faalden.

In *Figuur 115* zien we de typische vervorming van de genagelde verbinding.



Figuur 115 Bezwijkmechanisme *d* bij genagelde verbinding serie 1

Figuur 116 laat dan weer een zeldzaam geval zien waar de nagels anders vervormen. Het bezwijken van de verbinding komt nu meer overeen met bezwijkmechanisme *f*. De nagels worden eerder uit het hout getrokken dan dat zij doorheen het plaatmateriaal getrokken worden zoals de andere gevallen. Bij bezwijkmechanisme *f* is ook heel duidelijk te zien dat er zich twee plastische scharnieren vormen in plaats van het enkele scharnier bij bezwijkmechanisme *d*.



Figuur 116 Bezwijkmechanisme *f* bij genagelde verbinding serie 1

4.2.1.2 Berekening sterkte per nagel serie 2

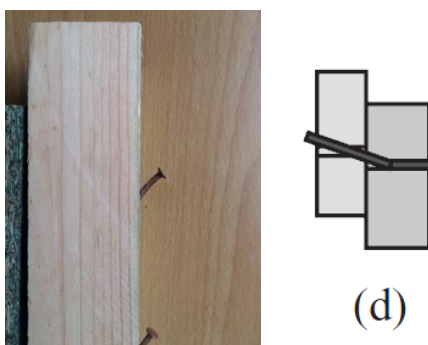
In Tabel 63 zijn de berekeningen weergegeven die dienen tot het bekomen van de sterkte per verbindingsmiddel voor serie 2: hout met een karakteristieke dichtheid van 455 kg/m^3 .

Tabel 63 Berekening sterkte per nagel serie 2

Serie 2					
Nagel	<i>Karakt.</i>		<i>Karakt. (exp)</i>		<i>Gemiddeld</i>
$d \text{ (mm)}$	2,5	$d \text{ (mm)}$	2,5	$d \text{ (mm)}$	2,5
$M_{y,Rk} \text{ (Nmm)}$	2924	$M_{y,Rk} \text{ (Nmm)}$	2924	$M_{y,Rk} \text{ (Nmm)}$	2924
Plaat					
$t_1 \text{ (mm)}$	12	$t_1 \text{ (mm)}$	12	$t_1 \text{ (mm)}$	12
$\rho m \text{ (kg/m}^3\text{)}$	720	$\rho m \text{ (kg/m}^3\text{)}$	720	$\rho m \text{ (kg/m}^3\text{)}$	720
$f_{h,1,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$f_{h,1,k} = 65 d^{-0.7} t^{0.1}$	$f_{h,1,k} \text{ (N/mm}^2\text{) experimenteel}$		$f_{h,1,m} \text{ (N/mm}^2\text{) experimenteel}$	
$f_{h,1,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	43,88	$f_{h,1,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	50,60	$f_{h,1,m} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	60,98
Hout					
$t_2 \text{ (mm)}$	38	$t_2 \text{ (mm)}$	38	$t_2 \text{ (mm)}$	38
$\rho k \text{ (kg/m}^3\text{)}$	455	$\rho k \text{ (kg/m}^3\text{)}$	455	$\rho k \text{ (kg/m}^3\text{)}$	550
$f_{h,2,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$f_{h,2,k} = 0.082 \rho_k d^{-0.3}$	$f_{h,2,k} \text{ (N/mm}^2\text{) experimenteel}$		$f_{h,2,m} \text{ (N/mm}^2\text{) experimenteel}$	
$f_{h,2,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	28,34	$f_{h,2,k} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	40,43	$f_{h,2,m} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	49,91
Capaciteit					
β	0,65	β	0,80	β	0,82
(2.1)	1316,40	(2.1)	1517,78	(2.1)	1829,30
(2.2)	2692,57	(2.2)	3840,78	(2.2)	4741,08
(2.3)	964,89	(2.3)	1328,00	(2.3)	1632,60
(2.4)	594,91	(2.4)	692,70	(2.4)	799,85
(2.5)	1039,9	(2.5)	1406,00	(2.5)	1710,70
(2.6)	708,62	(2.6)	810,60	(2.6)	895,84
$F_{joh} \text{ (N)}$	594,91	$F_{joh} \text{ (N)}$	692,70	$F_{joh} \text{ (N)}$	799,85
Koordeffect					
$F_{ax,Rk} \text{ (N) experimenteel}$		$F_{ax,Rk} \text{ (N) experimenteel}$		$F_{ax,Rm} \text{ (N) experimenteel}$	
$F_{ax,Rk} \text{ (N)}$	911,80	$F_{ax,Rk} \text{ (N)}$	911,80	$F_{ax,Rm} \text{ (N)}$	1326,30
$F_{ax,Rk}/4 \text{ (N)}$	227,95	$F_{ax,Rk}/4 \text{ (N)}$	227,95	$F_{ax,Rm}/4 \text{ (N)}$	331,60
$0,05 \cdot F_{joh} \text{ (N)}$	29,75	$0,05 \cdot F_{joh} \text{ (N)}$	34,63	$0,05 \cdot F_{joh} \text{ (N)}$	39,99
$F_{v,berekend} \text{ (N)}$	852,6	$F_{v,berekend} \text{ (N)}$	955,2	$F_{v,Rm,berekend} \text{ (N)}$	1171,42
$F_{v,gemeten} \text{ (N)}$	1058,14	$F_{v,gemeten} \text{ (N)}$	1058,14	$F_{v,Rm,gemeten} \text{ (N)}$	1363,91
<i>ber/exp</i>	0,81	<i>ber/exp</i>	0,90	<i>ber/exp</i>	0,86

Doordat de sterkte van de verbinding berekend door de Johansen vergelijkingen een lineaire toename kent doordat enkel de stuksterkte van het hout toeneemt, zien we dat de onderschatting van *ber/exp* voor de karakteristieke waardes iets afneemt. Wanneer we kijken naar de gemiddelde verhouding *ber/exp* moet wel vermeld worden dat de onderschatting toeneemt met het verhogen van de dichtheid van het hout.

In *Figuur 117* is te zien dat opnieuw het bezwijkmechanisme van EC5 en de praktijk overeenkomt.



Figuur 117 Bezwijkmechanisme *d* bij genagelde verbinding serie 2

4.2.1.3 Berekening sterkte per nagel serie 3

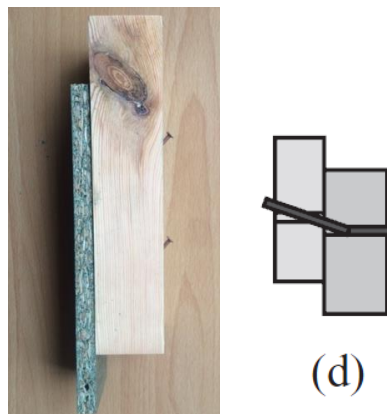
In *Tabel 64* zijn de berekeningen weergegeven die dienen tot het bekomen van de sterkte per verbindingsmiddel voor serie 3: hout met een karakteristieke dichtheid van 580 kg/m^3 .

Tabel 64 Berekening sterkte per nagel serie 3

Serie 3					
Nagel	Karakt.		Karakt. (exp)		Gemiddeld
d (mm)	2,5	d (mm)	2,5	d (mm)	2,5
$M_{y,Rk}$ (Nmm)	2924	$M_{y,Rk}$ (Nmm)	2924	$M_{y,Rk}$ (Nmm)	2924
Plaat					
t_1 (mm)	12	t_1 (mm)	12	t_1 (mm)	12
ρ_m (kg/m ³)	720	ρ_m (kg/m ³)	720	ρ_m (kg/m ³)	720
$f_{h,1,k}$ (N/mm ²)	$f_{h,1,k} = 65 d^{-0.7} t^{0.1}$	$f_{h,1,k}$ (N/mm ²)	experimenteel	$f_{h,1,m}$ (N/mm ²)	experimenteel
$f_{h,1,k}$ (N/mm ²)	43,88	$f_{h,1,k}$ (N/mm ²)	50,60	$f_{h,1,m}$ (N/mm ²)	60,98
Hout					
t_2 (mm)	38	t_2 (mm)	38	t_2 (mm)	38
ρ_k (kg/m ³)	580	ρ_k (kg/m ³)	580	ρ_k (kg/m ³)	645
$f_{h,2,k}$ (N/mm ²)	$f_{h,2,k} = 0.082 \rho_k d^{-0.3}$	$f_{h,2,k}$ (N/mm ²)	experimenteel	$f_{h,2,m}$ (N/mm ²)	experimenteel
$f_{h,2,k}$ (N/mm ²)	36,13	$f_{h,2,k}$ (N/mm ²)	52,33	$f_{h,2,m}$ (N/mm ²)	63,27
Capaciteit					
β	0,82	β	1,03	β	1,04
(2.1)	1316,40	(2.1)	1517,78	(2.1)	1829,30
(2.2)	3432,29	(2.2)	4971,35	(2.2)	6010,65
(2.3)	1180,8	(2.3)	1648,65	(2.3)	1992,28
(2.4)	629,49	(2.4)	730,58	(2.4)	838,92
(2.5)	1258,95	(2.5)	1723,20	(2.5)	2066,66
(2.6)	761,20	(2.6)	867,33	(2.6)	952,90
$F_{joh}(N)$	629,49	$F_{joh}(N)$	730,58	$F_{joh}(N)$	838,92

Koordeffect					
$F_{ax,Rk} (N)$ experimenteel		$F_{ax,Rk} (N)$ experimenteel		$F_{ax,Rm} (N)$ experimenteel	
$F_{ax,Rk}(N)$	911,80	$F_{ax,Rk}(N)$	911,80	$F_{ax,Rm}(N)$	1326,30
$F_{ax,Rk}/4(N)$	227,95	$F_{ax,Rk}/4(N)$	227,95	$F_{ax,Rm}/4(N)$	331,60
$0,05 \cdot F_{joh}(N)$	31,47	$0,05 \cdot F_{joh}(N)$	36,53	$0,05 \cdot F_{joh}(N)$	41,95
$F_{v,berekend}(N)$	888,9	$F_{v,berekend}(N)$	995,10	$F_{v,Rm,berekend}(N)$	1212,47
$F_{v,gemeten}(N)$	1113,10	$F_{v,gemeten}(N)$	1113,10	$F_{v,Rm,gemeten}(N)$	1461,83
ber/exp	0,80	ber/exp	0,89	ber/exp	0,83

Buiten een verdere onderschatting op basis van de gemiddelde waarden, is er weinig op deze serie aan te merken. Het optredend bezwijkmechanisme blijft onveranderd.



Figuur 118 Bezwijkmechanisme d bij genagelde verbinding serie 3

4.2.1.4 Berekening sterkte per nagel serie 4

In Tabel 65 zijn de berekeningen weergegeven die dienen tot het bekomen van de sterkte per verbindingsmiddel voor serie 4: hout met een karakteristieke dichtheid van 659 kg/m^3 .

Tabel 65 Berekening sterkte per nagel serie 4

Serie 4					
Nagel	Karakt.		Karakt. (exp)		Gemiddeld
$d (mm)$	2,5	$d (mm)$	2,5	$d (mm)$	2,5
$M_{y,Rk} (Nmm)$	2924	$M_{y,Rk} (Nmm)$	2924	$M_{y,Rk} (Nmm)$	2924
Plaat					
$t_1 (mm)$	12	$t_1 (mm)$	12	$t_1 (mm)$	12
$\rho_m (kg/m^3)$	720	$\rho_m (kg/m^3)$	720	$\rho_m (kg/m^3)$	720
$f_{h,1,k} (N/mm^2)$	$f_{h,1,k} = 65 d^{-0.7} t^{0.1}$	$f_{h,1,k} (N/mm^2)$ experimenteel		$f_{h,1,m} (N/mm^2)$ experimenteel	
$f_{h,1,k} (N/mm^2)$	43,88	$f_{h,1,k} (N/mm^2)$	50,60	$f_{h,1,m} (N/mm^2)$	60,98
Hout					
$t_2 (mm)$	38	$t_2 (mm)$	38	$t_2 (mm)$	38
$\rho_k (kg/m^3)$	659	$\rho_k (kg/m^3)$	659	$\rho_k (kg/m^3)$	733

$f_{h,2,k} (N/mm^2)$	$f_{h,2,k} = 0.082 \rho_k d^{-0.3}$	$f_{h,2,k} (N/mm^2)$ experimenteel		$f_{h,2,k} (N/mm^2)$	
$f_{h,2,k} (N/mm^2)$	41,05	$f_{h,2,k} (N/mm^2)$	65,13	$f_{h,2,m} (N/mm^2)$	73,90
Capaciteit					
β	0,935	β	1,29	β	1,21
(2.1)	1316,40	(2.1)	1517,78	(2.1)	1829,30
(2.2)	3899,80	(2.2)	6187,35	(2.2)	7020,50
(2.3)	1314,17	(2.3)	1981,71	(2.3)	2270,26
(2.4)	646,87	(2.4)	760,22	(2.4)	862,81
(2.5)	1391,28	(2.5)	2042,54	(2.5)	2334,85
(2.6)	787,53	(2.6)	912,53	(2.6)	988,43
$F_{joh}(N)$	646,87	$F_{joh}(N)$	760,22	$F_{joh}(N)$	862,81
Koordeffect					
$F_{ax,Rk} (N)$ experimenteel		$F_{ax,Rk} (N)$ experimenteel		$F_{ax,Rm} (N)$ experimenteel	
$F_{ax,Rk}(N)$	911,80	$F_{ax,Rk}(N)$	911,80	$F_{ax,Rm}(N)$	1326,30
$F_{ax,Rk}/4(N)$	227,95	$F_{ax,Rk}/4(N)$	227,95	$F_{ax,Rm}/4(N)$	331,60
$0,05 \cdot F_{joh}(N)$	32,34	$0,05 \cdot F_{joh}(N)$	32,00	$0,05 \cdot F_{joh}(N)$	43,14
$F_{v,berekend}(N)$	907,20	$F_{v,berekend}(N)$	1026,20	$F_{v,Rm,berekend}(N)$	1237,55
$F_{v,gemeten}(N)$	1053,55	$F_{v,gemeten}(N)$	1053,55	$F_{v,Rm,gemeten}(N)$	1334,95
ber/exp	0,86	ber/exp	0,97	ber/exp	0,93

Bij de serie met de hoogste densiteit kan men stellen dat de onderschatting is teruggedreven tot enkele procenten wanneer de vergelijkingen van de EC5 worden ingevuld met materiaalparameters welke eerder experimenteel verworven zijn. Er is nog altijd een onderschatting van 14% op de sterkte berekend uit de vergelijkingen waar enkel de experimentele uittrekcaciteit in verwerkt zit.

4.2.2 Evaluatie berekende vs. experimentele resultaten

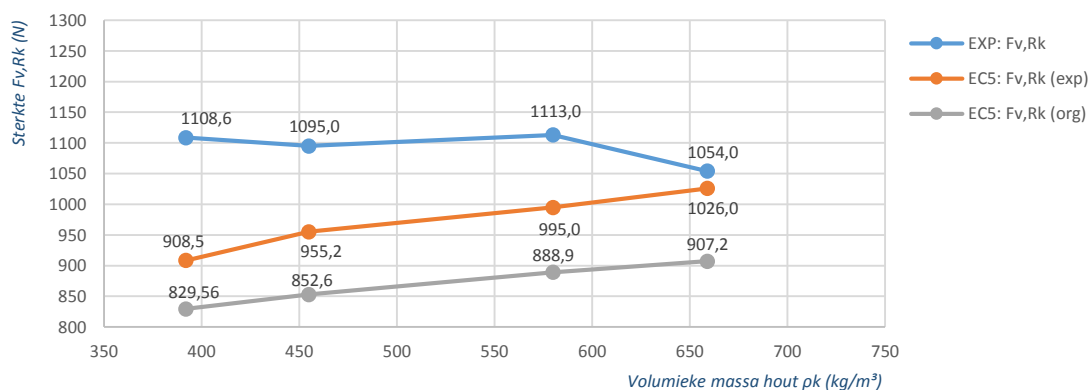
Tabel 66 geeft een overzicht van de karakteristieke sterkte per verbindingsmiddel, berekend volgens de Eurocode en de experimentele verworven sterkte. Procentueel wordt de verhouding gegeven van de berekende waarde ten opzichte van de experimentele sterkte per verbindingsmiddel.

Tabel 66 Overzicht karakteristieke resultaten per serie (sterkte per nagel)

$\rho_k(kg/m^3)$	exp	EC5(k)	EC5(exp)
k			
392	1108,6 N 100%	829,6 N 74,8%	908,5 N 82,0%
455	1095,0 N 100%	852,6 N 77,9%	955,2 N 87,2%
580	1113,0 N 100%	888,9 N 79,9%	995,0 N 89,4%
659	1054,0 N 100%	907,2 N 86,0%	1026,0 N 97,3%

In Tabel 66 valt op te merken dat de berekende waarde uit de Eurocode telkens een onderschatting geeft voor de sterkte per verbindingsmiddel. Wanneer de serie met de hoogste densiteit even buiten beschouwing gelaten wordt, bedraagt het minste verschil 20%.

De experimentele sterkte per verbindingsmiddel van de serie met de hoogste densiteit neemt lichtelijk af ten opzichte van de overige resultaten. Dit is te wijten aan het feit dat de beperkte resultaten voor deze karakteristieke sterkte afkomstig waren uit proefstukken waarbij de randafstand $3d$ bedroeg (3.5). De berekende sterkte, waar alle experimentele waarden zijn ingevuld, drijft de onderschatting zelfs terug tot 2,7% ten opzichte van de experimentele sterkte. Voorgaande series met deze experimentele waarden kennen een verschil tot minimum 10%. Hoe hoger de densiteit van het hout in de berekeningen, hoe meer de onderschatting wordt ingeperkt.

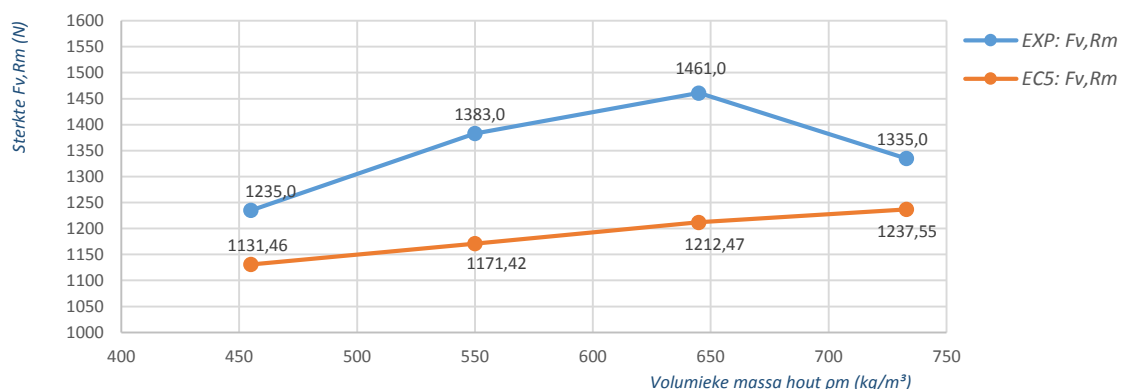


Figuur 119 Karakteristieke sterkte per verbindingsmiddel in functie van de karakteristieke densiteit van het naaldhout

Bij het bekijken van Tabel 66 en Figuur 119 kan uiteindelijk geconcludeerd worden dat de berekende sterkte ten opzichte van de experimentele sterkte per nagel te conservatief blijkt. Zelfs wanneer alle materiaalparameters ingevuld worden, met experimenteel verworven karakteristieke waarden, bedraagt het verschil in sterkte nog gemakkelijk 10%. De serie met de hoogste densiteit wordt hier even buiten beschouwing gelaten omwille van eerder genoemde reden. Een andere reden waarom deze serie niet relevant beschouwd kan worden, is het feit dat in de berekeningen voor de sterkte van een verbinding van een wandpaneel, nooit hout met zulke hoge densiteit zal gebruikt worden. In het kader van zulke toepassingen zien we dat we telkens te maken hebben met grote % verschillen in sterkte.

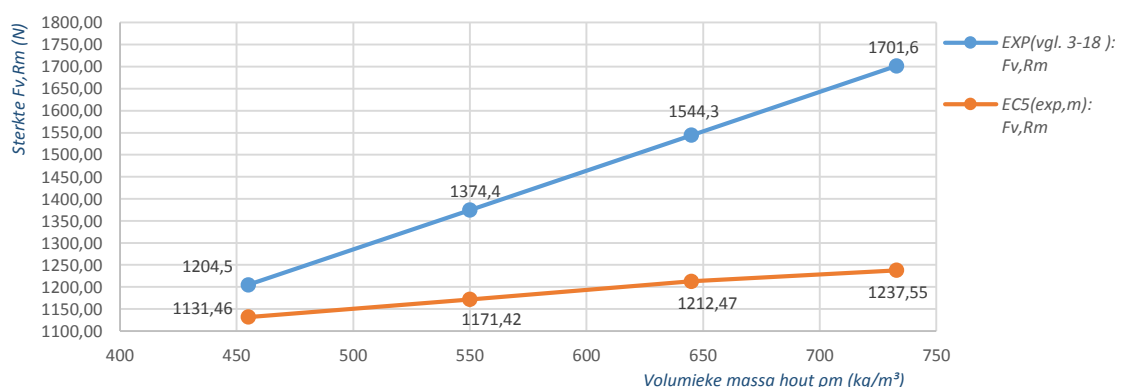
Voor de vergelijking van de gemiddelde sterkte per verbindingsmiddel kan dezelfde conclusie getrokken worden. De serie met de hoogste densiteit zwakt de onderschatting terug af. Daarvoor kent de gemiddelde experimentele sterkte een stijgend curve die steiler is dan de curve van de EC5 berekende sterkte.

Figuur 120 toont het verloop van de gemiddelde sterkte per verbindingsmiddel in functie van de gemiddelde densiteit van het naaldhout.



Figuur 120 Gemiddelde sterkte per verbindingsmiddel in functie van de gemiddelde densiteit van het naaldhout

Bovenstaande experimentele curve is bekomen door de berekening van de gemiddelde waarde voor de proefstukken in elke densiteitscategorie (Tabel 61). Omdat de hoeveelheid proefstukken per categorie voor de berekening van de gemiddelde waarde steeds verschillend is, kan de gemiddelde sterkte evenzeer berekend worden met de vergelijking (3-18) uit 3.5.3.2. Deze vergelijking geeft de geschatte sterkte per nagel in functie van de houtdensiteit. Figuur 121 toont het verloop van de gemiddelde sterkte per nagel in functie van de gemiddelde densiteit van het naaldhout.



Figuur 121 Gemiddelde sterkte per verbindingsmiddel in functie van de gemiddelde densiteit van het naaldhout, berekend door vergelijking 3-18

Uit bovenstaande grafiek kan geconcludeerd worden dat op basis van deze vergelijking, de curve tot 600 kg/m³ goed overeenkomt met de curve uit Figuur 120. Het bevestigt de toenemende onderschatting wanneer de densiteit van het hout toeneemt.

4.3 Berekening geniete plaat- houtverbinding

4.3.1 Berekening van de sterkte per verbindingsmiddel

4.3.1.1 Berekening sterkte per niet serie 1

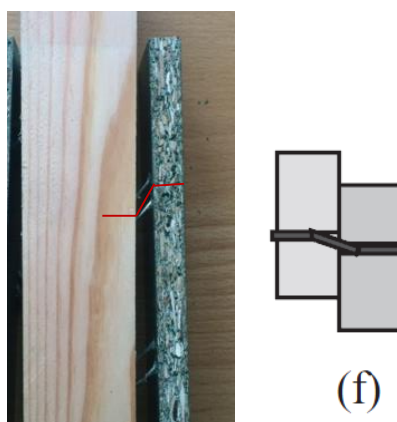
In Tabel 67 zijn de berekeningen weergegeven die dienen tot het bekomen van de sterkte per verbindingsmiddel voor serie 1: hout met een karakteristieke dichtheid van 392 kg/m^3 .

Tabel 67 Berekening sterkte per niet serie 1

Serie 1			
Niet		Karakteristiek	
d (mm)	1,8		
$M_{y,Rk}$ (Nmm)	874,80		
Plaat			
t_1 (mm)	12		
ρ_m (kg/m ³)	720		
$f_{h,1,k}$ (N/mm ²)	$f_{h,1,k} = 65 d^{-0.7} t^{0.1}$		
$f_{h,1,k}$ (N/mm ²)	55,23		
Hout			
t_2 (mm)	38		
ρ_k (kg/m ³)	392		
$f_{h,2,k}$ (N/mm ²)	$f_{h,2,k} = 0.082 \rho_k d^{-0.3}$		
$f_{h,2,k}$ (N/mm ²)	26,96		
Capaciteit per been			
β	0,49		
(2.1)	1192,87		
(2.2)	1844,07		
(2.3)	695,54		
(2.4)	400,15		
(2.5)	703,14		
(2.6)	337,80		
F_{joh} (N)	337,80		
Koordeffect			
$F_{ax,Rk}/4$ (N) Eurocode 5, begrensd op 15%		$F_{ax,Rk}/4$ (N) Eurocode 5, niet begrensd	
$F_{ax,Rk}$ (N)	210,41	$F_{ax,Rk}$ (N)	210,41
$F_{ax,Rk}/4$ (N)	52,60 -> 50,67	$F_{ax,Rk}/4$ (N)	52,60
$0,15 \cdot F_{joh}$ (N)	50,67	$0,15 \cdot F_{joh}$ (N)	50,67
$F_{v,Rk,berekend}$ (N)	878,28	$F_{v,Rk,berekend}$ (N)	882,14
$F_{v,Rk,gemeten}$ (N)	1075,12	$F_{v,Rk,gemeten}$ (N)	1075,12
ber/exp	0,82	ber/exp	0,82

De bijdrage van het koordeffect moet op 15% begrensd worden wanneer we de nieten gelijkstellen aan dezelfde regels als nagels. De sterkte per niet in beide gevallen is in dit geval niet veel verschillend. Het verschil tussen de berekende en de experimentele sterkte per niet bedraagt voor deze serie 18%.

In *Figuur 122* zien we de typische vervorming van de geniete verbinding voor deze serie.



Figuur 122 Bezwijkmechanisme *f* bij geniete verbinding serie 1

4.3.1.2 Berekening sterkte per niet serie 2

In *Tabel 68* zijn de berekeningen weergegeven die dienen tot het bekomen van de sterkte per verbindingsmiddel voor serie 2: hout met een karakteristieke dichtheid van 455 kg/m^3 .

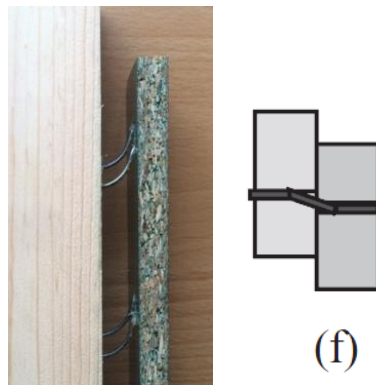
Tabel 68 Berekening sterkte per niet serie 2

Serie 2	
Niet	<i>Karakteristiek</i>
d (mm)	1,8
$M_{y,Rk}$ (Nmm)	874,80
Plaat	
t_1 (mm)	12
ρ_m (kg/m ³)	720
$f_{h,1,k}$ (N/mm ²)	$f_{h,1,k} = 65 d^{-0.7} t^{0.1}$
$f_{h,1,k}$ (N/mm ²)	55,23
Hout	
t_2 (mm)	38
ρ_k (kg/m ³)	455
$f_{h,2,k}$ (N/mm ²)	$f_{h,2,k} = 0.082 \rho_k d^{-0.3}$
$f_{h,2,k}$ (N/mm ²)	31,28
Capaciteit per been	
β	0,57
(2.1)	1192,87
(2.2)	2139,44
(2.3)	784,78
(2.4)	415,05
(2.5)	798,20
(2.6)	354,65
$F_{joh}(N)$	354,65

Koordeffect			
$F_{ax,Rk}/4$ (N) Eurocode 5, begrensd op 15%		$F_{ax,Rk}/4$ (N) Eurocode 5, niet begrensd	
$F_{ax,Rk}(N)$	283,21	$F_{ax,Rk}(N)$	283,21
$F_{ax,Rk}/4(N)$	70,80 -> 53,20	$F_{ax,Rk}/4(N)$	70,80
$0,15 \cdot F_{joh}(N)$	53,20	$0,15 \cdot F_{joh}(N)$	53,20
$F_{v,Rk,berekend}(N)$	922,10	$F_{v,Rk,berekend}(N)$	957,30
$F_{v,Rk,gemeten}(N)$	1275,50	$F_{v,Rk,gemeten}(N)$	1275,50
ber/exp	0,72	ber/exp	0,75

De bijdrage van het koordeffect moet opnieuw op 15% begrensd worden wanneer we de regel aanhouden voor nagels. De sterkte per niet tussen wel/niet begrensd verschilt 3%. Het verschil tussen de berekende en de experimentele sterkte per niet bedraagt voor deze serie 28% wanneer de bijdrage van het koordeffect begrensd wordt.

In *Figuur 123* zien we de typische vervorming van de geniete verbinding.



Figuur 123 Bezwijkmechanisme *f* bij geniete verbinding serie 2

4.3.1.3 Berekening sterkte per niet serie 3

In *Tabel 69* zijn de berekeningen weergegeven die dienen tot het bekomen van de sterkte per verbindingsmiddel voor serie 3: hout met een karakteristieke dichtheid van 580 kg/m^3 .

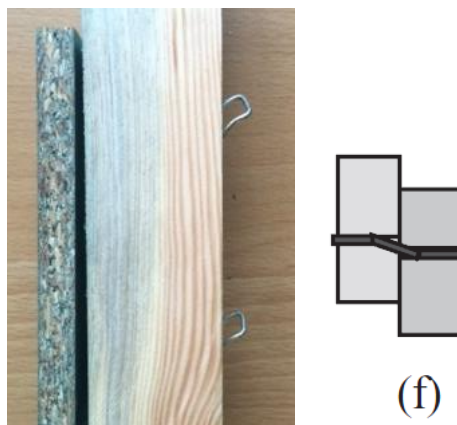
Tabel 69 Berekening sterkte per niet serie 3

Serie 3	
Niet	Karakteristiek
d (mm)	1,8
$M_{y,Rk}$ (Nmm)	874,80
Plaat	
t_1 (mm)	12
ρ_m (kg/m ³)	720
$f_{h,1,k}$ (N/mm ²)	$f_{h,1,k} = 65 d^{-0,7} t^{0,1}$
$f_{h,1,k}$ (N/mm ²)	55,23

Hout			
t_2 (mm)	38		
ρ_k (kg/m ³)	580		
$f_{h,2,k}$ (N/mm ²)	$f_{h,2,k} = 0.082 \rho_k d^{-0.3}$		
$f_{h,2,k}$ (N/mm ²)	39,87		
Capaciteit per been			
β	0,72		
(2.1)	1192,87		
(2.2)	2727,20		
(2.3)	958,87		
(2.4)	438,45		
(2.5)	979,64		
(2.6)	381,89		
F_{joh} (N)	381,89		
Koordeffect			
$F_{ax,Rk}/4$ (N) Eurocode 5, begrensd op 15%		$F_{ax,Rk}/4$ (N) Eurocode 5, niet begrensd	
$F_{ax,Rk}$ (N)	460,20	$F_{ax,Rk}$ (N)	460,20
$F_{ax,Rk}/4$ (N)	115,05 -> 57,28	$F_{ax,Rk}/4$ (N)	115,05
0,15 · F_{joh} (N)	57,28	0,15 · F_{joh} (N)	57,28
$F_{v,Rk,berekend}$ (N)	992,90	$F_{v,Rk,berekend}$ (N)	1108,44
$F_{v,Rk,gemetten}$ (N)	1446,84	$F_{v,Rk,gemetten}$ (N)	1446,84
ber/exp	0,69	ber/exp	0,77

De bijdrage van het koordeffect moet op 15% begrensd worden wanneer we deze de begrenzingregel voor nagels opnieuw aanhouden. De sterkte per niet tussen beide gevallen verschilt al snel 12%. Het verschil tussen de berekende en de experimentele sterkte per niet bedraagt voor deze serie 31% wanneer de bijdrage van het koordeffect begrensd wordt. De onderschatting van de berekende waarde wordt iets teruggedreven vergeleken met vorige serie wanneer we de bijdrage van het koordeffect niet zouden begrenzen.

In *Figuur 124* zien we de typische vervorming van de geniete verbinding voor serie 3.



Figuur 124 Bezwijkmechanisme *f* bij geniete verbinding serie 3

4.3.1.4 Berekening sterkte per niet serie 4

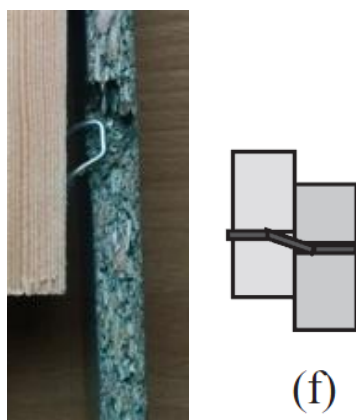
In *Tabel 70* zijn de berekeningen weergegeven die dienen tot het bekomen van de sterkte per verbindingsmiddel voor serie 4: hout met een karakteristieke dichtheid van 659 kg/m^3 .

Tabel 70 Berekening sterkte per niet serie 4

Serie 4			
Nagel		<i>Karakteristiek</i>	
d (mm)	1,8		
$M_{y,Rk}$ (Nmm)	874,80		
Plaat			
t_1 (mm)	12		
ρ_m (kg/m ³)	720		
$f_{h,1,k}$ (N/mm ²)	$f_{h,1,k} = 65 d^{-0.7} t^{0.1}$		
$f_{h,1,k}$ (N/mm ²)	55,23		
Hout			
t_2 (mm)	38		
ρ_k (kg/m ³)	659		
$f_{h,2,k}$ (N/mm ²)	$f_{h,2,k} = 0.082 \rho_k d^{-0.3}$		
$f_{h,2,k}$ (N/mm ²)	45,30		
Capaciteit per been			
β	0,82		
(2.1)	1192,87		
(2.2)	3098,66		
(2.3)	1066,65		
(2.4)	450,18		
(2.5)	1089,55		
(2.6)	395,92		
F_{joh} (N)	395,92		
Koordeffect			
$F_{ax,Rk}/4$ (N) Eurocode 5, begrensd op 15%		$F_{ax,Rk}/4$ (N) Eurocode 5, niet begrensd	
$F_{ax,Rk}$ (N)	594,10	$F_{ax,Rk}$ (N)	594,10
$F_{ax,Rk}/4$ (N)	148,52 -> 59,38	$F_{ax,Rk}/4$ (N)	148,52
0,15 · F_{joh} (N)	59,38	0,15 · F_{joh} (N)	59,38
$F_{v,Rk,berekend}$ (N)	1029,36	$F_{v,Rk,berekend}$ (N)	1207,64
$F_{v,Rk,gemeten}$ (N)	1447,97	$F_{v,Rk,gemeten}$ (N)	1447,97
ber/exp	0,71	ber/exp	0,83

De bijdrage van het koordeffect moet op 15% begrensd worden wanneer de regel aangehouden wordt (nagels). De sterkte per niet tussen beide gevallen verschilt opnieuw 12%. Het verschil tussen de berekende en de experimentele sterkte per niet bedraagt voor deze serie 29% wanneer de bijdrage van het koordeffect begrensd wordt. De onderschatting van de berekende waarde wordt iets teruggedreven vergeleken met vorige serie wanneer we het koordeffect niet zouden begrenzen.

In *Figuur 125* zien we de typische vervorming van de geniete verbinding voor deze serie.



Figuur 125 Bezwijkmechanisme *f* bij geniete verbinding serie 4

4.3.2 Evaluatie berekende vs. experimentele resultaten

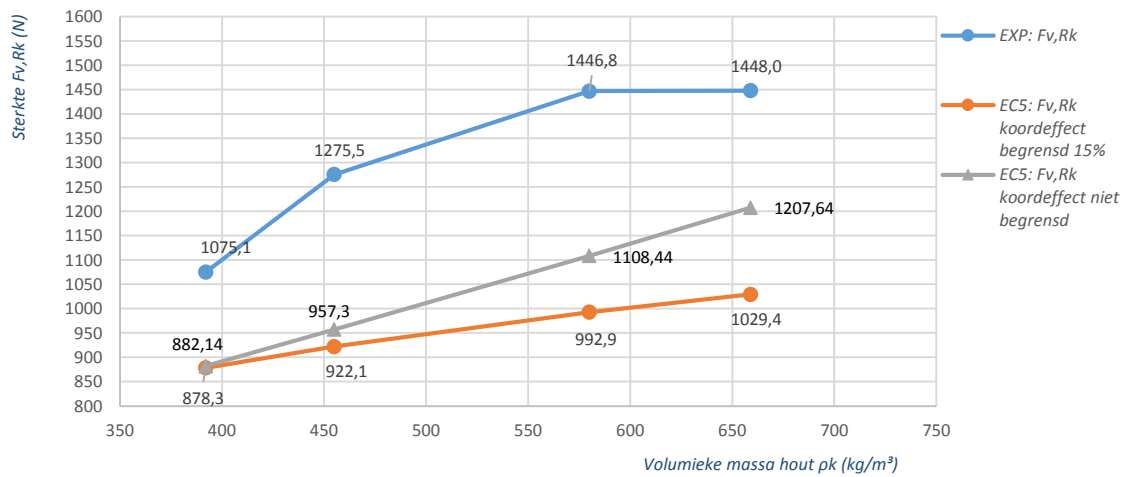
Tabel 71 geeft een overzicht van de karakteristieke sterkte per niet, berekend volgens de Eurocode en de experimentele verworven sterkte per dichteitscategorie (*Tabel 61*). Procentueel wordt de verhouding gegeven van de berekende waarde ten opzichte van de experimentele sterkte per verbindingsmiddel. Uit de tabel kan afgeleid worden dat de karakteristieke sterkte per niet, berekend uit de EC5 vergelijkingen, telkens resulteert in een onderschatting. Normaal gezien wordt voor nieten de bijdrage van het koordeffect begrensd op 15% van het Johansen's deel. Aangezien de karakteristieke dichtheid van het naaldhout niet snel tot de twee hoogste categorieën zal behoren, zijn het vooral de eerste twee rijen die belangrijk zijn voor de vergelijking.

Tabel 71 Overzicht karakteristieke resultaten per serie (sterkte per niet)

$\rho_k(\text{kg/m}^3)$	<i>exp</i>		<i>EC5(begrensd)</i>		<i>EC5(niet begrensd)</i>	
<i>k</i>						
392	1075,1	<i>N</i>	887,2	<i>N</i>	882,1	<i>N</i>
	100%		82,5%		82,0%	
455	1275,5	<i>N</i>	922,1	<i>N</i>	957,3	<i>N</i>
	100%		72,3%		75,0%	
580	1446,8	<i>N</i>	992,9	<i>N</i>	1108,4	<i>N</i>
	100%		68,6%		76,6%	
659	1448,0	<i>N</i>	1029,4	<i>N</i>	1207,6	<i>N</i>
	100%		71,1%		83,4%	

Bij naaldhout met een karakteristieke dichtheid van 455 kg/m³ resulteert de berekening volgens de Eurocode in een onderschatting van 27,7%. Zelfs wanneer de klassieke spreiding van hout in acht wordt genomen is dit toch een opmerkelijk verschil.

Figuur 126 geeft het grafische verloop van de sterkte per niet in functie van de karakteristieke densiteit van het naaldhout.



Figuur 126 Karakteristieke sterkte per niet in functie van de karakteristieke densiteit van het naaldhout

5 Conclusie

Uit de literatuur volgen de mogelijke parameters welke de sterkte van de verbinding beïnvloeden. Brosse breuk is volgens de Eurocode het fenomeen dat dient vermeden te worden om de maximaal benutte sterkte van de verbinding te garanderen. Om brosse breuk te vermijden, geeft de Eurocode voor zowel genagelde- en geniete plaat-hout verbindingen, minimum (on)belaste randafstanden in functie van het gekozen diameter verbindingsmiddel. In de lijn van eerder onderzoek naar de invloed van randafstanden door M.H. Kessel wordt deze analyse van hout- op houtverbindingen uitgezet.

Als eerste blijkt de randafstand invloed te hebben op de stuiksterkte van plaatmaterialen. Voor zowel Spaanplaat als voor OSB wordt de stuiksterkte onderzocht bij twee stiften met verschillende diameters. In het geval van spaanplaat blijkt de randafstand $5d$ nog voor voldoende stuiksterkte te zorgen. OSB daarentegen blijkt bij randafstanden vanaf $5d$ toch een mindering in stuiksterkte te ondergaan op basis van de experimentele karakteristieke stuiksterkte. Randafstanden tot $2d$ blijken zeer onderhevig te zijn aan brosse breuk en falen er bijgevolg in om nog voor de nodige stuiksterkte te zorgen.

Verder wordt de stuiksterkte van het gebruikte naaldhout ook experimenteel bepaald met de geprofileerde nagel als stift. Uit deze resultaten kan geconcludeerd worden dat de experimentele stuiksterkte telkens verschilt met de berekende stuiksterkte van het hout volgens de formule uit EC5. Het minimum procentuele verschil (ber/exp) voor stuiksterkte bedraagt hier zelfs 20%. Een overzicht van de overige verhoudingen wordt meegedeeld in *Tabel 72*.

Tabel 72 Resultaat stuiksterkte op het naaldhout (karakterisatieke densiteit)

Naaldhout:	392 kg/m ³	455 kg/m ³	580 kg/m ³	659 kg/m ³
Ber/exp	0,8	0,7	0,69	0,63

Er moet wel rekening gehouden worden met het feit dat naaldhout met een densiteit van 580 kg/m³ tot 659 kg/m³ normaal gezien niet zomaar voorkomt in de realiteit. Dit kwam alleen voor omdat de proefstukken ontstonden door het verzagen van kleinere stukken hout waardoor zulke stukken werden bekomen. Bij de toepassing van wandpanelen zal het hout een karakterisatieke densiteit bezitten die rond de 420 kg/m³ ligt. Uit deze testen kan uiteindelijk afgeleid worden dat de rekenregels voor de stuiksterkte van hout dienen herzien te worden voor slanke verbindingsmiddelen. De proefmethode beschreven in EN 383 is namelijk niet mogelijk voor kleine diameters. De proefmethode welke gebaseerd is op ASTM D5764 is hier beter aangewezen. Bij slanke verbindingsmiddelen zal de vergelijking voor stuiksterkte van het hout verschillen van de originele vergelijkingen uit EC5.

Uiteindelijk wordt de lijn doorgetrokken naar de verbindingen. Er worden proefstukken vervaardigd bestaande uit spaanplaat en naaldhout. Deze worden bevestigd met nieten of geprofileerde nagels. De invloed van de (on)belaste randafstand tot de sterkte van de verbinding wordt voor vier soorten randafstanden onderzocht. Voor de genagelde verbindingen kan op basis van de gevonden

karacteristieke sterktes geconcludeerd worden dat de sterkte niet onderhevig is aan grote verschillen bij een afnemende (on)belaste randafstand. Wanneer de gemiddelde sterkte wordt vergeleken per proefserie kan worden afgeleid dat de sterkte van de verbinding voor de kleinste (on)belaste randafstand ($3d$) toch lager ligt als de rest. Omdat de densiteit van het naaldhout doorheen de proefserie kan verschillen, worden vervolgens alle experimenteel bepaalde sterktes gerangschikt volgens de densiteit van het gebruikte naaldhout. Er ontstaan vier categorieën proefstukken met opnieuw per reeks een karakteristieke en gemiddelde sterkte. Deze sterkte werd vervolgens vergeleken met de berekende sterkte volgens de EC5 vergelijkingen.

Uit deze vergelijking volgt dat de berekende sterkte altijd lager ligt dan de experimentele sterkte die behaald werd bij de kortste randafstand. Zelfs wanneer de berekening gedaan wordt met onrealistische houtdensiteit, blijkt er nog steeds een onderschatting aanwezig te zijn. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de (on)belaste randafstand $3d$ toch aanvaardbaar blijkt als minimum (on)belaste randafstand op basis van de sterkte per verbindingsmiddel.

Uit 3.5.3.2 blijkt toch dat er sprake is van een reducering in sterkte per verbindingsmiddel wanneer de randafstand kleiner wordt dan $7d$. Voor $5d$ valt deze nog relatief mee maar vanaf dit punt neemt de sterkte verder af. Deze vaststelling wordt gedaan wanneer de sterkte per nagel wordt geschat aan de hand van een vergelijking. Deze vergelijking berekent de sterkte in functie van de densiteit van het hout. Een overzicht van de vergelijkingen voor de genagelde verbindingen volgt in Tabel 73.

Tabel 73 Resultaat sterkte per nagel in functie van de randafstand & vergelijking EC5

3. Sterkte in functie van de randafstand				
Randafstand	10d (ref)	7d	5d	3d
$i/ref (K)$	1,0	1,07	0,98	1,0
$\rho_k(kg/m^3) (EXP)$	408	391	385	398
$F_v, R_k (EXP)$	1015,1 N	1091,2 N	998,3 N	1018,3 N
$i/ref (M)$	1,0	1,0	1,03	0,91
$\rho_m(kg/m^3) (EXP)$	528	537	571	550
$F_v, R_m (EXP)$	1330,3 N	1356,2 N	1363,3 N	1212,3 N
3.5.3 Reducering in sterkte wanneer de sterkte vergeleken wordt in functie van de densiteit				
(M)	1,0	1,0	0,97	0,88
4. Sterkte berekend uit de vergelijkingen EC5				
$\rho_k(kg/m^3)$	392 kg/m ³	455 kg/m ³	580 kg/m ³	659 kg/m ³
karacteristiek	829,6 N	852,6 N	888,9 N	907,2 N
(kooordefect EXP)	$< (F_{v,3d})_{exp}$	$< (F_{v,3d})_{exp}$	$< (F_{v,3d})_{exp}$	$< (F_{v,3d})_{exp}$

Voor de geniete verbindingen zijn de minimum (on)belaste randafstanden uit de Eurocode dermate groot dat de experimentele proefreeks pas start met de minimum onbelaste randafstand ($10d$). Omdat de minimum belaste randafstand $20d$ hier niet onderzocht werd, wordt de sterkte van elke proefreeks vergeleken met de berekende

sterkte volgens de EC5 vergelijking. Hieruit blijkt dat de experimentele sterkte van de verbinding met de kleinste randafstand boven de berekende sterkte ligt. Tussen beide waarden zijn grote procentuele verschillen op te merken. Uiteindelijk kan geconcludeerd worden dat de (on)belaste randafstand tot $4d$ resulteert in een acceptabele sterkte per niet. Omdat doorheen de proefseries de densiteit van het naaldhout zwaar verschilt, dient bijkomende vergelijking uit 3.5.3.4 ook geëvalueerd te worden. Hieruit blijkt dat de sterkte per niet gereduceerd wordt wanneer de (on)belaste randafstand kleiner wordt dan $5d$. Een overzicht van de vergelijkingen voor de geniete verbindingen volgt in Tabel 74.

Tabel 74 Resultaat sterkte per niet in functie van de randafstand & vergelijking EC5

3. Sterkte in functie van de randafstand				
Randafstand	10d (ref)	7d	5d	4d
$i/ref (K)$	1,0	1,21	1,17	0,95
$\rho_k(kg/m^3) (EXP)$	411	439	420	328
$F_v, R_k (EXP)$	1148,0 N	1396,7 N	1344,5 N	1091,8 N
$i/ref (M)$	1,0	1,21	1,14	0,97
$\rho_m(kg/m^3) (EXP)$	488	619	589	523
$F_v, R_m (EXP)$	1449,2 N	1748,3 N	1652,7 N	1404,0 N

3.5.3 Reducering in sterkte wanneer de sterkte vergeleken wordt in functie van de densiteit				
(M)	0,97	1,02	1,00	0,91

4. Sterkte berekend uit de vergelijkingen EC5				
$\rho_k(kg/m^3)$	392 kg/m ³	455 kg/m ³	580 kg/m ³	659 kg/m ³
karakteristiek	887,2 N	922,1 N	992,9 N	1029,4 N
(kooardeffect EXP)	$< (F_{v,4d})_{exp}$	$< (F_{v,4d})_{exp}$	$< (F_{v,4d})_{exp}$	$< (F_{v,4d})_{exp}$

Volgens de Eurocode is brosse breuk vooral het fenomeen dat dient vermeden te worden. Om brosse breuk te vermijden dienen de minimum rand- en eindafstanden in acht genomen te worden. Uit de proeven is gebleken dat de eindafstanden gerespecteerd moeten worden. Wanneer de eindafstand te kort genomen wordt, is de kans zeer reëel dat het hout begint te splijten. Het splijten van hout heeft een zeer gereduceerde sterkte tot gevolg. Dit fenomeen is weergegeven in Figuur 127.



Figuur 127 Splijten van het hout bij onvoldoende eindafstand

De randafstanden hebben invloed op het optreden van brosse breuk van het plaatmateriaal. Onder brosse breuk verstaan we het doorponsen van het verbindingsmiddel doorheen het plaatmateriaal.

Het ponsen zorgt ervoor dat het plaatmateriaal bij afnemende randafstanden begint te scheuren. Wat uit de resultaten volgt is dat het wel/niet optreden van brosse breuk tot ongeveer dezelfde resultaten leidt. Er wordt tot een bepaalde randafstand telkens een aanvaardbare verplaatsing bij breuk behaald.

Bij de proefstukken met de kleinste randafstand, vertoonde het plaatmateriaal soms al enige schade vooraleer ze getest werden. Het bevestigingsmiddel zat wel degelijk doorheen de plaat in het houtblokje, maar het plaatmateriaal was toch al licht gescheurd. Wat volgt uit de toenemende belasting was het lichtelijk verder scheuren van het plaatmateriaal, maar telkens werd toch een aanvaardbare maximum belasting behaald. Hieruit kan afgeleid worden dat brosse breuk door afnemende randafstand niet per se leidt tot een vermindering in sterkte, zoals de Eurocode wel impliceert. Vooral voor de nietverbindingen dienen de minimum (on)belaste randafstanden herbekeken te worden. De Duitse norm DIN 1052 schrijft het volgende voor:

Tabel 75 Minimum (on)belaste randafstand nieten DIN 1052

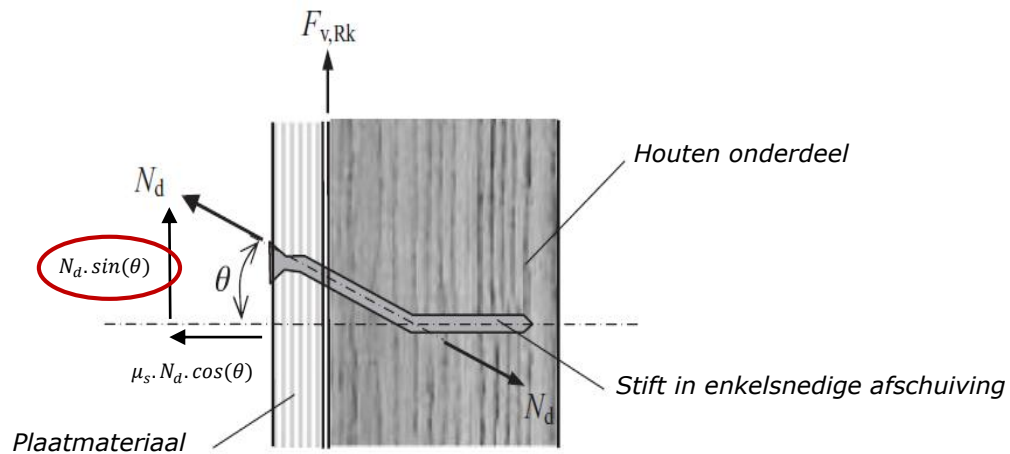
<i>Minimum randafstanden</i>	
<i>Afstand</i>	<i>Nieten</i>
$a_{4,t}(belast)$	$(5 + 5 \cdot \sin(\alpha)) \cdot d$
$a_{4,c}(onbelast)$	$(5 + 5 \cdot \sin(\beta)) \cdot d$

De minimum onbelaste randafstand wordt volgens deze norm bepaald door het inrekenen van de hoek β . Dit is de hoek die de niet maakt met de vezelrichting van het hout. In dit onderzoek is β gelijkgesteld aan 30° . Wanneer deze randafstanden worden uitgeteld in het kader van dit onderzoek wordt Tabel 76 bekomen. Hier kan uit afgeleid worden dat beide formules een betere minimum waarde geven voor de afstand tot rand. Stijlen van $\pm 45\text{mm}$ geven volgens deze rekenregels nog aanvaardbare randafstanden, zowel voor de onbelaste als de belaste randafstand. Verder onderzoek hierin zou bestaan uit het verder testen van andere plaatmaterialen om deze vaststelling te staven.

Tabel 76 Minimum (on)belaste randafstand nieten DIN 1052 in het kader van dit onderzoek

<i>Minimum randafstanden</i>	
<i>Afstand</i>	<i>Nieten</i>
$a_{4,t}(belast)$	$10d$
$a_{4,c}(onbelast)$	$7,5 \cdot d$

Als laatste dient nog vermeld te worden dat de sterkte van de verbinding volgens de EC5, telkens resulteert in een onderschatting wanneer ze vergeleken wordt met de experimentele sterkte van geniete en genagelde verbindingen. De verschillen zijn het grootst in het geval van geniete verbindingen. Verdergaand onderzoek zou zich best richten op het achterhalen van de onderschatting in de sterkte per verbindingsmiddel. Waarschijnlijk ligt deze onderschatting in het negeren van de verticale component uit 2.7.3. Deze verticale component $N_d \cdot \sin(\theta)$ wordt voorlopig nog niet opgenomen in de rekenregels van de Eurocode.



Figuur 128 Verticale component welke niet tot rekenregels behoort [9]

6 Bronnen

[EC5] European Committee for Standardization (CEN).2006. Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1-1- General -Common rules and rules for buildings - EN1995-1-1: 2006, CEN Brussels.

[1] "Plaatmaterialen en hun toepassingen", 2012, WTCB

[2] "Plaatmaterialen", Daniel Godefroid, 2011, Belgian woodforum

[3] Index plaatmaterialen, OSB – Houtwijzer – Houtdatabase, 2007, Uitgave Sdu, Den Haag

[4] OSB/3 Kronoply, Elke Wetzig, 8/11/2009

[5] NBN EN 14592:2012, Houtconstructies, Stiftvormige verbindingsmiddelen – Eisen

[6] Johansen, K.W. Theory of timber connections, International association of bridge and structural engineering, publication 9:249-262,1949

[7] Johansen, K.W. Forsøg med Træforbindelser. Bygningsstatistiske Meddelelser. Vol. XII, Nr. 2, pp. 29-86, 1941

[8] CIB, W18 Timber Structures – A review of meeting 1-43, 2008

[9] Structural Timber Design to Eurocode 5, Jack Porteous, Abdy Kermani, pp. 400-445, 2006, Blackwell publishing

[10] Einfluss der Verbindungsmittelabstände auf die Tragfähigkeit von Wandtafeln, M.H. Kessel, M. Huse, R. Augustin, 2001, Hildesheim

[11] NBN EN 383:2007, Test methods, determination of embedment strenght and foundation values for dowel type fasteners

[12] S. Kennedy, A. Salenikovich, Design equations for embedment strength of wood for threaded fasteners in the canadian timber design code

[13] ISO 6891:1983, Joints made with mechanical fasteners – general principles for the determination of strength and deformation characteristics

[14] Kohler, J., Leijten, A.J.M. & Jorissen, A.J.M. (2006). On the Modeling the Capacity of Dowel Type Fastener Connections. Proceedings of WTEC, (pp. 231/1-231/9). Portland, Oregon.

Bijlage A

De uitwerking van factoren mode II en III uit Eurocode 5 vergelijkingen

Bron: Timber Connections by Dr. Ad Leijten (TU-Eindhoven)

In de vergelijkingen van Johansen kwamen zowel materiaaleigenschappen van hout (stuijsterkte) als metaal (vloeimoment van het bevestigingsmiddel) voor. Omdat de rekenwaarde van de sterkte van de enkelsnedige verbinding berekend wordt door *Vergelijking I.1*, dient er een factor aan de vergelijking toegevoegd te worden die de verschillende veiligheidsfactoren uit kan middelen.

$$F_d = F_k \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_m} = F_k \cdot \frac{0,9}{1,3} = 0,69 \cdot F_k \quad (I-1)$$

Nu wordt voor de vergelijkingen van bezwijkmechanisme II en III volgende factoren bepaald uit onderstaande afleidingen.

Mode III: (vereenvoudigd)

$$F_d = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{1,1} \cdot d \cdot \frac{f_{h,1,k}}{1,3} \cdot 0,9} \quad (I-2)$$

$$F_d = \sqrt{0,63 \cdot M_{y,Rk} \cdot d \cdot f_{h,1,k}} \quad (I-3)$$

$$F_d = 0,79 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot d \cdot f_{h,1,k}} \quad (I-4)$$

$$F_d = 0,79 \cdot F_k \quad (I-5)$$

$$factor = \frac{0,79 \cdot F_k}{0,69 \cdot F_k} = 1,15 \quad (I-6)$$

Voor mode II wordt deze factor 1,05.

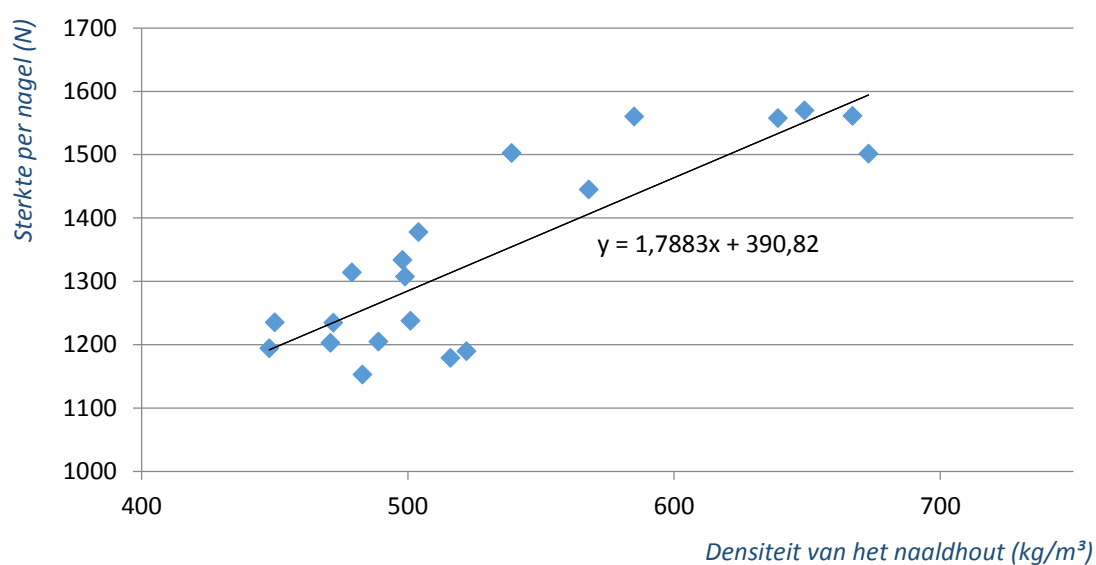
Bijlage B

De uitwerking van de vergelijkingen om sterkte per verbindingsmiddel te schatten

Vergelijking voor schatting sterkte per nagel:

$$F_{v,R} = 1,7883 \rho + 390,82 \quad (II-2)$$

Deze formule is de vergelijking van de lineaire regressielijn bekomen uit de experimentele resultaten van proefserie 10d en 7d.



Figuur 129 Experimentele resultaten sterkte per nagel bij proefserie 10d en 7d

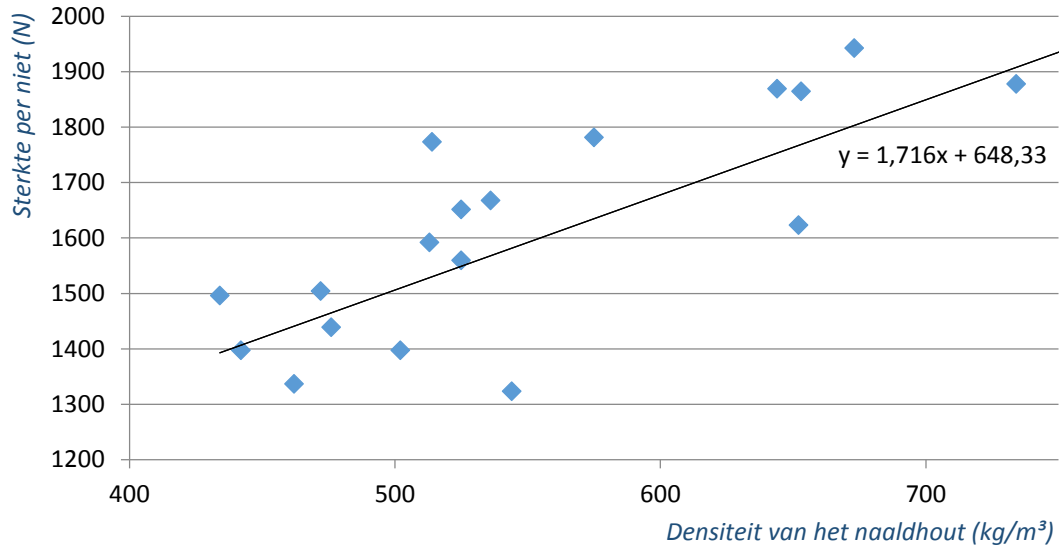
Tabel 77 Experimentele resultaten sterkte per nagel bij proefserie 10d en 7d

10d		7d	
ρ (kg/m ³)	Fvrk (N)	ρ (kg/m ³)	Fvrk (N)
522	1190,02	499	1307,72
585	1560,35	450	1235,50
568	1445,02	489	1205,10
539	1502,50	649	1569,70
471	1202,98	639	1557,90
483	1152,88	673	1501,60
479	1314,08	498	1334,08
516	1179,48	501	1237,88
448	1194,75	472	1234,80
667	1561,40	504	1377,88
522	1190,03	499	1307,73

Vergelijking voor schatting sterkte per nagel:

$$F_{v,R} = 1,716 \rho + 648,33 \quad (II-2)$$

Deze formule is de vergelijking van de lineaire regressielijn bekomen uit de experimentele resultaten van proefserie 10d en 7d.



Figuur 130 Experimentele resultaten sterkte per niet bij proefserie 10d en 7d

Tabel 78 Experimentele resultaten sterkte per niet bij proefserie 10d en 7d

10d		7d	
ρ (kg/m³)	Fvrk (N)	ρ (kg/m³)	Fvrk (N)
472	1504,25	536	1667,88
525	1559,73	575	1781,25
525	1651,73	514	1773,25
434	1496,07	644	1869,50
513	1592,30	653	1864,83
476	1438,88	462	1336,78
442	1397,63	734	1878,03
544	1323,55	751	1744,90
502	1397,48	673	1942,60
450	1130,78	652	1623,45
472	1504,25	536	1667,88

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Studie van nagel- en nietverbindingen: invloed van de (on)belaste randafstand op de sterkte van de verbinding

Richting: **master in de industriële wetenschappen: bouwkunde**

Jaar: **2015**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Rabaey, Jonas

Datum: **16/01/2015**