INDLEDNING

Casen "Undersøgelse af havplast" er et delprojekt under den nationale Cirkulære Økonomi HUB (CØ-HUB). Casen skal demonstrere at plast opskyllet og opsamlet på kysten er en værdifuld ressource, blot relationen mellem mængden af havplast og genanvendt rotationsplast samt effekten på det færdige emnes egenskaber er kendt.

Plastic Change og Dansk Rotations Plastic har allerede demonstreret , at det er muligt at producere bænke m.m. i 25, 50, 75 og 100% havplast. Havplasten er indsamlet på strande af forskellige kommuner, medlemmer af KIMO (Kommunernes Internationale Miljøorganisation) bl.a. på foranledning af Plastic Change.

Nærværende teknisk rapport udarbejdet af Plast Center Danmark har til formål at oplyse om effekten af forskellige koncentrationer af havplast tilsat genanvendt rotationsplast på følgende fysiske, kemiske og mekaniske egenskaber:

- Den overordnede kemiske struktur
- Smeltepunktstemperatur og nedbrydningstemperatur
- Styrke, stivhed og brudforlængelse og slagstyrke

Resultater og konklusioner for vejrligheds-egenskaber oplyses i en senere rapport.

PRØVER

PCD har d. 8. marts 2018 modtaget i alt 8 emner til test. Dvs. laboratoriedåser jf. Dansk Rotations Plast's varenr. 20-10 (L: 25 cm x B: 25 cm x L: 35 cm) med modifikation (uden øverste flade med låg).

Tabel 1 angiver emnernes benævnelse, antal af tilsendte emner og blandingssammensætning.

Tabel 1

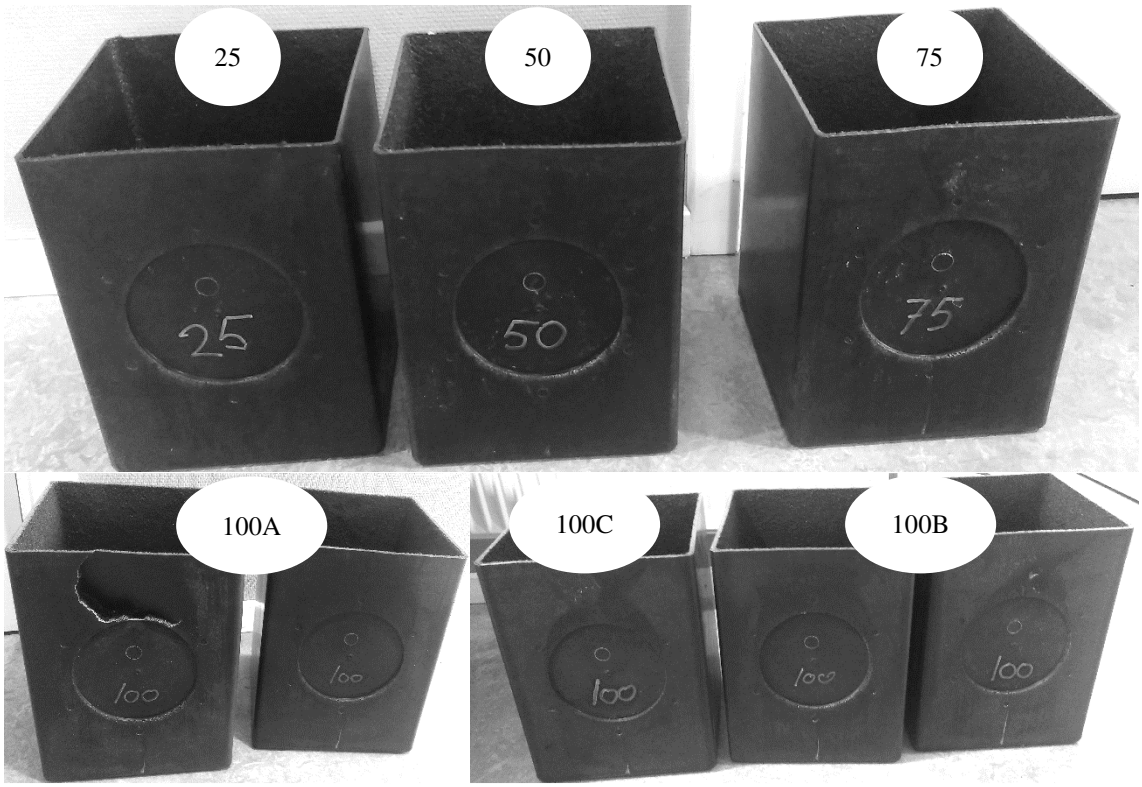
Blanding nr.	Antal tilsendte emner	Blandingsforhold	
		Havplast (%)	Genanvendt rotationsplast (%)
25	1	25	75
50[1]	1	50	50
75	1	75	25
100A	2	100	0
100B	2	100	0
100C	1	100	0

For at undersøge variationen af havplast indgår 100% blanding med en tredobbelt bestemmelse. De tilhørende emner benævnes blanding nr. 100A, 100B og 100C.

Der udtages prøver fra det øverste af kanterne og et af hjørnerne til FTIR og DSC analyser. Endvidere udtages emner til træk- og slagtest samt farvemåling af hver type emne.

[1] Det er aftalt, at blanding nr. 50 skulle have været sammensat af 51% havplast og 49% genanvendt rotationsplast, men ved modtagelsen var emnet mærket blanding nr. 50. Det formodes derfor, at blandingssammensætningen er 50% havplast og 50% rotationsplast.

Et helt emne af blanding nr. 100A og 100B anvendes til klimakammertest.

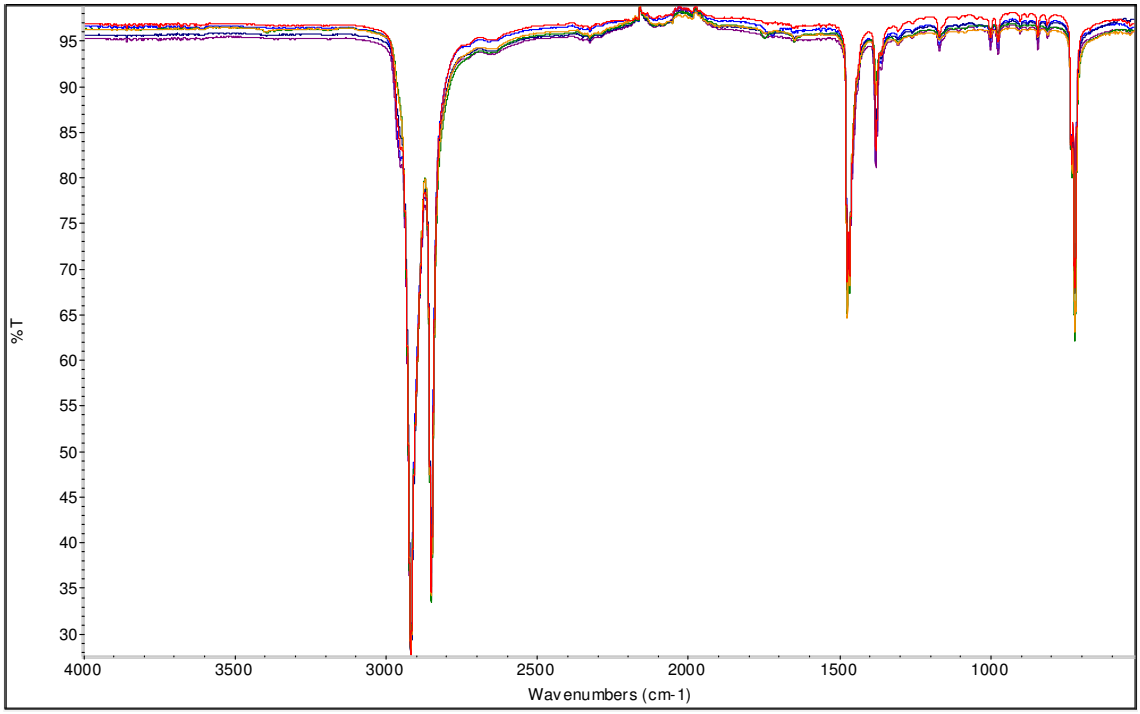


Figur 1: Her ses de 8 laboratoriedåser, blanding nr. 25, 50, 75 og 100 (havplast i koncentrationerne 25%, 50%, 75% og 100%). Da der foretages tredobbelt bestemmelse af blanding nr. 100 benævnes disse blanding nr. 100A, 100B og 100C.

FTIR ANALYSE OG RESULTATER

FTIR spektroskopi er et kvalitativt analyseapparat, der benytter infrarødstråling. Det bestrålede materiale absorberer strålingen, hvorved molekylet vibrerer. Vibrationsenergien afhænger af hvilke karakteristiske kemiske grupper, der er i molekylet. Materialets absorption af IR stråling måles som funktion af bølgelængden, der i spektret udtrykkes som bølgetal angivet i reciprokke cm. Der måles i området 400 – 4000 cm^{-1}.

De enkelte spektre for blanding nr. 25 – 75 samt de tre 100% blandinger kan ses i Appendiks A – IR spektre for prøverne. Derudover ses spektre for de seks prøver samlet i Figur 2.

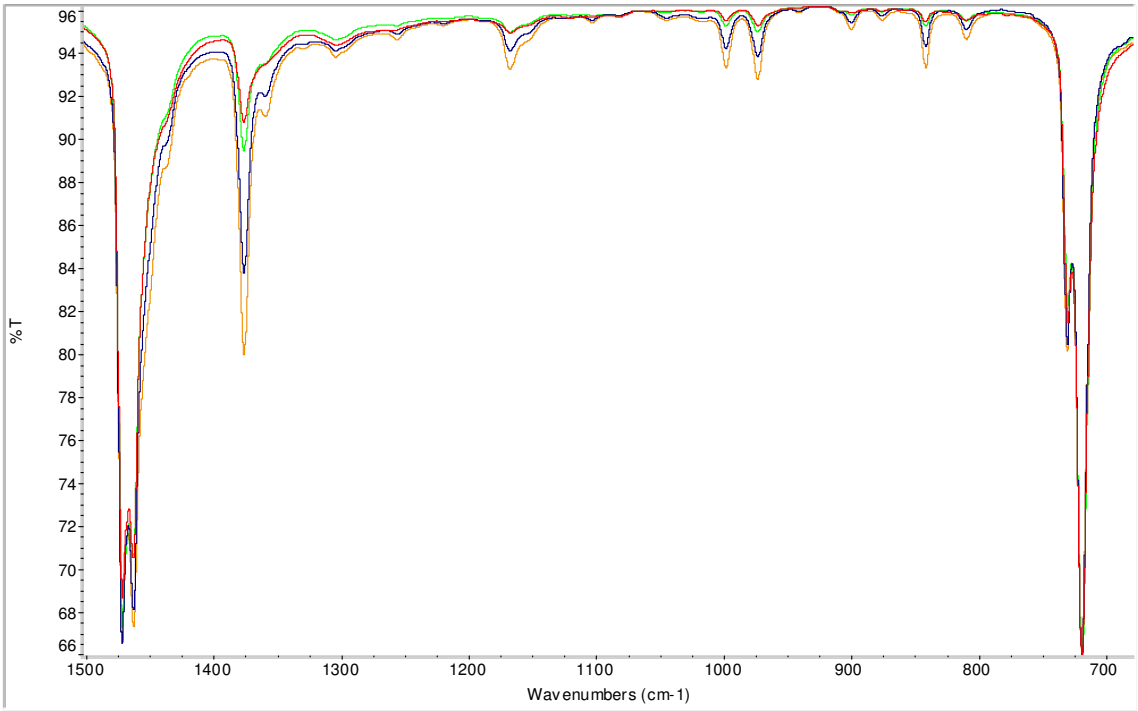


Figur 2: Spektre for alle de seks prøver ses samlet i et spektrum.

Som det fremgår af Figur 2, er spektrene sammenlignelige med mindre forskelle.

Ved søgning i apparatets bibliotek konstateres, som forventet, at prøverne hovedsageligt består af PE blandet med PP. Den procentvise match med PE er mellem 87,7–90,1 %. Endvidere se karakteristiske bølgetoppe fra PP, mere specifikt 1376 cm^{-1} og 1167 cm^{-1}.

I Figur 3 er området i bølgeintervallet 1500–700 cm^{-1} undersøgt nærmere. Det fremgår heraf, at de karakteristiske bølgetoppe for PP er stigende med stigende koncentration af havplast. Dette indikerer, at havplast indeholder mere PP end den tilsatte industrielle genbrugsplast.



Figur 3: Spektre for blanding nr. 25 (rød), 50 (grøn), 75 (sort) og 100A (orange) sammenlignes i bølgeintervallet 1500-700cm^{-1}.

DSC ANALYSE OG RESULTATER

DSC er et kalorimetrisk analyseapparat, der anvender et temperaturprogram til måling af varmekapaciteten. Målingen vil fremkomme som et termogram, hvor der afbildes varmestrøm som funktion af temperatur. Heraf kan bl.a. fysiske egenskaber bestemmes, så som smeltetemperatur og nedbrydningstemperatur.

Prøvernes termiske egenskaber bestemmes vha. en DSC analyse, der foretages iht. temperaturprogram fra Thermal Analysis – Thermoplastics[2] med en modifikation. Modifikationen består i, at prøven opvarmes fra 25°C til 400°C.

DSC termogrammer for blanding nr. 25 – 75 samt de tre 100% blandinger kan ses i Appendiks B – DSC termogrammer for prøverne. Resultater fra DSC analyse af de tre 100% blandinger og de fire forskellige blandinger fremgår af Tabel 2 og Tabel 3.

Tabel 2: Resultater fra DSC analyse af de tre 100% blandinger.

		100A	100B	100C	100 (A+B+C)
1. smeltetop (PE)	Smeltepunkt (°C)	131,11	130,62	130,07	130,60 ± 0,52
	Varmeenthalpi (J/g)	112,7	108,7	115,43	112,28 ± 3,38
2. smeltetop (PP)	Smeltepunkt (°C)	162,83	163,51	162,67	163,00 ± 0,45
	Varmeenthalpi (J/g)	23,22	22,39	23,77	23,13 ± 0,69
	PP indhold (%)	38,7	37,3	39,6	38,5 ± 1,16
Nedbrydningstemperatur (°C)		199,26	202,53	203,54	201,78 ± 2,24

[2] Jandali og Widmann: Thermal Analysis – Thermoplastics, 2 ed. Mettler Toledo, 2002, p. 44

Som det fremgår af Tabel 2, er der en god variation på under 3% for de tre blandinger.

Tabel 3: Resultater fra DSC analyse af de fire blandinger.

		Prøve			
		25	**50**	**75**	**100**
1. smeltetop (PE)	Smeltepunkt (°C)	127,08	128,12	129,75	130,60
	Varmeenthalpi (J/g)	133,8	126,44	120,53	112,28
2. smeltetop (PP)	Smeltepunkt (°C)	163,01	162,84	162,33	163,00
	Varmeenthalpi (J/g)	9,55	15,6	19,07	23,13
	PP indhold (%)	15,9	26,0	31,8	38,5
Nedbrydningstemperatur (°C)		219,31	215,89	202,38	201,78

Som det fremgår af Tabel 3, er der to karakteristiske smeltepunkter, som er følgende:

- 1. smeltepunkt: 127-130°C
- 2. smeltepunkt: 162-163°C

De to karakteristiske smeltepunkter sammenlignes med tabelopslag, der er sammenlignelige med hhv. PE-HD (135°C) og PP (163°C)[3]. De målte karakteristiske smeltepunkter understøtter således FTIR analysen om, at prøverne består af både PE og PP.

Ud fra den målte varmeenthalpi (ΔH) er PP koncentrationen beregnet for hhv. PE (1. smeltetop) og PP (2. smeltetop) i de enkelte prøver, hvor det er antaget, at varmeenthalpien for ren PP er 60 J/g. Koncentrationen af PP i 100% havplast er på ca. 40%, hvilket af den grund giver en varmeenthalpi for PE og dermed en lavere PE koncentration i takt med den stigende koncentration af havplast.

Som det fremgår af Tabel 3, er nedbrydningstemperaturerne aftagende med den stigende koncentration af havplast. Hermed kan det konstateres, at havplast er mere nedbrudt end den industrielle genbrugsplast.

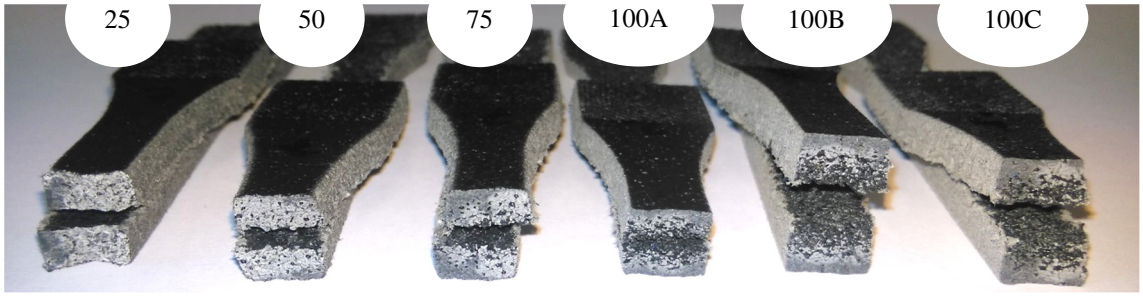
TRÆKTEST OG RESULTATER

Der udføres træktest på de seks prøver vha. et trækprøvningsapparat, Lloyd LR50KPlus i henhold til standard DS/EN ISO 527-2/1B.

Ud fra præliminær test er trækhastigheden for prøverne bestemt til at være 20 mm/min. Der er anvendt 50 kN vejecelle og pneumatiske kæber hertil.

Alle træktestemner af hver prøve blev trukket til brud, og de brudte emner brød indenfor ”gauge length”. Eksempler efter brud for hver prøve er vist i Figur 4.

[3] Jandali og Widmann: Thermal Analysis – Thermoplastics, 2 ed. Mettler Toledo, 2002, p. 44



Figur 4: Her ses eksempler på de brudte træktestemner og deres brudflader. Fra venstre til højre; Blanding nr. 25 (emne nr. 7), 50 (emne nr. 7), 75 (emne nr. 7), 100A (emne nr. 2), 100B (emne nr. 8) og 100C (emne nr. 4).

Rådataene fra træktesten samt enkelte spænding-/tøjningsdiagrammer fremgår af Appendiks C – Data fra træktest.
Resultater af E-modul, maksimal trækstyrke og brudstyrke for alle emnerne er præsenteret herunder i de enkelte afsnit.

Resultater af E-modul

De statistiske resultater af E-modul for de tre 100% blandinger og de fire forskellige blandinger fremgår af hhv. Tabel 4 og Tabel 5.

Tabel 4: Statistiske resultater af E-modul for de tre 100% blandinger.

Prøve	Antal	E-modul (MPa)	Standardafvigelse (MPa)	95% konfidensinterval (MPa)
100A	9	374,3	23,2	[359,2 ; 389,4]
100B	10	272,5	33,8	[251,5 ; 293,5]
100C	10	219,0	26,1	[202,8 ; 235,2]

Som det fremgår af Tabel 4, er der ikke overlap af konfidensintervaller for de tre blandinger. Hermed kan det konstateres, at der er statistisk signifikant forskel på E-modul for de tre prøver og hermed stor variation i materialet.

Tabel 5: Statistiske resultater af E-modul for de fire blandinger, blanding nr. 25 – 100.

Prøve	Antal	E-modul (MPa)	Standardafvigelse (MPa)	95% konfidensinterval (MPa)
25	9	399,7	24,0	[384,0 ; 415,4]
50	11	376,2	33,1	[356,6 ; 395,8]
75	10	389,6	33,5	[368,8 ; 410,3]
100	30	288,2	70,2	[263,0 ; 313,3]

Som det fremgår af Tabel 5, er der overlap af konfidensintervaller for blanding nr. 25, 50 og 75. Hermed kan det konstateres, at der ikke er statistisk signifikant forskel på E-modul for de tre prøver. Konfidensintervallet for blanding nr. 100 har ikke overlap, hvoraf det konstateres, at der er statistisk signifikant forskel på E-modul for blanding nr. 100.

Det kan konstateres, at den gennemsnitlige E-modul for blanding nr. 100 er lavere end de andre prøver og dermed et mere blødt materiale.

Resultater af maksimal trækstyrke og dens forlængelse

De statistiske resultater af maksimal trækstyrke og dens forlængelse for de tre 100% blandinger og de fire forskellige blandinger fremgår hhv. af Tabel 6 – Tabel 7 og Tabel 8 – Tabel 9.

Tabel 6: Statistiske resultater af maksimal trækstyrke for de tre 100% blandinger.

Prøve	Antal	Maks. trækstyrke (MPa)	Standardafvigelse (MPa)	95% konfidensinterval (MPa)
100A	9	8,8	0,3	[8,6 ; 9,0]
100B	10	7,0	0,5	[6,7 ; 7,3]
100C	10	6,9	0,4	[6,6 ; 7,1]

Som det fremgår af Tabel 6, er der overlap af konfidensintervaller for blanding nr. 100B og 100C. Hermed kan det konstateres, at der ikke er statistisk signifikant forskel på den maksimal trækstyrke for de to prøver. Konfidensintervallet for blanding nr. 100A har ikke overlap, hvoraf det konstateres, at der er statistisk signifikant forskel på den maksimal trækstyrke.

Tabel 7: Statistiske resultater af maksimal trækstyrke for for de fire blandinger, blanding nr. 25 – 100.

Prøve	Antal	Maks. trækstyrke (MPa)	Standardafvigelse (MPa)	95% konfidensinterval (MPa)
25	9	15,1	0,2	[15,0 ; 15,3]
50	11	12,1	0,4	[11,9 ; 12,3]
75	10	10,2	0,3	[10,0 ; 10,3]
100	30	7,6	1,0	[7,2 ; 7,9]

Som det fremgår af Tabel 7, kan det konstateres, at der er statistisk signifikant forskel på den maksimale trækstyrke for blanding nr. 25, 50, 75 og 100, da der ikke er overlap af konfidensintervaller.

Det kan konstateres, at den gennemsnitlige, maksimale trækstyrke er faldende med den stigende koncentration af havplast.

Tabel 8: Statistiske resultater af forlængelse ved maksimal trækstyrke for de tre 100% blandinger.

Prøve	Antal	Forlængelse v/ maks. trækstyrke (%)	Standardafvigelse (%)	95% konfidensinterval (%)
100A	9	4,43	0,21	[4,29 ; 4,57]
100B	10	4,60	0,26	[4,44 ; 4,76]
100C	10	5,10	0,27	[4,93 ; 5,27]

Som det fremgår af Tabel 8, er der overlap af konfidensintervaller for blanding nr. 100A og 100B. Hermed kan det konstateres, at der ikke er statistisk signifikant forskel på forlængelsen ved maksimal trækstyrke for de to prøver. Konfidensintervallet for blanding nr. 100C har ikke overlap, hvoraf det konstateres, at der er statistisk signifikant forskel på forlængelsen ved maksimal trækstyrke.

Tabel 9: Statistiske resultater af forlængelse ved maksimal træk for de fire blandinger, blanding nr. 25 – 100.

Prøve	Antal	Forlængelse v/ maks. trækstyrke (%)	Standardafvigelse (%)	95% konfidensinterval (%)
25	9	15,34	2,02	[14,02 ; 16,66]
50	11	8,96	1,05	[8,34 ; 9,58]
75	10	6,29	0,64	[5,90 ; 6,69]
100	30	4,71	0,37	[4,58 ; 4,84]

Som det fremgår af Tabel 9, kan det konstateres, at der er statistisk signifikant forskel på forlængelsen ved maksimal trækstyrke for blanding nr. 25, 50, 75 og 100, da der ikke er overlap af konfidensintervaller.

Det kan konstateres, at den gennemsnitlige, forlængelse ved maksimal trækstyrke er faldende med den stigende koncentration af havplast.

Resultater af brudstyrke og -forlængelse

De statistiske resultater af brudstyrke og -forlængelse for de tre 100% blandinger og de fire forskellige blandinger fremgår hhv. af Tabel 10, Tabel 11, Tabel 12 og Tabel 13.

Tabel 10: Statistiske resultater af brudstyrke for de tre 100% blandinger.

Prøve	Antal	Brudstyrke (MPa)	Standardafvigelse (MPa)	95% konfidensinterval (MPa)
100A	9	8,6	0,3	[8,4 ; 8,8]
100B	10	6,9	0,5	[6,6 ; 7,2]
100C	10	6,8	0,4	[6,5 ; 7,0]

Som det fremgår af Tabel 10, er der overlap af konfidensintervaller for blanding nr. 100B og 100C. Hermed kan det konstateres, at der ikke er statistisk signifikant forskel på brudstyrken for de to prøver. Konfidensintervallet for blanding nr. 100A har ikke overlap, hvoraf det konstateres, at der er statistisk signifikant forskel på brudstyrken.

Tabel 11: Statistiske resultater af brudstyrke for de fire blandinger, blanding nr. 25 – 100.

Prøve	Antal	Brudstyrke (MPa)	Standardafvigelse (MPa)	95% konfidensinterval (MPa)
25	9	12,0	0,9	[11,4 ; 12,6]
50	11	10,6	0,5	[10,2 ; 10,9]
75	10	9,6	0,3	[9,4 ; 9,8]
100	29	7,4	0,9	[7,1 ; 7,7]

Som det fremgår af Tabel 11, kan det konstateres, at der er statistisk signifikant forskel på brudstyrken for blanding nr. 25, 50, 75 og 100, da der ikke er overlap af konfidensintervaller.

Det kan konstateres, at den gennemsnitlige brudstyrke er faldende med den stigende koncentration af havplast.

Tabel 12: Statistiske resultater af brudforlængelse for de tre 100% blandinger.

Prøve	Antal	Brudforlængelse (%)	Standardafvigelse (%)	95% konfidensinterval (%)
100A	9	4,57	0,29	[4,38 ; 4,76]
100B	10	4,65	0,26	[4,48 ; 4,81]
100C	10	5,28	0,39	[5,04 ; 5,52]

Som det fremgår af Tabel 12, er der overlap af konfidensintervaller for blanding nr. 100A og 100B. Hermed kan det konstateres, at der ikke er statistisk signifikant forskel på brudstyrken for de to prøver. Konfidensintervallet for blanding nr. 100C har ikke overlap, hvoraf det konstateres, at der er statistisk signifikant forskel på brudstyrken.

Tabel 13: Statistiske resultater af brudforlængelse for de fire blandinger, blanding nr. 25 – 100.

Prøve	Antal	Brudforlængelse (%)	Standardafvigelse (%)	95% konfidensinterval (%)
25	9	19,76	2,21	[18,32 ; 21,21]
50	11	10,06	1,42	[9,22 ; 10,89]
75	10	6,67	0,67	[6,26 ; 7,09]
100	29	4,84	0,45	[4,68 ; 5,00]

Som det fremgår af Tabel 13, kan det konstateres, at der er statistisk signifikant forskel på brudforlængelsen for blanding nr. 25, 50, 75 og 100, da der ikke er overlap af konfidensintervaller.

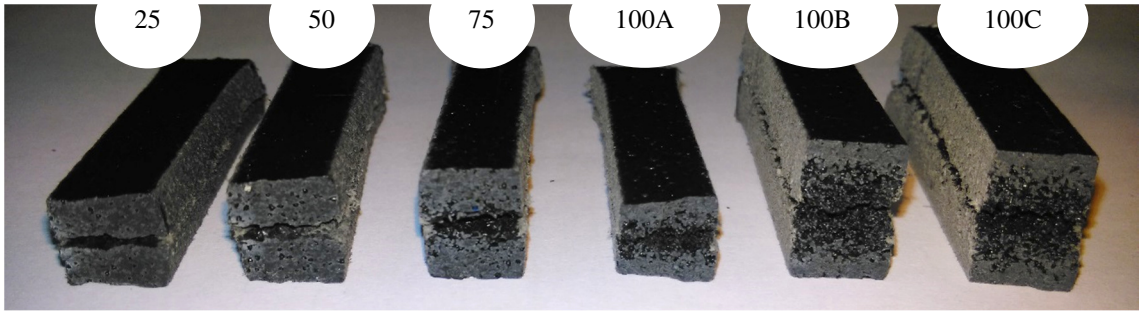
Det kan konstateres, at den gennemsnitlige brudforlængelse er faldende med den stigende koncentration af havplast.

SLAGTEST OG RESULTATER

Princippet i et slagtest er, at et emne påvirkes af ét slag fra en hammer midt imellem de bærende støtter, hvilket fører til emnet brydes. Hammerens udsving viser den absorberede slagenergi, hvilket aflæses og noteres. Det noteres endvidere, hvilken type brud (iflg. ISO 179-1), der er tale om.

Der udføres slagtest på hvert af de seks prøver med 10 gentagelser vha. en CEAST Torino slagtester. Der anvendes 2 J hammer for slagtestemner, som er uden not.

Alle slagtestemnerne brød fuldstændigt. Eksempler på brud efter slagtest ses på Figur 5.



Figur 5: Her ses eksempler på de brudte træktestemner og deres brudflader. Fra venstre til højre; Prøve 25 (emne nr. 2), 50 (emne nr. 6), 75 (emne nr. 2), 100A (emne nr. 6), 100B (emne nr. 9) og 100C (emne nr. 6).

Slagstyrken, a_{cN}, beregnes på baggrund af de målte energier med basis i Ligning 1.

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \cdot 10^3$$

Ligning 1: Beregning af slagstyrken (a_{cN}) i kJ/m², idet slagenergien (E_c) udtrykkes i J, og tykkelse (h) samt bredde (b_N) udtrykkes i mm.

De aflæste resultater fra slagtesten og de beregnede slagstyrker for hvert enkelt resultat fremgår af Appendiks D – Data fra slagtest. De gennemsnitlige slagstyrker for de tre 100% blandinger og de fire forskellige blandinger fremgår af hhv. Tabel 14 og Tabel 15.

Tabel 14: Statistiske resultater af slagstyrke for de tre 100% blandinger.

Prøve	Antal	Slagstyrke (kJ/m2)	Standardafvigelse (kJ/m2)	95 % konfidensinterval (kJ/m2)
100A	10	3,9	0,5	[3,6 ; 4,3]
100B	9	3,3	0,3	[3,1 ; 3,5]
100C	8	3,3	0,5	[2,9 ; 3,6]

Som det fremgår af Tabel 14, er der overlap af konfidensintervaller for blanding nr. 100A, 100B og 100C. Hermed kan det konstateres, at der ikke er statistisk signifikant forskel på slagstyrken for de tre prøver.

Tabel 15: Statistiske resultater af slagstyrke for de fire blandinger.

Prøve	Antal	Slagstyrke (kJ/m²)	Standardafvigelse (kJ/m²)	95 % konfidensinterval (kJ/m²)
25	8	22,2	5,2	[18,8 ; 25,6]
50	10	10,8	1,2	[10,0 ; 11,5]
75	7	5,5	0,9	[4,9 ; 6,0]
100	29	3,5	0,6	[3,3 ; 3,7]

Som det fremgår af Tabel 15, kan det konstateres, at der er statistisk signifikant forskel på slagstyrke for blanding nr. 25, 50, 75 og 100, da der ikke er overlap af konfidensintervaller.

Det kan konstateres, at den gennemsnitlige slagstyrke er faldende med den stigende koncentration af havplast.

SAMMENFATNING

I casen "Undersøgelse af havplast" har Plast Center Danmark (PCD) påtaget sig at udføre en materialeanalyse af blandingerne 25%, 50%, 75% og 100% havplast blandet med genanvendt rotationsplast. Resultaterne ses herunder:

Egenskaber	**Prøve**			
	25	**50**	**75**	**100**
Termiske egenskaber				
DSC analyse:				
• PE's smeltepunkt (°C)	127,1	128,1	129,8	130,6
• PP's smeltepunkt (°C)	163,0	162,8	162,3	163,0
• PP's koncentration (%)	15,9	26,0	31,8	38,5
• Nedbrydningstemperatur (°C)	219,3	215,9	202,4	201,8
Mekaniske egenskaber				
Træktest iht. ISO 527-2/1B:				
• E-modul (MPa)	399,7	376,2	389,6	288,2
• Maksimal trækstyrke (MPa)	15,1	12,1	10,2	7,6
• Forlængelse v/ maks. trækstyrke (%)	15,3	9,0	6,3	4,7
• Brudstyrke (MPa)	12,0	10,6	9,6	7,4
• Brudforlængelse (%)	19,8	10,1	6,7	4,8
Slagtest iht. ISO 179-1/1eU:				
• Slagstyrke (kJ/m^2)	22,2	10,8	5,5	3,5

På baggrund af FTIR og DSC analysen konkluderes det, at prøverne består af en blanding af PE og PP, hovedsageligt PE. Det er konkluderet, at sammensætningen af PE og PP ændrer sig med koncentrationen af havplast. Andelen af PP for 100% havplast er ca. 40%. Nedbrydningstemperaturen er faldende med den stigende koncentration af havplast, da havplasten er mere nedbrudt end den genanvendte rotationsplast.

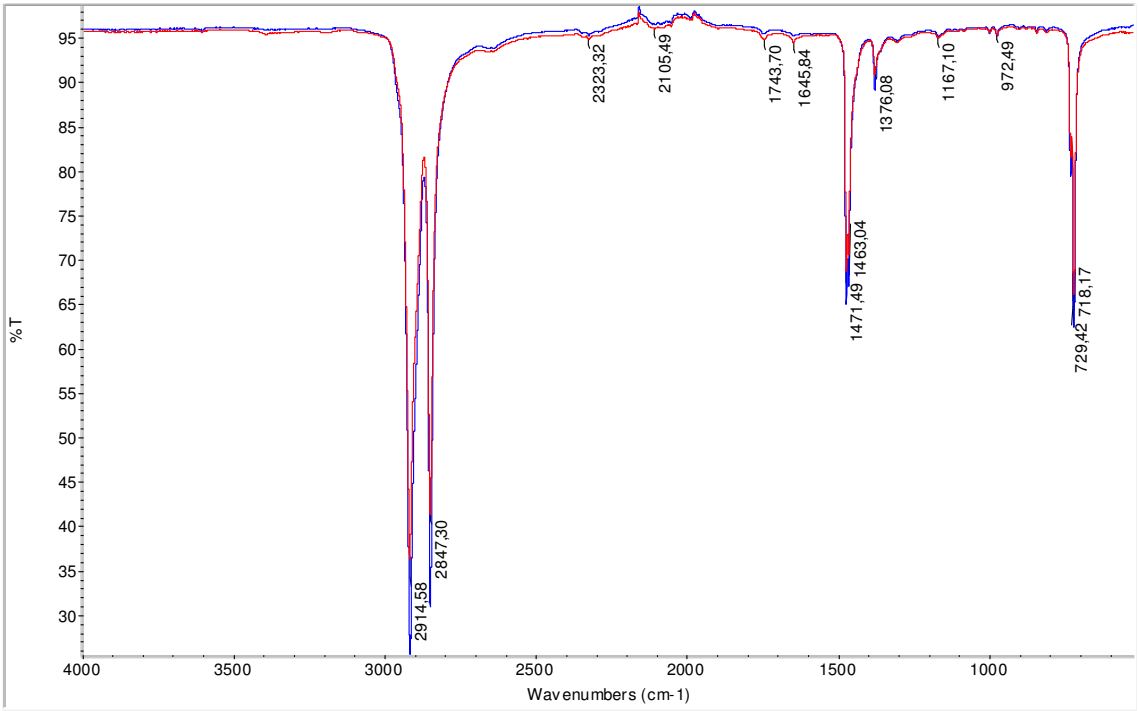
På baggrund af de mekaniske tests konkluderes, at blandingerne bliver blødere og dårligere i styrke med den stigende koncentration af havplast.

Udarbejdet den 16. april 2018 af:

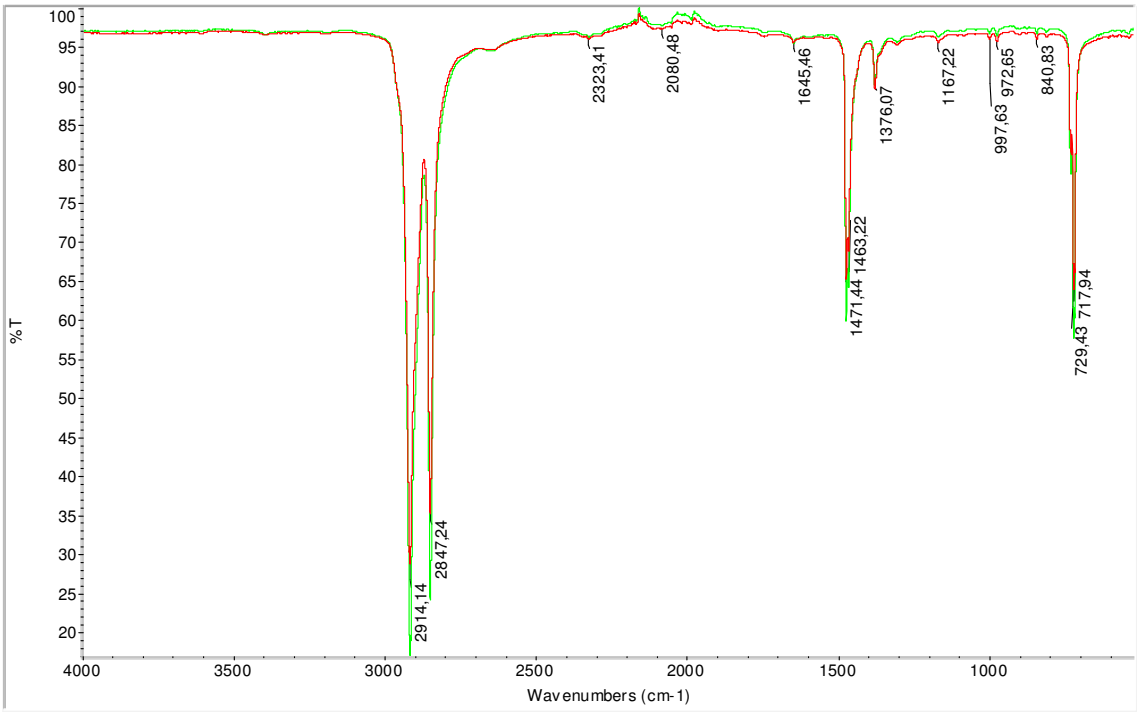
Hatice G. Tüzün
Laboratorieingeniør – B.Sc. Chem. Eng.
Plast Center Danmark

APPENDIKS A – IR SPEKTRE FOR PRØVERNE

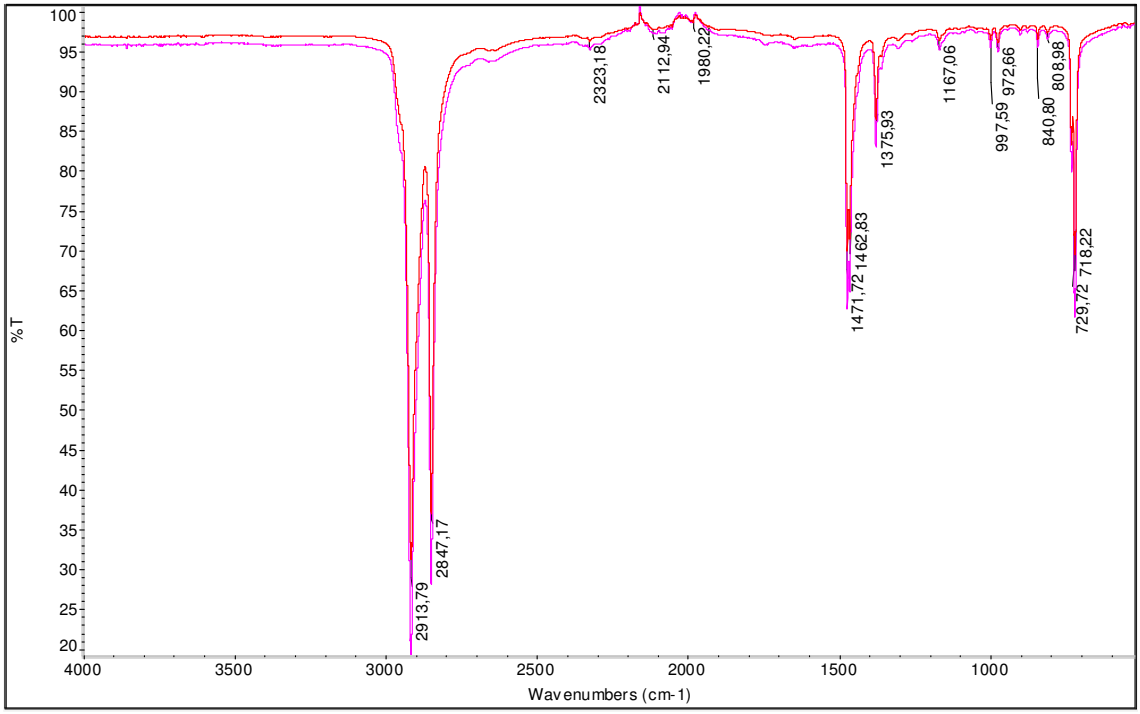
FTIR spektre for de seks prøver ses på Figur 6 til Figur 11.



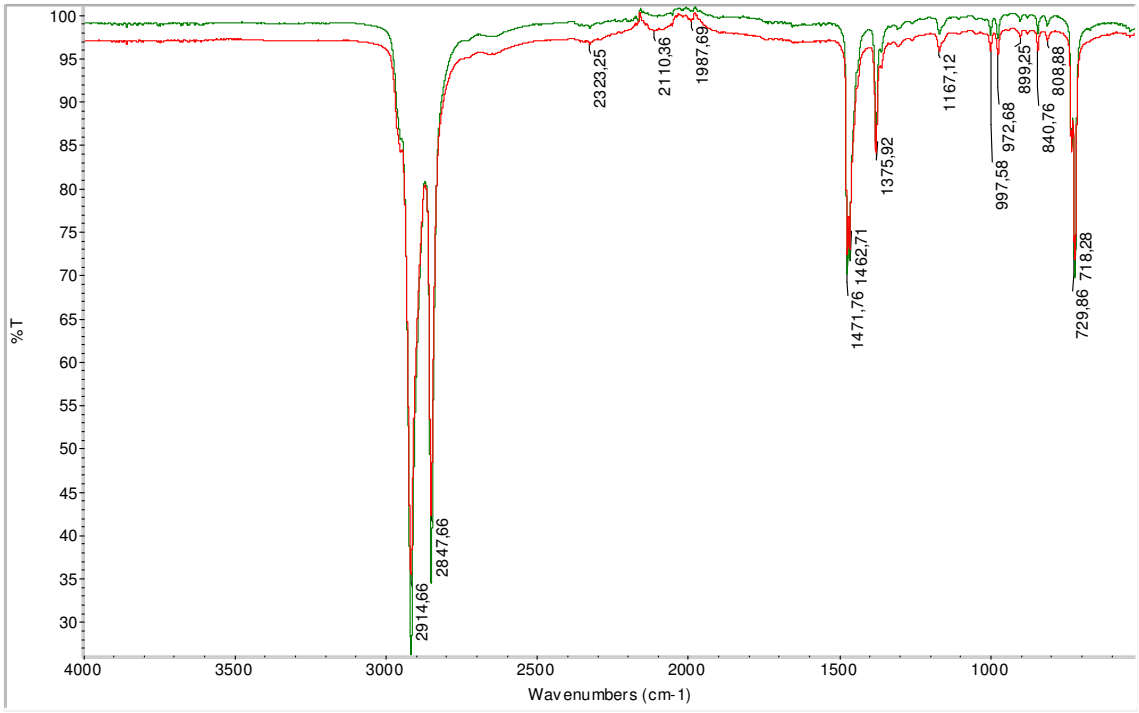
Figur 6: IR spektrum for Prøve 25, 1. gentagelse (rød) og 2. gentagelse (blå).



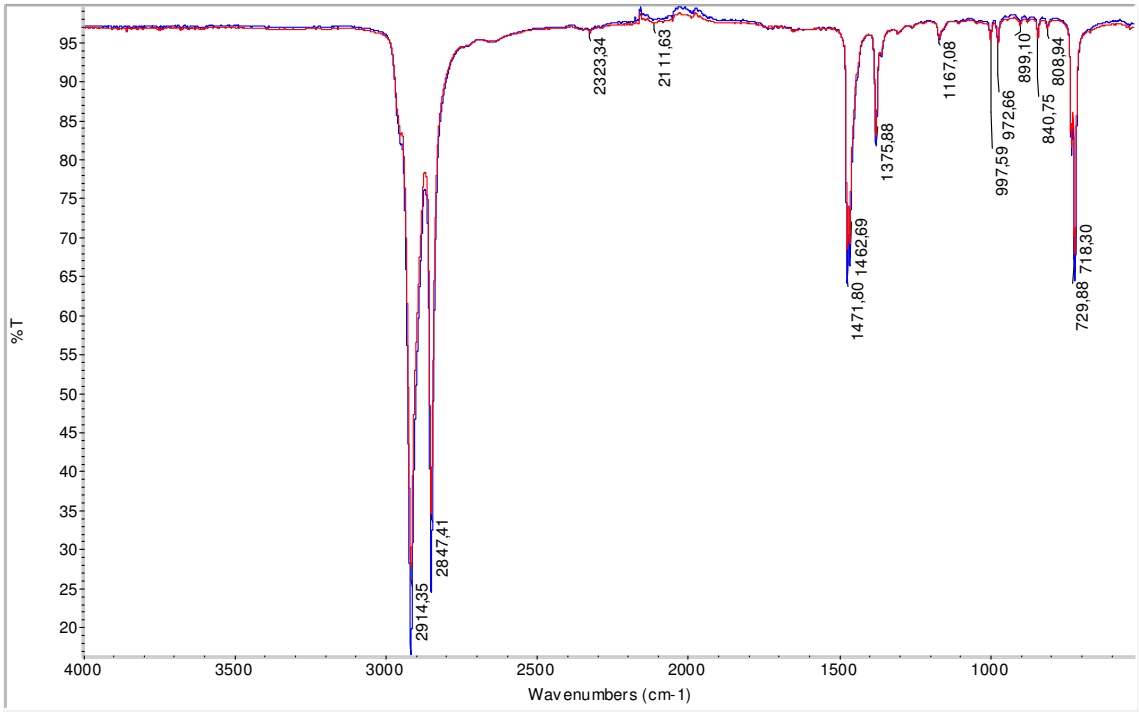
Figur 7: IR spektrum for Prøve 50, 1. gentagelse (rød) og 2. gentagelse (limegrøn).



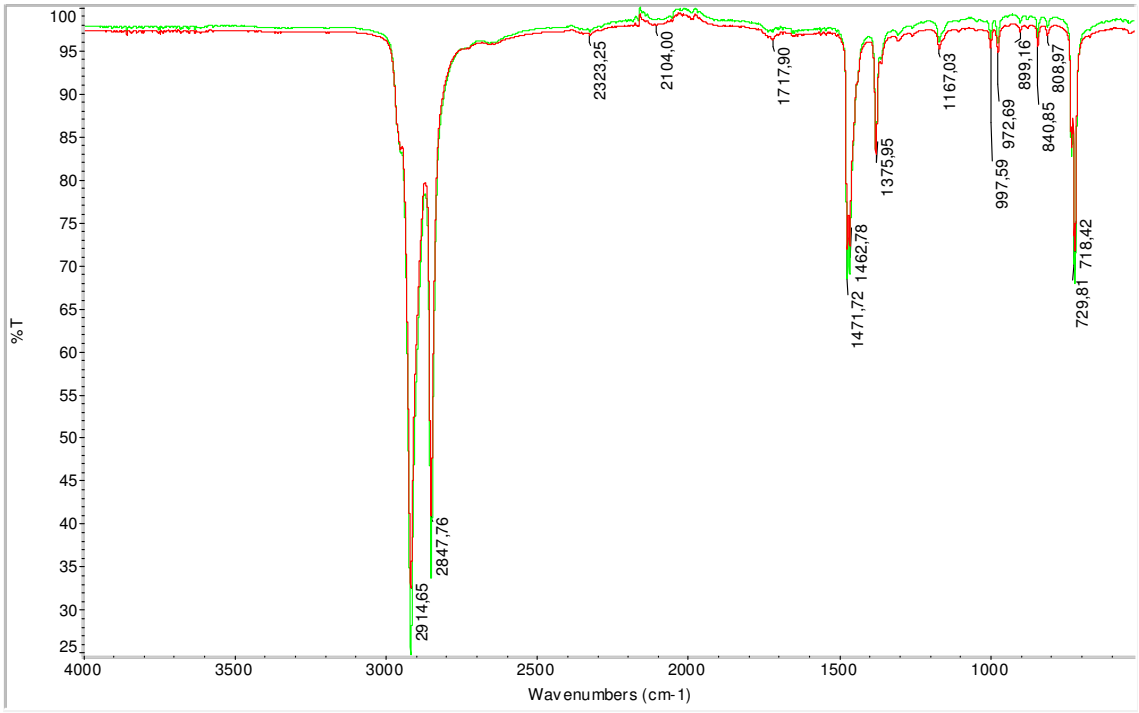
Figur 8: IR spektrum for Prøve 75, 1. gentagelse (rød) og 2. gentagelse (pink).



Figur 9: IR spektrum for Prøve 100A, 1. gentagelse (rød) og 2. gentagelse (grøn).



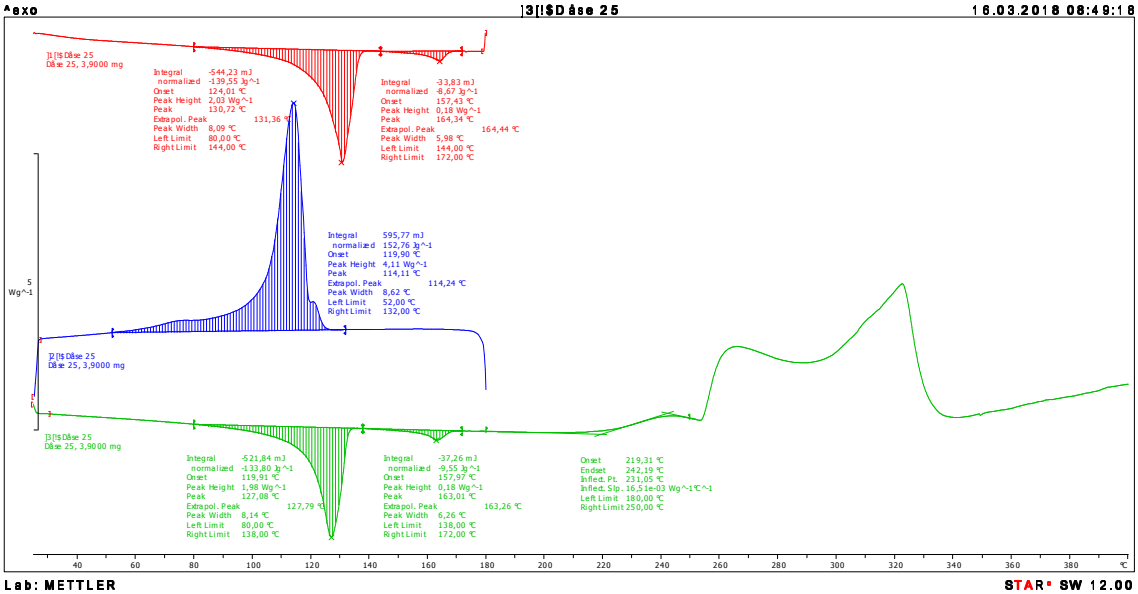
Figur 10: IR spektrum for Prøve 100B, 1. gentagelse (rød) og 2. gentagelse (blå).



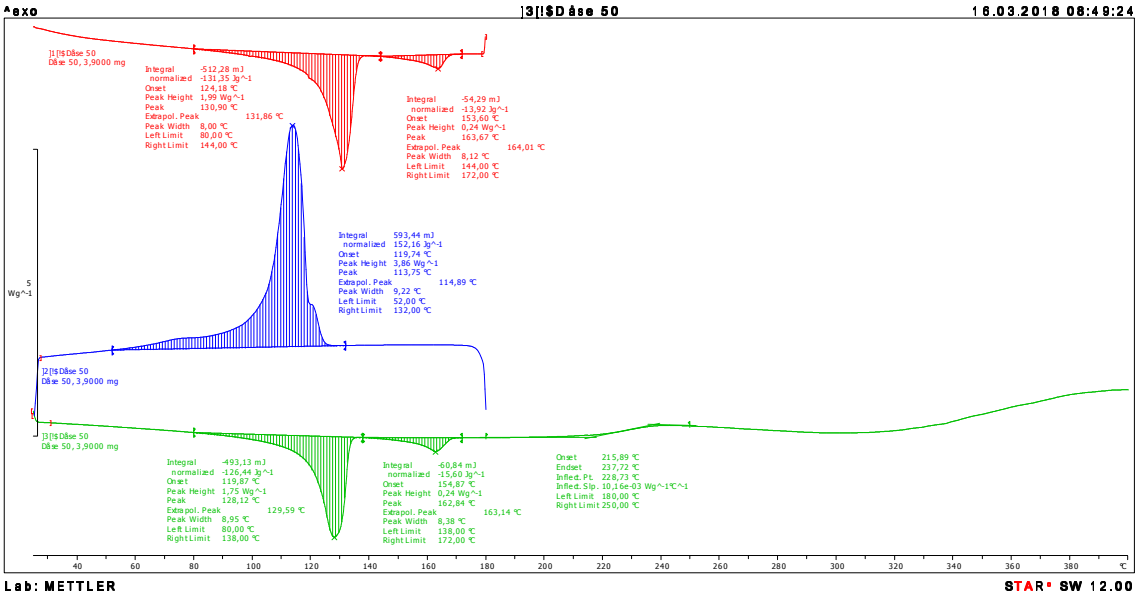
Figur 11: IR spektrum for Prøve 100C, 1. gentagelse (rød) og 2. gentagelse (limegrøn).

APPENDIKS B – DSC TERMOGRAMMER FOR PRØVERNE

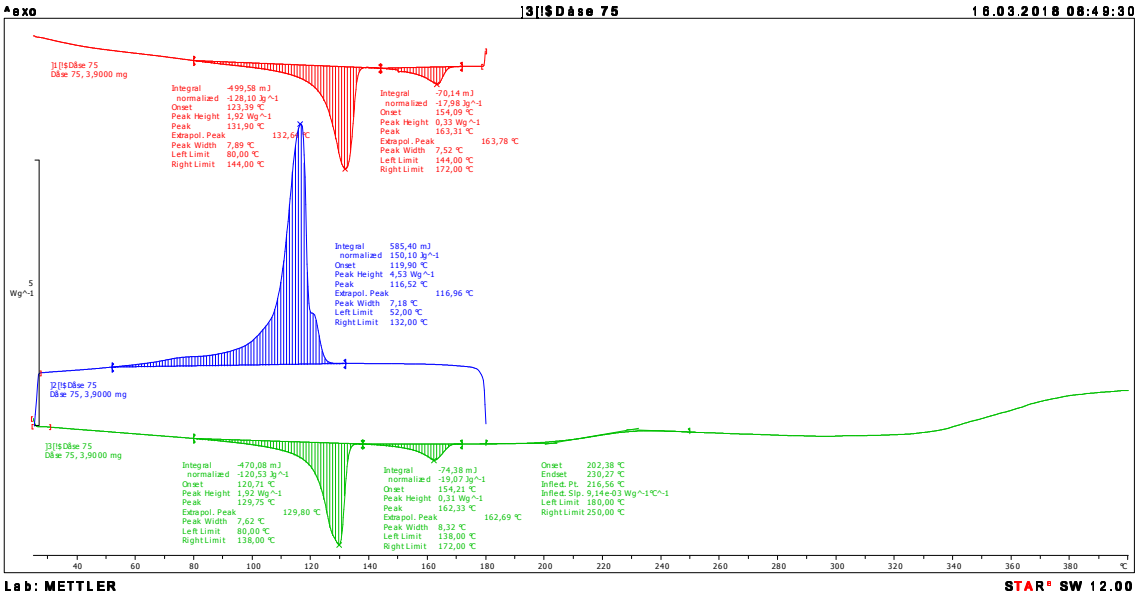
DSC termogrammer for de seks prøver ses på Figur 12 til Figur 17.



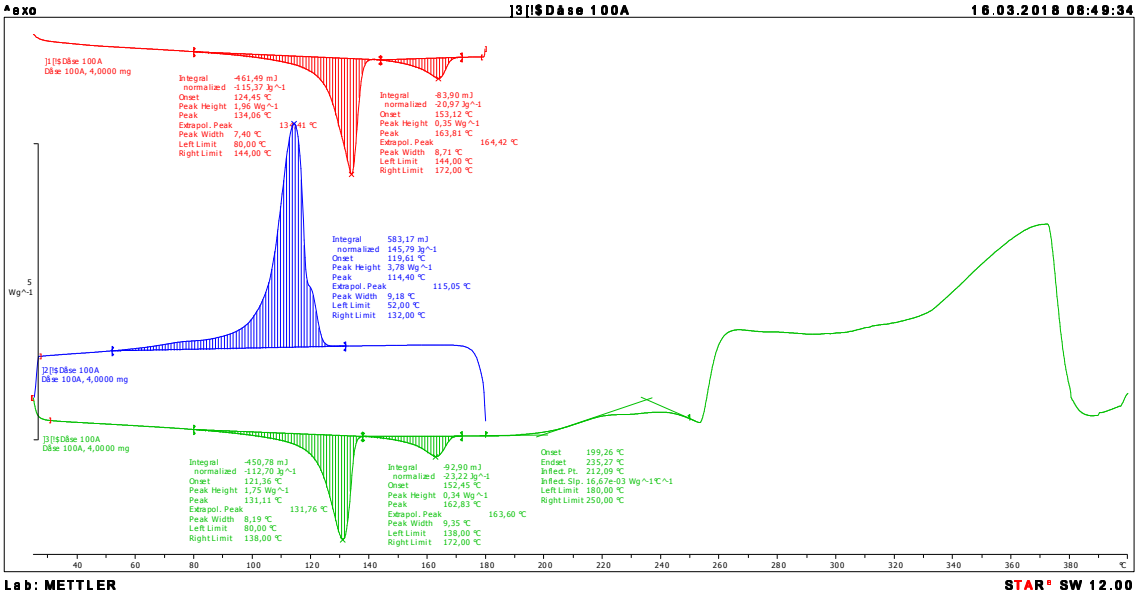
Figur 12: DSC termogram for Prøve 25.



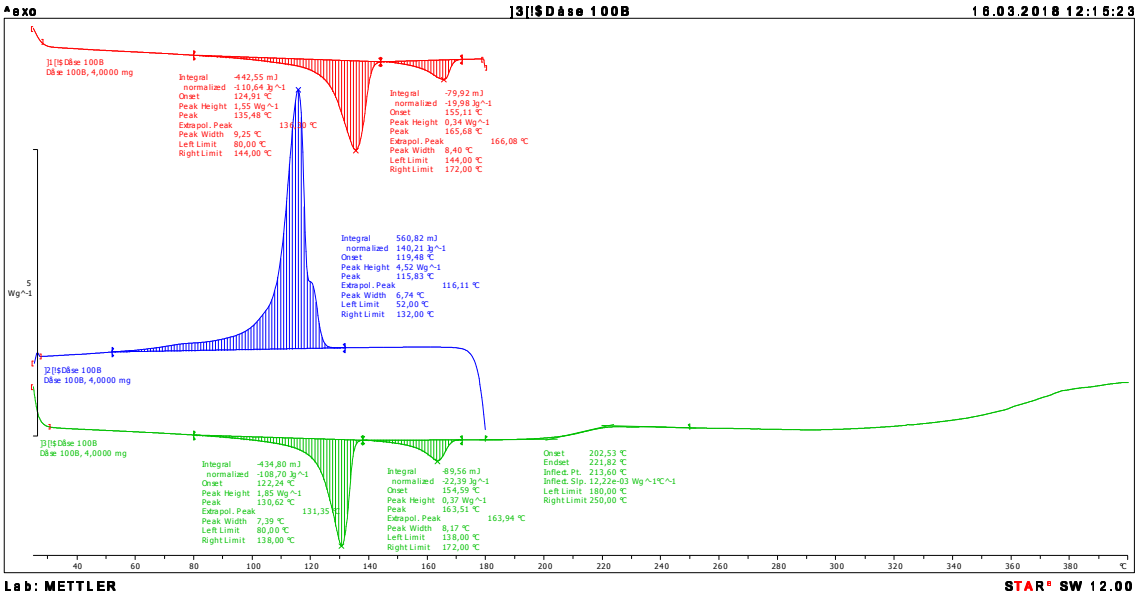
Figur 13: DSC termogram for Prøve 50.



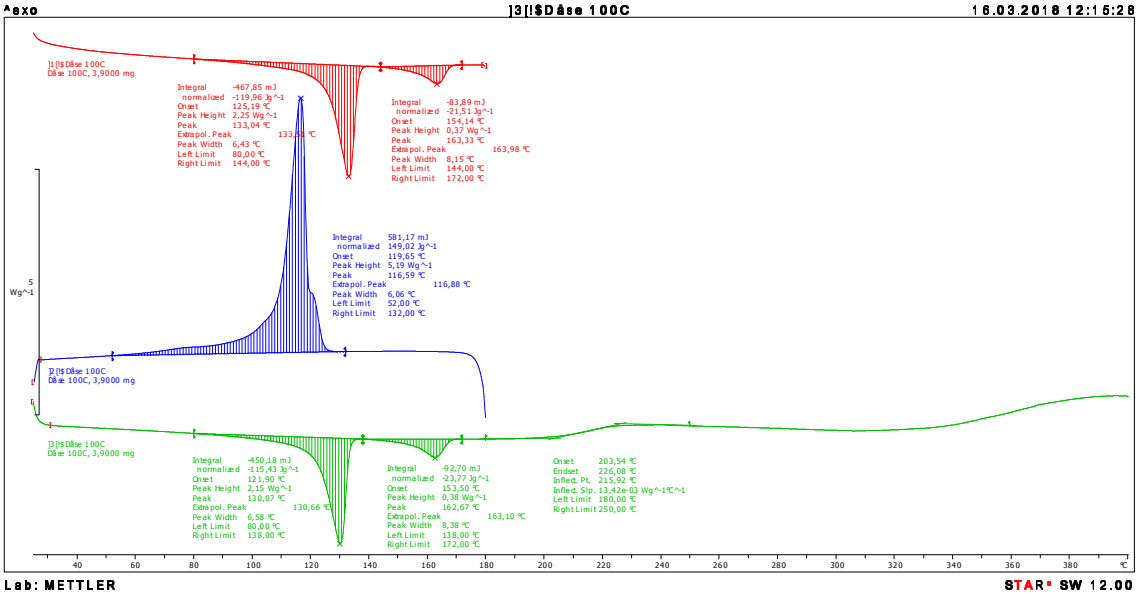
Figur 14: DSC termogram for Prøve 75.



Figur 15: DSC termogram for Prøve 100A.



Figur 16: DSC termogram for Prøve 100B.



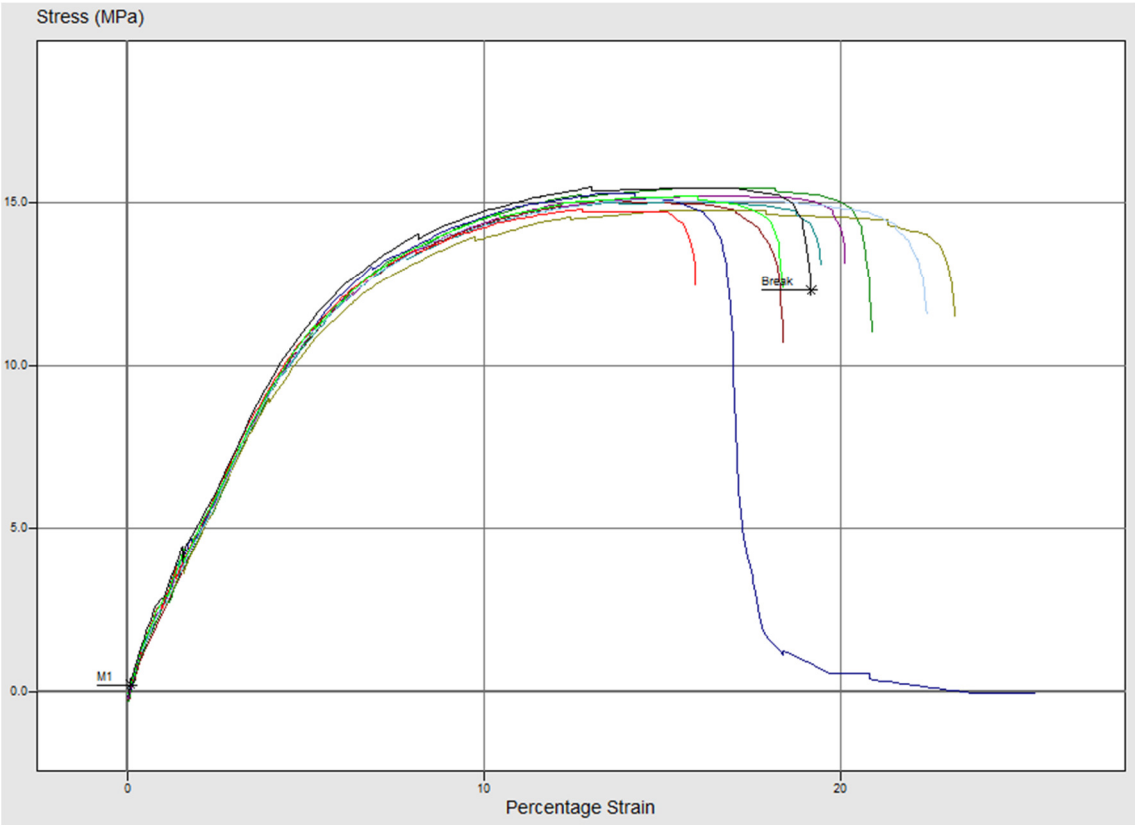
Figur 17: DSC termogram for Prøve 100C.

APPENDIKS C – DATA FRA TRÆKTEST

Aflæste og beregnede resultater på træktest af de seks prøver fremgår af Tabel 16 - Tabel 21. Alle spænding-/tøjningsdiagrammer ses samlet for de enkelte prøver på Figur 18 - Figur 23.

Tabel 16: Resultater for Prøve 25, der er trukket til brud. Forkortelsen B står for bredde, T for tykkelse og Kæbe for kæbeafstand. Outliers er mærket med orange og ikke med i de statistiske beregninger.

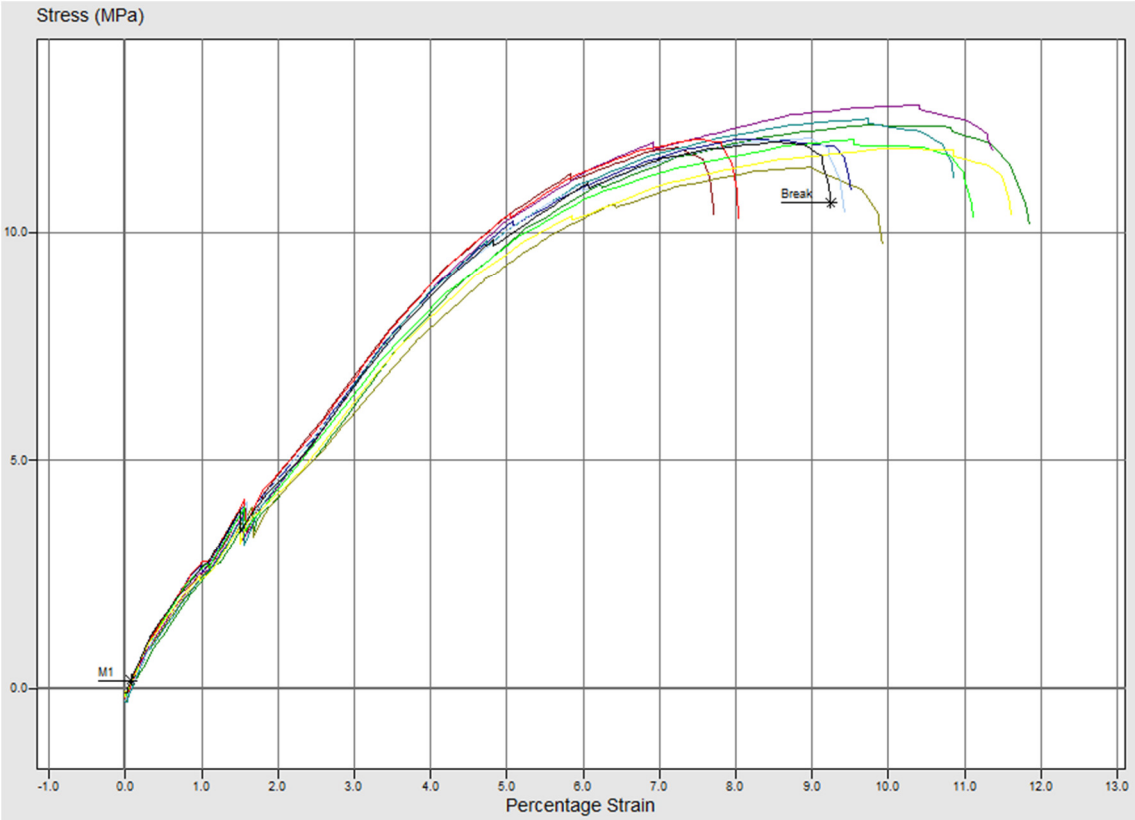
Emne nr.	B (mm)	T (mm)	Kæbe (mm)	E-modul (MPa)	Maksimal træk		Brud	
					Styrke (MPa)	Forlængelse (%)	Styrke (MPa)	Forlængelse (%)
25.1	10,30	4,68	108,67	389,0	15,0	13,30	10,7	18,39
25.2	10,22	5,14	108,01	410,6	15,4	18,15	11,0	20,86
25.3	10,04	5,21	108,02	376,2	14,8	17,89	11,5	23,19
25.4	9,25	4,72	108,15	384,5	15,3	14,23	-	-
25.5	9,88	5,15	108,12	402,9	15,2	16,50	13,1	20,12
25.6	10,27	5,45	108,11	373,4	15,0	15,41	13,1	19,43
25.7	10,29	5,21	107,99	381,1	15,1	15,00	11,6	22,41
25.8	10,71	5,09	107,99	426,7	14,8	12,75	12,4	15,93
25.9	10,25	4,73	107,72	393,1	15,2	16,00	12,3	18,37
25.10	10,18	4,58	108,04	444,5	15,5	13,01	12,3	19,16
Gennemsnit	10,24	5,03	108,07	399,7	15,1	15,34	12,0	19,76
Std. afv.	0,22	0,29	0,25	24,0	0,2	2,02	0,9	2,21



Figur 18: Spænding-/tøjningsdiagrammer for Prøve 25's brudte træktestemner.

Tabel 17: Resultater for Prøve 50, der er trukket til brud. Forkortelsen B står for bredde, T for tykkelse og Kæbe for kæbeafstand.

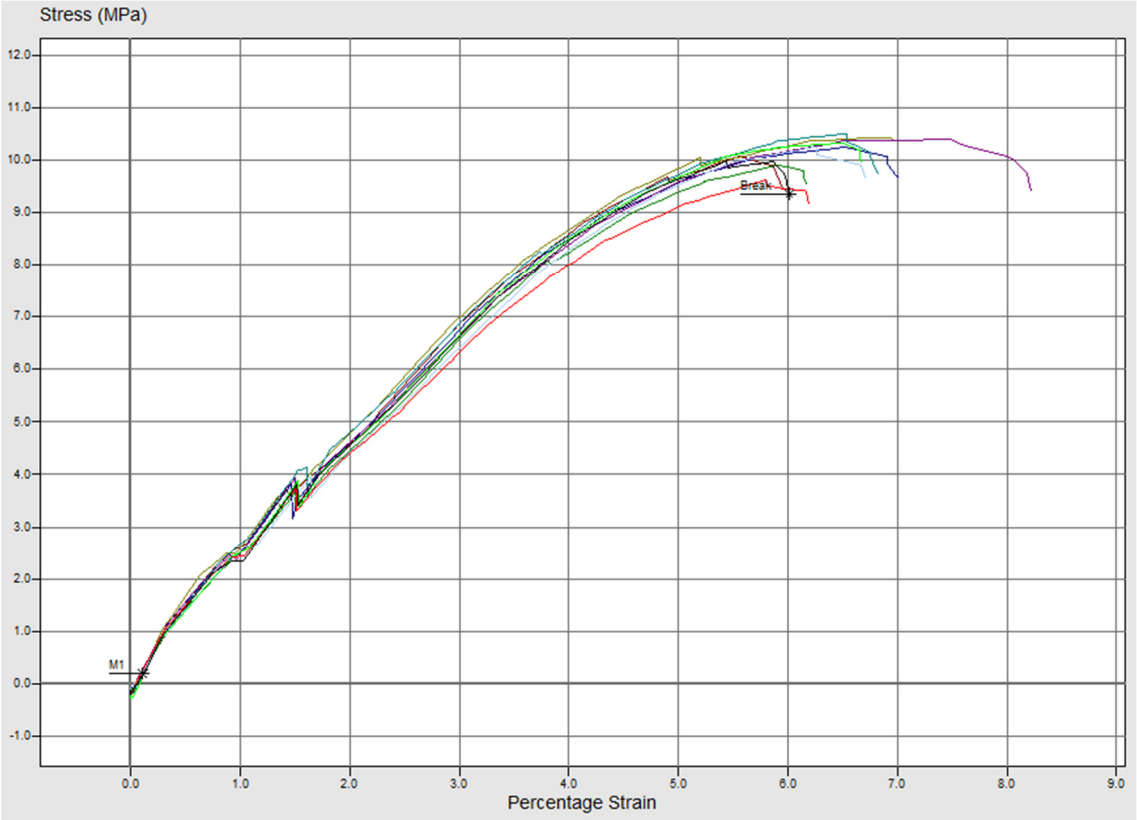
Emne nr.	B (mm)	T (mm)	Kæbe (mm)	E-modul (MPa)	Maksimal træk		Brud	
					Styrke (MPa)	Forlængelse (%)	Styrke (MPa)	Forlængelse (%)
50.1	10,05	5,07	108,21	399,4	11,8	7,24	10,4	7,71
50.2	10,02	5,53	108,15	282,6	12,3	9,71	10,2	11,85
50.3	10,06	5,46	108,37	372,3	11,4	8,97	9,7	9,93
50.4	10,02	5,36	108,30	399,3	12,0	8,00	10,9	9,51
50.5	10,10	5,46	108,09	375,1	12,8	10,41	11,8	11,36
50.6	10,07	5,62	108,20	398,4	12,5	9,74	11,2	10,85
50.7	9,93	5,13	108,99	372,4	12,0	8,96	10,4	9,42
50.8	10,04	5,12	108,40	386,0	12,0	7,48	10,3	8,04
50.9	10,04	5,35	108,28	391,3	12,0	9,55	10,3	11,11
50.10	10,02	5,71	108,21	369,3	11,8	10,00	10,4	11,61
50.11	9,96	5,52	108,25	392,0	12,0	8,53	10,6	9,24
Gennemsnit	10,03	5,39	108,31	376,2	12,1	8,96	10,6	10,06
Std. afv.	0,05	0,21	0,24	33,1	0,4	1,05	0,5	1,42



Figur 19: Spænding-/tøjningsdiagrammer for Prøve 50's brudte træktestemner.

Tabel 18: Resultater for Prøve 75, der er trukket til brud. Forkortelsen B står for bredde, T for tykkelse og Kæbe for kæbeafstand.

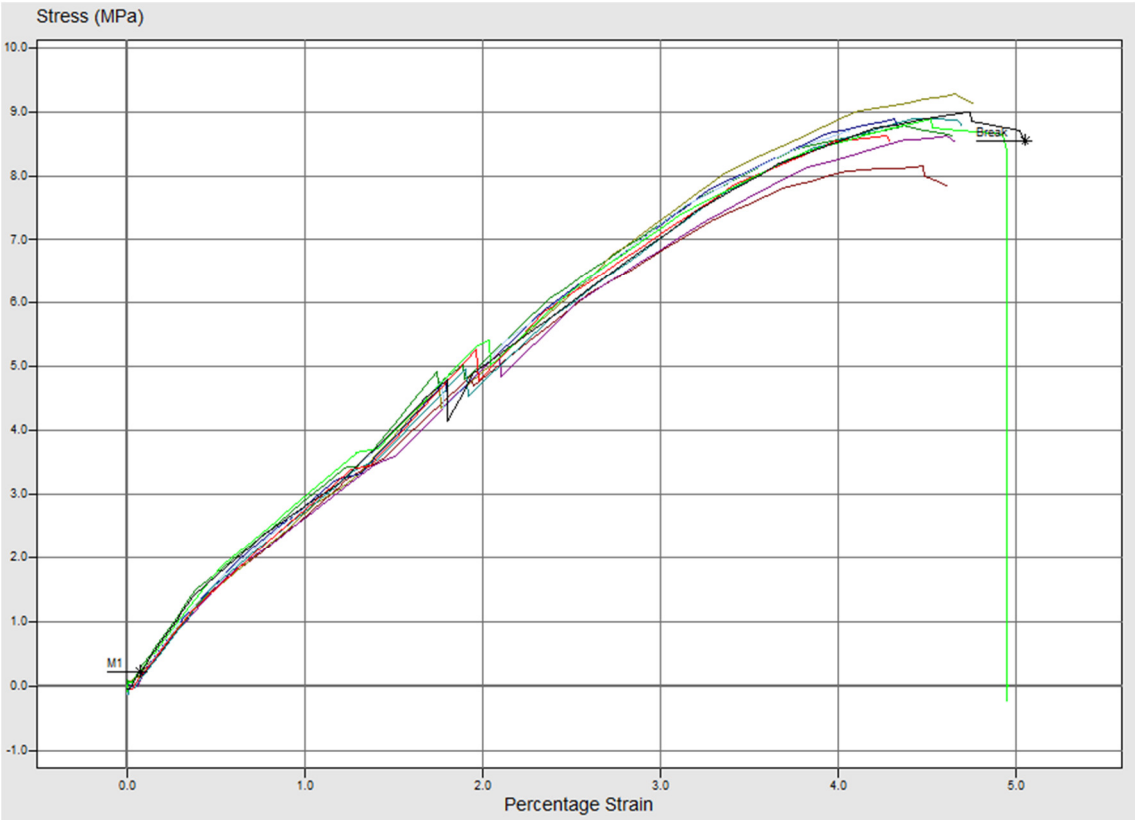
Emne nr.	B (mm)	T (mm)	Kæbe (mm)	E-modul (MPa)	Maksimal træk		Brud	
					Styrke (MPa)	Forlængelse (%)	Styrke (MPa)	Forlængelse (%)
75.1	10,02	5,47	108,48	364,1	10,1	5,56	9,4	5,95
75.2	10,09	5,64	108,45	349,5	9,9	5,91	9,5	6,17
75.3	10,10	5,70	107,89	440,9	10,4	6,93	10,4	6,98
75.4	10,13	5,73	108,21	388,6	10,3	6,50	9,7	7,00
75.5	9,99	5,53	108,09	390,0	10,4	7,49	9,4	8,22
75.6	10,03	5,30	107,78	439,0	10,5	6,53	9,7	6,82
75.7	9,95	5,34	108,32	342,0	10,2	6,26	9,6	6,71
75.8	9,99	5,71	107,92	390,4	9,6	5,80	9,2	6,20
75.9	9,97	5,44	107,98	410,2	10,3	6,50	10,0	6,66
75.10	9,97	5,40	108,11	381,1	10,0	5,44	9,4	6,01
Gennemsnit	10,02	5,53	108,12	389,6	10,2	6,29	9,6	6,67
Std. afv.	0,06	0,16	0,24	33,5	0,3	0,64	0,3	0,67



Figur 20: Spænding-/tøjningsdiagrammer for Prøve 75's brudte træktestemner.

Tabel 19: Resultater for Prøve 100A, der er trukket til brud. Forkortelsen B står for bredde, T for tykkelse og Kæbe for kæbeafstand. Outliers er mærket med orange og ikke med i de statistiske beregninger.

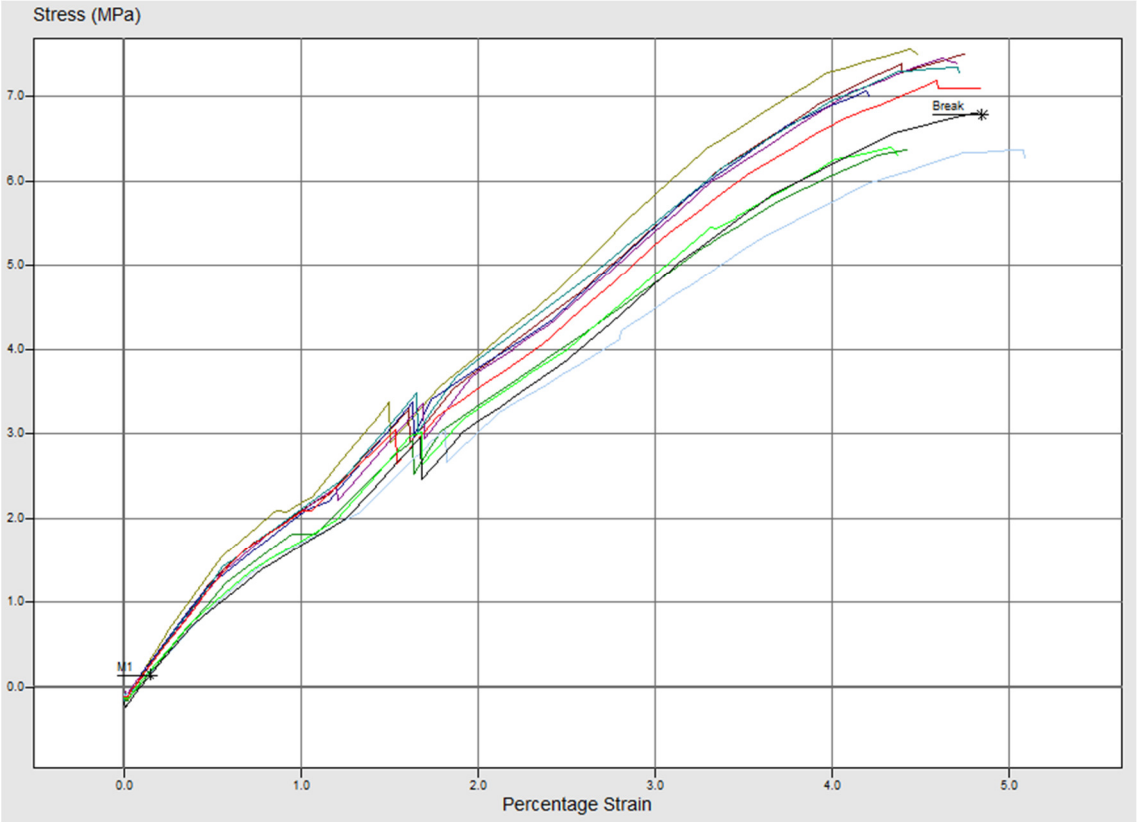
Emne nr.	B (mm)	T (mm)	Kæbe (mm)	E-modul (MPa)	Maksimal træk		Brud	
					Styrke (MPa)	Forlængelse (%)	Styrke (MPa)	Forlængelse (%)
100A.1	10,08	4,15	107,64	361,8	8,1	4,48	7,8	4,62
100A.2	10,16	4,09	108,58	397,3	8,8	4,36	8,6	4,64
100A.3	10,11	4,49	107,72	328,0	9,3	4,66	9,1	4,77
100A.4	10,05	4,41	108,28	383,0	8,9	4,31	8,8	4,33
100A.5	10,17	3,99	107,77	388,3	8,6	4,61	8,5	4,66
100A.6	10,25	4,22	107,87	361,5	8,9	4,42	8,8	4,69
100A.7	10,23	4,39	108,32	390,6	8,7	4,06	8,7	4,06
100A.8	10,08	4,01	107,83	360,3	8,6	4,27	8,5	4,29
100A.9	10,10	3,85	108,10	361,0	8,9	4,52	-	-
100A.10	10,16	4,52	108,47	398,0	9,0	4,74	8,5	5,05
Gennemsnit	10,14	4,25	108,05	374,3	8,8	4,43	8,6	4,57
Std. afv.	0,07	0,21	0,36	23,2	0,3	0,21	0,3	0,29



Figur 21: Spænding-/tøjningsdiagrammer for Prøve 100A's brudte træktestemner.

Tabel 20: Resultater for Prøve 100B, der er trukket til brud. Forkortelsen B står for bredde, T for tykkelse og Kæbe for kæbeafstand.

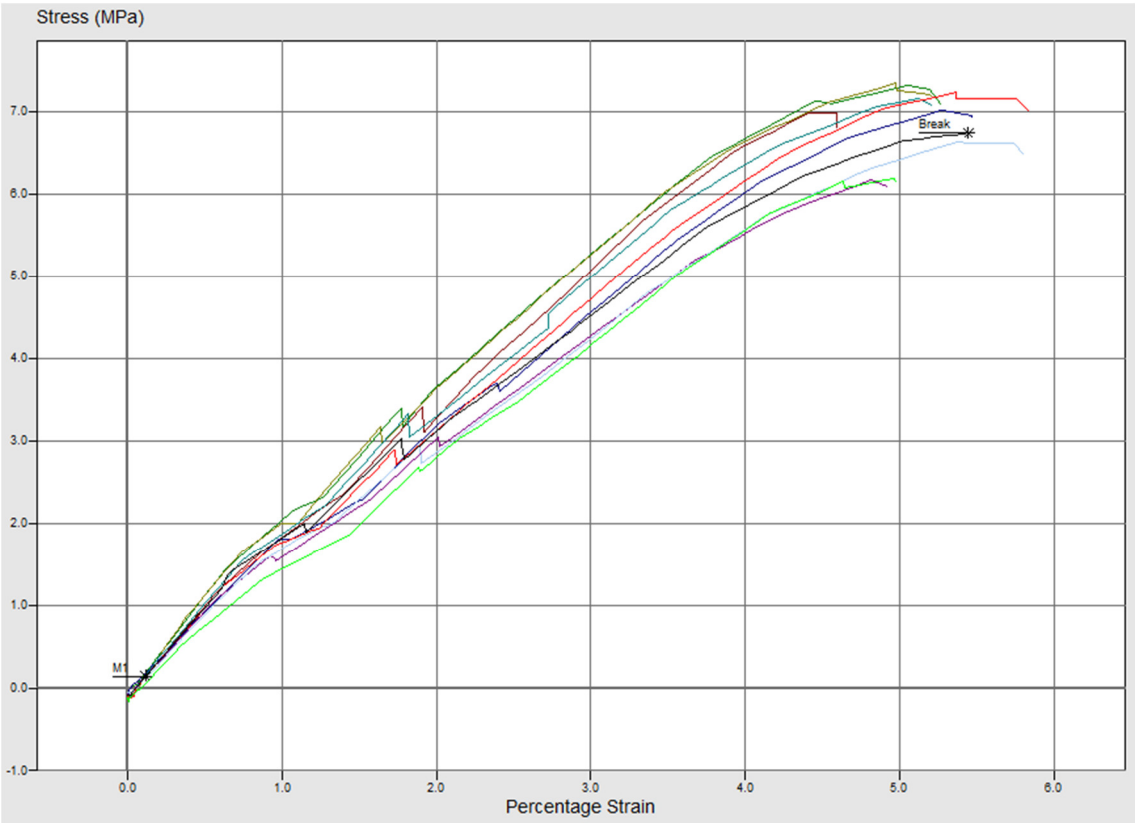
Emne nr.	B (mm)	T (mm)	Kæbe (mm)	E-modul (MPa)	Maksimal træk		Brud	
					Styrke (MPa)	Forlængelse (%)	Styrke (MPa)	Forlængelse (%)
100B.1	10,21	6,26	108,04	289,9	7,5	4,75	7,5	4,75
100B.2	10,42	6,76	108,24	250,6	6,4	4,43	6,4	4,43
100B.3	10,19	6,17	108,34	349,7	7,6	4,44	7,5	4,49
100B.4	10,12	6,25	108,22	282,3	7,1	4,19	7,0	4,21
100B.5	10,06	6,19	108,30	270,2	7,5	4,62	7,4	4,71
100B.6	10,14	5,94	108,10	283,7	7,4	4,71	7,3	4,72
100B.7	10,15	6,82	108,10	224,2	6,4	5,08	6,3	5,09
100B.8	10,23	6,91	108,05	273,9	7,2	4,59	7,1	4,85
100B.9	10,22	7,13	107,99	251,0	6,4	4,33	6,3	4,38
100B.10	10,21	7,14	108,22	249,6	6,8	4,80	6,8	4,85
Gennemsnit	10,20	6,56	108,16	272,5	7,0	4,60	6,9	4,65
Std. afv.	0,10	0,44	0,12	33,8	0,5	0,26	0,5	0,26



Figur 22: Spænding-/tøjningsdiagrammer for Prøve 100B's brudte træktestemner.

Tabel 21: Resultater for Prøve 100C, der er trukket til brud. Forkortelsen B står for bredde, T for tykkelse og Kæbe for kæbeafstand.

Emne nr.	B (mm)	T (mm)	Kæbe (mm)	E-modul (MPa)	Maksimal træk		Brud	
					Styrke (MPa)	Forlængelse (%)	Styrke (MPa)	Forlængelse (%)
100C.1	10,17	6,18	108,43	226,6	7,0	4,59	6,8	4,60
100C.2	10,04	6,19	108,33	232,9	7,3	5,05	7,1	5,27
100C.3	10,20	6,40	108,06	275,2	7,3	4,97	7,2	5,21
100C.4	10,09	6,38	107,79	188,0	7,0	5,27	6,9	5,47
100C.5	10,13	6,76	108,28	206,0	6,2	4,81	6,1	4,92
100C.6	10,23	6,36	108,13	234,8	7,2	5,12	7,1	5,21
100C.7	10,04	7,14	108,23	201,4	6,6	5,38	6,5	5,81
100C.8	9,99	7,00	108,61	219,2	7,2	5,36	7,0	5,84
100C.9	10,71	7,15	108,07	186,8	6,2	4,96	6,1	4,98
100C.10	10,08	7,05	108,22	219,1	6,7	5,44	6,7	5,44
Gennemsnit	10,17	6,66	108,22	219,0	6,9	5,10	6,8	5,28
Std. afv.	0,21	0,40	0,22	26,1	0,4	0,27	0,4	0,39



Figur 23: Spænding-/tøjningsdiagrammer for Prøve 100C's brudte træktestemner.

APPENDIKS D – DATA FRA SLAGTEST

Aflæste og beregnede resultater på slagtest af de seks prøver fremgår af Tabel 22 - Tabel 27.

Tabel 22: Resultater for Prøve 25, der er slået til brud med 2 J hammer jf. ISO 179-1/1eU. Outliers er mærket med orange og ikke med i de statistiske beregninger.

Emne nr.	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Slagenergi (J)	Slagstyrke (kJ/m²)
25.1*	10,17	5,09	0,700	13,5
25.2	10,13	4,81	1,070	22,0
25.3	10,40	4,98	1,340	25,9
25.4	10,36	5,04	1,030	19,7
25.5	10,29	5,29	1,000	18,4
25.6	10,18	4,98	0,770	15,2
25.7	10,23	5,41	1,010	18,2
25.8	10,28	5,34	1,585	28,9
25.9	10,31	4,85	1,450	29,0
25.10	10,29	4,64	0,560	11,7
Gennemsnit	10,27	5,04	1,091	21,0
Std. afv.	0,08	0,26	0,324	6,0

*Emne afprøvet med 15 J hammer for at vælge den rigtige hammerstørrelse til materialet.

Tabel 23: Resultater for Prøve 50, der er slået til brud med 2 J hammer jf. ISO 179-1/1eU.

Emne nr.	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Slagenergi (J)	Slagstyrke (kJ/m²)
50.1	10,04	5,27	0,640	12,1
50.2	10,05	5,27	0,620	11,7
50.3	10,13	5,59	0,510	9,0
50.4	9,97	5,33	0,670	12,6
50.5	10,21	5,46	0,650	11,7
50.6	10,11	5,60	0,610	10,8
50.7	10,13	5,47	0,570	10,3
50.8	10,08	5,65	0,560	9,8
50.9	10,02	5,76	0,565	9,8
50.10	10,18	5,77	0,580	9,9
Gennemsnit	10,09	5,52	0,598	10,8
Std. afv.	0,07	0,19	0,049	1,2

Tabel 24: Resultater for Prøve 75, der er slået til brud med 2 J hammer jf. ISO 179-1/1eU. Outliers er mærket med orange og ikke med i de statistiske beregninger.

Emne nr.	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Slagenergi (J)	Slagstyrke (kJ/m²)
75.1	10,03	5,79	0,440	7,6
75.2	10,03	5,91	0,365	6,2
75.3	10,13	6,46	0,430	6,6
75.4	10,16	5,63	0,245	4,3
75.5	9,99	5,62	0,450	8,0
75.6	10,07	5,71	0,310	5,4
75.7	10,24	5,94	0,380	6,2
75.8	10,17	5,85	0,450	7,6
75.9	10,19	6,20	0,310	4,9
75.10	9,92	5,80	0,270	4,7
Gennemsnit	10,09	5,89	0,365	6,1
Std. afv.	0,10	0,26	0,077	1,3

Tabel 25: Resultater for Prøve 100A, der er slået til brud med 2 J hammer jf. ISO 179-1/1eU.

Emne nr.	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Slagenergi (J)	Slagstyrke (kJ/m^2)
100A.1	10,07	3,97	0,160	4,0
100A.2	10,00	4,23	0,180	4,3
100A.3	10,10	4,05	0,170	4,2
100A.4	10,08	4,14	0,150	3,6
100A.5	10,16	4,07	0,130	3,1
100A.6	10,11	4,35	0,170	3,9
100A.7	10,04	4,41	0,140	3,2
100A.8	10,14	4,27	0,195	4,5
100A.9	10,36	4,12	0,190	4,5
100A.10	10,12	4,23	0,180	4,2
Gennemsnit	10,12	4,18	0,167	3,9
Std. afv.	0,10	0,14	0,021	0,5

Tabel 26: Resultater for Prøve 100B, der er slået til brud med 2 J hammer jf. ISO 179-1/1eU. Outliers er mærket med orange og ikke med i de statistiske beregninger.

Emne nr.	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Slagenergi (J)	Slagstyrke (kJ/m^2)
100B.1	10,26	6,97	0,235	3,3
100B.2	10,25	7,04	0,240	3,3
100B.3	10,25	6,74	0,150	2,2
100B.4	10,36	7,56	0,280	3,6
100B.5	10,31	6,89	0,200	2,8
100B.6	10,13	7,26	0,220	3,0
100B.7	10,20	6,55	0,220	3,3
100B.8	10,27	6,66	0,270	3,9
100B.9	10,16	7,29	0,235	3,2
100B.10	10,31	7,44	0,250	3,3
Gennemsnit	10,25	7,04	0,230	3,2
Std. afv.	0,07	0,34	0,037	0,5

Tabel 27: Resultater for Prøve 100C, der er slået til brud med 2 J hammer jf. ISO 179-1/1eU. Outliers er mærket med orange og ikke med i de statistiske beregninger.

Emne nr.	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Slagenergi (J)	Slagstyrke (kJ/m^2)
100C.1*	10,27	7,47	0,300	3,9
100C.2	10,19	7,38	0,190	2,5
100C.3	10,12	6,94	0,250	3,6
100C.4	10,38	6,93	0,240	3,3
100C.5	10,29	6,40	0,290	4,4
100C.6	10,27	7,16	0,250	3,4
100C.7	10,10	6,65	0,180	2,7
100C.8	10,21	6,02	0,210	3,4
100C.9	10,15	7,21	0,230	3,1
100C.10	10,17	6,96	0,280	4,0
Gennemsnit	10,21	6,85	0,236	3,4
Std. afv.	0,09	0,43	0,037	0,6

*Emne afprøvet med 15 J hammer for at vælge den rigtige hammerstørrelse til materialet.