2013•2014

Masterproef

Ontwikkeling van testmethode voor de bepaling van de materiaalparameters voor het thermovormen van thermoplasten

Promotor : dr. ir. Albert VAN BAEL

Promotor : Ing. BART VAN MIEGHEM

Maarten Neyens, Gert-Jan Bex Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven



FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Copromotor : dr. ir. FREDERIK DESPLENTERE



2013•2014 Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Ontwikkeling van testmethode voor de bepaling van de materiaalparameters voor het thermovormen van thermoplasten

Promotor : dr. ir. Albert VAN BAEL

Promotor : Ing. BART VAN MIEGHEM Copromotor : dr. ir. FREDERIK DESPLENTERE

Maarten Neyens, Gert-Jan Bex

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





Woord vooraf

Naar aanleiding van onze opleiding industrieel ingenieur elektromechanica voerden wij dit academiejaar een masterproef uit bij Cel Kunststoffen. De opdracht hield het ontwikkelen van een testmethode in voor de bepaling van de materiaalparameters van het K-BKZ model van thermoplasten voor het simuleren van thermoformeerprocessen. Wij kozen voor dit onderwerp omwille van twee redenen. Ten eerste is het onderwerp meer onderzoek gericht wat wij een leuke afwisseling vonden ten opzichte van de bachelorproef waar de focus op het machineontwerp lag. Ten tweede is kunststofverwerking een belangrijke tak binnen de Belgische industrie. Daarbij is het thermovormen een minder bekende techniek die momenteel aandeel aan het winnen is ten opzichte van het bekendere spuitgieten.

Voor het tot stand komen van onze masterproef wensen wij een aantal mensen te danken die ons gesteund en begeleid hebben doorheen dit proces.

Om te beginnen willen we in het bijzonder onze promotoren prof. dr. ir. Bert Van Bael en ing. Bart Van Mieghem bedanken voor de paraatheid, advies en het beantwoorden van onze vragen. Dankzij hun input heeft de masterproef enkele interessante conclusies opgeleverd.

Daarnaast bedanken we graag iedereen aan Cel Kunststoffen voor het beantwoorden van vragen en de aangename werksfeer. In het bijzonder ing. Koen Libens voor al zijn hulp bij het uitvoeren van de proeven gedurende het volledige academiejaar.

Vervolgens willen we ook zeker dr. ir. Frederik Desplentere bedanken voor de hulp bij het fitten van onze data en het beantwoorden van al onze vragen betreffende de software. Niet te vergeten bedanken we ook graag ing. Marijke Amerijckx voor haar hulp bij het gebruiken van de software.

Tot slot bedanken we ook graag onze ouders voor hun steun en vertrouwen gedurende onze volledige opleiding en in het bijzonder het laatste jaar bij het uitwerken van deze masterproef.

Maarten Neyens Gert-Jan Bex

Juni 2014

Inhoudsopgave

••	oord voora	f	
Li	ijst tabeller		7
Li	ijst figuren		9
A	bstract		19
Su	ummary		21
In	leiding		23
	Situering		
	Probleemst	elling	
	Doelstellin	3	
	Methode		
1	Thermo	vormen	29
	1.1 Inle	iding	
	1.2 Ges	chiedenis	
	1.3 Me	hodes van vormen	
	1.3.1	Vormen in 1 stap	
	1.3.2	Vormen in 2 stappen	
	1.3.3	Vormen in meerdere stappen	
2	Simuler	en van thermovormprocessen	39
	2.1 K-E	KZ model	44
	2.1.1	Rektensor	44
	2.1.2	Geheugenfunctie	46
	2.1.2 2.1.3	Geheugenfunctie Dempingsfunctie	46 49
	2.1.2 2.1.3 2.1.4	Geheugenfunctie Dempingsfunctie Tijd-temperatuur superpositie	
	2.1.22.1.32.1.42.1.5	Geheugenfunctie Dempingsfunctie Tijd-temperatuur superpositie Parameters	
	2.1.2 2.1.3 2.1.4 2.1.5 2.2 T-S	Geheugenfunctie Dempingsfunctie Tijd-temperatuur superpositie Parameters M	
3	2.1.2 2.1.3 2.1.4 2.1.5 2.2 T-S Parame	Geheugenfunctie Dempingsfunctie Tijd-temperatuur superpositie Parameters M erbepaling	
3	2.1.2 2.1.3 2.1.4 2.1.5 2.2 T-S Parame 3.1 Me	Geheugenfunctie Dempingsfunctie Tijd-temperatuur superpositie Parameters M erbepaling hode voor parameterbepaling: Dynamic Mechanical Analysis (DMA)	46 49 51 52 53 57
3	2.1.2 2.1.3 2.1.4 2.1.5 2.2 T-S Parame 3.1 Me 3.2 Me	Geheugenfunctie Dempingsfunctie Tijd-temperatuur superpositie Parameters M erbepaling hode voor parameterbepaling: Dynamic Mechanical Analysis (DMA) hode voor parameterbepaling: T-SIMFIT	46 49 51 52 53 53 57 57 60
3	2.1.2 2.1.3 2.1.4 2.1.5 2.2 T-S Parame 3.1 Me 3.2 Me 3.3 Spa	Geheugenfunctie Dempingsfunctie Tijd-temperatuur superpositie Parameters M erbepaling hode voor parameterbepaling: Dynamic Mechanical Analysis (DMA) hode voor parameterbepaling: T-SIMFIT ningsrekdata: huidige methode	46 49 51 52 53 53 57 57 60 64
3	2.1.2 2.1.3 2.1.4 2.1.5 2.2 T-S Parame 3.1 Me 3.2 Me 3.3 Spa 3.3.1	Geheugenfunctie Dempingsfunctie Tijd-temperatuur superpositie Parameters IM erbepaling hode voor parameterbepaling: Dynamic Mechanical Analysis (DMA) hode voor parameterbepaling: T-SIMFIT ningsrekdata: huidige methode Kracht-verplaatsing	46 49 51 52 53 53 57 57 60 64 64
3	2.1.2 2.1.3 2.1.4 2.1.5 2.2 T-S Parame 3.1 Me 3.2 Me 3.3 Spa 3.3.1 3.3.2	Geheugenfunctie Dempingsfunctie Tijd-temperatuur superpositie Parameters IM erbepaling hode voor parameterbepaling: Dynamic Mechanical Analysis (DMA) hode voor parameterbepaling: T-SIMFIT nningsrekdata: huidige methode Kracht-verplaatsing Spanning-rekratio	46 49 51 52 53 53 57 57 60 64 64 64 68
3	2.1.2 2.1.3 2.1.4 2.1.5 2.2 T-S Parame 3.1 Me 3.2 Me 3.3 Spa 3.3.1 3.3.2 3.4 Spa	Geheugenfunctie Dempingsfunctie Tijd-temperatuur superpositie Parameters IM erbepaling hode voor parameterbepaling: Dynamic Mechanical Analysis (DMA) hode voor parameterbepaling: T-SIMFIT nningsrekdata: huidige methode Spanning-rekratio nningsrekdata: nieuw ontwikkelde methode	46 49 51 52 53 53 57 57 60 64 64 64 68 69
3	2.1.2 2.1.3 2.1.4 2.1.5 2.2 T-S Parame 3.1 Me 3.2 Me 3.3 Spa 3.3.1 3.3.2 3.4 Spa 3.4.1	Geheugenfunctie Dempingsfunctie Tijd-temperatuur superpositie Parameters M erbepaling hode voor parameterbepaling: Dynamic Mechanical Analysis (DMA) hode voor parameterbepaling: T-SIMFIT nningsrekdata: huidige methode Kracht-verplaatsing Spanning-rekratio nningsrekdata: nieuw ontwikkelde methode Controle Zwick Z050 trekbank	46 49 51 52 53 53 57 57 60 64 64 64 64 64 68 69 69

3	.4.3	3 Krachtverplaatsingsdata	. 87
3	.4.4	4 Spanningsrekdata	. 88
4 V	ali	lidatie door middel van simulatie	. 93
4.1		Krachtverplaatsingsdata	. 94
4.2		Spanningsrekdata	. 97
4.3		Fitting door middel van T-SIMFIT	100
4.4		Validatie	103
4	.4.1	1 K-BKZ parameters IKT	103
4	.4.2	2 Simulatie uniaxiale trekproeven	112
4	.4.3	3 Simulatie equibiaxiale proef IKT	124
4.5		Simulatie Samsonite koffer	127
4	.5.1	1 Simulatie van vacuüm vormen over mannelijke mal	129
4	.5.2	2 Simulatie van vacuüm vormen in vrouwelijke matrijs	141
5 A	Alge	emeen besluit	149
Refer	enti	tielijst	151
Bijlag	gen.	11	153
Bijl	lage	e A	153
Bijl	lage	e B	154
Staj	p1:	Data inladen	154
Staj	p2:	Koppels selecteren	156
Staj	p3:	Grafieken maken	157
Stap	p4:	Exporteren	157
Bijl	lage	e C	159
Bijl	lage	e D	164

Lijst tabellen

Tabel 1: Belangrijke kunststoffen bij het thermovormen [8]	30
Tabel 2: m-waarde voor verschillende vervormingstypes [10, 13, 14]	45
Tabel 3: Omrekening naar werkelijke spanning en rekratio [19]	60
Tabel 4: Vergelijking opgelegde snelheid en werkelijke snelheid	73
Tabel 5: Belangrijkste afmetingen van het trekstaafje volgens ISO527-2/1A [23]	75
Tabel 6: Berekening reksnelheid	79
Tabel 7: Belangrijkste afmetingen van het trekstaafje volgens ISO527-2/5A [23]	
Tabel 8: Berekening reksnelheid met beginlengte 20 mm	80
Tabel 9: Verschillen in diktes volgens de doorsnede in de breedterichting	137
Tabel 10: Verschillen in diktes volgens de doorsnede in de lengterichting	137
Tabel 11: Berekening reksnelheid	139
Tabel 12: Verschil in diktes volgens de doorsnede in de lengterichting	141
Tabel 13: Verschil in diktes volgens de doorsnede in de breedterichting	141

Lijst figuren

Figuur 1: Machine hal [1]	23
Figuur 2: Thermovormprincipe [2]	24
Figuur 3: Chocoladebakje [3]	24
Figuur 4: Structureel onderdeel [6]	24
Figuur 5: Opstelling voor het bepalen van materiaalparameters (IKT) [13]	25
Figuur 6: Schematische voorstelling van de opstelling [13]	25
Figuur 7: Trekbank Cel kunststoffen	26
Figuur 8: Het blazen van een bel	27
Figuur 9: Basisstappen in het thermovormproces	29
Figuur 10: Chocoladebakje [3]	29
Figuur 11: Structureel onderdeel [6]	29
Figuur 12: Wanddikte variatie bij het vormen van een eenvoudig product [7]	31
Figuur 13: Positief vormen op een mannelijke vorm [7]	32
Figuur 14: vacuüm vormen in een negatieve of vrouwelijke vorm [7]	33
Figuur 15: Vrij vormen van een kunststof product [7]	33
Figuur 16: Product gevormd met passende matrijshelften [7]	34
Figuur 17: Thermovormen met stempel [7]	35
Figuur 18: Thermovormen met een ringstempel [7]	35
Figuur 19: Thermovormen met een stempel over een mannelijke matrijs [7]	36
Figuur 20: Thermovormen met een mannelijke vorm en voorblazen [7].	
Figuur 21: Thermovormen met een vrouwelijke matrijs en voorblazen [7]	37
Figuur 22: Thermovormen met voorblazen d.m.v. een vacuüm [7].	
Figuur 23: Thermovormen met stempel en voorblazen volgens het principe van vacuümvormen [7]	38
Figuur 24: Thermovormen met stempel en voorblazen met een mannelijke vorm [7]	38
Figuur 25: Respons van een elastisch materiaal op trekproef [9]	39
Figuur 26: Spanningsverloop in functie van de rek [9]	39
Figuur 27: Respons op een constante rekexcitatie en constante spanningsexcitatie [9]	40
Figuur 28: Respons van een visceus materiaal op een trekproef [9]	. 40
Figuur 29: Spanningsverloop in functie van de rek [9]	
Figuur 30: Respons op een constante rekexcitatie en constante spanningsexcitatie [9].	
Figuur 31: Respons van een visco-elastisch materiaal op een trekproef [9]	42
Figuur 32: Rekrespons on een constante spanningsexcitatie [9]	42
Figuur 33: Spanningsrespons on een constante rekexcitatie [9]	43
Figuur 34: Kruinexperiment [9]	43
Figuur 35: Kruinisochronen [9]	43
Figuur 36: Schematische voorstelling van de vervormingstynes [13]	45
Figuur 37: Maxwell element [9]	15
Figuur 38: Spanningsrelaxatie van een Maxwell element [9]	10
Figuur 39: Relaxatie van Maxwell elementen [9]	10
Figuur 40: Gegeneraliseerd Maxwell model [9]	10
Figuur 41: Principe van het K-BKZ model	10
Figuur 42: Verloon van de demningsfuncties	12
Figuur 12: Verteep van de dempingstaneties	50 51
Figure 42. Mastercurve [9]	51
i Buur II. mustereur ve [7]	52
Figuur 45: Voorbeeld wanddikte benaling [20]	52
Figuur 45: Voorbeeld wanddikte bepaling [20]	52 53 54

Figuur 47: Afbeelding op het eindproduct [20]	54
Figuur 48: T-SIM simulatie met positieve matrijs [20]	54
Figuur 49: T-SIM simulatie negatieve matrijs [20]	54
Figuur 50: Torsie rheometer [13]	57
Figuur 51: DMA rekrespons [22]	58
Figuur 52: Opslagmodulus en verliesmodulus bij verschillende frequenties [13]	59
Figuur 53: Verliesmodulus bij verschillende testtemperaturen [13]	59
Figuur 54: Selecteren van punten op de spanningsrekcurve bij gelijke rekratio	61
Figuur 55: Input punten in T-SIMFIT [19]	61
Figuur 56: Fittingsalgoritme vertrekkende van simulatie van de meetmethode waarbij de	
simulatieresultaten vergeleken worden met werkelijke resultaten [10].	62
Figuur 57: Aflezen verschuiving ten opzichte van de referentietemperatuur [9]	63
Figuur 58: Schema met de basisstappen voor een thermovormsimulatie volgens de methode van IKT.	64
Figuur 59: Principeschets testopstelling voor het bepalen van krachtverplaatsingsdata [13]	64
Figuur 60: Cirkelvormig kunststof testmateriaal op een uitgeholde stalen houder [4]	65
Figuur 61: Stalen stempel en houder van de testopstelling [4]	65
Figuur 62: kunststof proefmonster na het vervormen [4]	66
Figuur 63: Krachtverplaatsingsdata na testen op 3 verschillende snelheden [4]	66
Figuur 64: Testopstelling IKT [13]	67
Figuur 65: Krachtverplaatsingsdata bepaald door IKT	68
Figuur 66: Zwick Z050 trekbank met klimaatkast	69
Figuur 67: Verplaatsing van de trekbank in functie van de tijd	70
Figuur 68: Verplaatsing 200mm/min (3.33mm/s) gedurende één seconde	71
Figuur 69: Invloed wachttijd op spanningsrekdata	71
Figuur 70: Snelheidscurve 200mm/min (3,33mm/s) afgeleid van de verplaatsingscurve	72
Figuur 71: Tijd nodig om opgelegde snelheid te bereiken	74
Figuur 72: Trekstaafje volgens norm ISO527-2/1A [23]	75
Figuur 73: Problemen waargenomen bij standaard uniaxiale trekproef	76
Figuur 74: Foto van oorspronkelijke testopstelling met extensometers aangeduid met rode cirkels	76
Figuur 75: Krachtverplaatsingsdata gemeten volgens bovenstaande methode bij T=120°C	77
Figuur 76: Krachtverplaatsingsdata verkregen met krachtsensor van 1kN en proefmonsterdikte van 5	mm
bij T=120°C	
Figuur 77: Trekstaafie volgens norm ISO 527-2/5A [23]	79
Figuur 78: polystyreen trekstaafies volgens norm ISO527-2/5A (wit) en volgens norm ISO527-2/1A	15
(zwart)	80
Figuur 79: Proefonstelling voor het in beeld brengen van de temperatuurverdeling in de klimaatkast	
Figuur 80: Temperatuurverdeling vastgelegd met infraroodcamera	01
Figuur 81: Temperatuurmeting on het oppervlak van het trekstaafie	01
Figuur 82: Temperatuurverloop on het oppervlak van een trekstaafie tijdens opwarmen in klimaatkast	met
$T=120^{\circ}C$	83
Figuur 83: Temperatuurverloon volgens Heisler-Gröber hij de testtemperaturen	05
Figuur 84: Temperatuurverloop voigens rieisier Gröber of de testemperaturen	
Figuur 85: Temperatuurverloop bij het opwarmen tot 120°C Heisler-Gröber/gemeten	05
Figuur 86: Temperatuurverloop bij het opwarmen tot 120°C Heisler-Gröber/gemeten	05
Figuer 87: Verloon van hasistreknroef naar geontimaliseerde treknroef	00
Figuur 88: Krachtvernlaatsingsdata henaald volgens uniaviale trekproef	00
Figuer 89: Testaegevens geëxnorteerd door de trekbank	
Figur 0. Krachtvernlagtsingedata na eerste stan in het verwerkingenrogramme	00 09
r iguur 90. Kraontvorpiaatsingsuata na corste stap in net verworkingsprogramma	09

Figuur 91: Resultaat van de omrekening naar rekratio en spanning	90
Figuur 92: Spanningsrekdata berekend door het verwerkingsprogramma	90
Figuur 93: Koppels van spanning en rekratio bepaald door het verwerkingsprogramma	91
Figuur 94: Spanningsrekdata geëxporteerd door het verwerkingsprogramma	92
Figuur 95: Bel bij 131°C: hoogte 212mm	93
Figuur 96: Bel bij 129°C: hoogte 205mm	93
Figuur 97: Kracht-verplaatsing bij verschillende combinaties in breedterichting	95
Figuur 98: De richtingsafhankelijkheid van de kracht bij 110°C	96
Figuur 99: De richtingsafhankelijkheid van de kracht bij 150°C	96
Figuur 100: Spanning in functie van rekratio	97
Figuur 101: Spanning-rekratio drie herhalingen bij 110°C	98
Figuur 102: Spanning-rekratio drie herhalingen bij 150°C	98
Figuur 103: Geselecteerde spanningspunten door verwerkingsprogramma bij 110°C	99
Figuur 104: Gegevens fitting PS	100
Figuur 105: Resultaat fitting met demping en WLF-constanten	101
Figuur 106: Resultaat fitting zonder WLF-constanten	101
Figuur 107: Resultaat fitting zonder demping	102
Figuur 108: Resultaat fitting zonder demping en zonder WLF-constanten	102
Figuur 109: Resultaat fitting bij 150°C	103
Figuur 110: Materiaalfile geleverd door Accuform	104
Figuur 111: Lineair verband verplaatsing stempel in functie van de tijd	104
Figuur 112: Voorstelling biaxiale trekproef volgens Accuform [Acc]	105
Figuur 113: Krachtverplaatsingsdata bepaald door IKT voor een proefmonster PS met dikte 1mm	105
Figuur 114: Berekening rekratio bij een vervormingsweg van 40mm	106
Figuur 115: Gedeelte van de meetpunten voor de meting bij 130°C en een snelheid van 20mm/s	107
Figuur 116: Kunststofproefmonster gebruikt voor de testen door IKT	108
Figuur 117: Mogelijkheid 1 voor de afmetingen van A ₀ en L ₀	108
Figuur 118: Mogelijkheid 2 en 3 voor de afmetingen van A_0 en L_0	109
Figuur 119: Mogelijkheid 4 tot 6 voor de afmetingen van A_0 en L_0	109
Figuur 120: Spannings-rekcurves bij verschillende rekgradiënten volgens de materiaalfile van IKT	door
T-SIM bij 140°C	110
Figuur 121: Spannings-rekcurves berekend met A0 =1256 mm ² . L0=20mm door T-SIM	111
Figuur 122: Spannings-rekcurves berekend met A0 =1256 mm ² , L0=20mm (aangepaste fitting) doo	or T-
SIM	111
Figuur 123: Opstelling trekproef in T-SIM	112
Figure 124: Instelling snelheid matriis	113
Figuur 125: Temperatuurverdeling	114
Figuur 126: spanningsverdeling	114
Figuur 127: Legende snanningen	114
Figuur 128: Spanningsverloop doorheen kunststofvel	114
Figuur 129: Resultaat gesimuleerd trekproef bij 110°C	111
Figure 130: Resultant gesimuleerd trekproef bij 110 C	116
Figure 131: Resultant gesimuleerd trekproef bij 120°C	116
Figure 132: Resultant gesimuleerd trekproef bij 140°C	117
Figure 133: Resultant gesimuleerd trekproef 150°C	117
Figure 134: Gesimuleerde trekproef bij verschillende snalheden en een temperatuur van 120°C	117
Figuur 135: Gesimuleerde trekproef bij verschillende snelheden en een temperatuur van 140°C	117
Figure 126: Gesimulaarda trakproof bij verschillende enalbeden en een temperatuur van 150°C	120
Figuur 150. Gestinuteerue trekproet olj verschillende sneineden en een temperatuur van 150°C	120

Figuur 137: Spannings-rek curve van K-BKZ parameters IKT door T-SIM	121
Figuur 138: Spannings-rek curve van onze K-BKZ parameters door T-SIM	121
Figuur 139: Gesimuleerde trekproef bij 130°C met K-BKZ parameters onder verschillende richtingen	123
Figuur 140: Gesimuleerde trekproef bij 140°C met K-BKZ parameters onder verschillende richtingen	123
Figuur 141: Gesimuleerde trekproef bij 150°C met K-BKZ parameters onder verschillende richtingen	124
Figuur 142: Kunststofvel voor simulatie stempelproef	125
Figuur 143: Simulatie stempelproef	125
Figuur 144: Spanningsverdeling stempelproef	125
Figuur 145: Spanningsverloop stempelproef	126
Figuur 146: Elementen in kunststofvel bij stempelproef	126
Figuur 147: Samsonite bagagekoffer [25]	127
Figuur 148: Mannelijke matrijs voor het vormen van Samsonite kofferdeel	128
Figuur 149: Vrouwelijke matrijs voor het vormen van Samsonite kofferdeel	128
Figuur 150: Beginsituatie van thermovormsimulatie van een Samsonite kofferdeel	129
Figuur 151: Invoeren van de warmteoverdracht en wrijving tussen materiaal en mal	130
Figuur 152: Definitie van de wrijvingscoëfficiënt in T-SIM [14]	131
Figuur 153: Proefonstelling voor benaling wrijvingscoëfficiënt tussen kunststof en matriis	131
Figuur 154: Proefopstelling voor het bepalen van de wrijvingscoëfficiënt volgens norm ASTM d1894	
[26]	132
Figuur 155: Proefonstelling voor benaling wrijvingscoëfficiënt tussen kunststof en matriis m.b.v. een	102
trekbank	132
Figuur 156: Resultaten van de bepaling van de statische wrijvingskracht	133
Figuur 157: Procesdata voor het vacuüm vormen in 1 stap over mannelijke vorm	134
Figuur 158: Resultaat van de simulatie voor het vacuüm vormen in 1 stap met mannelijke vorm	134
Figuur 159: Dikteverdeling in de doorsnede volgens de groene lijn in de breedterichting	135
Figuur 160: Dikteverdeling in de doorsnede volgens de groen lijn in de lengterichting	135
Figuur 161: Dikteverdeling volgens simulaties met verschillende materiaalfiles, doorsnede in	
breedterichting	136
Figuur 162: Dikteverdeling volgens simulaties met verschillende materiaalfiles, doorsnede in	
lengterichting	136
Figuur 163: Spanningsverloop bij de gesimuleerde trekproeven bij een temperatuur van 130°C	137
Figuur 164: Elementinformatie tijdens de simulatie	138
Figuur 165: Gevolgde elementen op het kofferdeel	138
Figuur 166: De dikteverdeling volgens de snijlijn in de breedterichting met verschillende referentie	
temperaturen	140
Figuur 167: De dikteverdeling volgens de snijlijn in de lengterichting met verschillende referentie	
temperaturen	140
Figuur 168: Procesdata voor het vacuümvormen in vrouwelijke matrijs	141
Figuur 169: Resultaat van de simulatie voor het vormen in een vrouwelijke matrijs	142
Figuur 170: Dikteverdeling in de doorsnede volgens de groene lijn	142
Figuur 171: Dikteverdeling in de doorsnede volgens de groene lijn	143
Figuur 172: Dikteverdeling volgens simulaties met verschillende materiaalfiles, doorsnede in	
breedterichting	143
Figuur 173: Dikteverdeling volgens simulaties met verschillende materiaalfiles, doorsnede in	-
lengterichting	144
Figuur 174: De dikteverdeling volgens de snijlijn in de breedterichting voor verschillende	
referentietemperaturen.	144
-	

Figuur 175: De dikteverdeling volgens de snijlijn in de lengterichting voor verschillende	
referentietemperaturen	145
Figuur 176: Dikteverdeling volgens simulaties met verschillende materiaalfiles, doorsnede in de	
breedterichting	146
Figuur 177: Dikteverdeling volgens simulaties met verschillende materiaalfiles, doorsnede in de	
lengterichting	146

Abstract

Cel Kunststoffen doet onderzoek naar het thermovormen van kunststoffen. Bij de optimalisatie van een thermovormproces zijn veelal simulaties nodig. Echter, het bepalen van materiaalparameters, nodig voor een accurate simulatie, kan op dit ogenblik enkel door middel van een dure test ontwikkeld aan een Duitse universiteit. Het doel van de thesis is het ontwikkelen van een alternatieve methode voor de bepaling van de parameters aan de hand van de beschikbare apparatuur bij Cel Kunststoffen.

De in de masterproef ontwikkelde methode vertrekt van een reeks uniaxiale trekproeven bij verschillende reksnelheden en temperaturen in plaats van equibiaxiale rekproeven. Een fittingsprogramma zet de bekomen spanningsrekdata om naar materiaalparameters. Via de nieuwe en huidige methode zijn de parameters bepaald voor hetzelfde type polystyreen. Op basis van thermovormsimulaties, vertrekkende van beide parametersets, is een vergelijking gemaakt tussen de testmethodes.

Uit de vergelijking van de simulaties blijkt dat de overeenstemming van testcondities met procescondities de nauwkeurigheid sterk beïnvloed. Onze methode is beperkt in reksnelheid waardoor met deze parameters enkel accurate simulaties mogelijk zijn bij thermovormprocessen met lage reksnelheden. Zo leverden simulaties van een werkelijk product, waarin enkel lage reksnelheden optreden, met beide parametersets identieke resultaten. Door de uniaxiale trekproeven uit te voeren op een hydraulische trekbank bij hogere reksnelheden, zijn ze eventueel een evenwaardig alternatief.

Summary

Cel Kunststoffen does research on the thermoforming of thermoplastics. In the optimisation of a thermoforming process, simulations are commonly used. The determination of material parameters, necessary for an accurate simulation, at this time this is only possible by means of an expensive test developed at a German university. The goal of this thesis is the development of an alternative method for the determination of the parameters based on the equipment available at Cel Kunststoffen.

The method, developed in this thesis, is based on a series of uniaxial tensile tests at different strain rates and varying temperatures instead of biaxial tensile tests. Curve fitting software converts the tensile-strain data to material parameters. Using both the current and new method, the parameters of the same grade of polystyrene are determined. Based on thermoforming simulations, starting from both parameter sets, a comparison is made between the methods.

A comparison of simulation results shows that similarity between testing conditions and simulation conditions greatly influences the accuracy. Our method is limited in strain rate, because of this limitation it's only possible to do accurate simulations of thermoform processes with low strain rates. Thus simulations of an actual thermoform product, where only low strain rates occurred, with both parameter sets provided identical results. By executing the uniaxial tensile tests on a hydraulic tensile-strength tester at higher strain rates, it may be possible to achieve an equivalent result.

Inleiding

Situering

Het onderwerp van de masterproef is aangebracht door Cel Kunststoffen, een onderzoeksgroep van de associatie KU Leuven. Deze onderzoeksgroep is actief in het technologiecentrum te Diepenbeek en werkt, naast het onderzoek dat ze uitvoeren, nauw samen met bedrijven bij de ontwikkeling en/of optimalisatie van productieprocessen. Cel Kunststoffen is voornamelijk gespecialiseerd in spuitgieten en thermovormen. Hierbij maken ze gebruik van een uitgebreid en modern machinepark. Zo staan er bijvoorbeeld meerdere spuitgietmachines, twee extrusielijnen en een thermovormmachine. Daarnaast beschikken ze ook over een uitgebreide waaier aan laboapparatuur. In het kader van deze masterproef zal gebruik gemaakt worden van onder andere trekbanken, een infraroodcamera en een rheometer [1].



Figuur 1: Machine hal [1]

Een andere kerntaak van Cel Kunststoffen is het ondersteunen van doctoraatsonderzoeken. Momenteel loopt er één doctoraat over waterinjectie bij spuitgieten en één over parameteroptimalisatie bij thermovormen. Uit deze laatste studie is het onderwerp voor deze masterpoef voortgevloeid.

Thermovormen is de derde belangrijkste verwerkingstechniek van kunststoffen, naast spuitgieten en extrusie. Bij dit proces wordt kunststof plaatmateriaal of folie (halffabricaat) verwerkt tot een bruikbaar eindproduct. Figuur 2 toont de verschillende processtappen van het thermovormproces. In de eerste processtap wordt het halffabricaat opgewarmd tot de temperatuur nodig voor de verwerking. Deze temperatuur verschilt voor elk type kunststof (bij polystyreen ligt de verwerkingstemperatuur bijvoorbeeld tussen 130°C en 160°C). De tweede stap in het proces is het omvormen van het halffabricaat tot het gewenste eindproduct met behulp van een matrijs. Om een goede aansluiting te verzekeren tussen de kunststof de vorm overneemt van de matrijs. Wanneer het product voldoende afgekoeld is, kan het ontvormd worden uit de matrijs zonder verder te vervormen. Bekende eindproducten zijn te vinden in de verpakkingsindustrie maar het is ook mogelijk structurele onderdelen te maken. Figuur 3 en figuur 4 geven twee voorbeelden van mogelijke eindproducten.





Figuur 2: Thermovormprincipe [2]

Figuur 3: Chocoladebakje [3]



Figuur 4: Structureel onderdeel [6]

Voor het thermovormen van een product is het nodig een matrijs te vervaardigen. Een dergelijke matrijs vereist het nodige vakmanschap en dikwijls redelijk wat handenarbeid en meerdere iteraties, wat een hoge kost met zich meebrengt. Om deze reden worden er eerst simulaties uitgevoerd om latere aanpassingen aan de matrijs te vermijden. Door het iteratief uitvoeren van deze simulaties tijdens het ontwerpen van een nieuwe matrijs, is het mogelijk een matrijs te ontwerpen die met grotere zekerheid zal leiden tot een goed eindproduct. De grootste meerwaarde van thermovormsimulatie bestaat erin dat de wanddikte van het eindproduct op elke plaats in het product berekend wordt. Deze wanddikte is op zijn beurt verantwoordelijk voor een groot deel van de mechanische eigenschappen van het eindproduct.

Probleemstelling

Het principe van thermovormen berust op het vervormen van kunststoffen wat enkele moeilijkheden met zich meebrengt doordat er een sterke afhankelijkheid is van het type kunststof, de temperatuur en de vervormingssnelheid. Daarnaast zijn kunststoffen niet-lineair visco-elastisch.

Wanneer een simulatie wordt uitgevoerd moet ze rekening houden met al de voorgaande factoren. Daarom is het nodig de simulatie te baseren op een wiskundig model dat correct het materiaalgedrag kan beschrijven. Eén van die modellen is het K-BKZ model. Dit model werkt op basis van een aantal relaxatiemoduli met bijhorende relaxatietijden, constanten voor tijd-temperatuur superpositie en dempingsconstanten. (een gedetailleerde beschrijving van het model is terug te vinden in hoofdstuk 2.1)

Om een nauwkeurige simulatie te bekomen is het belangrijk dat de parameters die nodig zijn in het K-BKZ model nauwkeurig bepaald zijn. De test die momenteel wordt aangeraden door de ontwikkelaar van de simulatiesoftware T-SIM, werd ontwikkeld door een Duits onderzoekscentrum (IKT: Institut für Kunststofftechnik). Deze test vereist specifiek daarvoor ontwikkelde testapparatuur, bestaande uit een hydraulische trekbank voorzien van een klimaatkast, die niet aanwezig is in Cel Kunststoffen. Cel Kunststoffen is bijgevolg verplicht, indien ze accurate thermovormsimulaties willen uitvoeren, om teststalen op te sturen naar het Duitse onderzoekscentrum om daar de parameters te laten bepalen. De kosten voor deze parameterbepaling liggen om en bij de 2000 euro per materiaal. Vermits kleine variaties in het materiaal leiden tot verschillen in de parameters nodig voor het K BKZ model, is het dus noodzakelijk om voor elke materiaalgrade een nieuwe test uit te voeren wat zeer hoge kosten met zich meebrengt.



Verstärker Oszilloskop Probe Probe Probe Heizkammer Heizkammer

Figuur 6: Schematische voorstelling van de opstelling [13]

Figuur 5: Opstelling voor het bepalen van materiaalparameters (IKT) [13]

Doelstelling

De hoofddoelstelling van de masterproef is het ontwikkelen van een testmethode waarbij men de materiaalparameters die nodig zijn voor accurate thermovormsimulaties gebaseerd op het K-BKZ model kan uitvoeren met beschikbare apparatuur in Cel Kunststoffen. De ontwikkelde testmethode is succesvol wanneer het parameters kan opleveren waarvan de resultaten tot maximaal $\pm 5\%$ afwijking vertonen ten opzichte van resultaten bekomen met de IKT-parameters. Het is nodig de voorgestelde methode voor het bepalen van de parameters nadien te valideren door een simulatie uit te voeren met de bekomen parameters en het gesimuleerde resultaat te vergelijken met experimentele resultaten.

Methode

De huidige methode om de materiaalparameters te bepalen gebruikt spanningsrekdata afkomstig van equibiaxiale trektesten uitgevoerd door het IKT. Via het software programma T-SIMFIT worden de spanningsrekdata nadien gefit om zo K-BKZ parameters te bekomen. Deze biaxiale trekproeven gebeuren bij een combinatie van drie temperaturen en drie reksnelheden. Om goede resultaten te bekomen liggen deze temperaturen best zo dicht mogelijk rond de verwerkingstemperatuur van het thermovormproces. Momenteel gebeuren de trekproeven met apparatuur uit het Duitse onderzoekscentrum die equibiaxiale stempelproeven kan uitvoeren bij snelheden tot 500 mm/s. Hoge snelheden zijn gewenst omdat het thermovormproces ook hoge reksnelheden kan veroorzaken. Onder een equibiaxiale trekproef verstaan we een trekproef waarbij de kunststof gelijktijdig in twee richtingen wordt getrokken. Dat wordt verkregen door met een stempel op een kunststof proefmonster te drukken.

In deze masterproef zal er gewerkt worden met een trekbank van Cel Kunststoffen. De maximum snelheid van deze trekbank is echter beperkt tot 8.33 mm/s in tegenstelling tot de 500 mm/s gehaald met de apparatuur van het IKT. Onderzoek is nodig om de invloed van dit grote verschil in snelheid in kaart te brengen. Indien het snelheidsverschil tot een te grote afwijking leidt, is het nodig een manier te zoeken om de snelheid van de trekbank te verhogen.



Figuur 7: Trekbank Cel kunststoffen

Voor de uitwerking van de eigen methode zijn we uitgegaan van het KISS-principe (Keep It Simple Stupid) wat betekent dat we vertrekken van de eenvoudigst mogelijke oplossing. Met dit principe in het achterhoofd zijn er drie mogelijke methodes.

De voor de hand liggende eerste methode bestaat erin om zuiver uniaxiale trekproeven uit te voeren bij de snelheden die de beschikbare trekbank aankan. Net zoals bij de test van het IKT wordt er gewerkt met drie verschillende temperaturen en drie verschillende snelheden. De temperaturen verkrijgen we aan de hand van een klimaatkast die rond de trekbank geschoven wordt. Deze klimaatkast laat temperaturen toe tussen -80°C en 240°C.

Voor de start van de eigenlijke trekproeven is het belangrijk enkele kenmerken van de trekbank te bepalen. Zo is het belangrijk te weten of de ingestelde snelheid ook werkelijk bereikt wordt en na hoeveel tijd deze bereikt wordt (m.a.w. snelheidsgradiënt). In het ideale geval zou de snelheid vanaf tijdstip nul gelijk zijn aan de ingestelde snelheid. Realistisch is dat echter niet aangezien er altijd een bepaalde tijd nodig is voor een versnelling. Een uniforme snelheid gedurende de volledige test is een vereiste aangezien de berekening van de parameters tijdsafhankelijk is, we zullen het verloop van de snelheid dan ook moeten onderzoeken. Omdat de temperatuur een tweede belangrijke factor is bij het bepalen van de parameters zijn we geïnteresseerd in het opwarmgedrag van de kunststof in de klimaatkast. Ten eerste is het belangrijk te weten of de opwarming van de kunststof uniform is. Ten tweede is het nodig te weten wanneer de kerntemperatuur van de kunststof de oventemperatuur bereikt. Resultaten van empirische berekeningen zullen vergeleken worden met effectieve metingen waarbij de kerntemperatuur met een thermokoppel gemeten wordt in functie van de tijd.

Verder zijn eigenschappen van een geëxtrudeerde plaat afhankelijk van de richting waarop ze gemeten worden ten opzichte van de extrusierichting van de plaat. Deze richtingsafhankelijkheid, anisotropie genaamd, wordt veroorzaakt doordat een kunststof op microscopisch vlak uit lange ketens bestaat (polymeerketens), die normaal een willekeurig oriëntatie hebben maar door het extrusieproces een voorkeursoriëntatie aannemen. Bij een equibiaxiale trekproef wordt deze anisotropie mee in rekening gebracht doordat er gelijktijdig in beide richtingen getrokken wordt. Bij de uniaxiale trekproef is dat niet het geval en moet worden nagegaan welke richting de resultaten oplevert die het meest overeenkomen met de resultaten bekomen met de parameters van het IKT.

Wanneer het niet mogelijk is om met de uniaxiale trekproeven de gewenste nauwkeurigheid te bereiken zullen we overgaan tot een tweede methode waarbij een tool ontworpen wordt die het mogelijk maakt om met de huidige trekbank toch een equibiaxiale trekproef uit te voeren. Deze tool kan gerealiseerd worden met een ringvormige klem en bijpassende stempel.

Een derde en laatste methode is gebaseerd op reverse engineering waarbij we vertrekken vanuit het productieproces. Om het bij thermovormen makkelijker te maken om een product te vormen over een mannelijke matrijs (positieve matrijs), kan de thermovormmachine het verwarmde vel kunststof voorblazen tot een bel. De reden voor dit voorblazen is om een betere materiaalverdeling in het eindproduct te verkrijgen. Deze bel kan tevens gesimuleerd worden met simulatiesoftware en is afhankelijk van het tijdstip, de druk en de temperatuur. We vertrekken vanuit de hoogte van de bel, gecreëerd door de thermovormmachine, onder verschillende omstandigheden van tijd, temperatuur en druk. Die gaan we vervolgens proberen na te bootsen met een simulatie door aanpassing van de verschillende materiaalparameters. Wanneer de simulatie exact overeenkomt met de werkelijkheid, nemen we aan dat de materiaalparameters correct gekozen zijn. Deze set parameters kan dan gebruikt worden voor verdere thermovormsimulaties.



Figuur 8: Het blazen van een bel

Zowel de zelf bekomen parameters als de parameters bepaald door het IKT worden gebruikt om het thermovormen van een complexer stuk te simuleren. De voorspelde dikteverdelingen doorheen het product worden vergeleken met experimentele resultaten voor de validatie van de materiaalparameters.

1 Thermovormen

1.1 Inleiding

Thermovormen is in essentie een term die duidt op verschillende technieken om bruikbare kunststof producten te produceren vertrekkende van plaatmateriaal of folie (halffabricaat). Het thermovormproces bestaat uit drie basisstappen die steeds terug te vinden zijn in het productieproces. Oorspronkelijk werd dit volledige proces handmatig uitgevoerd maar ook binnen het thermovormen heeft de tijd niet stilgestaan. In de meer geavanceerde vorm zal het volledige proces dan ook automatisch verlopen. De drie basisstappen in het thermovormen zijn weergegeven op onderstaande figuur.



Figuur 9: Basisstappen in het thermovormproces

Als eerste stap wordt het ingeklemd plaatmateriaal opgewarmd tot op de verwerkingstemperatuur. Deze temperatuur verschilt voor elk type kunststof (bij polystyreen bijvoorbeeld ligt de verwerkingstemperatuur tussen 130°C en 160°C). De hierop volgende stap is het vormen van het product rond een mal. De derde stap is het afkoelen en uitharden waarna het product uit de matrijs verwijderd wordt. Een extra stap, toegepast in de meeste processen, is het afknippen van het overtollige plaatmateriaal. Dat alles gebeurt in het moderne thermovormproces op een geautomatiseerde thermovormmachine [7].

Thermovormen vertrekt altijd van een halffabricaat namelijk een geëxtrudeerde kunststofplaat of folie. Het onderscheid tussen plaatmateriaal en folie gebeurt op basis van de dikte. Men spreekt van een dun kunststof vel wanneer het eindproduct flexibel, en dus geen structureel onderdeel is. Een voorbeeld hiervan is de verpakking van pralines afgebeeld in figuur 10. Een dikker halffabricaat vormt de basis voor het produceren van structurele onderdelen zoals het dak van een tractor dat voorgesteld is in figuur 11 [7].



Figuur 10: Chocoladebakje [3]



Figuur 11: Structureel onderdeel [6]

Het halffabricaat is niet beperkt tot één bepaald type kunststof. De belangrijkste thermovorm kunststoffen en de overeenkomstige afkorting zijn opgesomd in tabel 1.

Tabel 1: Belangrijke kunststoffen bij het thermovormen [8]

Plastics material	Symbols acc. to ISO
(Standard)-polystyrene	PS
Impact resistant polystyrene	SB, HIPS
Styrene-butadiene-styrene	SBS
Orientated polystyrene sheet	OPS, BOPS
Polystyrene-foamed sheet	EPS, XPS
Styrene-acrylonitrile	SAN
Acrylonitrile-butadiene-styrene	ABS
Acrylonitrile-styrene-acrylic ester	ASA
Unplasticized polyvinyl chloride	PVC-U
Platicized polyvinyl chloride	PVC-P
Foamed polyvinyl chloride sheet	EPVC
High-density polyethylene	HDPE
Low-density polyethylene	LDPE
Foamed polyethylene sheet	EPE
Polypropylene	РР
Foamed polypropylene sheet	EPP
Polymethyl methacrylate	PMMA
Polyoxymethylene	POM
Polyacetal	
Polycarbonate	PC
Foamed polycarbonate sheet	EPC
Polyester carbonate	PEC
Polyphenylene ether	РРЕ
Polyamide	РА
Polyethylene terephthalate	PET
Foamed Polyethylene terephthalate sheet	EPET
Polysulfone	PSU
Polyether sulfone	PES
Polyphenylene sulfide	PPs
Acrylonitrile/metacrylate/butadiene	A/MMA/B
Cellulose acetate	CA
Cellulose acetate butyrate	CAB
Cellulose diacetate	CdA
Polyetherimide	PEI
Thermoplastic elastomers	TPE
Thermoplastic polyolefines	ТРО

1.2 Geschiedenis

Het gebruiken van thermovormen als productietechniek is terug te traceren tot in de prehistorie. In deze periode werd keratine, een component in schildpadhuizen, hoeven en hoorns, opgewarmd in kokend water en nadien zo gevormd zodat ze bruikbaar waren als recipiënten voor voedsel en water. Een ander natuurlijk polymeer, cellulose, dat we terugvinden in boomschors werd rond deze tijd ook op eenzelfde manier gebruikt.

De moderne technieken voor het thermovormen werden pas ongeveer 60 jaar geleden ontwikkeld. In deze periode was de productie vooral bedoeld voor militaire doeleinden. Het was pas enkele jaren later dat de verpakkingsindustrie het proces overnam en het thermovormen zo de belangrijkste verwerkingstechniek werd binnen deze sector [7].

1.3 Methodes van vormen

Zoals al eerder vermeld is thermovormen in zijn simpelste vorm het rekken van een verwarmd kunststofvel in een uiteindelijke vorm. Om de gewenste vorm te verkrijgen gebeurt het rekken rond een nauwkeurig geproduceerde matrijs. Een matrijs kan uit verschillende materialen van hout tot aluminium geproduceerd worden. Wanneer het verwarmde, rubberachtige kunststof vel het oppervlak van de matrijs raakt zal het afkoelen en stoppen met rekken zodat het de vorm van de matrijs zal overnemen. Dat proces is afgebeeld op figuur 12.



Figuur 12: Wanddikte variatie bij het vormen van een eenvoudig product [7]

In het uiteindelijke product zal de wanddikte groter zijn daar waar het vel het snelste de matrijs raakt en dunner waar het als laatste raakt en dus later zal afkoelen en stoppen met rekken. Dat is dan ook duidelijk te zien op bovenstaande figuur waar het materiaal dunner wordt naarmate het dieper in de vorm zakt.

Om ervoor te zorgen dat het product de gewenste vorm aanneemt zijn er verschillende methodes ontwikkeld. Deze methodes zijn onderverdeeld in verschillende groepen aan de hand van de stappen nodig om het product te vormen nadat het tot op de gewenste temperatuur is opgewarmd [7].

1.3.1 Vormen in 1 stap

Binnen deze methode zijn er nog eens minstens 5 van elkaar verschillende processen:

- positief vormen,
- vacuüm vormen,
- druk vormen,
- vrij blazen,
- gelijke matrijs vormen [7].

1.3.1.1 Positief vormen

Het verwarmde kunststofvel zal ofwel over de mannelijke vorm zakken of de vorm zal in het vel gedrukt worden. Het gedeelde dat dan al in contact staat met de vorm zal niet verder rekken. De lucht die gevangen zit tussen het vel en de vorm moet kunnen ontsnappen wanneer de vorm verder het materiaal in gedrukt wordt. Het drukverschil nodig om het vel nauw te laten aansluiten met de vorm kan gecreëerd worden door een vacuüm aan te leggen tussen het vel en de vorm of door een overdruk boven het vel. Onderstaande figuur geeft dit proces weer [7].



Figuur 13: Positief vormen op een mannelijke vorm [7]

Een product gemaakt volgens dit proces zal een dikke bodem hebben en dunne zijwanden. In dit geval zullen de binnenmaten van het product nauwkeuriger zijn dan de buitenmaten. Deze techniek krijgt naast de naam positief vormen ook wel eens de naam mannelijk vormen [7].

1.3.1.2 Vacuüm vormen

Het verwarmde kunststof vel wordt op de rand van een vrouwelijke vorm geklemd. Het aangelegde vacuüm tussen het vel en de vorm zorgt voor een drukverschil dat het vel tegen het oppervlak van de vorm aandrukt. Onderstaande figuur toont dit proces [7].



Figuur 14: vacuüm vormen in een negatieve of vrouwelijke vorm [7]

Het resultaat is nu een product met een dikke rand en het dunste punt gelegen in de onderste hoeken. Het is ook duidelijk dat in dit geval de buitenmaten van het product nauwkeuriger zullen zijn dan de binnenmaten. Deze techniek wordt naast vacuüm vormen ook negatief of vrouwelijk vormen genoemd [7].

1.3.1.3 Druk vormen

Deze techniek is vergelijkbaar met het vacuüm vormen. Het drukverschil nodig om het vel tegen het oppervlak van de vorm te drukken wordt hier echter niet door een vacuüm gecreëerd maar door een hoge druk aan te leggen boven het vel. Hiervoor is wel een drukkamer boven de vorm nodig [7].

1.3.1.4 Vrij blazen

Bij deze techniek zal het verwarmd kunststofvel ingeklemd worden aan de randen en onder invloed van een hogere druk aan de onderkant van het vel rekken. We verkrijgen dan een vrij gevormd product zoals afgebeeld in figuur 15 [7].



Figuur 15: Vrij vormen van een kunststof product [7]

Het is mogelijk om met behulp van deze methode gecontroleerd een bel te blazen door de hoogte te controleren met een lichtsensor [7].

1.3.1.5 Gelijke matrijs vormen

Dit volgende proces is ideaal voor het vormen van relatief stijve polymeren zoals polystyreen schuim. Het proces is schematisch weergegeven in figuur 16 [7].



Pressure Applied to Shape Part

Figuur 16: Product gevormd met passende matrijshelften [7]

De eerste stap is het klemmen van het verwarmde kunststofvel tussen de twee matrijshelften. Wanneer de matrijshelften sluiten zal het aangelegde vacuüm in het vrouwelijke gedeelte van de matrijs een goede aansluiting met het vel garanderen. De wanddikte van het product is afhankelijk van de tolerantie tussen de twee matrijshelften [7].

1.3.2 Vormen in 2 stappen

Vormen in meerdere stappen is oorspronkelijk ontwikkeld voor het produceren van producten met een relatief grote wanddikte en een complexe vorm. Dat omdat de dikteverdeling bij dit soort stukken van groot belang is op gebied van kosten- en sterkteberekening. Door een proces met meerdere stappen te gebruiken, is het mogelijk de dikteverdeling beter onder controle te houden. Pas sinds 1970 is deze techniek ook toegepast voor producten met een dunne wand [7].

Het proces van vormen in 2 stappen vertoont nog steeds grote gelijkenissen met het vorige proces met als enige verschil dat als extra stap na het verwarmen van het kunststofvel het ook al gerokken wordt voor het eigenlijke vormen. Die extra stap noemt men het voorrekken [7].

Het voorrekken kan op twee manieren gebeuren. Een eerste manier is door een stempel in het kunststofvel te duwen. De tweede manier is het voorblazen van het vel waar het zal rekken door een drukverschil aan te leggen tussen boven en onderzijde van het vel [7].
1.3.2.1 Thermovormen met stempel

Van beide methoden voor het voorrekken zijn er weer verschillende technieken die worden toegepast. De meest voorkomende vorm van thermovormen met stempel is het vacuüm vormen met een vrouwelijke matrijs zoals te zien in figuur 17. Twee andere mogelijke technieken zijn het vormen met een ringstempel te zien in figuur 18 en het vormen met een stempel over een mannelijke vorm voorgesteld in figuur 19 [7].



Plug Moving Into Hot Sheet Plug Bottoming Out

Figuur 17: Thermovormen met stempel [7]

Wanneer de stempel in het vel beweegt zal het uniform gaan rekken wat leidt tot een uniforme dikteverdeling. Nadien duwt de stempel het vel tot op de bodem waarna een drukverschil, doormiddel van een vacuüm, voor een goede aansluiting met de matrijs zorgt [7].



Vacuum/Pressure Forming

Figuur 18: Thermovormen met een ringstempel [7]

Het enige verschil tussen deze techniek en de vorige is dat er hier geen gebruik wordt gemaakt van een vacuüm om de aansluiting van het vel met de matrijs te voorzien. In dit geval zorgt een luchtstroom door de stempel voor het nodige drukverschil [7].



Figuur 19: Thermovormen met een stempel over een mannelijke matrijs [7]

In dit geval zal het kunststof vel over de mannelijke matrijs zakken en zullen individueel bewegende stempels zorgen voor een goede aansluiting met de mal. Dit wordt zelden gedaan enkel wanneer er moeilijke driedimensionale hoeken zijn in een product of wanneer er insneden zijn. Het vel kan op deze manier in elke vorm geduwd worden [7].

1.3.2.2 Thermovormen met voorblazen

Ook hier bestaan er weer verschillende toegepaste technieken. Een eerste techniek is het thermovormen met een mannelijke vorm en voorblazen zoals getoond in figuur 20. De tweede is wanneer er gebruik wordt gemaakt van een vrouwelijke mal zoals afgebeeld in figuur 21 en een derde waar de bel door middel van een vacuüm gevormd is zoals voorgesteld in figuur 22 [7].



Figuur 20: Thermovormen met een mannelijke vorm en voorblazen [7]

Nadat de mannelijke matrijs in de bel geduwd is, zorgt een overdruk voor het vormen van het uiteindelijke product.



Figuur 21: Thermovormen met een vrouwelijke matrijs en voorblazen [7]

In dit geval is er een zeer snelle omschakeling nodig tussen de hoge druk die ervoor gezorgd heeft dat de bel de gewenste hoogte bereikte en een vacuüm om het vel op de vrouwelijke matrijs te laten aansluiten.



Figuur 22: Thermovormen met voorblazen d.m.v. een vacuüm [7]

Deze methode vormt een bel in de vacuümkamer waarna de stempel de bel omlaag zal duwen. De vorming rond de matrijs gebeurt door het omschakelen van een vacuüm naar een overdruk. Dat geeft zoals al de bovenstaande methodes van vormen in 2 stappen een uniformere dikteverdeling ten opzichte van het vormen in 1 stap [7].

1.3.3 Vormen in meerdere stappen

Een combinatie van het vervormen met stempel en het vervormen met voorblazen kan leiden tot producten met een unieke dikteverdeling. Hoe deze processen er dan kunnen uitzien is afgebeeld op figuur 23 en figuur 24 [7].



Figuur 23: Thermovormen met stempel en voorblazen volgens het principe van vacuümvormen [7]

Na het voorblazen zakt een stempel in de bel om zo een specifieke dikteverdeling te verkrijgen. De uiteindelijke vorming wordt gerealiseerd volgens het principe van vacuümvormen [7].



Figuur 24: Thermovormen met stempel en voorblazen met een mannelijke vorm [7]

In dit geval is er slecht een klein verschil met het vorig beschreven proces. De stempel is nu ook de matrijs waar het product rond zal vormen in de laatste stap.

2 Simuleren van thermovormprocessen

Het simuleren van een thermovormproces is niet eenvoudig doordat kunststoffen een niet-lineair viscoelastisch gedrag vertonen. Een visco-elastisch materiaal gedraagt zich zowel zuiver elastisch als zuiver visceus waardoor simulaties gebaseerd op een elastisch model slechte resultaten geven. De reden hiervoor is terug te vinden in het verschil tussen de eigenschappen van een elastisch, visceus en visco-elastisch materiaal [9,10].

De wet van Hooke beschrijft het gedrag van een zuiver elastisch materiaal.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{1}$$

De spanning (σ) is recht evenredig met de aangelegde rek (ϵ) volgens de evenredigheidsfactor *E* genaamd de elasticiteitsmodulus. Het mechanisch analogon voor een elastisch materiaal is een veer [9]. Figuur 25 toont het verloop van de spanning in functie van de tijd tijdens het uitrekken van een elastisch materiaal tot een bepaalde rek.



Figuur 25: Respons van een elastisch materiaal op trekproef [9]

Beide nemen eerst lineair toe en nadien lineair af. De grootte van de spanning is afhankelijk van de elasticiteitsmodulus volgens de wet van Hooke (vergelijking 1). Figuur 26 toont het spanningsverloop in functie van de rek.



Figuur 26: Spanningsverloop in functie van de rek [9]

Uit de figuur is af te leiden dat het spannings-rekverloop voor het belasten en ontlasten van het materiaal langs dezelfde weg plaatsvindt waardoor de energie nodig voor het belasten bij het ontlasten terug vrijkomt zodat de uiteindelijke energiedissipatie nul is. Om het tijdsafhankelijk gedrag van een elastisch materiaal duidelijk te maken, bestuderen we de respons op een constante rekexcitatie en een constante spanningsexcitatie [9]. Figuur 27 toont deze excitaties met bijhorende respons.



Figuur 27: Respons op een constante rekexcitatie en constante spanningsexcitatie [9]

Op de figuur is te zien dat de respons bij beide excitaties hetzelfde verloop kent als de excitatie met een waarde gegeven door de wet van Hooke (vergelijking 1). De conclusie hieruit is dat de spanning en de rek voor een elastisch materiaal onafhankelijk van de tijd zijn [9].

De wet van Newton beschrijft het gedrag van een zuiver visceus materiaal.

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon} \tag{2}$$

Deze wet stelt dat de spanning afhankelijk is van de reksnelheid ($\dot{\varepsilon}$) en de viscositeit (η). Voor een Newtoniaanse vloeistof zoals water neemt de viscositeit een constante waarde aan afhankelijk is van de temperatuur. Een hogere temperatuur zorgt voor een lagere viscositeit en dus een lagere spanning. Het mechanisch analogon voor een visceus materiaal is een demper [9]. Figuur 28 toont het verloop van de spanning in het materiaal belast met een constante reksnelheid.



Figuur 28: Respons van een visceus materiaal op een trekproef [9]

In tegenstelling tot het elastisch materiaal vertoont de spanning niet hetzelfde verloop als de rek. De spanning blijft constant gedurende het belasten en met een waarde bepaald door de viscositeit en de opgelegde reksnelheid (vergelijking 2). Tijdens het ontlasten van het materiaal neemt de spanning een negatieve maar opnieuw constante waarde aan [9]. Figuur 29 toont het verloop van de spanning in functie van de aangelegde rek.



Figuur 29: Spanningsverloop in functie van de rek [9]

Ditmaal gebeurt het belasten en het ontlasten niet volgens dezelfde weg. Zowel het belasten als het ontlasten vragen een hoeveelheid energie. De totale toegevoerde energie is dus niet nul voor een visceus materiaal wat ook af te leiden is uit de oppervlakte gelegen tussen beide curves [9]. Ook hier wordt het tijdsafhankelijk gedrag bestudeerd aan de hand van een constante rekexcitatie en een constante spanningsexcitatie getoond op figuur 30.



Figuur 30: Respons op een constante rekexcitatie en constante spanningsexcitatie [9]

In tegenstelling tot een elastisch materiaal is de spanning bij een visceus materiaal afhankelijk van de reksnelheid, bij constant blijvende rek is er geen spanning. Enkel tijdens het opkomen en wegvallen van de rek is er een reksnelheid wat in de spanningsrespons terug te vinden is als een positieve en negatieve piek. Een constante spanningsexcitatie zal volgens de wet van Newton leiden tot een constante reksnelheid waardoor de rek in functie van de tijd toeneemt totdat de spanning verwijderd wordt. Volgens de wet van Newton is de reksnelheid op dat moment gelijk aan nul waardoor het materiaal een blijvende deformatie blijft vertonen. Het is duidelijk dat de spanning en rek bij een visceus materiaal een tijdafhankelijk gedrag vertonen [9].

Een visco-elastisch materiaal vertoont zowel elastische als viskeuze eigenschappen. Figuur 31 geeft het verloop van de spanning weer in een visco-elastisch materiaal achtereenvolgens belast en ontlast met een constante reksnelheid.



Figuur 31: Respons van een visco-elastisch materiaal op een trekproef [9]

Tijdens het belasten neemt de spanning in eerste instantie, net zoals bij een elastisch materiaal, lineair toe. Naarmate de rek toeneemt wordt de spanningscurve steeds vlakker waardoor het meer aansluit bij het gedrag van een visceus materiaal. Tijdens het ontlasten is het duidelijk dat de spanning niet dezelfde weg volgt als bij het belasten wat wijst op een energiedissipatie overeenkomstig met het oppervlak tussen de curves. Doordat het materiaal slechts gedeeltelijk visceus is, zal er slechts een gedeeltelijke energiedissipatie plaatsvinden. De helling van de spanningscurve zal toenemen naarmate de aangelegde reksnelheid stijgt. Bij stijgende reksnelheid zal bij een visco-elastisch materiaal de optredende spanning groter zijn [9].

Figuur 32 toont de rekrespons bekomen na een constante spanningsexcitatie.



Figuur 32: Rekrespons op een constante spanningsexcitatie [9]

Vlak na het aanbrengen van de spanning vertoont het materiaal een elastische respons waardoor de rek onmiddellijk toeneemt. In tegenstelling tot een elastisch materiaal zal een visco-elastisch materiaal verder deformeren tot het verwijderen van de aangelegde spanning. Dit verschijnsel noemt kruip. Een viscoelastisch materiaal heeft dus net zoals een visceus materiaal een tijdsafhankelijk gedrag. Na het verwijderen van de spanning is in eerste instantie opnieuw een elastische respons zichtbaar waarna de rek in functie van de tijd zal afnemen en waarna er eventueel een restvorming (ε_{pl}) zal overblijven [9]. Figuur 33 toont de spanningsrespons van een visco-elastisch materiaal op een constante rekexcitatie.



Figuur 33: Spanningsrespons op een constante rekexcitatie [9]

Na het aanleggen van de rek is een elastische respons te zien aan de spanning die onmiddellijk toeneemt. Nadien zal de spanning terug afnemen, een verschijnsel dat spanningsrelaxatie noemt. Bij het verwijderen van de rek is de spanning negatief (drukkracht) om het materiaal terug te drukken naar rek nul. Nadien relaxeert het materiaal weer tot de spanning terug nul is [9].

Een kunststof is een visco-elastisch materiaal en voldoet dus aan de hiervoor beschreven eigenschappen. Er is echter nog een onderscheid tussen een lineair en een niet-lineair visco-elastisch materiaal. Bij een lineair materiaal is de respons van het materiaal altijd proportioneel met de excitatie. Dat wil zeggen dat wanneer de grootte van de excitatie verdubbelt, dezelfde verdubbeling terug te vinden is bij de respons. Bij een niet-lineair materiaal is dat niet het geval. Met een kruipexperiment is eenvoudig te bepalen of het materiaal een lineair of een niet-lineair gedrag heeft. Een kruipexperiment bestaat uit het aanleggen van een bepaalde, constante, spanning op het materiaal en de hierbij horende rek doorheen de tijd op te meten [9]. Figuur 34 toont een kruipexperiment uitgevoerd bij verschillende spanningen.



Figuur 34: Kruipexperiment [9]

Wanneer we op deze grafieken een tijdstip kiezen en bij iedere spanning op dit tijdstip de bijhorende rek aflezen en de spanning uitzetten in functie van de rek bekomen we de grafiek uit figuur 35.



Figuur 35: Kruipisochronen [9]

Deze curves zijn kruipisochronen (samengevoegde punten van gelijke tijd) en aan de hand van deze curves is te zien of het materiaal lineair is of niet. Voor een lineair visco-elastisch materiaal zijn de kruipisochronen namelijk perfect lineair. Bij kunststoffen is dat bijna nooit het geval, zij hebben eerder curves zoals op de tweede figuur. In processen waar de vervormingen klein zijn, is het mogelijk een niet-lineair materiaal lineair te benaderen. Dat is te zien aan de kruipisochronen van een niet-lineair materiaal die over een klein bereik lineair lopen. Thermovormen veroorzaakt echter grote vervormingen waardoor deze benadering niet opgaat [9, 13].

We concluderen dat er voor simulaties betreffende het thermovormen van kunststoffen het onmogelijk is gebruik te maken van elastische modellen doordat een kunststof visco-elastisch is. In tegenstelling tot een elastisch model zal het bij een visco-elastisch model nodig zijn rekening te houden met de tijd, de temperatuur en de vervormingssnelheid. De temperatuurafhankelijkheid is gevolg van de viscositeit die in waarde verschilt naarmate de temperatuur varieert. Doordat het materiaal bij thermovormen grote vervormingen ondergaat is het nodig een niet-lineair model te gebruiken.

2.1 K-BKZ model

Het uitvoeren van realistische simulaties vraagt een niet-lineair tijdsafhankelijk visco-elastisch model zoals het K-BKZ model (Kay - Bernstein, Kearsly en Zapas) voorgesteld door Kaye [11] en Bernstein [12]. Het model werd door Wagner [15] geformuleerd met volgende tijdsafhankelijke integraal.

$$\hat{\sigma}(t) = \int_{-\infty}^{t} \mu(t - t') \cdot h(I_1, I_2) \cdot \hat{B}(t, t') dt'$$
(3)

Hierin is $\hat{\sigma}(t)$ de spanningstensor (een matrix van de spanningen in de verschillende richtingen), $\mu(t - t')$ de visco-elastische geheugenfunctie, $h(I_1, I_2)$ de dempingsfunctie afhankelijk van de twee rekinvarianten (I_1, I_2) en $\hat{B}(t, t')$ de rektensor. Op het tijdstip *t* berekent de integraal de spanningstensor, *t'* is de variabele van de integraal. Temperatuureffecten brengt tijd-temperatuur superpositie in rekening door het toepassen hiervan op de materiaalparameters van het model [10, 13, 14, 15, 16, 17].

2.1.1 Rektensor

De rektensor is een matrix die de rekratio's in de lengte-, breedte- en dikterichting weergeeft.

$$\hat{B}(t) = \begin{pmatrix} \lambda^2(t,t') & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^{2m}(t,t') & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^{-2(m+1)}(t,t') \end{pmatrix}$$
(4)

Hierin staat λ voor de rekratio die gedefinieerd is als de verhouding van de ogenblikkelijke lengte tot de beginlengte. Omwille van de tijdsafhankelijke integraal dienen de rekratio's in functie van de tijd geschreven te worden. Het K-BKZ model gaat uit van een exponentieel verloop van de verlenging doorheen de tijd waardoor $\lambda(t, t')$ als volgt geschreven wordt.

$$\lambda(t,t') = e^{\alpha_0(t-t')}$$

$$\alpha_0 = \frac{v}{l_0}$$
(5)
(6)

Hierin staat v voor de verlengingssnelheid en l_0 voor de beginlengte [10, 13, 14, 19].

De parameter m is afhankelijk van het vervormingstype opgelegd aan het testmonster.

Tabel 2: m-waarde voor verschillende vervormingstypes [10, 13, 14]

m-waarde	Vervormingstype	
-0.5	Uniaxiaal	
1	Biaxiaal	
0	vlak	

Dit model veronderstelt dat het volume constant blijft, dat wil zeggen dat het materiaal onsamendrukbaar is. Hiertoe moet het product van de rekratio's in de drie hoofdrichtingen steeds gelijk aan één te zijn. De overige hoofdrichtingen compenseren steeds een toename van de rek in de ene hoofdrichting. De mate waarin de overige hoofdrichtingen bijdragen tot deze compensatie is afhankelijk van het type deformatie. De parameter *m* bepaalt in het K-BKZ model het type vervorming. Dat het K-BKZ model een model is dat rekening houdt met een constant volume kan aangetoond worden door in de rektensor, voor ieder deformatietype, een waarde voor de parameter *m* in te vullen en nadien het product te maken van de rekratio's in de verschillende hoofdrichtingen. Als voorbeeld zijn de parameters *m* uit tabel 2 ingevuld.

 $Uniaxiaal: \lambda^{2}(t,t') \cdot \lambda^{2m}(t,t') \cdot \lambda^{-2(m+1)}(t,t') = \lambda^{2}(t,t') \cdot \lambda^{-1}(t,t') \cdot \lambda^{-1}(t,t') = 1$ (7)

Biaxiaal:
$$\lambda^{2}(t,t') \cdot \lambda^{2m}(t,t') \cdot \lambda^{-2(m+1)}(t,t') = \lambda^{2}(t,t') \cdot \lambda^{2}(t,t') \cdot \lambda^{-4}(t,t') = 1$$
 (8)

$$Planair: \lambda^{2}(t,t') \cdot \lambda^{2m}(t,t') \cdot \lambda^{-2(m+1)}(t,t') = \lambda^{2}(t,t') \cdot \lambda^{0}(t,t') \cdot \lambda^{-2}(t,t') = 1$$
(9)

Door bovenstaande formules te koppelen aan de schematische voorstelling van de verschillende vervormingstypes uit figuur 36 is het mogelijk de verschillende waardes van de parameter *m* te verklaren.



Figuur 36: Schematische voorstelling van de vervormingstypes [13]

Bij een uniaxiale deformatie rekt het materiaal slechts in één richting uit, in de overige twee richtingen is het materiaal vrij te vervormen (figuur 36, geval a). De som van de rekken in deze richtingen is gelijk aan de rek in de richting van belasting. Hetzelfde is terug te zien aan de exponenten wanneer bij het invullen van de parameter m, voor het uniaxiale geval, in de formules voor de verschillende rekratio's (vergelijking 7).

In het geval van een biaxiale deformatie rekt het materiaal gelijktijdig in twee richtingen, de derde richting kan opnieuw vrij vervormen (figuur 36, geval *b*). De waarde van de rek in deze derde richting moet gelijk zijn aan de som van de rekken in de twee andere richtingen maar een tegengesteld teken hebben om steeds een constant volume te behouden. Vullen we ook hier voor de rekratio's de waarde van de parameter *m* in voor een biaxiale deformatie, dan komen we tot dezelfde conclusie als afgeleid uit de exponenten van de verschillende rekratio's (vergelijking 8).

Een vlakke vervorming is een speciaal geval van een uniaxiale deformatie door het inklemmen van het materiaal in één van de overige twee richtingen zodat de rek in deze richting nul is (figuur 36, geval *c*). Doordat de rek in één van de richtingen nul is, moeten de rekken in de overige twee richtingen gelijk in absolute waarde maar tegengesteld van teken zijn. We concluderen opnieuw hetzelfde wanneer we de waarde van de parameter *m* invullen voor een planaire deformatie in de formules van de verschillende rekratio's (vergelijking 9).

2.1.2 Geheugenfunctie

De geheugenfunctie wordt als volgt geformuleerd:

$$\mu(t - t') = \sum_{i=1}^{N} -\left\{ \frac{G_i}{\tau_i} \cdot e^{\frac{-(t - t')}{\tau_i}} \right\}$$
(10)

In deze vergelijking staat G_i voor de relaxatiemodulus en τ_i voor de bijhorende relaxatietijd [10, 13, 14]. De bespreking van de geheugenfunctie begint bij het Maxwell element. Zoals eerder aangehaald geven een veer en een demper respectievelijk het elastisch gedrag en visceus gedrag weer. Het visco-elastisch gedrag combineert elastische en viskeuze eigenschappen waardoor een visco-elastisch materiaal ook vergelijkbaar is met een combinatie van een veer en een demper. Er zijn verschillende combinaties mogelijk die elk een ander model voorstellen. Het Maxwell model stelt het visco-elastisch gedrag voor door een serieschakeling van een demper en een veer. Deze serieschakeling, genaamd het Maxwell element, is afgebeeld op figuur 37.



Figuur 37: Maxwell element [9]

De wet van Hooke (vergelijking 1) beschrijft ook hier de elastische respons, de wet van Newton (vergelijking 2) beschrijft dan weer de viskeuze respons. Het Maxwell element maakt het mogelijk spanningsrelaxatie te beschrijven. Om dit gedrag zichtbaar te maken deformeert het Maxwell element op tijdstip t=0 instantaan tot een rek ε [9, 13]. Figuur 38 toont de ontstane spanningsrelaxatie.



Figuur 38: Spanningsrelaxatie van een Maxwell element [9]

De veer zal ogenblikkelijk reageren met een spanning $\sigma_0 = G \cdot \varepsilon$. De constante *G* is de relaxatiemodulus en is gelijk aan de elasticiteitsmodulus van de veer, berekend door de beginwaarde van de spanning te delen door de aangelegde rek ε . Uit de wet van Newton (vergelijking 2) is af te leiden dat de demper op het tijdstip *t*=0 niet zal bijdragen tot de spanningsrespons aangezien er geen verandering in de rek is. Vanaf het tijdstip *t*=0 ondervindt de demper echter wel de spanning σ_0 waardoor hij begint de vloeien volgens de wet van Newton (vergelijking 2): $\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\eta}$. De totale rek ligt vast en is steeds gelijk aan de som van de rek in de veer en de rek in de demper. Doordat de demper begint te vloeien zal de rek in de veer afnemen en daarmee ook de spanning volgens de wet van Hooke (vergelijking 1). Op elk tijdstip is de veer onderworpen aan een rek ε_1 en de demper aan een rek ε_2 die van elkaar verschillen zodat de som gelijk is aan de rek ε . Er geldt wel dat de spanning σ_1 in de veer en de spanning σ_2 in de demper steeds gelijk zijn [9, 13].

Het is mogelijk hetzelfde gedrag formulematig te beschrijven vertrekkende van de gelijke spanningen in veer en demper.

$$\sigma_1 = \sigma_2 \tag{11}$$

$$\sigma_1 = G \cdot \varepsilon_1 = \sigma_2 = \eta \cdot \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \eta \cdot \frac{d(\varepsilon - \varepsilon_1)}{dt} = -\eta \cdot \frac{d\varepsilon_1}{dt}$$
(12)

Want: $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ en ε is een constante.

$$-\eta \cdot \frac{d\varepsilon_1}{dt} = G \cdot \varepsilon_1 \tag{13}$$

$$\frac{d}{d} = -\frac{G}{G} \cdot dt \tag{14}$$

$$\varepsilon_1 \qquad \eta \\ \ln \varepsilon_1 = -\frac{G}{n} \cdot t + c \tag{15}$$

$$\varepsilon_1 = e^{-\frac{G}{\eta}t} \cdot c' \tag{16}$$

$$\sigma_1 = G \cdot \varepsilon_1 = G \cdot e^{-\frac{G}{\eta} \cdot t} \cdot c' \tag{17}$$

De constante *c*' wordt bepaald door de spanning op *t*=0 gelijk te stellen aan $\sigma = G \cdot \varepsilon$ waardoor de constante gelijk is aan de rek ε .

$$\sigma(t) = G \cdot \varepsilon \cdot e^{-\frac{G}{\eta}t}$$
(18)

In deze vergelijking geldt de relaxatietijd $\tau = \frac{\eta}{c}$. De relaxatietijd τ is gelijk aan de tijd nodig voor de spanning om te dalen tot 1/e maal zijn beginwaarde ofwel tot ongeveer 37% van zijn beginwaarde. De relaxatietijd is ook weergegeven op figuur 38. Na het invullen van de relaxatietijd τ bekomen we volgende formule [9, 13].

$$\sigma(t) = G \cdot \varepsilon \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{19}$$

Een belangrijk tekort van het Maxwell element is dat het enkel relaxatieprocessen met één enkele relaxatietijd kan beschrijven, hetgeen figuur 39 aantoont.



Figuur 39: Relaxatie van Maxwell elementen [9]

Op deze grafiek zijn de relaxatiecurves weergegeven met een logaritmische tijdsschaal. Bij een stijgende relaxatietijd verschuift de curve naar rechts. De vorm van de relaxatiecurves blijft echter steeds gelijk. Het werkelijke relaxatiegedrag van een kunststof is aangeduid met een stippellijn en strekt zich uit over een breder gebied dan de relaxatiecurves met slechts één enkele relaxatietijd. Het gegeneraliseerd Maxwell model beschrijft wel dit werkelijk relaxatiegedrag aangeduid met een stippellijn [9, 13]. Dit model bestaat uit een parallelschakeling van een aantal Maxwell elementen met elk hun eigen relaxatietijd en relaxatiemodulus. Een schematische weergave is afgebeeld op figuur 40.



Figuur 40: Gegeneraliseerd Maxwell model [9]

Vergelijking 19 is in dit geval niet meer geldig als beschrijving van het relaxatiegedrag. In dit geval beschrijft volgende formule het relaxatiegedrag:

$$\sigma(t) = \varepsilon \cdot \sum_{i=1}^{N} G_i \cdot e^{\frac{-t}{\tau_i}}$$
⁽²⁰⁾

Nu het gegeneraliseerd Maxwell model nader verklaard is, gaan we verder met de bespreking van de geheugenfunctie. In het K-BKZ model (vergelijking 3) is het mogelijk de dempingsfunctie in eerste instantie weg te laten aangezien deze gelijk aan één kan zijn. Hierna blijft er binnen de integraal een product van de geheugenfunctie en de rektensor over. Het gegeneraliseerd Maxwell model is de basis voor de geheugenfunctie [13, 15]. Afleiden van de formule voor het gegeneraliseerd Maxwell model naar de tijd geeft volgend resultaat:

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} = \varepsilon \cdot \sum_{i=1}^{N} -\left\{\frac{G_i}{\tau_i} \cdot e^{\frac{-t}{\tau_i}}\right\}$$

$$d\sigma(t) = \varepsilon \cdot \sum_{i=1}^{N} -\left\{\frac{G_i}{\tau_i} \cdot e^{\frac{-t}{\tau_i}}\right\} dt$$
(21)
(22)

In het K-BKZ model is het tijdstip t het tijdstip waarop we de spanning willen berekenen. De variabele van de integraal is t' daarom dienen we vergelijking 22 aan te passen zodat de variabele t' in rekening gebracht wordt.

$$d\sigma(t) = \varepsilon \cdot \sum_{i=1}^{N} -\left\{ \frac{G_i}{\tau_i} \cdot e^{\frac{-(t-t')}{\tau_i}} \right\} dt$$
⁽²³⁾

Vergelijking 23 verklaart het principe van het K-BKZ model. Door de integraal naar de tijd te nemen van deze vergelijking tussen $-\infty$ en het tijdstip *t* waarop we de spanning willen kennen en de rek ε te vervangen door de rektensor bekomen we de vereenvoudigde vorm van het K-BKZ model. De rektensor is in tegenstelling tot de rek ε uit vergelijking 23 tijdsafhankelijk. Uitrekenen van deze integraal levert voor ieder tijdstip tussen $-\infty$ en het tijdstip *t* een gegeneraliseerd Maxwell model waaruit de bijdrage tot de eindspanning gehaald wordt [13, 15]. Figuur 41 maakt dit principe duidelijker.





Figuur 41 toont de relaxatiecurve beschreven door Maxwell model. Ieder tijdstip tussen de grenzen van de integraal heeft een gelijksoortige curve. Aangezien de rektensor verandert doorheen de tijd zal de beginspanning σ_0 en dus ook de hoogte van de curve veranderen doorheen de tijd. Vergelijking 23 laat zien dat het af te lezen tijdstip op de relaxatiecurve bepaald wordt door (*t*-*t'*) waarin *t'* de variabele is van de integraal. Op figuur 17 zijn de grenzen van de integraal ingevuld en aangeduid op de curve, hieruit leiden we af dat het uitrekenen van de integraal een spanning levert die van de rechterkant van de relaxatiecurve naar de linkerkant verschuift. De methode achter het K-BKZ model bestaat er dus uit voor ieder tijdstip de rek te berekenen en voor deze rek te kijken wat de bijdrage is tot de spanning. Door dit te herhalen voor elk tijdstip tot aan het tijdstip *t* bekomen we de eindspanning op het tijdstip *t*.

2.1.3 Dempingsfunctie

In de bespreking van de geheugenfunctie werd het algemene principe achter het K-BKZ model besproken aan de hand van een vereenvoudigde vorm van het K-BKZ model zonder de dempingsfunctie. Deze vereenvoudigde vorm is de vergelijking van Lodge [13, 15]. De vergelijking van Lodge gaat er van uit dat de vervorming van een kunststof geen effect heeft op de structuur binnen de kunststof. Grote vervormingen leiden echter tot ontwarring en breuk van de ketens waardoor de kunststof minder weerstand biedt tegen het vervormen. Doordat de vergelijking van Lodge geen rekening houdt met beide effecten zal de berekende spanning een overschatting zijn van de werkelijke spanning [13, 15]. Een betere benadering van de werkelijke spanning is te verkrijgen na het invoeren van de door Wagner geformuleerde dempingsfunctie $h(I_1, I_2)$. De dempingsfunctie $h(I_1, I_2)$ schat in welke mate het netwerk de vervorming overleeft. Aangezien de kans op beschadiging van het netwerk afhangt van de grote van de vervorming wordt de dempingsfunctie geschreven in functie van eerste en tweede invarianten van de rektensor (I_1, I_2) .

$$I_{1} = \lambda^{2} + \lambda^{2m} + \lambda^{-(2m+1)}$$
(24)

$$I_{2} = \lambda^{-2} + \lambda^{-2m} + \lambda^{(2m+1)}$$
(25)

De waarde van de dempingsfunctie varieert van 1 tot 0. Bij zeer kleine vervormingen blijft het netwerk volledig intact en neemt de dempingsfunctie de waarde 1 aan. Zeer grote vervormingen vernietigen het netwerk volledig door het breken van de ketens waardoor de dempingsfunctie de waarde 0 krijgt [13, 15].

Wagner beschrijft twee verschillende dempingsfuncties genaamd Wagner-1 en Wagner-2.

Wagner - 1:
$$h(I_1, I_2) = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \sqrt{(I_1 - 3) \cdot (I_2 - 3)}}$$
 (26)

Wagner - 2:
$$h(I_1, I_2) = \frac{1}{\exp(\beta \cdot \sqrt{\alpha \cdot I_1 + (1 - \alpha) \cdot I_2 - 3})}$$
 (27)

In beide dempingsfuncties zijn α en β dempingsparameters waarmee we het verloop van de demping instellen zodat de benadering van het werkelijk gedrag zo optimaal mogelijk is [10, 13, 14, 15]. Het verschil tussen de Wagner-1 en Wagner-2 dempingsfunctie is te vinden in het gedrag volgend op de vervorming. De schade die de structuur van een kunststof oploopt tijdens het vervormen zal bij een vervorming in de omgekeerde richting niet herstellen. De Wagner-2 dempingsfunctie houdt rekening met dit gedrag in tegenstelling tot de Wagner-1 dempingsfunctie [15].

Zoals eerder vermeld, verlopen de dempingsfuncties in functie van de vervorming. Figuur 42 geeft het verloop van beide dempingsfuncties weer met vergelijkbare dempingsparameters.



Figuur 42: Verloop van de dempingsfuncties

Op de figuur is duidelijk te zien dat de dempingsfunctie voor kleine vervormingen gelijk is aan 1 en daalt naar 0 naarmate de vervorming stijgt. De daling gebeurt duidelijk sneller bij de Wagner-2 dempingsfunctie.

2.1.4 Tijd-temperatuur superpositie

Zoals eerder aangehaald is een kunststof een visco-elastisch materiaal waardoor de materiaaleigenschappen afhankelijk zijn van de temperatuur. Door toepassing van tijd-temperatuur superpositie is het mogelijk de materiaaleigenschappen van de kunststof te kennen bij een bepaalde referentietemperatuur en deze om te rekenen naar materiaaleigenschappen bij andere temperaturen gelegen in een beperkt interval rond de referentietemperatuur. Belangrijk is dat deze temperatuur boven de glastemperatuur ligt [9, 13].

Als voorbeeld van een materiaaleigenschap nemen we de elasticiteitsmodulus. Wanneer we deze uitzetten in functie van de tijd op een logaritmische schaal bij twee verschillende temperaturen bekomen we figuur 43.



Figuur 43: Tijd-temperatuur verschuiving [9]

Op figuur 43 is zichtbaar dat het verloop van de elasticiteitsmodulus in functie van de tijd naar rechts verplaatst naarmate de temperatuur lager ligt dan de referentietemperatuur t_0 wat betekent dat de elasticiteitsmodulus op hetzelfde tijdstip stijgt naarmate de temperatuur daalt. De verschuivingsfactor a_T beschrijft de verschuiving van de curve onder invloed van de temperatuur. Wanneer we de materiaaleigenschappen willen kennen bij temperaturen afwijkend van de referentietemperatuur is het nodig deze verschuivingsfactor te berekenen. Hiervoor zijn twee mogelijkheden beschikbaar [9, 13]. De eerste is de vergelijking van Arrhenius:

$$\log a_T = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \tag{28}$$

Waarin E_a staat voor de activeringsenergie en R voor de algemene gasconstante. Beide constanten vormen samen één algemene constante [9, 13]. De tweede vergelijking is de vergelijking van Williams, Landel en Ferry (WLF):

$$\log a_T = \frac{-C_1 \cdot (T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})}$$
(29)

In deze vergelijking bepalen de constanten C_1 en C_2 de grootte van de verschuivingsfactor [1, 5].

Tijd-temperatuur superpositie bestaat er in een mastercurve op te stellen voor de materiaaleigenschappen bij een bepaalde referentietemperatuur. Wanneer de constanten van vergelijking 28 of vergelijking 29 bekend zijn is het mogelijk voor verschillende temperaturen, binnen een beperkt tijdsinterval rond de referentietemperatuur, de verschuivingsfactor a_T te bepalen en zo de overige curves op te stellen zoals zichtbaar op figuur 44 [9, 13].



Figuur 44: Mastercurve [9]

2.1.5 Parameters

Nu de werking en de verschillende onderdelen van het K-BKZ model verklaard zijn, is het duidelijk dat voor de beschrijving van een kunststof met het K-BKZ er een aantal parameters nodig zijn. Een aantal relaxatiemoduli met bijhorende relaxatietijden zijn noodzakelijk voor de werking van het K-BKZ model. Om de spanning zo correct mogelijk te beschrijven, is het gewenst de dempingsfunctie te gebruiken waardoor bijhorende parameters voor deze dempingsfunctie nodig zijn. Voor de berekening van spanningen afwijkend van de temperatuur, waarbij de vorige parameters bepaald werden, is het ook noodzakelijk de Arrhenius constante of beide WLF-constanten te bepalen.

2.2 T-SIM

Het simulatieprogramma dat tot onze beschikking staat is T-SIM [20], een programma voor het simuleren van thermovormprocessen. Het simuleren van een thermovormproces kan gebeuren om verschillende redenen. De simulatiesoftware maakt het mogelijk de finale wanddikte en dikteverdeling in het product weer te geven in functie van de verschillende procesparameters zoals de druk, snelheid van de stempel, begindikte van het vel en de temperatuur van het vel. Aan de hand van simulaties is het dan ook mogelijk een inzicht te krijgen in de verschillende effecten van materiaal- en procesparameters op de uiteindelijke wanddikte om zo het principe van trial and error te vermijden. Onderstaande figuur toont hoe het programma de dikte kan weergeven over een doorsnede van het product. Daarnaast is het mogelijk de dikteverdeling over het hele product weer te geven [20].



Figuur 45: Voorbeeld wanddikte bepaling [20]

Een tweede reden is het reduceren van de ontwikkelingstijd van een nieuw product. Na iedere aanpassing van het model is het mogelijk een simulatie uit te voeren en zo te achterhalen of de aanpassing het gewenste effect heeft. Door op deze manier latere aanpassingen te vermijden is het mogelijk extra kosten te ontlopen. T-SIM kan de matrijzen, nodig voor de simulatie, inladen nadat ze in een willekeurig 3D-programma zijn aangemaakt [20].

Daarnaast maakt het simulatieprogramma het ook mogelijk een beeld te schetsen van de wijze waarop het product afkoelt. Deze afkoeling geeft een beeld van de spanningen in het eindproduct. Dergelijke simulatie maakt het mogelijk om gericht te koelen zodat het eindproduct ook werkelijk de gewenste vorm behoudt [20].

Tot slot is het mogelijk het kunststofvel in T-SIM te bedrukken met een afbeelding om zo te bepalen in welke mate de afbeelding vervormt wanneer het kunststofvel de vorm van het eindproduct aanneemt. Op deze manier is het mogelijk het vel te bedrukken met een op voorhand vervormde afbeelding die na het vormen van het eindproduct leidt tot de gewenste afbeelding [20].



Figuur 46: Voorgedrukte afbeelding [20]



Figuur 47: Afbeelding op het eindproduct [20]

T-SIM maakt het ook mogelijk allerhande procesvarianten van het thermovormen te simuleren. Zo is het mogelijk om zowel een positieve als negatieve matrijs te gebruiken. Bij de negatieve matrijs kan er zelfs een stempel gebruikt worden. Figuur 48 toont de simulatie met een positieve matrijs, figuur 49 toont een simulatie met een negatieve matrijs [20].



Figuur 48: T-SIM simulatie met positieve matrijs [20]

Figuur 49: T-SIM simulatie negatieve matrijs [20]

Het programma is gebaseerd op het zojuist besproken K-BKZ model. Om een accurate simulatie uit te voeren is het dan ook nodig om de besproken parameters, kenmerkend voor de verschillende materialen, exact te bepalen en in te geven in het simulatieprogramma. Zoals vermeld zijn de eigenschappen van kunststoffen sterk temperatuurafhankelijk. Het is dan ook belangrijk dat de werkelijke temperatuur van het kunststofvel correct in rekening gebracht wordt doorheen de simulaties.

T-SIM kent echter ook enkele nadelen. Een eerste nadeel van T-SIM is dat het de opwarming van het kunststofvel niet mee in rekening brengt waardoor de temperatuurverdeling in het kunststofvel voor de start van het werkelijke proces slechts een benadering is van de werkelijkheid.

Daarnaast zal het vel tijdens het vormen gaan afkoelen doordat het in contact komt met zowel de omgevingslucht als de matrijs. Een aantal warmteoverdracht coëfficiënten, ingegeven in het simulatieprogramma, definiëren de warmtestroom naar beide. Exacte kennis van deze warmteoverdracht coëfficiënten is onmogelijk waardoor het moeilijker is de werkelijkheid te benaderen.

Tot slot treedt er wrijving op tussen het kunststofvel en de matrijs wat leidt tot extra spanningen en zo de uiteindelijke wanddikte van het product beïnvloedt. Deze wrijving is afhankelijk van het gebruikte materiaal en de nabewerking van de matrijs. T-SIM bepaalt de wrijving door middel van een wrijvingscoëfficiënt. Ook deze wrijvingscoëfficiënt is moeilijk exact te bepalen.

Het is duidelijk dat wanneer met T-SIM een exacte simulatie dient te gebeuren, de bepaling van alle voorgaande parameters een belangrijke rol spelen [20].

3 Parameterbepaling

Alvorens een thermovormsimulatie op een accurate manier uit te kunnen voeren is het nodig om de K-BKZ parameters nader te bepalen voor de gebruikte kunststof. Zoals in vorige hoofdstukken nader verklaard, gaat het hier om een aantal koppels van relaxatiemoduli en relaxatietijden, eventuele dempingsparameters en tot slot de parameters nodig voor tijd-temperatuur superpositie. De leverancier van het T-SIM simulatiepakket benadrukt dat de nauwkeurigheid van het softwarepakket sterk afhankelijk is van de kwaliteit van deze parameters. De leverancier biedt dan ook de mogelijkheid om de materiaalparameters aan te leveren. Momenteel zijn hiervoor twee mogelijkheden. De eerste methode bepaalt de parameters aan de hand van DMA (Dynamic Mechanical Analysis). De tweede methode is gebaseerd op het fitten van spanningsrekdata.

3.1 Methode voor parameterbepaling: Dynamic Mechanical Analysis (DMA)

Dynamic Mechanical Analysis (DMA) is de meest gebruikte methode voor de bepaling van de K-BKZ parameters. Doormiddel van DMA is het mogelijk zowel koppels van relaxatiemoduli en relaxatietijden als parameters voor tijd-temperatuur superpositie te bepalen [13, 21, 22]. DMA maakt gebruik van een torsie rheometer zichtbaar op figuur 50.



Figuur 50: Torsie rheometer [13]

De torsie rheometer bestaat uit een stempel die een kunststof proefmonster tegen een aanslag klemt. De stempel brengt een sinusoïdale kracht over op de kunststof dat op zijn beurt een sinusoïdale spanning ondervindt. Het toestel meet de hierbij ontstane rek. De frequentie van de sinusoïdale kracht is aanpasbaar en het geheel is in een oven geplaatst zodat de testtemperatuur ook kan variëren [13, 21, 22].

Door een vergelijking te maken tussen de aangelegde spanning en de bekomen rek is het mogelijk een aantal materiaalparameters, specifiek voor de DMA test, te bekomen namelijk de opslagmodulus G' en de verliesmodulus G''. Op figuur 51 is het verloop van zowel de opgelegde spanning als de bekomen rek zichtbaar [13, 21, 22].



Figuur 51: DMA rekrespons [22]

Op de figuur is een faseverschil δ zichtbaar tussen de verplaatsing van de kunststof en de aangelegde kracht. Dit faseverschil is te wijten aan de verliesenergie afkomstig van de viskeuze eigenschappen van het materiaal. Dezelfde proef ondervindt bij een elastisch materiaal geen faseverschil. De opslagmodulus *G*' is te vergelijken met de elasticiteitsmodulus en duidt op het elastisch gedrag van het materiaal. De berekening van de opslagmodulus *G*' gebeurt in functie van het faseverschil δ .

$$G' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \delta \tag{30}$$

In tegenstelling tot de opslagmodulus G' die duidt op de elastische eigenschappen zal de verliesmodulus G'' een waarde toekennen aan de mate waarin het materiaal visceus is. Wanneer er geen faseverschil is en het materiaal volledig elastisch is, krijgt de verliesmodulus dan ook de waarde nul. De berekening van de verliesmodulus G'' gebeurt ook in functie van het faseverschil δ .

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \delta \tag{31}$$

Om aan de hand van DMA de K-BKZ parameters te bepalen, is het nodig om het materiaal te testen bij een aantal frequenties en dit bij minstens drie temperaturen. Bij elke frequentie waarbij de test wordt uitgevoerd is het mogelijk een koppel van een relaxatiemodulus met relaxatietijd te bepalen. Het is dan ook logisch dat het aantal geteste frequenties minstens overeen moet komen met het aantal gewenste koppels. Uit de bekomen resultaten is het mogelijk de opslagmodulus G' en de verliesmodulus G'' te berekenen [13, 21, 22]. Op figuur 52 zijn beide uitgezet in functie van de frequentie bij de temperatuur die later als referentietemperatuur gebruikt wordt.



Figuur 52: Opslagmodulus en verliesmodulus bij verschillende frequenties [13]

Via onderstaande formule is het mogelijk om voor iedere verliesmodulus G" de relaxatiemodulus met bijhorende relaxatietijd te bepalen [13, 21, 22].

$$G_i = \ln(10) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot G''(\omega)_{|\frac{1}{\omega} = \lambda_i}$$
(32)

Op figuur 53 is de verliesmodulus G" opnieuw uitgezet in functie van de frequentie maar deze keer voor testen bij verschillende temperaturen.



Figuur 53: Verliesmodulus bij verschillende testtemperaturen [13]

We zien dat de curves horizontaal verschuiven naarmate de testtemperatuur verandert. Uit deze verschuiving is het mogelijk de eerder besproken constanten (C_1 en C_2) nodig voor tijd-temperatuur superpositie (WLF) te bepalen [13, 21, 22].

3.2 Methode voor parameterbepaling: T-SIMFIT

De leverancier van het softwarepakket T-SIM vertrekt van een methode verschillend aan DMA voor de bepaling van de materiaalparameters. DMA is gebaseerd op metingen bij temperaturen hoger dan de procestemperaturen terwijl de methode gebaseerd op T-SIMFIT vertrekt van metingen bij temperaturen gelegen binnen de procestemperaturen. Hierdoor zou deze laatste tot betere resultaten leiden. Hiervoor is het fittingsprogramma T-SIMFIT, gebaseerd op reverse engineering, ontwikkeld. T-SIMFIT gebruikt spanningsrekdata bij minimum drie verschillende reksnelheden en dit bij drie verschillende temperaturen voor de bepaling van de parameters. Het programma werkt met werkelijke spanningen en rekken (in plaats van engineering spanning en rek) waardoor er meestal een omrekening vereist is voor de start van de fitting. De formules voor de omrekening zijn terug te vinden in tabel 3.

Type test	Rekratio λ(t)	Spanning σ(t)
Lineair uniaxiaal	$\lambda(t) = 1 + t \cdot \dot{\varepsilon}$	$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A_0/(1+t\cdot\dot{\varepsilon})}$
Exponentieel uniaxiaal	$\lambda(t)=e^{\varepsilon \cdot t}$	$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A_0/e^{\varepsilon t}}$
Lineair biaxiaal	$\lambda(t) = 1 + t \cdot \dot{\varepsilon}$	$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A_0/(1+t\cdot\dot{\varepsilon})}$
Exponentieel biaxiaal	$\lambda(t) = e^{\varepsilon \cdot t}$	$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A_0/e^{\varepsilon \cdot t}}$

Tabel 3: Omrekening naar werkelijke spanning en rekratio [19	Tabel 3: Omreken	ing naar werkeli	ike spanning en	rekratio [19	1
--	------------------	------------------	-----------------	--------------	---

In deze tabel is $\dot{\varepsilon}$ de reksnelheid, A_0 de oppervlakte van de doorsnede van het proefmonster bij de start van de trekproef en F(t) de gemeten kracht tijdens de trekproef.

Zowel de gekozen reksnelheden als de gekozen temperaturen dienen in de buurt te liggen van de reksnelheden en temperaturen die voorkomen tijdens het thermovormproces dat men wenst te simuleren. De reksnelheden liggen bij het thermovormen meestal tussen 0.01-10 s⁻¹. De lage waarden komen meer voor bij "heavy gauge" thermovormen, de hogere veelal bij het drukvormen. De verwerkingstemperaturen zijn materiaalafhankelijk, voor polystyreen bijvoorbeeld liggen deze tussen 130°C en 160°C [10, 13, 19, 20].

De spanningsrekdata kunnen zowel afkomstig zijn van een uniaxiale trekproef als van een biaxiale trekproef. De biaxiale trekproef verdient de voorkeur omwille van de gelijkenis met het thermovormproces doordat het materiaal tijdens een thermovormproces gelijktijdig in beide richtingen wordt uitgerokken. Daarnaast kan de trekproef zowel een lineair als een exponentieel verloop kennen. Belangrijk is het type proef te selecteren voor de start van de fitting [10, 13, 19, 20].

T-SIMFIT heeft niet de volledige spannings-rek curve nodig maar slechts een aantal punten (meestal 10 tot 15) [10, 13, 19, 20]. Belangrijk is dat deze verschillende punten voor iedere combinatie van snelheid en temperatuur dezelfde rek hebben, hetgeen figuur 54 verduidelijkt.



Figuur 54: Selecteren van punten op de spanningsrekcurve bij gelijke rekratio

Figuur 54 toont spanningsrekdata bij drie verschillende temperaturen en drie verschillende snelheden. Voor iedere curve is het nodig tien punten te selecteren als input voor T-SIMFIT. Eerste stap is het kiezen van tien rekken. Deze tien rekken zijn met rode lijnen aangeduid op de figuur. Ieder snijpunt met een curve is een punt als input voor T-SIMFIT [10, 13, 19].

Deze spannings-rek punten bij verschillende reksnelheden worden voor iedere temperatuur apart ingegeven in de software, hetgeen zichtbaar is op figuur 55.



Figuur 55: Input punten in T-SIMFIT [19]

De figuur toont een grafiek waar de X-as de rekratio voorstelt en de Y-as de spanning. De blauwe punten op de figuur stellen de voorheen geselecteerde spannings-rek punten voor bij de verschillende reksnelheden. De paarse curves zijn de curves gefit door T-SIMFIT door middel van reverse engineering. Het algoritme voor dit principe is afgebeeld op figuur 56.



Figuur 56: Fittingsalgoritme vertrekkende van simulatie van de meetmethode waarbij de simulatieresultaten vergeleken worden met werkelijke resultaten [10].

De fitting start met een schatting van de K-BKZ prameters. Met deze schatting simuleert het programma de meetmethode (biaxiaal of uniaxiaal) waarmee de spanningsrekdata bepaald werd en dat bij de verschillende snelheden voor de betreffende temperatuur. Het programma vergelijkt de bekomen spanningen uit de simulatie met de werkelijk gemeten spanningen. Indien beide spanningen goed overeenkomen zijn de K-BKZ parameters aanvaard. Wanneer de afwijking te groot is past het programma de parameters aan en herhaalt het de vorige stappen tot de afwijking aanvaardbaar is. De parameters worden zo bepaald dat ze bij elk van de drie snelheden zo goed mogelijk aansluiten. Vanuit deze drie snelheden extrapoleert de simulatiesoftware later de snelheden die werkelijk optreden tijdens het thermovormproces. Om een goede extrapolatie te verkrijgen is het nodig om zowel hoge als lage testsnelheden te gebruiken. Omwille van de deze extrapolatie is het ook duidelijk dat er bij een fitting met meer dan drie testsnelheden, de uiteindelijke resultaten beter zijn doordat er over een ruimer gebied gefit wordt [10, 13, 19].

Het voorgaande herhaalt zich voor elk van de drie testtemperaturen. De drie temperaturen zijn noodzakelijk voor het bepalen van de constanten voor tijd-temperatuur superpositie. T-SIMFIT zet nu de bekomen relaxatiemoduli uit in functie van de tijd voor de drie temperaturen. Eén van deze drie temperaturen is geselecteerd als referentietemperatuur T_0 ,meestal is dit de middelste temperatuur. Er kan nu ten opzichte van de referentietemperatuur T_0 een horizontale verschuiving a_T afgelezen worden zoals aangeduid op figuur 57.



Figuur 57: Aflezen verschuiving ten opzichte van de referentietemperatuur [9]

Deze verschuiving a_T vult het programma in de WLF formule.

$$\log a_T = \frac{-C_1 \cdot (T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)}$$
(33)

Aangezien er twee constanten (C_1 en C_2) te bepalen zijn, is het onmogelijk de vergelijking op te lossen. Dit is de reden waarom het fittingsprogramma drie temperaturen nodig heeft. De derde temperatuur zorgt voor een tweede verschuiving a_T ten opzichte van de gekozen referentietemperatuur waardoor volgend stelsel van twee vergelijkingen op te lossen is [10, 13, 19].

$$\begin{cases} \log a_T = \frac{-C_1 \cdot (T_1 - T_0)}{C_2 + (T_1 - T_0)} \\ \log a_T = \frac{-C_1 \cdot (T_2 - T_0)}{C_2 + (T_2 - T_0)} \end{cases}$$
(34)

Tot slot berekent T-SIMFIT de waarde van de dempingsparameters. Het is mogelijk verschillende types dempingen in te stellen maar de meest ondersteunde dempingen zijn Wagner 1 en Wagner 2. Daarbij is het aangeraden Wagner 2 te gebruiken indien het materiaal verstevigt (strain hardening) naarmate de rek toeneemt (bv: polypropyleen). De verklaring hiervoor is terug te vinden wanneer we kijken naar figuur 42. Het is duidelijk dat Wagner 2 veel sterker dempt naarmate de vervorming toeneemt wat nodig is om een overschatting van de versteviging tegen te gaan [10, 19].

3.3 Spanningsrekdata: huidige methode

Zoals hierboven beschreven vormen spanningsrekdata de basisgegevens die nodig zijn in T-SIMFIT. Aan de hand van deze gegevens zal T-SIMFIT de parameters van het K-BKZ model bepalen wat op zijn beurt de basis vormt voor het simuleren van een thermovormproces in T-SIM. De spanningsrekdata zijn echter onmogelijk rechtstreeks meetbaar. Om de data alsnog te bepalen zullen krachtverplaatsingsdata, die wel meetbaar zijn, het vertrekpunt zijn.

Een schematische voorstelling van de huidige methode, met het bepalen van de basis krachtverplaatsingsdata tot de uiteindelijke thermovormsimulaties, is afgebeeld op figuur 58.



Figuur 58: Schema met de basisstappen voor een thermovormsimulatie volgens de methode van IKT

In dit gedeelte van de tekst ligt de focus op de huidige methode voor het bepalen van de spanningsrekdata en dus de eerste twee stappen op het schema. De derde en vierde stap, waar T-SIMFIT vertrekkende van deze data de parameters voor het K-BKZ model bepaalt, zijn reeds verduidelijkt in het gedeelte tekst over T-SIMFIT en T-SIM.

3.3.1 Kracht-verplaatsing

De eerste stap is het bepalen van de krachtverplaatsingsdata aan de hand van een equibiaxiale rekproef. De onderstaande afbeelding geeft een schematische voorstelling van de testmethode.



Figuur 59: Principeschets testopstelling voor het bepalen van krachtverplaatsingsdata [13]

De schets geeft een duidelijk beeld van hoe een equibiaxiale rekproef verloopt. Tijdens de proef zal een kunststof proefmonster, uit het te testen halffabricaat, vervormen door het indrukken van een metalen stempel. Tegelijkertijd zullen sensoren de kracht die hiervoor nodig is, samen met de verplaatsing van de stempel registreren. Dit volledige proces voor het opmeten van de krachtverplaatsingsdata bestaat uit vijf stappen die aan de hand van enkele afbeeldingen verduidelijkt zijn.



Figuur 60: Cirkelvormig kunststof testmateriaal op een uitgeholde stalen houder [4]

De eerste stap is het uitsnijden van een cirkelvormig proefmonster uit het kunststof halffabricaat. De volgende stap is het klemmen van het proefmonster op een houder boven een cirkelvormige opening met een diameter van 40mm [13].

Op figuur 59 was al te zien dat het proefmonster zich in een klimaatkast bevindt wat dus wil zeggen dat de temperatuur regelbaar is. De tweede stap in de test is dan ook het opwarmen van het proefmonster tot op de gewenste testtemperatuur. Deze testtemperatuur is afhankelijk van het materiaal. Voor polystyreen kan de temperatuur verschillen tussen 130-160°C afhankelijk van de temperaturen bereikt tijdens het thermovormen.



Figuur 61: Stalen stempel en houder van de testopstelling [4]

De derde stap is het vervormen van het proefmonster door het indrukken van de stalen stempel (diameter 30mm [13]) met een vooraf ingestelde snelheid. Hoe deze snelheid bepaald is, is verder uitgelegd in een volgend hoofdstuk. De vierde stap verloopt gelijktijdig met het vervormen. Zowel de verplaatsing van de stempel als de kracht op de cilinder wordt opgemeten en uitgelezen.



Figuur 62: kunststof proefmonster na het vervormen [4]

Hierna volgt de laatste stap van de equibiaxiale rekproef namelijk het verwerken van de krachtverplaatsingsdata. Kracht en verplaatsing zijn dan in functie van de gemeten tijd uitgezet in een grafiek.

Voor een volledige set van krachtverplaatsingsdata is het nodige deze test bij een combinatie van drie verschillende temperaturen en drie verschillende stempelsnelheden uit te voeren. Om later nauwkeurige data te verkrijgen zal IKT iedere combinatie van temperatuur en stempelsnelheid driemaal uitvoeren. Volgens deze methode kan pas na het omrekenen naar spanningsrekdata van de drie herhalingen het gemiddelde genomen worden, aangezien de tijdstippen waarop gemeten is kunnen afwijken tussen de drie testen. De krachtverplaatsingsdata voor één combinatie van temperatuur en verschillende stempelsnelheden is te zien op figuur 63.





Figuur 63: Krachtverplaatsingsdata na testen op 3 verschillende snelheden [4]

Op deze figuur zijn de curves van de krachtverplaatsingsdata te zien van drie testen op een proefmonster van het materiaal polypropyleen bij een temperatuur van 140°C bij drie verschillende stempelsnelheden. De snelheid is gekozen om tijdens de test de typische vervormingssnelheden tijdens een thermovormproces te benaderen [20].

Er is een duidelijk verschil zichtbaar in kracht afhankelijk van de stempelsnelheid en dus de vervormingssnelheid. Naarmate de snelheid hoger ligt zal de kracht ook hoger liggen. Dit hebben we in een voorgaand deel beschreven als een eigenschap van een visco-elastisch materiaal zoals polypropyleen.

Om de data verder te vervolledigen zal men volgens de beschreven methode de test op hetzelfde materiaal ook nog bij twee temperaturen rond 140°C uitvoeren (vb. 130°C en 150°C). Deze temperaturen zijn gekozen afhankelijk van de temperatuur bereikt tijdens het vormen van het thermovormproduct, zodat de testen het werkelijke proces benaderen [20].

Voor deze materiaalgrade van polypropyleen zijn er nu dus 27 equibiaxiale trektesten uitgevoerd bij combinaties van verschillende snelheden en verschillende temperaturen die dan ook 27 koppels van krachtverplaatsingsdata hebben opgeleverd. Het zijn deze data die nu omgerekend worden naar spanningsrekdata en uiteindelijk naar werkelijke spanning en werkelijke rek.

Zoals eerder al aangehaald is de uiteindelijke nauwkeurigheid van een thermovormsimulatie binnen T-SIM sterk afhankelijk van de nauwkeurige bepaling van de krachtverplaatsingsdata. Om deze reden wordt momenteel de volledige testmethode zoals hierboven beschreven uitgevoerd door IKT (Institut für Kunststofftechnik) aan de universiteit van Stuttgart.



Figuur 64: Testopstelling IKT [13]

Op de linkerkant van de figuur zijn de klimaatkast, het klemsysteem en de stempel zichtbaar. Het volledige klemsysteem zal via een hydraulisch systeem naar boven toe bewegen zodat de vaste stempel zich in het kunststof proefmonster drukt. Door het gebruik van een hydraulisch systeem zijn de mogelijk te bereiken snelheden in IKT zeer hoog (tot 500 mm/s).



Een voorbeeld van de data verkregen met deze testopstelling voor de fitting van het HIPS(High Impact polystyreen) materiaal, is te zien in figuur 65.

Figuur 65: Krachtverplaatsingsdata bepaald door IKT

Het geteste materiaal is een proefmonster uit een polystyreen vel met een dikte van 1 mm. Het is duidelijk te zien dat er 27 testen uitgevoerd zijn bij snelheden van 20mm/s, 200mm/s en 500mm/s en temperaturen van 120°C, 130°C en 140°C.

De rode pijl tussen twee grafieken duidt op een verschil in kracht gemeten bij dezelfde snelheid, temperatuur en proefmonsterdikte. Hieruit blijkt dat er bij bepaalde combinaties van temperatuur en snelheid een redelijke afwijking op de herhaalbaarheid van de test zitten.

3.3.2 Spanning-rekratio

De tweede stap binnen de huidige methode is het omzetten van de krachtverplaatsingsdata, bepaald door gebruik te maken van de beschreven testmethode, naar spanningsrekdata. IKT werkt voor het omrekenen van de data samen met Accuform, de ontwikkelaar van T-SIM, om zo betrouwbare data te kunnen leveren.

Hoe Accuform de data exact omrekent is niet helemaal duidelijk en blijft tot op heden bedrijfsgeheim. Er is echter wel een handleiding voor hoe de omrekening zou gebeuren op krachtverplaatsingsdata verkregen a.d.h.v. de volgende testmethoden:

- 1. Uniaxiale trekproef met lineaire functie voor de rekratio;
- 2. Uniaxiale trekproef met exponentiële functie voor de rekratio;
- 3. Biaxiale trekproef met lineaire functie voor de rekratio;
- 4. Biaxiale trekproef met exponentiële functie voor de rekratio [20].

De formules die in deze gevallen nodig zijn voor de omrekening zijn terug te vinden in tabel 3.

3.4 Spanningsrekdata: nieuw ontwikkelde methode

De testopstelling van het IKT is niet aanwezig op Cel Kunststoffen. Daarnaast beschikt de onderzoeksgroep ook niet over de apparatuur om DMA testen uit te voeren. Om de K-BKZ parameters te bepalen door middel van T-SIMFIT is het nodig een andere methode te gebruiken om spanningsrekdata te verzamelen. Aangezien T-SIMFIT ook de mogelijkheid biedt spanningsrekdata te fitten verkregen met een lineaire uniaxiale trekproef, is het mogelijk de spanningsrekdata te bekomen aan de hand van een aantal uniaxiale trekproeven. Ook ditmaal dienen deze trekproeven te gebeuren bij combinaties van drie verschillende snelheden en drie verschillende temperaturen.

De treksnelheid van de aanwezige trekbank is instelbaar tot maximum 8,33mm/s (500mm/min), een treksnelheid die veel lager ligt dan 500mm/s gebruikt bij de testopstelling van het IKT. De door ons gebruikte maximum treksnelheid van 8,33mm/s leidt tot reksnelheden lager dan 1 s⁻¹ hoewel er tijdens een thermovormproces reksnelheden voorkomen tot 10 s⁻¹. Zoals eerder aangehaald zal het simulatieprogramma deze hogere reksnelheden extrapoleren. Doordat de maximum gemeten reksnelheid laag is, bestaat de kans dat simulatieresultaten bij hoge reksnelheden niet nauwkeurig zijn.

Bijkomend nadeel is dat een thermovormproces rekken in meerdere richtingen veroorzaakt terwijl de uniaxiale trekproef het materiaal slechts in één richting rekt. De fitting van de parameters gebeurt met het uniaxiaal K-BKZ model. Het simulatieprogramma zal deze parameters nadien omrekenen naar het biaxiaal K-BKZ model aan de hand van de parameter *m*. Deze omzetting zorgt mogelijk voor fouten.

3.4.1 Controle Zwick Z050 trekbank

De gebruikte trekbank is de Z050 van het merk Zwick Roell met een capaciteit van 50kN. De trekbank is voorzien van een klimaatkast van dezelfde fabrikant. De temperaturen zijn instelbaar tussen -80°C en 240°C.



Figuur 66: Zwick Z050 trekbank met klimaatkast

Aangezien de thermovormsimulaties sterk afhankelijk zijn van de K-BKZ parameters is het belangrijk te zorgen dat de spanningsrekdata, die dienen als input voor de fitting, nauwkeurig bepaald zijn. Om deze nauwkeurigheid te garanderen is het nodig de trekbank te controleren op volgende eigenschappen:

- Lineariteit,
- snelheid,
- versnelling.

Om een antwoord te geven op deze vragen hebben we de verplaatsing van de trekbank uitgezet doorheen de tijd en dit bij verschillende snelheden. De verplaatsing wordt bepaald doordat de trekbank de positie van de klem opneemt met een frequentie van 50Hz.

3.4.1.1 Lineariteit

Figuur 67 toont de verplaatsing van de trekbank in functie van de tijd bij verschillende snelheden.



Figuur 67: Verplaatsing van de trekbank in functie van de tijd

Uit de figuur concluderen we dat de verplaatsing bij iedere snelheid lineair verloopt. Het valt echter op dat de curves niet vertrekken vanuit de oorsprong terwijl de oorsprong samenvalt met de start van de trekproef. Ter verduidelijking geeft figuur 68 het verloop van de curve bij 200mm/min gedurende de eerste seconde na de opstart van de trektest.


Figuur 68: Verplaatsing 200mm/min (3,33mm/s) gedurende één seconde

De blauwe punten op de figuur stellen de door de trekbank geregistreerde posities voor. Uit de figuur is duidelijk af te leiden dat de trekbank pas na 0,3s na de start van de trekproef begint te bewegen. Dezelfde conclusies volgen uit de curves bij de overige snelheden. Rekening houdend met de overige snelheden concluderen we dat de tijd tussen het starten van de trekproef en de het starten van de eigenlijke beweging gemiddeld 0,3s is.

Om het effect van de wachttijd duidelijk te maken, toont figuur 69 spanningsrekdata bekomen met een trekproef op een polystyreen proefmonster bij 110°C en een snelheid van 500mm/min.



Figuur 69: Invloed wachttijd op spanningsrekdata

De figuur toont de werkelijke spanning in functie van de werkelijke rekratio verkregen aan de hand van de formules uit tabel 3. Het verschil tussen de blauwe curve en de rode curve is de correctie van de wachttijd. We merken op dat de curve zonder correctie een verschuiving naar rechts kent en niet start bij een rekratio van één terwijl dat in werkelijkheid niet mogelijk is. De verklaring is te vinden in de gebruikte definities van rekratio en spanning.

$$\lambda(t) = 1 + t \cdot \dot{\varepsilon}$$

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A_0/(1 + t \cdot \dot{\varepsilon})}$$
(35)
(36)

Bij de start van de trekproef start ook de tijdsmeting (t), de trekbank is in werkelijkheid nog niet bezig met bewegen waardoor er geen kracht meetbaar is en de spanning nul blijft. Formule 35 toont dat de rekratio wel zal toenemen omwille van de tijd die reeds gestart is. Naast een horizontale verschuiving merken we dat de curve zonder correctie naar boven verschuift. In formule 36 zien we dat dit het gevolg is van de doorsnede die door de tijd reeds verkleint wat een grotere spanning tot gevolg heeft. In beide formules zien we dat het effect van de wachttijd vergroot naarmate de reksnelheid toeneemt. Het is duidelijk dat deze spanningsrekdata zonder correctie van de wachttijd zal leiden tot foutieve resultaten en het dus belangrijk is deze correctie uit te voeren voor de bepaling van de parameters.

3.4.1.2 Snelheid

Een beeld van de snelheid bekomen we door de afgeleide te nemen van de zojuist besproken verplaatsingscurve. De snelheidscurve bij 200mm/min wordt getoond in figuur 70.



Figuur 70: Snelheidscurve 200mm/min (3,33mm/s) afgeleid van de verplaatsingscurve

We zien dat de snelheid na de gekende wachttijd oploopt tot zijn eindwaarde en nadien deze waarde aanhoudt. Het is belangrijk dat de eindwaarde van de snelheid gelijk is aan de opgelegde snelheid. We hebben de gemiddelde snelheid bepaald vanaf het moment dat de snelheid constant blijft. De resultaten voor elk van de testsnelheden zijn terug te vinden in tabel 4.

Opgelegde snelheid (mm/min)	Werkelijke snelheid (mm/min)		
500	499,98		
400	399,99		
300	299,98		
200	199,99		
100	100,00		
50	50,00		
20	19,99		

Tabel 4: Vergelijking opgelegde snelheid en werkelijke snelheid

Uit de tabel wordt het duidelijk dat de werkelijke snelheid goed overeenkomt met de opgelegde snelheid.

Voorgaande conclusies betreffende de snelheid zijn enkel correct indien de uitlezing van de verplaatsing van de trekbank correct is. Het is daarom dat we de eindwaarde van de snelheid aan de hand van een tweede methode bepaald hebben. Aan de hand van een meetlat hebben we de tijd bepaald die de trekbank nodig heeft om een afstand van 100mm af te leggen. Uit beide gegevens is het mogelijk de bereikte snelheid te berekenen. Na drie herhalingen bekomen we voor een opgelegde snelheid van 200mm/min een gemiddelde snelheid van 200±1mm/min. Deze waarde bevestigt de voorgaande meting. Hieruit concluderen we dat de resultaten bekomen door middel van de uitlezing van de trekbank correct zijn.

3.4.1.3 Versnelling

Zoals zichtbaar op figuur 70 ondervindt de trekbank een versnelling vooraleer hij zijn eindwaarde bereikt. Gegevens tijdens deze versnelling zijn niet correct en hebben een negatief effect op de fitting. De duur van de versnelling dient bekend te zijn om deze foutieve gegevens te verwijderen. Lichte ruis op de uitlezing van de trekbank zorgt voor een kleine, verwaarloosbare, variatie op de snelheid. Deze variatie in snelheid maakt het onmogelijk de versnelling te analyseren door gebruik te maken van de afgeleide van de snelheid. De variatie in snelheid, hoe klein het verschil ook is, zorgt afwisselend voor een positieve en negatieve versnelling wat leidt tot grote schommelingen. Om toch een beeld te krijgen van versnelling hebben we voor elke opgelegde snelheid gekeken hoelang het duurt om de eindwaarde te bereiken. Voor deze analyse is de wachttijd reeds gecorrigeerd. Deze tijden zijn uitgezet in figuur 71.



Figuur 71: Tijd nodig om opgelegde snelheid te bereiken

De figuur bevestigt dat de versnelling langer duurt naarmate de opgelegde snelheid hoger is. Bij de maximale snelheid van 500mm/min duurt de versnelling 0,55s. We zullen bij alle verdere testen geen spanningsrekdata gebruiken gelegen in de eerste 0,55s.

3.4.1.4 Controle bij last

De voorheen besproken resultaten zijn gemeten zonder enige last tussen de klemmen. Het is mogelijk dat een belasting de resultaten beïnvloedt. Om hierover enige kennis te verkrijgen, hebben we de trekbank belast met een belasting gelijk aan de belasting bij verdere proeven. Deze belasting is een trekproef met een treksnelheid van 500mm/s op een polystyreen proefmonster bij 110°C. Ook hier blijkt de verplaatsing lineair te zijn. Daarnaast bereikt de trekbank opnieuw de opgelegde snelheid na 0,55s.

3.4.2 Uitwerking proefopstelling

Voor verdere testen wordt met al de voorgaande eigenschappen van de trekbank rekening gehouden of gecompenseerd. De volgende stap is het uitwerken van een proefopstelling zodat de bekomen krachtverplaatsingsdata nauwkeurig en betrouwbaar zijn.

Standaard is de trekbank uitgerust met een krachtsensor die kan meten tot 500kN. Het meten van de verplaatsing gebeurt aan de hand van uitwendige extensometers. Aangezien er metingen nodig zijn op hoge temperaturen (rond 130°C voor polystyreen) is een klimaatkast een tweede basisonderdeel van de proefopstelling. De beschikbare klimaatkast heeft een temperatuurbereik van -80°C tot 240°C. De proefopstelling met deze twee basisonderdelen ziet er dan uit zoals afgebeeld op figuur 66.

Om een proefopstelling en bijhorende werkwijze op te stellen zodat de verkregen data betrouwbaar en nauwkeurig zijn, is het vertrekpunt een standaard uniaxiale trekproef met bovenstaand beschreven basisonderdelen. Voor de start van een trekproef zijn er vanzelfsprekend ook trekstaafjes nodig van het te testen materiaal. Deze trekstaafjes zijn gestandaardiseerd volgens norm ISO527-2/1A. Op figuur 72 is een tekening van dit trekstaafje te zien met de belangrijkste afmetingen.



Figuur 72: Trekstaafje volgens norm ISO527-2/1A [23]

De belangrijkste maten op deze figuur zijn te zien in tabel 5. Hier is L_0 de meetlengte, L de initiële lengte tussen de inklemming, b_1 de breedte van het smalste gedeelte en b_2 de breedte aan de uiteindes. De dikte van het trekstaafje is, binnen een door de norm bepaald interval, afhankelijk van de dikte van de te testen plaat.

Tabel 5: Belangrijkste afmetingen van het trekstaafje volgens ISO527-2/1A [23]

L ₀	$50,0 \pm 0,5 \text{ mm}$
L	$115 \pm 1 \text{ mm}$
b ₁	$10,0 \pm 0,2 \text{ mm}$
b ₂	$20,0 \pm 0,2 \text{ mm}$

Bij gebruik van de door de norm gespecifieerde trekstaafjes en de genormeerde opstelling inclusief extensometers en klimaatkast, bleken enkele problemen op te duiken. Een opsomming van de problemen en onzekerheden, die optraden tijdens de eerste testen, is te zien in figuur 73.

Oorzaak

Gevolg

cbank	Uitwendige extensometers	Insnijding en slippen
Trek	50 kN krachtsensor	\Box Kleine meetkracht $ ightarrow$ onnauwkeurig
taaf	Trekstaafje 1 mm dik	Wapperen door luchtstroom
Treks	Trekstaafje meetlengte 50 mm	Te lage reksnelheid
itkast	Onbekend opwarmingsprofiel	Onzekerheid over uniforme opwarming
Klimaa	Beperkte opwarmtijd	Onzekerheid over kerntemperatuur

Figuur 73: Problemen waargenomen bij standaard uniaxiale trekproef

Het is duidelijk dat de oorzaken van de problemen, zoals getoond op de figuur, afkomstig zijn van verschillende onderdelen van de standaard proefopstelling. De eerste twee oorzaken zijn afkomstig van de trekbank terwijl de volgende twee terug te herleiden zijn naar de afmetingen van het trekstaafje. De laatste twee oorzaken zijn duidelijk afkomstig van de beperkte kennis over de klimaatkast. Ieder gevolg van deze oorzaken zal leiden tot een onnauwkeurige of slechte meting. Het is dus duidelijk dat er nog verschillende aanpassingen nodig zijn aan zowel testopstelling als werkwijze.

Verder wordt ieder probleem verduidelijkt en oplossingen voorgesteld.

3.4.2.1 Uitwendige extensometers

De eerste oorzaak die het onmogelijk maakt om een goede meting uit te voeren is het gebruik maken van uitwendige extensometers. De extensometers zoals afgebeeld op figuur 74 gaan de verplaatsing meten door op het trekstaafje te klemmen en rechtstreeks de verplaatsing van het proefmonster op te meten.



Figuur 74: Foto van oorspronkelijke testopstelling met extensometers aangeduid met rode cirkels

Zoals op de foto te zien is, zijn de extensometers in feite metalen mesjes die tegen het oppervlak van het trekstaafje zullen klemmen om zo de beweging nauwkeurig te kunnen volgen. In ons geval gaat dit zorgen voor insnijding en slippen omdat de trekstaafjes opgewarmd zijn tot boven T_g (glastransitietemperatuur) en hierdoor zacht en rubberachtig zijn zoals in een thermovormproces. Dit probleem is opgelost door in plaats van de extensometer rechtstreeks de verplaatsing van de klauwen uit te lezen.

3.4.2.2 50 kN krachtsensor en trekstaafje van 1mm dik

Om de problemen veroorzaakt door de volgende twee factoren beter uit te leggen is het vertrekpunt een grafiek met spanningsrekdata verkregen met de basisproefopstelling zoals zichtbaar op figuur 75.



Figuur 75: Krachtverplaatsingsdata gemeten volgens bovenstaande methode bij T=120°C

Het eerste wat opvalt aan de grafiek is dat de gemeten kracht bij een verplaatsing van 0mm niet gelijk is aan 0N. Er is een kleine kracht gemeten doordat na het meten van een vorige test de sensoruitlezing niet volledig naar 0N zal zakken. Om deze reden zullen we na iedere test de meting handmatig terug op 0N moeten zetten.

Ten tweede toont de grafiek dat er veel ruis aanwezig is. Dat valt meteen te herleiden naar twee oorzaken uit figuur 73, namelijk het gebruik van een krachtsensor met maximumlast van 50kN en het meten op trekstaafjes met een dikte van 1mm. Een sensor die grotere krachten kan meten kan meer foutmarge hebben bij het meten van kleine krachten dan een sensor die slechts kleine krachten kan meten omwille van het verschil in resolutie. Doordat de gebruikte trekstaafjes slechts een dikte van 1mm hebben en een breedte van 10 mm is de doorsnede klein en dus de kracht nodig voor vervormen ook kleiner dan wanneer de dikte bijvoorbeeld 5mm zou zijn. Aangezien op de figuur te zien is dat de kracht niet groter zal zijn dan 4,5N kunnen we concluderen dat het beter is een krachtsensor te gebruiken met een kleiner meetbereik. Vervolgens is het ook beter de kracht, nodig voor het vervormen, te vergroten door de dikte en zo de dwarsdoorsnede van het trekstaafje te vergroten. De krachtsensor die hiervoor ter beschikking is, heeft een maximum meetkracht van 1kN. De dikte van de trekstaafjes is verhoogd tot 5mm hetgeen toegelaten is door de norm. De krachtverplaatsingsdata verkregen met de aangepaste testmethode is afgebeeld in figuur 76.



Figuur 76: Krachtverplaatsingsdata verkregen met krachtsensor van 1kN en proefmonsterdikte van 5mm bij T=120°C

Op deze grafiek zijn de verbeteringen, bekomen door het aanpassen van de krachtsensor en proefmonsterdikte, zichtbaar. Het is duidelijk dat er bijna geen ruis meer is op de meting en de gemeten krachten ook groter zijn dan in voorgaande meting door aanpassing van de doorsnede.

3.4.2.3 Trekstaafje met meetlengte van 50mm

Zoals afgebeeld op figuur 73, is het gevolg van het gebruiken van een trekstaafje met meetlengte van 50mm dat de reksnelheden tijdens de trekproef laag zullen zijn t.o.v. de reksnelheden die bereikt kunnen worden in een thermovormproces (tussen $0.01s^{-1}$ en $10s^{-1}$).

De reksnelheid gehaald tijdens een uniaxiale trekproef is bepaald door de beginlengte (L_0) in mm en de treksnelheid (v) in mm/s volgens formule 37.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L_0} \left[1/s \right] \tag{37}$$

De mogelijk te bereiken reksnelheden, met de beschikbare trekbank, bij de verschillende treksnelheden en een trekstaafje met meetlengte van 50mm zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 6: Berekening reksnelheid

Treksnelheid (v) in mm/s	Beginlengte (L ₀) in mm	Reksnelheid ($\dot{\epsilon}$) in s ⁻¹
0,33 (20 mm/min)	50	0,0067
3,33 (200 mm/min)	50	0,067
8,33 (500 mm/min)	50	0,17

In de tabel is duidelijk te zien dat de maximum bereikte reksnelheid met deze proefopstelling slechts 0,17 s⁻¹ is. In de voorgaande uitleg over T-SIMFIT is echter al verteld dat deze reksnelheden zo dicht mogelijk rond die van het werkelijke thermovormproces moeten liggen. In een werkelijk thermovormproces wil dat dan zeggen tussen 0,01 s⁻¹ en 10 s⁻¹. Het is nu duidelijk dat de reksnelheden bekomen met een trekstaafje met meetlengte van 50mm enkel in het lage gebied van die reksnelheden liggen en dus als te laag beschouwd zijn. Om dat te verhogen kan ofwel de treksnelheid verhogen of de beginlengte verkleinen. Omdat de maximumtreksnelheid van de beschikbare trekbank 500 mm/min is, kan de reksnelheid enkel veranderen door de beginlengte te verkleinen.

Om binnen genormeerde omstandigheden te blijven moeten onderstaande afmetingen gebruikt worden.



Figuur 77: Trekstaafje volgens norm ISO 527-2/5A [23]

Tabel 7: Belangrijkste afmetingen van het trekstaafje volgens ISO527-2/5A [23]

L ₀	$20,0 \pm 0,5 \text{ mm}$
L	$50 \pm 2 \text{ mm}$
b ₁	$4 \pm 0,1 \text{ mm}$
b ₂	$12,5 \pm 1 \text{ mm}$

De dikte van het trekstaafje, volgens deze maten gefabriceerd, is zoals eerder vermeld gelijk aan 5 mm. Het is die nieuwe dikte die voor problemen zal zorgen bij het fabriceren van de trekstaafjes. Normaal gezien zijn de trekstaafjes gestanst maar dit is met het apparaat beschikbaar in Cel Kunststoffen onmogelijk bij een dikte van 5 mm. Als oplossing voor dit probleem zijn de trekstaafjes, bij FabLab op de MAD-Faculty in Genk, op maat gelaserd. De gefabriceerde trekstaafjes uit polystyreen zijn op figuur 78 afgebeeld samen met een trekstaafje met de standaard meetlengte van 50 mm.



Figuur 78: polystyreen trekstaafjes volgens norm ISO527-2/5A (wit) en volgens norm ISO527-2/1A (zwart)

De witte trekstaafjes zijn de nieuwe met een meetlengte van 20 mm. Het zwarte is het meest gebruikt trekstaafje met een meetlengte van 50 mm. Opnieuw uitrekenen van de reksnelheid met deze nieuwe beginlengte geeft de waarden weergegeven in tabel 8.

Treksnelheid (v) in mm/s	Beginlengte (L ₀) in mm	Reksnelheid ($\dot{\epsilon}$) in s ⁻¹
0,33 (20 mm/min)	20	0,017
3,33 (200 mm/min)	20	0,17
8,33 (500 mm/min)	20	0,42

Tabel 8: Berekening reksnelheid met beginlengte 20 mm

Uit de tabel blijkt dat de waarden voor de reksnelheid nog steeds in het lage gebied liggen van de reksnelheden bereikt in een typisch thermovormproces. Helaas is het niet mogelijk de reksnelheid verder te verhogen door de afmetingen van het trekstaafje nog kleiner te maken, aangezien dit de kleinst mogelijke is die binnen de norm valt. Wat dit als gevolg zal hebben op de nauwkeurigheid van de uiteindelijke simulaties is verder besproken in het gedeelte met resultaten.

3.4.2.4 Onbekend opwarmingsprofiel

Zoals eerder al beschreven zijn de mechanische eigenschappen van een kunststof sterk afhankelijk van de temperatuur. Zo zal bijvoorbeeld de elasticiteitsmodulus dalen naarmate de temperatuur stijgt. Aangezien bij aanvang van een trekproef een materiaal met uniform elasticiteitsmodulus gewenst is om lokaal geen veranderingen in spanningen te krijgen, is het dan ook belangrijk dat het trekstaafje overal tot op dezelfde temperatuur opgewarmd is.

Het probleem van de onbekende conductie en convectie in de klimaatkast zal leiden tot een onzekerheid over de uniforme opwarming. Om toch op een eenvoudige manier een idee te krijgen van de temperatuurverdeling bij het opwarmen is de proefopstelling zoals afgebeeld op figuur 79 gebruikt.



Figuur 79: Proefopstelling voor het in beeld brengen van de temperatuurverdeling in de klimaatkast

- 1. Klimaatkast,
- 2. Flir infraroodcamera,
- 3. Fluke infrarood temperatuurmeter,
- 4. Geklemd trekstaafje.

Een voorbeeld van een foto genomen met de infraroodcamera, tijdens het opwarmen van een polystyreen trekstaafje, is afgebeeld op figuur 80.



Figuur 80: Temperatuurverdeling vastgelegd met infraroodcamera

Op de bovenstaande foto is de temperatuurverdeling in de oven gemeten met de infraroodcamera afgebeeld. Wat hier direct opvalt zijn de vele blauwe en dus, volgens de legende aan de rechterzijde, koude zones. In werkelijkheid zijn deze zones echter niet koud maar zijn ze niet correct gemeten door de infraroodcamera omdat het zeer reflecterende oppervlakken zijn met dus een lage emissiefactor. De emissiefactor die werd ingesteld was 0,95-0,96, hetgeen als een standaardwaarde voor kunststof wordt aanzien. De bepaling van de temperatuur, van oppervlakken met een lage emissiefactor, kan niet via de infrarood methode. De gebruikte trekstaafjes zijn wel mat zodat hier de bepaling van de temperatuur wel mogelijk is. De temperatuurverdeling op het oppervlak van het trekstaafje is te zien in de zwart omcirkelde zone. De kleur is mooi homogeen over het hele oppervlak wat aantoont dat het trekstaafje homogeen zal opwarmen.

Om een nog duidelijker beeld te krijgen van de temperatuurverdeling is er op verschillende tijdstippen tijdens de opwarming een foto gemaakt. Op deze foto's is met behulp van verwerkingssoftware van Flir de temperatuur in verschillende zones gemeten. De foto's zien er dan uit zoals afgebeeld op figuur 81.

	Metingen		
	Sp1		108,9
	Li1	Max	109,4
		Min	106,8
		Average	107,9
	Li2	Max	109,1
ais in an areas		Min	107,2
A THIRD AND A THIRD		Average	107,9
	Parameters		
	Emissiegraad		0,95
	Gerefl. temp.		24,0°C
			Toon alles 🔻

Figuur 81: Temperatuurmeting op het oppervlak van het trekstaafje

Op de foto zijn er twee lijnstukken aangeduid op het oppervlak van het trekstaafje namelijk Li1 en Li2. Li1 is een lijnstuk dat over de breedte van het oppervlak van het trekstaafje getrokken is zo dicht mogelijk bij de inklemming. Li2 is in de lengte over het oppervlak getrokken. Van beide lijnstukken geeft de software de minimum, maximum en gemiddelde temperatuur. In de rechterkolom op de foto is dan te zien dat de gemiddelde temperaturen voor beide lijnstukken gelijk zijn wat opnieuw duidt op een homogene temperatuurverdeling over het oppervlak van het trekstaafje.

Zoals eerder aangehaald is dit proces op meerdere tijdstippen tijdens het opwarmen van een trekstaafje herhaald. Door al de meetpunten in functie van de tijd uit te zetten op een grafiek is het mogelijk een duidelijk beeld te vormen van het temperatuursverloop. Dit verloop is afgebeeld op figuur 82. Op de grafiek is voor ieder lijnstuk de gemiddelde temperatuur weergegeven.





Hoewel er in de eerste 40 seconden nog kleine afwijkingen zijn tussen de temperatuur in het midden en aan de klem is het toch duidelijk dat in beide zones de opwarming vrijwel uniform verloopt. Hierdoor is het verder niet nodig om nog andere maatregelen te treffen.

3.4.2.5 Beperkte opwarmtijd

De opwarmtijd is de tijd die nodig is om een homogene temperatuurverdeling te krijgen doorheen de dikte van het trekstaafje. Deze temperatuur moet gelijk zijn aan de temperatuur die voor het testen bepaald is en die zoals eerder besproken rond de temperatuur bij het thermovormen gelegen is. De temperaturen waarop de eerste testen zijn uitgevoerd zijn 110°C, 120°C en 130°C.

Tijdens de standaard testen is er vertrokken van een korte opwarmtijd van ongeveer 2 minuten. Dit is een geschatte tijd waardoor er geen enkele zekerheid is over de kerntemperatuur van het trekstaafje. Aangezien het de bedoeling is dat de kerntemperatuur exact gelijk is aan de opgelegde temperatuur is het belangrijk te weten gedurende welke tijd het trekstaafje in de klimaatkast op testcondities moet verblijven vooraleer de kern ook tot op de juiste temperatuur verwarmd is. De nodige opwarmtijd is bepaald op twee manieren namelijk zowel theoretisch alsook via een meting met een thermokoppel in de kern van het trekstaafje. De theoretische methode is gebaseerd op een wiskundige formule volgens Heisler-Gröber. Deze formule vormt de basis voor de Heisler kaart waarmee eenvoudig de temperatuur in het centrum van een oneindige vlakke plaat bepaald is door enkel rekening te houden met geleiding, convectie werd verwaarloosd. De formule zoals ze hieronder beschreven is geeft na invoeren in Matlab een temperatuursverloop in functie van de tijd voor het centrum van de plaat. De code ingegeven in Matlab is te vinden in bijlage A.

$$\frac{T(x,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{4\sin\lambda_n}{2\lambda_n + \sin 2\lambda_n} e^{-\lambda_n^2 \frac{\alpha t}{L^2}} \cos\frac{\lambda_n x}{L} \right]$$
(38)

Met:

T(x, t) de temperatuur op tijdstip t op locatie x in de plaat in °C. x=0 betekend het centrum van de plaat; T_{∞} de temperatuur aan de grenzen van de plaat in °C. De temperatuur in de klimaatkast;

 T_i de initiële temperatuur van de plaat in °C. Meestal de kamertemperatuur;

 $\lambda_n = \pi(n+0.5);$

n de sommatie-index van 0 tot ∞

 α de warmtediffusiviteit in m²/s. Ingevuld als 0,104 m²/s;

L de dikte van de plaat in mm. [24]

In figuur 85 is het resultaat voor T(x, t) weergegeven voor enkele testtemperaturen.



Figuur 83: Temperatuurverloop volgens Heisler-Gröber bij de testtemperaturen

Uit de figuur blijkt duidelijk dat een opwarmtijd van 2 minuten te kort is volgens Heisler-Gröber. Pas na ongeveer 500 seconden is de eindtemperatuur werkelijk bereikt. Let wel op dat het hier gaat om berekeningen voor een oneindige plaat en dus slechts een benadering voor een trekstaafje. Ook is er geen rekening gehouden met convectie die wel aanwezig is in de klimaatkast. Door convectie zou de temperatuur sneller stijgen.

Aangezien de theoretische methode voor het bepalen van de nodige opwarmtijd slechts een benadering is van de werkelijke situatie, is er een controle gebeurd aan de hand van een temperatuursmeting. De temperatuur is gemeten in het centrum van het trekstaafje door gebruik te maken van een thermokoppel. De meting is gebeurd voor dezelfde testtemperaturen die gebruikt zijn voor de gesimuleerde waarden bekomen volgens Heisler-Gröber. Door de gemeten waarden te vergelijken met de gesimuleerde, is het mogelijk een goede schatting te maken voor de nodige opwarmtijd van het trekstaafje. De grafieken bekomen voor iedere testtemperatuur zijn afgebeeld op figuur 84,85 en 86.



Figuur 84: Temperatuurverloop bij het opwarmen tot 110°C Heisler-Gröber/gemeten



Figuur 85: Temperatuurverloop bij het opwarmen tot 120°C Heisler-Gröber/gemeten



Figuur 86: Temperatuurverloop bij het opwarmen tot 130°C Heisler-Gröber/gemeten

Op iedere testtemperatuur zijn twee metingen uitgevoerd om zo de kans op meetfouten te verkleinen. Uit de figuren blijkt duidelijk dat, hoewel er bij de test op 110°C een afwijking is tussen gemeten en gesimuleerde waarden is, de tijd waarop de kerntemperatuur gelijk is aan de testtemperatuur ongeveer 500 seconden is. Dat wil dus zeggen dat het nodig is om 500 seconden te wachten tussen het inklemmen van het trekstaafje en het beginnen van de meting.

3.4.2.6 Conclusie

Door al de problemen die er waren met een standaard uniaxiale trekproef op te lossen zoals hierboven beschreven is het nu mogelijk een bruikbare en nauwkeurige meting van krachtverplaatsingsdata uit te voeren. De schematische voorstelling van de problemen met de standaard trekproef en de oplossingen gevonden voor het ontwikkelen van de geoptimaliseerde trekproef is afgebeeld op figuur 87.



Figuur 87: Verloop van basistrekproef naar geoptimaliseerde trekproef

De geoptimaliseerde trekproef gebaseerd op de beschikbare trekbank en klimaatkast kan dus uniaxiale trekproeven uitvoeren tot snelheden van 500mm/min en temperaturen tot 240°C. Om een goede meting te doen zijn volgende punten essentieel:

- Positiebepaling rechtstreeks door de trekbank;
- Gebruik maken van 1kN krachtsensor;
- Werken met trekstaafjes met dikte van 5mm en meetlengte 20mm;
- 500s wachten tussen inklemmen en start van de meting.

3.4.3 Krachtverplaatsingsdata

Nu de uniaxiale trekproef geoptimaliseerd is voor het testen onder condities die in een thermovormproces voorkomen, is het mogelijk betrouwbare krachtverplaatsingsdata te meten. Een voorbeeld van deze data bepaald volgens de bovenstaand beschreven methode is afgebeeld op figuur 88.



Figuur 88: Krachtverplaatsingsdata bepaald volgens uniaxiale trekproef

Het geteste proefmonster is opnieuw uit een polystyreen halffabricaat. De testen zijn uitgevoerd bij 110-,120- en 130°C en bij snelheden van 20-, 200- en 500mm/min. Voor ieder combinatie van krachtverplaatsing is de test drie maal uitgevoerd. De grafiek toont het gemiddelde van de drie herhalingen. Het zijn deze data die nu, net zoals bij de methode van IKT, de basis vormen voor de omrekening naar spanningsrekdata.

3.4.4 Spanningsrekdata

Aangezien de krachtverplaatsingsdata bepaald zijn aan de hand van een uniaxiale trekproef is het omrekenen naar spanning en rek relatief eenvoudig. De formules die hiervoor nodig zijn staan reeds beschreven in tabel 3.

De kracht en verplaatsingsgegevens gemeten door de trekbank zijn samen met de tijd en enkele proefmonsters gegevens in een tekstbestand opgeslagen. Het openen van dit bestand in Excel levert een overzicht van de gegevens zoals afgebeeld op figuur 89.

		А	В		С	D
1	Cross-sect	ion input	1	mm²	_	
2	Specimen	thickness a0	5,34	mm		
3	Specimen	width b0	3,67	mm		
4	Gauge len	gth	20,1575	mm		
5	Series		110-20-3			
6	Test durat	ion	Standard travel	Stanc	lard force	Strain
7	s		mm	N		mm
8		0,0400146	-3,10E-09		-0,163165	-3,10E-09
9		0,120015	-3,10E-09		-0,158013	-3,10E-09
10		0,240015	-3,10E-09		-0,166599	-3,10E-09
11		0,340015	-3,10E-09		-0,158013	-3,10E-09
12		0,420015	0,0028416		-0,051545	0,0028416
13		0,440015	0,0076544		0,0051234	0,0076544
14		0,460015	0,0131584		0,0583574	0,0131584
15		0,480015	0,0192256		0,109874	0,0192256
16		0,500015	0,0251648		0,142501	0,0251648
17		0,520015	0,0315136		0,171694	0,0315136
18		0,540015	0,0378624		0,187149	0,0378624
19		0,560015	0,0443648		0,212908	0,0443648
20		0,580015	0,0509184		0,224928	0,0509184
21		0,600015	0,057472		0,238666	0,057472
22		0,620015	0,0641024		0,248969	0,0641024
23		0,640015	0,070656		0,266142	0,070656

Figuur 89: Testgegevens geëxporteerd door de trekbank

In de bovenste rode kader op de figuur zijn de belangrijkste gegevens over het proefmonster opgesomd. Namelijk de dikte, breedte en meetlengte van het proefmonster samen met de naam van de testserie (110-20-3). De naam duidt op de temperatuur waarbij de test is uitgevoerd (110°C), de snelheid waarmee getrokken is (20 mm/min) en het volgnummer van de herhalingen (3). Verder zijn de tijd van de test, de afstand die de klem aflegt en de kracht hiervoor nodig, geëxporteerd. De laatste kolom, met wat hier de Strain genoemd is, is hetzelfde als de verplaatsing van de klem. Dit is een foute benaming van de kolom die automatisch gebeurd is bij het exporteren van de gegevens door de trekbank.

Aangeduid in de tweede rode kader staan de eerste vier meetpunten van de trekproef. Wat hier opvalt is dat, hoewel de tijd verder loopt, de klemmen nog niet verplaatsen en de kracht dan ook niet verandert. Ook begint de tijd niet op 0 seconden zoals verwacht is. Het is dus duidelijk dat het nodig is voor het verder verwerken van de gegevens de eerste meetpunten, waar er nog geen verplaatsing is, te verwijderen. De tweede stap is dan het corrigeren van het tijdsverloop zodat het eerste meetpunt overeenkomt met een tijd van 0 seconden. Voor iedere curve op figuur 88 zijn er 3 files zoals afgebeeld op figuur 89. Dit wil zeggen dat bij een volledige meting 27 van deze files horen. Voor iedere file is de correctie nodig zoals hierboven beschreven nog voor de verdere berekeningen mogelijk zijn. De verdere berekeningen, waaronder omrekenen naar spanning en rek en het selecteren van de punten, nodig in T-SIMFIT zullen samen met de voorgaande bewerkingen veel tijd in beslag nemen indien ze handmatig moeten gebeuren. Om deze reden is er door ons een Visual Basic for Applications-programma geschreven om het volledige proces van krachtverplaatsingsdata naar spanningsrekratio koppels te automatiseren. Al de bewerkingen die het programma uitvoert zijn hieronder verder verduidelijkt.

3.4.4.1 Automatische verwerking

Het programma dat de volledige verwerking van de kracht-verplaatstingsdata zal uitvoeren moet dus starten met het verwijderen van de eerste onbruikbare meetpunten en het opnieuw instellen van de tijdsmeting zoals hierboven beschreven. Dit levert het resultaat afgebeeld op figuur 90.

	А	В	С	D	E
1	Cross-section input	19,5978	mmí		
2	Specimen thickness a0	5,34	mm		
3	Specimen width b0	3,67	mm		
4	Gauge length	20,1575	mm		
5	Series	110-20-3			
6	Test duration	Standard travel	Standard force	Strain	corr_time
7	s	mm	N	mm	s
8	0,340015	-3,10E-09	-0,158013	0,00E+00	0
9	0,420015	0,0028416	-0,051545	0,002842	0,08
10	0,440015	0,0076544	0,0051234	0,007654	0,1
11	0,460015	0,0131584	0,0583574	0,013158	0,12
12	0,480015	0,0192256	0,109874	0,019226	0,14
13	0,500015	0,0251648	0,142501	0,025165	0,16
14	0,520015	0,0315136	0,171694	0,031514	0,18
15	0,540015	0,0378624	0,187149	0,037862	0,2
16	0,560015	0,0443648	0,212908	0,044365	0,22
17	0,580015	0,0509184	0,224928	0,050918	0,24
18	0,600015	0,057472	0,238666	0,057472	0,26
19	0,620015	0,0641024	0,248969	0,064102	0,28

Figuur 90: Krachtverplaatsingsdata na eerste stap in het verwerkingsprogramma

Op de figuur is duidelijk afgebeeld dat de eerste nutteloze punten verwijderd zijn en er een extra kolom is bijgekomen met de correcte tijdsweergave.

De volgende stap in het verwerken van de gegevens is het omrekenen naar werkelijke spanning en rek volgens de formules voor een lineair uniaxiale proef, formule 35 en 36. Lineair aangezien de verplaatsing in functie van de tijd voor onze trekproef lineair verloopt.

Het verwerkingsprogramma zal nu voor ieder meetpunt de rekratio en de spanning berekenen. Voor dat kan, is het nodig de reksnelheid te berekenen volgens formule 37. Al de gegevens die nodig zijn voor de verdere berekeningen zijn ter beschikking zodat het programma de volledige berekening kan uitvoeren. Het resultaat is afgebeeld op figuur 91.

	А	В	С	D	E	F	G
1	Cross-section input	19,5978	mmኅ				
2	Specimen thickness a0	5,34	mm				
3	Specimen width b0	3,67	mm				
4	Gauge length	20,1575	mm				
5	Series	110-20-3					
6	Test duration	Standard travel	Standard force	Strain	corr_time	rekratio	spanning
7	s	mm	N	mm	s		N/mm²
8	0,340015	-3,10E-09	-0,158013	0,00E+00	0	1,000	-0,008
9	0,420015	0,0028416	-0,051545	0,002842	0,08	1,001	-0,003
10	0,440015	0,0076544	0,0051234	0,007654	0,1	1,002	0,000
11	0,460015	0,0131584	0,0583574	0,013158	0,12	1,002	0,003
12	0,480015	0,0192256	0,109874	0,019226	0,14	1,002	0,006
13	0,500015	0,0251648	0,142501	0,025165	0,16	1,003	0,007
14	0,520015	0,0315136	0,171694	0,031514	0,18	1,003	0,009
15	0,540015	0,0378624	0,187149	0,037862	0,2	1,003	0,010
16	0,560015	0,0443648	0,212908	0,044365	0,22	1,004	0,011
17	0,580015	0,0509184	0,224928	0,050918	0,24	1,004	0,012
18	0,600015	0,057472	0,238666	0,057472	0,26	1,004	0,012
19	0,620015	0,0641024	0,248969	0,064102	0,28	1,005	0,013

Figuur 91: Resultaat van de omrekening naar rekratio en spanning

Het is duidelijk dat er twee kolommen zijn bijgekomen met voor ieder meetpunt de waarde voor de rekratio en de werkelijke spanning. De volledige omrekening van de krachtverplaatsingsdata uit figuur 88 naar de spanningsrekdata is nu voltooid. Het uitzetten van de spanning in functie van de rekratio levert grafieken zoals afgebeeld op figuur 92.



Figuur 92: Spanningsrekdata berekend door het verwerkingsprogramma

Deze spanningsrekdata vormen de basis voor het bepalen van de K-BKZ parameters nodig voor de thermovormsimulaties. Zoals eerder al uitgelegd zal het fittingsprogramma T-SIMFIT die parameters bepalen aan de hand van slechts enkele (meestal 10 tot 15) spanningsrekratio koppels. Het is dus nodig een selectie te maken van enkele waardes die in iedere meting terug te vinden zijn. Een rekratio gevonden in één file komt niet noodzakelijk overeen met die uit een andere file. Het is dan nodig een waarde hoger en lager dan de gekozen waarde te zoeken en de overeenkomstige spanningen te interpoleren om toch zo een correct mogelijke waarde te vinden. Dit volledige selectieproces is reeds verduidelijkt in hoofdstuk 2, paragraaf 2.2 en is volledig automatisch uitgevoerd door het verwerkingsprogramma.

Ter controle van het programma is het mogelijk de geselecteerde koppels uit te zetten op een grafiek zoals afgebeeld op figuur 93. Als alles goed verloopt, moeten de punten overeenkomen met de curves in figuur 92.



Figuur 93: Koppels van spanning en rekratio bepaald door het verwerkingsprogramma

De figuur toont de 15 koppels die in dit geval geselecteerd zijn voor de trekproeven op 130°C. Door te vergelijken met figuur 92 is het duidelijk dat de werking van het programma in orde is. Na het goedkeuren van de koppels voor iedere testtemperatuur kunnen de gegevens automatisch geëxporteerd worden in een tekstbestand klaar voor gebruik in T-SIMFIT. Zo een exportbestand is afgebeeld op figuur 94.

Input_TS	imFit - I	Kladblok			
Bestand Bev	werken	Opmaak	Beeld	Help	
strainrate "0,333mm/s	sinn "	nm/s "3,333n	m/s"	"8,333mm/s"	-
lengte 20 dikte 5. breedte 3.).182 341 644	mm mm mm			
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$.0°⊂ 158 265 367 465 565 750 844 935 031 123 217 315 409	0.000 0.442 0.636 0.966 1.121 1.275 1.432 1.590 1.754 1.921 2.091 2.269 2.453 2.640	0.000 0.72 1.02 1.24 1.45 1.64 1.63 2.22 2.43 2.22 2.43 2.86 3.09 3.33 3.59	D 4 1 9 3 8 7 1 1 7 3 5 9 9 9 9 9	
12 1 0. 1.288 0. 1.576 0. 1.864 0. 2.152 0. 2.44 0. 2.728 0. 3.016 0. 3.304 0. 3.304 0. 3.592 0. 3.88 0. 4.168 0. 4.168 0. 4.744 0. 5.032 0.	20°C 000 073 196 250 301 347 394 436 471 548 577 607 634	0.000 0.128 0.237 0.339 0.437 0.532 0.626 0.717 0.810 0.901 0.901 1.082 1.174 1.263 1.354	0.00 0.16 0.30 0.42 0.54 0.66 1.00 1.11 1.23 1.35 1.47 1.59 1.71	D 3 3 5 5 2 5 3 4 4 5 1 1 1 2	
13 1 0. 1.288 0. 1.576 0. 1.864 0. 2.152 0. 2.44 0. 2.728 0. 3.016 0. 3.304 0. 3.304 0. 3.592 0. 3.88 0. 4.168 0. 4.168 0. 4.744 0. 5.032 0.	0°C 000 045 117 144 167 202 212 223 233 233 233 233	0.000 0.075 0.150 0.217 0.280 0.338 0.3391 0.444 0.492 0.537 0.581 0.621 0.658 0.694 0.726	0.00 0.07 0.17 0.26 0.34 0.41 0.41 0.56 0.63 0.63 0.76 0.82 0.82 0.89 0.95 1.01	D 3 4 0 1 5 0 3 3 1 1 3 9 1 1 2	
▲					

Figuur 94: Spanningsrekdata geëxporteerd door het verwerkingsprogramma

In deze file staat alles wat T-SIMFIT nodig heeft voor het bepalen van de K-BKZ parameters. De volledige informatie over het verwerkingsprogramma is te vinden in bijlage B.

4 Validatie door middel van simulatie

De beschreven methode is gebruikt om de K-BKZ parameters van een polystyreen halffabricaat te bepalen. De berekening van de uiteindelijke K-BKZ parameters gebeurt met T-SIMFIT waardoor er spanningsrekdata nodig is bij drie snelheden en dat bij drie temperaturen. De trektesten zijn uitgevoerd bij 500mm/min, 200mm/min en 20mm/min.

Zoals eerder besproken, berekent het simulatieprogramma spanningen bij temperaturen afwijkend van de drie testtemperaturen door middel van tijd-temperatuur superpositie. De WLF-constanten voor deze tijd-temperatuur superpositie zijn bepaald aan de hand van de drie testtemperaturen waardoor tijd-temperatuur superpositie realistische spanningen oplevert zolang de temperatuur tijdens de simulatie tussen de twee uiterste testtemperaturen blijft. Wanneer de temperatuur buiten dit bereik treedt, is het mogelijk dat de berekende spanning foutief is. Dat kan leiden tot een plotse verandering in spanning en dus ook in de simulatieresultaten.

Voorafgaand aan een thermovormproces met een mannelijke matrijs is het mogelijk het vel, door middel van druk, tot een bel op te blazen dit om de materiaalverdeling te optimaliseren. Om het probleem van tijd-temperatuur superpositie aan te tonen beelden volgende figuren de simulatie van zo een bel af op twee tijdstippen. De simulatie bestaat uit het opblazen van een kunststofvel met een temperatuur van 150°C door het aanbrengen van een druk. Door afkoeling van het kunststofvel is de temperatuur op de rechtse figuur, op een verder tijdstip, lager als de temperatuur op de linkse figuur.



Figuur 95: Bel bij 131°C: hoogte 212mm



Figuur 96: Bel bij 129°C: hoogte 205mm

De simulatie is gemaakt aan de hand van K-BKZ parameters bij een referentietemperatuur van 140°C en dus gefit met spanningsrekdata bij 130°C, 140°C en 150°C. Het kunststofvel heeft op de linkse figuur nog een temperatuur van 131°C welke binnen de uiterste testtemperaturen ligt. De hoogte van de bel is op dat ogenblik 212mm. Op de rechtse figuur is de temperatuur gedaald tot 129°C welke buiten de uiterste testtemperaturen ligt. Ondanks dat de druk onveranderd is, daalt de hoogte van de bel tot 205mm. De reden hiervoor is te vinden in de tijd-temperatuur superpositie die tot foutieve resultaten leidt buiten het bereik van de testtemperaturen. Tijdens het verder dalen van de temperatuur, neemt de hoogte van de bel weer toe.

Het is dus belangrijk voor het bepalen van de K-BKZ parameters te schatten binnen welke bereik de temperatuur tijdens het thermovormproces zal variëren om op die manier de optimale testtemperaturen te kiezen voor de bepaling van de spanningsrekdata. Om het effect van de gekozen testtemperaturen op de bekomen eindresultaten duidelijker te maken, hebben we de spanningsrekdata bij vijf verschillende temperaturen bepaald. De temperaturen zijn gekozen op basis van de temperaturen waarbij polystyreen door middel van thermovormen verwerkt wordt. Deze temperaturen liggen tussen 130°C en 160°C. Rekening houdend met het afkoelen van het vel tijdens het proces kozen we ook temperaturen die lager liggen. Omwille van nauwkeurigheid mag de gemeten kracht tijdens de trekproef niet te laag zijn waardoor de testtemperatuur ook niet te hoog mag liggen. De uiteindelijke testtemperaturen zijn 110°C, 120°C, 130°C, 140°C en 150°C.

Aangezien T-SIMFIT slechts drie temperaturen nodig heeft voor de bepaling van een set K-BKZ parameters is het mogelijk K-BKZ parameters te bepalen bij meerdere referentietemperaturen. De referentietemperatuur is optimaal gekozen wanneer het de middelste temperatuur van de drie testtemperaturen is. Met vijf testtemperaturen is het dan mogelijk om bij drie verschillende referentietemperaturen een set K-BKZ parameters te bekomen. De eerste referentietemperatuur is 120°C gebaseerd op metingen bij 110°C, 120°C en 130°C. De tweede referentietemperatuur is 130°C gebaseerd op metingen bij 120°C, 130°C en 140°C. De laatste referentietemperatuur is 140°C gebaseerd op metingen bij 130°C, 140°C en 150°C. Door een vergelijking te maken tussen de resultaten van dezelfde simulatie bekomen met K-BKZ parameters bij verschillende referentietemperaturen krijgen we een beeld over de invloed van de testtemperaturen.

De polystyreen platen zijn geproduceerd door middel van extrusie. Extrusie is een proces waarbij een granulaat gesmolten wordt, nadien duwt een schroef het gesmolten materiaal door een matrijs waardoor het de vorm van de matrijs aanneemt. Indien de matrijs de vorm van een gleuf heeft, zal na afkoelen het granulaat verwerkt zijn tot een plaat.

Nadelig aan deze techniek is dat de schroef de kunststof door de matrijs forceert waardoor de kunststofketens een voorkeursrichting krijgen gelegen volgens de lengterichting van de plaat. Doordat de ketens vooral volgens de lengterichting liggen, is de plaat ook sterker in deze richting. Een trekstaafje gemaakt volgens de lengterichting van de plaat zal dan ook meer weerstand bieden tegen vervorming dan een trekstaafje gemaakt volgens de breedterichting. Een equibiaxiale trekproef werkt dit verschil weg doordat het materiaal gelijktijdig in breedte- en lengterichting vervormd wordt. Bij de uniaxiale trekproef is dat niet het geval. Daarom besloten we de trekproeven uit te voeren op proefmonsters volgens de lengte- en breedterichting van de plaat. Daarnaast is het mogelijk een gemiddelde van beide te maken. Op die manier leidt elke referentietemperatuur tot een set K-BKZ parameters volgens de lengte- en breedterichting van de plaat en een gemiddelde van beide. Later zal blijken welke richting tot de beste simulatieresultaten leidt.

Wegens onzekerheden en mogelijke afwijkingen die voorkomen tijdens de trekproeven hebben we elke combinatie van een richting, snelheid en temperatuur drie maal uitgevoerd wat leidt tot een totaal van 90 trekproeven. Deze trekproeven leiden tot K-BKZ parameters bij drie referentietemperaturen onder drie verschillende richtingen van de plaat wat een totaal van negen K-BKZ parameters oplevert.

4.1 Krachtverplaatsingsdata

De trekbank meet tijdens de trekproef de kracht, verplaatsing en bijhorend tijdstip op. Deze data kunnen ingelezen worden in Excel voor verdere verwerking. Voor verdere verwerking gebruikt het verwerkingsprogramma kracht-tijd data maar omdat de trekproeven gebeuren bij verschillende snelheden geeft een curve van de kracht in functie van de tijd een vertekend beeld. Daarom gebeurt de bespreking van trekcurves aan de hand van krachtverplaatsingsdata. Figuur 97 toont de krachtverplaatsingscurves bij elke mogelijke combinatie verkregen met de proefmonsters volgens de breedterichting van de plaat.





Iedere combinatie is driemaal herhaald maar deze figuur toont voor elke combinatie slechts één meting. Een vergelijking tussen de drie herhalingen op basis van de kracht heeft weinig belang aangezien er ook een variatie zit op de doorsnede van het proefmonster. Het is dan ook belangrijk voor ieder proefmonster de doorsnede te meten en te gebruiken in de verdere resultaatverwerking.

Zoals verwacht liggen de curves hoger naarmate de temperatuur en snelheid stijgt. Zo is te zien dat een meting bij een snelheid van 500mm/min en een temperatuur van 110°C leidt tot een kracht van ongeveer 13N terwijl diezelfde meting bij een temperatuur van 150°C een maximum kracht van slechts 1N oplevert. De curves bij een temperatuur van 110°C tonen aan dat polystyreen versterkt naarmate de vervorming toeneemt wat later belangrijk is voor het fitten van de data. Bij de overige temperaturen daalt de kracht eerst licht waarna hij ongeveer constant blijft. De kracht bij de meting met een snelheid van 20mm/min en een temperatuur van 150°C bereikt maximaal slechts 0,4N. Nadien daalt de kracht tot ongeveer 0,1N. Deze kracht is zeer klein in vergelijking met de maximale kracht van 1000N die de krachtsensor kan meten. Wanneer de testtemperatuur hoger lag dan 150°C was het onmogelijk de kracht bij 20mm/min voldoende nauwkeurig te meten.

Zoals eerder verklaard zal een kunststof plaat meer weerstand bieden in de lengterichting dan in de breedterichting. Figuur 98 en figuur 99 tonen het verschil in gemeten kracht tussen de lengte- en breedterichting bij verschillende snelheden en respectievelijk 110°C en 150°C.



Figuur 98: De richtingsafhankelijkheid van de kracht bij 110°C



Figuur 99: De richtingsafhankelijkheid van de kracht bij 150°C

Beide figuren tonen aan dat de kracht in de lengterichting onafhankelijk van de testtemperatuur en snelheid groter is dan de kracht in de breedterichting. De kracht kent in beide richtingen wel hetzelfde verloop er is enkel een verschuiving merkbaar.

4.2 Spanningsrekdata

De verwerking tot spanningsrekdata is gebeurd met het VBA (Visual Basic for Applications) verwerkingsprogramma. Dit programma rekent eerst de spanningen en de rekratio's uit en zal nadien de nodige punten selecteren. Deze spanningen zijn te zien op figuur 100 in functie van de rekratio.



Figuur 100: Spanning in functie van rekratio

Het programma rekent de curves uit figuur 100 uit voor elk van de drie herhalingen. Nu de krachten omgerekend zijn naar spanningen is de variatie in doorsnede in rekening gebracht waardoor het mogelijk is een vergelijking te maken tussen de herhalingen. Deze vergelijking is te zien in figuur 101 en figuur 102 voor respectievelijk 110°C en 150°C.



Figuur 101: Spanning-rekratio drie herhalingen bij 110°C



Figuur 102: Spanning-rekratio drie herhalingen bij 150°C

De metingen tonen goede overeenkomst bij de verschillende herhalingen. Dat toont ook aan dat de gebruikte opwarmtijd voor het materiaal correct is. Wanneer het materiaal niet steeds de juiste temperatuur behaalt, zouden er duidelijke afwijkingen zichtbaar zijn. Het is wel zo dat de afwijking tussen de herhalingen groter wordt naarmate de temperatuur stijgt en de gemeten kracht daalt. Kleine verschillen zijn te wijten aan plaatselijke variaties in het materiaal en aan onnauwkeurigheden van de krachtcel. Het programma berekent het gemiddelde van de drie curves en bepaalt nadien de nodige punten als input voor T-SIMFIT. Figuur 103 toont de geselecteerde punten voor de temperatuur van 110°C



Figuur 103: Geselecteerde spanningspunten door verwerkingsprogramma bij 110°C

Het verloop van de curves uit figuur 100 is terug te vinden in de posities van de punten. Het zijn deze punten die verder gebruikt worden voor de bepaling van de K-BKZ parameters.

4.3 Fitting door middel van T-SIMFIT

De uiteindelijke K-BKZ parameters zijn het resultaat van de fitting van de zonet besproken spanningsrekpunten door middel van T-SIMFIT. Bij de start van een nieuwe fitting vraagt T-SIMFIT enkele materiaalprameters zoals de dichtheid, de warmtecapaciteit en de warmtegeleidingscoëfficiënt. Deze zijn niet van belang voor de fitting maar zijn noodzakelijk bij verdere simulaties. Daarnaast is het belangrijk in te geven volgens welke type test de spanningsrekdata bekomen zijn. Figuur 104 toont de gegevens nodig voor onze fitting.

Test & Material Data			×
Material data - Heat transfer Material name: Density (kg/m ³) Heat Capacity (J/kg/K) Thermal Conductivity (W/m/K)	1050 1200 0.17	Material databank Read:	
Test data Reference temperature (C) Linear strain-time dependency Biaxial test	120		OK Cancel

Figuur 104: Gegevens fitting PS

Naast de materiaalgegevens zijn er nog een aantal opties die het eindresultaat beïnvloeden. Zo is het mogelijk het type demping te selecteren, een standaard waarde voor de WLF-constanten te gebruiken, geen demping te voorzien of een combinatie van verschillende opties te gebruiken. Wat het type demping betreft raad de handleiding aan om in het geval van een versterkend materiaal te kiezen voor Wagner-2 demping. Zoals zichtbaar in figuur 97 vertoont polystyreen een versterkend effect, we kozen dan ook voor een Wagner-2 demping.

Aangezien de verschillende opties leiden tot verschillende fittingen is het eerst nodig te weten bij welke opties de fitting het best slaagt. Daarom hebben we de fitting meermaals uitgevoerd bij verschillende instellingen. Figuur 105 geeft het resultaat weer van de fitting met punten uit de spanningsrekdata van het gemiddelde van de breedte- en lengterichting waarbij zowel de dempingsparameters als de WLF- constanten mee opgenomen zijn in de fitting. De data zijn afkomstig van een trekproef bij 130°C.



Figuur 105: Resultaat fitting met demping en WLF-constanten

De X-as van de grafiek toont de rekratio en de Y-as de bijhorende spanning. Op de figuur stellen de blauwe punten de spannings-rek punten voor. De paarse curve geeft het resultaat van de fitting weer. De fitting is optimaal wanneer de paarse lijnen door elk blauw punt lopen wat bij deze fitting bij de meeste punten het geval is. Er bestaan standaardwaarden voor de WLF-constanten die in een klein gebied rond de referentietemperatuur geldig zijn onafhankelijk van het materiaal ($C_1 = 17,44$ en $C_2=51,6$) [7]. Figuur 106 laat het resultaat van de fitting zien met dezelfde spannings-rek punten als in figuur 105 maar gebruikmakend van de standaard WLF-constanten.



Figuur 106: Resultaat fitting zonder WLF-constanten

In vergelijking met de fitting uit figuur 105 is de afwijking ten opzichte van de punten groter. Vooral bij toenemende rek wijken de gefitte curves sterk af van de meetpunten. Voor deze fitting werd een referentietemperatuur van 120°C gekozen. De omrekening van de spanningen vertrekkende van deze referentietemperatuur van 120°C naar de temperatuur van 130°C met behulp van de standaard WLF-constanten is onvoldoende accuraat. De temperatuur van 130°C wijkt al te zwaar af van de referentietemperatuur om de standaardconstanten te gebruiken.

Tot nu toe zijn de resultaten steeds voorzien van een demping van het type Wagner-2. Zoals vermeld is deze demping noodzakelijk om de stijging in spanning tegen te werken om zo realistische waarden te bekomen. T-SIMFIT bepaalt de dempingparameters tijdens het fitten, het is echter ook mogelijk een fitting te doen zonder demping. Het resultaat hiervan is te zien in figuur 107.



Figuur 107: Resultaat fitting zonder demping

Ook hier is de afwijking groter dan in figuur 105. Het ontbreken van de fitting zorgt voor een eerder exponentieel verloop van de curves in vergelijking met een lineair verloop bij het gebruik van de demping. Dat heeft tot gevolg dat de curves een grotere afwijking vertonen naarmate de rek toeneemt wat volledig aansluit bij de theoretische bespreking over de reden waarom de demping werd ingevoerd. Daarnaast sluiten de middelste punten, door de gebogen vorm van een exponentiële functie, slecht aan.

De vierde mogelijkheid is het fitten van de spanningsrekdata zonder gebruik te maken van de fitting van de demppingsparameters en de WLF-constanten. Dit resultaat toont figuur 108.



Figuur 108: Resultaat fitting zonder demping en zonder WLF-constanten

Opvallend is dat de fitting ditmaal verloopt op basis van twee reksnelheden. De reden hiervoor is waarschijnlijk terug te vinden in het aantal benodigde onbekenden voor de berekening van de parameters. Door de parameters niet mee te fitten zijn er ook minder data nodig. Ook hier is het duidelijk dat de fitting uit figuur 105 veel beter verliep. In dit geval wijken de curves sterk af van de punten. Daarnaast is opnieuw een eerder exponentieel verloop te herkennen.

Uit deze analyse blijkt dat de fitting het best verloopt door zowel de dempingsparameters als de WLFconstanten mee te fitten. Het is dan ook op deze manier dat de negen files K-BKZ parameters zijn bekomen. Deze files zijn terug te vinden in bijlage C. Opvallend aan de resultaten is, dat er bij elke temperatuur een goede aansluiting is met de meetpunten behalve bij 150°C. Dit resultaat is te zien op figuur 109.



Figuur 109: Resultaat fitting bij 150°C

De meetpunten vertonen bij elke reksnelheid een daling na het bereiken van een maximum. Bij de andere temperaturen volgden de meetpunten een stijgende lijn. Het is duidelijk dat de fitting problemen heeft met deze daling in spanning, wat leidt tot dit slechtere resultaat.

4.4 Validatie

Als validatie zijn de K-BKZ parameters van hetzelfde polystyreen bepaald door het IKT aan de universiteit van Stuttgart. Een vergelijking tussen simulaties, uitgevoerd in T-SIM, met de door ons bekomen K-BKZ parameters en de K-BKZ parameters van het IKT (terug te vinden in bijlage D) leidt tot een aantal conclusies. Zo hebben we de door ons gebruikte uniaxiale trekproef in simulatie uitgevoerd bij verschillende temperaturen en verschillende treksnelheden. Hetzelfde deden we voor de equibiaxiale stempelproef van het IKT. Tot slot simuleerden we het thermovormproces voor het vormen van een Samsonite kofferhelft, zowel door gebruik te maken van een mannelijke als een vrouwelijke matrijs.

4.4.1 K-BKZ parameters IKT

IKT vertrekt voor de bepaling vanuit een equibiaxiale rekproef op dezelfde testtemperaturen maar hogere treksnelheden. Voor de eigenlijke omrekening van de krachtverplaatsingsdata naar spanningsrekdata en uiteindelijk de K-BKZ parameters werkt IKT samen met Accuform [14].

Aangezien we zelf beschikken over het fittingsprogramma T-SIMFIT willen we zelf de parameters bepalen aan de hand van de verkregen krachtverplaatsingsdata. Vooraleer het mogelijk is de data te fitten, moet er eerst een omrekening gebeuren naar spanningsrekdata. Dit is echter niet zo eenvoudig. Aangezien Accuform de ontwikkelaar is van de fittingssoftware en ze graag zelf zo veel mogelijk fittingen doen, geven ze niet veel informatie prijs. De enige informatie die ter beschikking wordt gesteld zijn de krachtverplaatsingsdata en de uiteindelijk file met de K-BKZ parameters zoals afgebeeld op figuur 110.

T144_Fit_tmc_140 - Kladblok	
Bestand Bewerken Opmaak Beeld Help	
<pre>KBKZ wagner2 0.05 Time increment [s] /n 12 ==> Number of pairs 2.371370000e-002 7.858470000e+001 ==> tau(s) & a(Pa) 2.738420000e-002 6.474960000e+002 ==> tau(s) & a(Pa) 3.162280000e-002 4.200130000e+003 ==> tau(s) & a(Pa) 3.651740000e-002 1.393910000e+004 ==> tau(s) & a(Pa) 4.216970000e-002 1.87070000e+004 ==> tau(s) & a(Pa) 4.869680000e-002 8.389190000e+003 ==> tau(s) & a(Pa) 5.623410000e-002 8.657540000e+002 ==> tau(s) & a(Pa) 1.000000000e-001 3.037620000e+002 ==> tau(s) & a(Pa) 1.333520000e+000 4.301550000e+002 ==> tau(s) & a(Pa) 1.333520000e+000 6.870860000e+004 ==> tau(s) & a(Pa) 1.539930000e+000 1.911910000e+002 ==> tau(s) & a(Pa) 1.778280000e+000 2.679480000e+004 ==> tau(s) & a(Pa) 0.0 ==> Damping parameter(s) /w 0 140 0.0 5 80 0 ==> Arh [1/c], T0 [c], [dummy], WLF C1 [K], WLF C2 [K], Tsolid [C 999.9 ==> density (kg/m43) 1234 ==> heat capacity (J/kg/K) 0.33 ==> therm. conductivity (W/m/K) 5 GamaBend</pre>	:]

Figuur 110: Materiaalfile geleverd door Accuform

Het is deze file die rechtstreeks in T-SIM wordt geladen als materiaalfile zodat de eigenschappen van het materiaal tijdens het thermovormen gekend zijn. De parameters zijn bepaald voor exact hetzelfde materiaal waar al onze testen op gebeurd zijn. Er is getest op exact dezelfde temperaturen (130-,140- en 150°C) maar bij hogere snelheden (20-,200- en 500mm/s).

Ondanks het gebrek aan informatie over de omrekening van krachtverplaatsingsdata binnen Accuform is er een manier om de methode voor het bepalen van de spanningsrekdata proberen te achterhalen. Het vertrekpunt voor deze methode zijn de formules uit tabel 3 die gebruikt worden voor de omrekening wanneer de krachtverplaatsingsdata afkomstig zijn van één van de vier mogelijkheden uit de tabel. Het probleem is hier dat de equibiaxiale trekproef gebruikt door IKT niet exact overeenkomt met één van deze methodes. Maar aangezien dit de enige mogelijkheden zijn die Accuform vernoemt zal er verder gerekend worden met de formules gebruikt in het geval van een lineair biaxiale proef. De formules voor berekeningen in geval van een exponentiële verplaatsingsfunctie zijn uitgesloten door het uitzetten van verplaatsing in functie van tijd voor de krachtverplaatsingsdata die wel ter beschikking is (figuur 111).



Figuur 111: Lineair verband verplaatsing stempel in functie van de tijd



Figuur 112: Voorstelling biaxiale trekproef volgens Accuform [19]

De formules die in dit geval gebruikt worden voor de omrekening zijn dan als volgt. Voor het berekenen van de rekratio $\lambda(t)$ (formule 35) en spanning $\sigma(t)$ (formule 36).

Het vertrekpunt voor de omrekening zijn kracht-verplaatsingsdata bepaald door IKT voor een polystyreen folie met een dikte van 1mm. De equibiaxiale rekproef is uitgevoerd volgens de methode beschreven in hoofdstuk 3 paragraaf 3.3. De curves bepaald door IKT zijn getoond op volgende afbeelding. Dit is zoals eerder gezegd naast de K-BKZ parameters de enige informatie die Accuform ter beschikking stelt bij het testen van een proefmonster.



Figuur 113: Krachtverplaatsingsdata bepaald door IKT voor een proefmonster PS met dikte 1mm

Op de grafiek staan 27 curves voor testen uitgevoerd bij temperaturen van 130°C, 140°C en 150°C en snelheden van 20mm/s, 200mm/s en 500mm/s. Er is een duidelijk verschil zichtbaar tussen de verschillende curves op basis van vervormingsweg. De curve bepaald bij 150°C en 500mm/s geraakt zelfs niet voorbij 40mm. Dat wil zeggen dat de data vanaf dit punt is afgesneden door IKT. Wat ons doet vermoeden dat de minimum bereikte rek vrij laag is.

De minimum bereikte rek is van groot belang omdat deze rek en dus ook de overeenkomende rekratio bepalend zal zijn tijdens de selectie van de koppels voor spanning en rekratio. De selectieprocedure is reeds beschreven in het hoofdstuk over de T-SIMFIT. Wanneer de maximum rekratio, waarbij het mogelijk is de spanning te selecteren, laag is ten opzichte van de rekratio's bereikt in een gesimuleerd thermovormproces, zal dit de nauwkeurigheid niet ten goede komen. Dat omdat voor de grotere rekken het nodig is te extrapoleren naar hogere waarden waardoor de uitkomst veel minder nauwkeurig zal zijn.

Een benadering voor de maximum rekratio, bereikt in een test volgens IKT bij een vervormingsweg van 40mm is door ons berekend volgens de methode afgebeeld op figuur 114.



Figuur 114: Berekening rekratio bij een vervormingsweg van 40mm

Om de rekratio te berekenen volgens de formule op de figuur moeten eerst de afstanden L en L_0 gekend zijn. De afstand L_0 is gekend als de straal van de cirkelvormige opening onder het proefmonster (20mm). De afstand L is berekend als de kwart cirkelomtrek plus de schuine afstand tot tegen de stempel met straal 15mm. L is dan gelijk aan:

 $\sqrt{5^2 + (40 - 15)^2} + (0.25 \times \pi \times 15) = 37.3$ mm.

Dit geeft:

$$\lambda = \frac{37,3\text{mm}}{15\text{mm}} = 2,5$$
Dit is slechts een benaderende waarde aangezien vertrokken is van de veronderstelling dat de rek langs de rode lijn uniform is. In werkelijkheid zal tegen het oppervlak van de stempel de rek kleiner zijn waardoor die in het rechte gedeelte iets groter zal zijn. Toch is deze waarde voor de rekratio een goede indicatie waar rekening mee gehouden is in andere verificatie methodes.

Voor iedere curve zijn de meetpunten uitgezet in een Excel bestand met voor ieder proefmonster een apart tabblad. Naast de meetpunten is er nog extra informatie over het geteste proefmonster terug te vinden zoals afgebeeld op figuur 115.

	G35	- (0	f _x		
2	A	В	С	D	
1	T144_25				
2	130°	С			
3	20	mm/s			Dikte van het proetmonster in mm.
4	0,984	\leftarrow			
5	5,000	min 🔶			
6	Stahl	halbrund			Tiid in de klimaatkast voor
7	Zeit	Weg	Kraft		i iju ili uč klimatkast vool
8	[s]	[mm]	[N]		
9	0,000	0,000	0,000		
10	0,021	0,389	0,040		
11	0,042	0,809	0,070		
12	0,063	1,228	0,159		
13	0,084	1,648	0,336		
14	0,105	2,083	0,635		
15	0,127	2,522	0,900		
16	0,148	2,930	1,257		
17	0,169	3,323	1,636		
18	0,190	3,807	1,959		
19	0,211	4,280	2,493		
20	0,232	4,700	3,244		
21	0,253	5,150	4,086		
22	0,274	5,509	4,990		
23	0,295	5,974	5,768		
24	0,316	6,428	6,568		
25	0,338	6,893	7,572		
26	0,359	7,401	8,765		
27	0,380	7,927	9,943		
28	0,401	8,393	11,151		
29	0,422	8,778	12,333		
30	0,443	9,125	13,453		
31	0,464	9,499	14,496		
32	0,485	9,850	15,683		
33	0,506	10 285	16 913		

I I I I Kraft-Weg-Diagramm ↓ T144_130_20_01 ∠

Figuur 115: Gedeelte van de meetpunten voor de meting bij 130°C en een snelheid van 20mm/s

De extra informatie over het proefmonster meegegeven met de krachtverplaatsingsdata is bovenaan op de figuur afgebeeld. Zo is de testtemperatuur, stempelsnelheid, proefmonsterdikte en opwarmtijd meegegeven.

Voor ieder meetpunt is nu de tijdsduur, de verplaatsing en de kracht gekend samen met de extra informatie. Om de omrekening te doen naar spanning en rek zijn de formules gebruikt zoals eerder beschreven. Het is in deze stap dat er enkele onzekerheden zijn over de omrekening. Aangezien het niet gaat om een simpel rechthoekig proefmonster is het niet duidelijk welke afmeting Accuform gebruikt voor A_0 en L_0 .

Aangezien er ook na verschillende vragen aan Accuform geen verdere informatie is vrijgegeven over de exacte omrekening en de afmetingen voor A_0 en L_0 is er door ons met verschillende mogelijkheden verder gerekend. De beginafmetingen van het proefmonster zijn gekend zoals afgebeeld op figuur 116.



Figuur 116: Kunststofproefmonster gebruikt voor de testen door IKT

De diameter van het proefmonster is 60 mm maar in het hoofdstuk over de huidige methode is beschreven dat het proefmonster over een opening met een diameter van 40 mm is ingespannen. Om deze reden zal alleen dat gedeelte boven het opening vervormen en is het nodig verder te rekenen met de diameter van het gat. De dikte is gelijk aan 1 mm.

Om verschillende sets spanningsrekdata te berekenen is er gewerkt met verschillende combinaties voor de maten van A_0 en L_0 . Welke afmetingen er juist gekozen zijn is verduidelijkt aan de hand van volgende figuren.



Figuur 117: Mogelijkheid 1 voor de afmetingen van A_0 en L_0

In dit geval is de oppervlakte A_0 de halve doorsnede over de diameter van het proefmonster en L_0 de straal. Dan is $A_0=20 \text{ mm}^2$ en $L_0=20 \text{ mm}$.



Figuur 118: Mogelijkheid 2 en 3 voor de afmetingen van A₀ en L₀

De volgende twee mogelijkheden voor de combinatie van A_0 en L_0 zijn de doorsnede over de volledige diameter met ofwel de straal of diameters al lengte. Dat geeft dan:

- $A_0 = 40 \text{ mm}^2 \text{ en } L_0 = 20 \text{ mm};$
- $A_0 = 40 \text{ mm}^2 \text{ en } L_0 = 40 \text{ mm}.$



Figuur 119: Mogelijkheid 4 tot 6 voor de afmetingen van A_0 en L_0

Mogelijkheid 4 tot 6 zijn combinaties met verschillende maten voor L_0 voor een doorsnede over een cirkel met een straal van 17,5 mm. Deze straal is zo gekozen dat de doorsnede op een afstand midden tussen de stempeldiameter en de proefmonsterdiameter ligt. Dat geeft dan volgende combinaties:

- A₀ = 110 mm² en L₀ = 20 mm;
- $A_0 = 110 \text{ mm}^2 \text{ en } L_0 = 40 \text{ mm};$
- $A_0 = 110 \text{ mm}^2 \text{ en } L_0 = 110 \text{ mm}.$

Voor de laatste twee mogelijkheden is de oppervlakte van het bovenvlak van het proefmonster gebruikt in combinatie met verschillende waarden voor L_0 . De laatste mogelijkheden zijn dan als volgt:

- A₀ = 1256 mm² en L₀ = 20 mm;
- $A_0 = 1256 \text{ mm}^2 \text{ en } L_0 = 40 \text{ mm}.$

Door via de formules voor spanning en rekratio, voor iedere combinatie van A_0 en L_0 de krachtverplaatsingsdata te verwerken zijn er acht mogelijkheden voor de spanningsrekdata bekomen. De eenvoudigste manier om te controleren of één van deze gevallen overeenkomt met de methode van IKT is door rechtstreeks te vergelijken met hun data, maar deze wordt niet ter beschikking gesteld.

De enige manier om toch te verifiëren of één van de bovenstaande omrekeningen overeenkomt met die van IKT is door de uiteindelijke materiaalfiles met elkaar te vergelijken. Al de spanningsrekdata, bepaald volgens de bovenstaande methode, zijn verwerkt met het door ons geschreven verwerkingsprogramma waarna de fitting met T-SIMFIT is uitgevoerd.

Om de materiaalfiles onderling te vergelijken zijn ze in T-SIM geladen. Door dit te doen zal T-SIM voor iedere materiaalfile enkele spannings-rekcurven tekenen bij verschillende reksnelheden en referentietemperatuur (figuur 120). De referentietemperatuur is voor alle hier opvolgende grafieken 140°C.





Er is dus een grafiek getekend met spannings-rekcurves bij reksnelheden van 10 s^{-1} tot in dit geval 0,1 s⁻¹. Door dit voor iedere door ons gefitte materiaalfile te doen is het mogelijk te controleren of één van de berekeningen voor spanning en rek overeenkomt met die van IKT. Hieruit blijkt dat geen enkele berekening perfect overeenkomt. De enige die in de buurt komt heeft curves zoals afgebeeld op figuur 121.



Figuur 121: Spannings-rekcurves berekend met A0 =1256 mm², L0=20mm door T-SIM

Het is duidelijk dat er nog steeds een grote afwijking is tussen beide files. Een belangrijk punt dat opvalt aan deze curves is dat ze een meer exponentieel verloop lijken te hebben dan die bepaald door IKT. Dit doet ons vermoeden dat de file van IKT gefit is met als instelling in T-SIMFIT dat de gegevens via een exponentiële equibiaxiale rekproef bepaald zijn.

Om deze reden zijn onze gegevens opnieuw gefit ook met de instelling van een exponentiële proef in T-SIMFIT. De alzo verkregen materiaalfile is afgebeeld op figuur 122.



Figuur 122: Spannings-rekcurves berekend met A0 =1256 mm², L0=20mm (aangepaste fitting) door T-SIM

In dit geval is het duidelijk dat de waarden beter overeenkomen met die op figuur 120. Dit zou kunnen betekenen dat de omrekeningmethode van IKT bekend is. We kunnen hier echter niet van uit gaan aangezien er, om deze resultaten te bekomen, vanuit gegaan is dat het ging om een exponentiële equibiaxiale rekproef terwijl het werkelijk ging om een lineaire equibiaxiale rekproef. Dit maakt dat de spanningsrekdata, bepaald via de omrekening met $A_0 = 1256$ mm² en $L_0 = 20$ mm, geen goede data zijn om de parameters mee te fitten.

4.4.2 Simulatie uniaxiale trekproeven

Het is mogelijk met T-SIM een uniaxiale trekproef te simuleren door de wrijving tussen het kunststofvel en de matrijs oneindig groot te maken (wrijvingscoëfficiënt 10000). Door de wrijvingscoëfficiënt zo groot te maken zal de matrijs het proefmonster als het ware klemmen. Een inklemming aan de bovenzijde van het kunststofvel zorgt ervoor dat de matrijs aan het vel kan trekken. Wanneer de matrijs beweegt met een snelheid gelijk aan de gewenste treksnelheid stelt de simulatie een trekproef voor. De temperatuur van het kunststofvel is instelbaar net zoals de warmteoverdrachtcoëfficiënt naar de omgevingslucht. Door de warmteoverdrachtcoëfficiënt gelijk aan nul te stellen, is het mogelijk een constante temperatuur van het kunststofvel te bekomen zoals in het geval van een klimaatkast, dit om de werkelijke trekproef zo goed mogelijk te evenaren. Onderstaande figuur toont de opstelling van de uniaxiale trekproef in T-SIM.



Figuur 123: Opstelling trekproef in T-SIM

Het kunststofvel heeft een dikte van 5mm, een breedte van 3,7mm en een lengte van 44mm. De matrijs heeft een hoogte van 20mm. De lengte van het kunststofvel dat niet ingeklemd is bedraagt dan 22mm. Er is 2mm toegevoegd voor de overgang na de inklemmingen zodat het kunststofvel een uiteindelijke meetlengte heeft van 20mm. De trekstaafjes uit de werkelijke trekproeven hadden eveneens een meetlengte van 20mm. Wanneer de matrijs met dezelfde snelheid beweegt als de klem van de trekbank, ondervindt het kunststofvel dezelfde reksnelheid als het werkelijke trekstaafje. Hierdoor is het mogelijk een vergelijking te maken tussen de gesimuleerde resultaten en de werkelijke resultaten. De breedte en dikte zijn ook gelijk aan de werkelijke afmetingen om de simulatie zo realistisch mogelijk uit te voeren.

In dit geval geeft de kleur van het kunststofvel de temperatuurverdeling weer, de uniforme kleur wijst dan ook op een constante temperatuurverdeling zoals ook verkregen bij de werkelijke trekproeven.

Volgende figuur geeft de verplaatsing van de matrijs weer.



Figuur 124: Instelling snelheid matrijs

De groene lijn op de figuur toont het verloop van de verplaatsing. De lijn eindigt bij -80mm wat betekent dat de matrijs een uiteindelijke afstand van 80mm aflegt. Aangezien het kunststofvel een lengte heeft van 20mm heeft het vel op het einde van de beweging een lengte van 100mm. Deze gegevens invullen in de formules van rek en rekratio geeft volgende resultaten.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{(100mm - 20mm)}{20mm} = 4$$
$$\lambda = 1 + \varepsilon = 5$$

De werkelijke trekproeven bereikten altijd minstens een rek van 4 waardoor het mogelijk is de gesimuleerde trekproef volledig te vergelijken. De keuze van het tijdstip waarop de matrijs de eindafstand van 80mm bereikt, bepaalt de uiteindelijke treksnelheid. Op deze figuur bereikt de matrijs de afstand van 80mm in 9600ms wat leidt tot een treksnelheid van 8,33mm/s.

Figuur 125 en figuur 126 tonen respectievelijk de temperatuur- en spanningsverdeling in het kunststofvel op het einde van de trekproef.



Doordat de warmteoverdrachtcoëfficiënt nul is, is zoals verwacht op figuur 125 zichtbaar dat de temperatuur op het einde van de trefproef nog steeds constant verdeeld is. Figuur 126 laat zien dat het materiaal enkel vervormt over de meetlengte die een constante spanning heeft. Het kunststofvel kleurt uniform blauw over de lengte van de matrijs (inklemming). Figuur 127 laat zien dat de spanning hier zoals in werkelijkheid nul is.

De software kan op elk tijdstip de spanning weergeven over een doorsnede doorheen het kunststofvel. Op onderstaande figuur is zulke doorsnede zichtbaar na volledige uitrekking.



Figuur 128: Spanningsverloop doorheen kunststofvel

De X-as geeft de afstand doorheen het kunststofvel weer, de Y-as toont de bijhorende spanning. Op de figuur is opnieuw zichtbaar dat de spanning tussen de bovenste en onderste inklemming constant blijft. Door op verschillende tijdstippen doorheen de simulatie een doorsnede te maken en de spanning af te lezen, is het mogelijk trekcurves te bekomen zoals zichtbaar in figuur 103.

4.4.2.1 Analyse referentietemperaturen

Om het belang van een goede referentietemperatuur te bestuderen, voerden we de beschreven simulatie van de uniaxiale trekproef uit voor de vijf testtemperaturen (110°C, 120°C, 130°C, 140°C en 150°C) bij een snelheid van 500mm/min. De simulatie gebeurt op basis van de door ons bekomen K-BKZ parameters bij de drie verschillende referentietemperaturen (120°C, 130°C en 140°C) en op basis van de K-BKZ parameters bekomen door het IKT. Voor de bepaling van de K-BKZ parameters zijn deze trekproeven ook werkelijk uitgevoerd zodat het mogelijk is simulatiedata gelijktijdig uit te zetten met werkelijke data. Figuur 129 tot en met figuur 133 tonen de spanningen in functie van de rekratio die het resultaat zijn van simulaties en werkelijke trekproeven bij de vijf testtemperaturen. In elk punt is de spanning verkregen door middel van de methode uit figuur 128.



Figuur 129: Resultaat gesimuleerd trekproef bij 110°C



Figuur 130: Resultaat gesimuleerd trekproef bij 120°C



Figuur 131: Resultaat gesimuleerd trekproef bij 130°C



Figuur 132: Resultaat gesimuleerd trekproef bij 140°C



Figuur 133: Resultaat gesimuleerd trekproef 150°C

De referentietemperatuur is steeds de middelste temperatuur van de drie testtemperaturen. De grafieken tonen dat de gesimuleerde spanning de werkelijke spanning benadert enkel indien de temperatuur van de trekproef tussen de drie testtemperaturen ligt. Op figuur 129 valt de gesimuleerde spanning met K-BKZ parameters bij een referentietemperatuur van 120°C zo goed als samen met de werkelijke spanning. De temperatuur van de trekproef is 110°C welke één van de drie testtemperaturen is voor de referentietemperatuur van 120°C. De trekproef bij een temperatuur van 130°C uit figuur 131 is een mooi voorbeeld van deze conclusie. De temperatuur van 130°C is voor elk van de referentietemperaturen één van de drie testtemperaturen waardoor de curves bij elke referentietemperatuur hetzelfde resultaat geven.

Figuur 130 en figuur 131 geven de simulatieresultaten en werkelijke resultaten weer van de trekproeven bij respectievelijk 120°C en 130°C. Ondanks dat deze temperaturen binnen de drie testtemperaturen van de K-BKZ parameters liggen, wijkt de spanning toch nog af van de werkelijke spanning. Aangezien de K-BKZ parameters gefit zijn met de werkelijke spanning en de fitting goed geslaagd is, zouden de werkelijke spanning en de gesimuleerde spanning gelijk moeten zijn. Een mogelijke verklaring is terug te vinden in het algoritme van de fitting. Het fittingsprogramma simuleert de testmethode voor de bepaling van de spanningsrekdata en vergelijkt de gesimuleerde spanning met de werkelijke spanning. Het programma past de K-BKZ parameters aan tot beide overeenkomen. Het is mogelijk dat, ondanks dat onze data bekomen zijn met een uniaxiale trekproef, het fittingsprogramma gebruik maakt van een equibiaxiale stempelproef voor de benadering van een uniaxiale trekproef.

Indien de simulatie gebeurt bij een temperatuur lager dan de drie testtemperaturen ligt de gesimuleerde spanning veel lager dan de werkelijke spanning wat te zien is in figuur 129 voor de referentietemperaturen 130°C en 140°C. Het omgekeerde geldt in figuur 132 en figuur 133 waar de simulatie gebeurt bij een temperatuur hoger als de testtemperaturen van de referentietemperatuur 120°C.

De K-BKZ parameters verkregen via het IKT hebben een referentietemperatuur van 140°C. Voor de fitting van deze parameters zijn dezelfde testtemperaturen gebruikt als voor onze K-BKZ parameters met een referentietemperatuur van 140°C. Op elk van de bovenstaande grafieken is dan ook te zien dat simulaties met beide K-BKZ parameters leiden tot dezelfde spanning indien de rekratio lager ligt dan 2,5. Eenmaal de rekratio hoger ligt blijft de spanning ongeveer constant in tegenstelling tot de werkelijke spanning. De verklaring hiervoor is terug te vinden in de data waarmee de K-BKZ parameters gefit zijn. Deze spanningsrekdata kunnen maar gebruikt worden tot een rek van 2,5 omdat dit de maximum rek is bij enkele stempelproeven zoals in een vorig hoofdstuk verklaard (hoofdstuk 4.4.1).

4.4.2.2 Analyse treksnelheden

De handleiding van T-SIMFIT raadt aan dat de spanningsrekdata, voor de fitting, afkomstig moeten zijn van proeven waarbij de reksnelheid in de buurt ligt van de reksnelheid uit de thermovormprocessen. De beschikbare trekbank op Cel Kunststoffen heeft een maximale snelheid van 500mm/min (8,33mm/s) wat leidt tot een reksnelheid van 0,42 s⁻¹. Bij thermovormprocessen kan de reksnelheid oplopen tot 10 s⁻¹ waardoor de beschikbare trekbank niet optimaal is. De spanningsrekdata van het IKT is bekomen met volgende reksnelheden: 1 s⁻¹; 10 s⁻¹ en 25 s⁻¹. De door het IKT gebruikte reksnelheden zijn veel hoger dan de door ons gebruikte reksnelheden.

Om de invloed van deze lage reksnelheden in onze proeven te controleren hebben we de trektesten gesimuleerd voor snelheden: 8,33mm/s; 20mm/s; 100mm/s en 200mm/s. Deze snelheden leiden voor een trekstaafje met een meetlengte van 20mm respectievelijke tot volgende reksnelheden: 0,42 s⁻¹; 1 s⁻¹; 5 s⁻¹ en 10 s⁻¹. De verschillende snelheden zijn getest bij 130°C, 140°C en 150°C. De simulatie is uitgevoerd op basis van onze K-BKZ parameters bij een referentie temperatuur van 140°C en met de K-BKZ parameters van het IKT eveneens bij een referentietemperatuur van 140°C. Figuur 134 tot en met figuur 136 geven de bekomen spanningen weer in functie van de rekratio.



Figuur 134: Gesimuleerde trekproef bij verschillende snelheden en een temperatuur van 130°C



Figuur 135: Gesimuleerde trekproef bij verschillende snelheden en een temperatuur van 140°C



Figuur 136: Gesimuleerde trekproef bij verschillende snelheden en een temperatuur van 150°C

De spanningscurves bij een snelheid van 8,33mm/s of een reksnelheid van 0,42 s⁻¹ zijn gelijk aan de curves uit het vorige hoofdstuk. De conclusies omtrent deze curves zijn dan ook identiek, tot een rekratio van 2,5 zijn de curves gelijklopend voor beide K-BKZ parameters. Eens de rekratio groter is als 2,5 ligt de spanning, bekomen met de K-BKZ parameters van het IKT, lager dan de spanning bekomen met onze K-BKZ parameters. Het verloop van de spanningen bij een snelheid van 20mm/s of een reksnelheid van 1 s⁻¹ verschilt licht voor beide K-BKZ parameters. De afwijking tussen de spanningen, bekomen met de verschillende K-BKZ parameters, neemt toe naarmate de temperatuur stijgt.

De figuren geven weer dat simulaties bij hogere reksnelheden leiden tot grote afwijkingen in spanningen tussen beide K-BKZ parameters. De spanningen uit simulaties met de K-BKZ parameters van het IKT kunnen het dubbel zijn van de spanningen bekomen met onze K-BKZ parameters. Naarmate de reksnelheid stijgt, stijgt ook de afwijking.

De verklaring is terug te vinden in de gebruikte spanningsrekdata voor de fitting. IKT gebruikt volgende reksnelheden: 1 s^{-1} ; 10 s^{-1} en 25 s⁻¹. De door ons gebruikte spanningsrekdata zijn afkomstig van trekproeven met volgende reksnelheden: $0,0167 \text{ s}^{-1}$; $0,167 \text{ s}^{-1}$ en $0,42 \text{ s}^{-1}$. De simulatiesoftware bekomt spanningen bij hogere of lagere reksnelheden door middel van extrapolatie. Doordat de door ons gebruikte reksnelheden laag zijn, zal de extrapolatie bij hoge reksnelheden tot fouten leiden.

De simulatiesoftware heeft de mogelijkheid de K-BKZ parameters om te zetten naar spannings-rek curves bij verschillende reksnelheden. Hierbij gaat het programma uit van een exponentieel verloop van de rek waardoor het onmogelijk is de spanningen te vergelijken met de spanningen uit de simulaties of uit de werkelijke trekproeven. Het is echter wel mogelijk de spanningen van twee K-BKZ parameters relatief te vergelijken en daarmee de resultaten uit de simulaties te staven. Figuur 137 geeft de spannings-rek curve weer bekomen door T-SIM bij een temperatuur van 140°C met de K-BKZ parameters van het IKT bij een referentietemperatuur van 140°C. Figuur 138 geeft dezelfde curves weer voor de door ons bekomen K-BKZ parameters.



Figuur 137: Spannings-rek curve van K-BKZ parameters IKT door T-SIM



Figuur 138: Spannings-rek curve van onze K-BKZ parameters door T-SIM

De curves zijn spannings-rek curves bij verschillende reksnelheden (0.01 tot 10 s⁻¹). Vertrekkende bij de bovenste curve hebben de curves volgende reksnelheden: 10 s^{-1} ; 3 s^{-1} ; 1 s^{-1} ; $0,3 \text{ s}^{-1}$; $0,03 \text{ s}^{-1}$; $0,03 \text{ s}^{-1}$; $0,01 \text{ s}^{-1}$. Ook deze figuren tonen aan dat bij hoge reksnelheden de spanningen bekomen met de parameters van het IKT tot tweemaal zo hoog zijn als de spanningen bekomen met onze parameters.

Rond de curve met een reksnelheid van 1 s⁻¹ komen de spanningen afkomstig van beide K-BKZ parameters terug samen. Hetzelfde was merkbaar tijdens de simulaties van de trekproeven. Eenmaal de reksnelheid lager is als 1 s⁻¹, is de spanning verkregen met de parameters van het IKT lager dan de spanning bekomen met onze parameters. Voor de zeer lage reksnelheden (0,1 tot 0,01 s⁻¹) is de spanning verkregen met de parameters van het IKT zo goed als nul onafhankelijk van de rek terwijl er met onze parameters wel nog een spanning merkbaar is. Tijdens de bepaling van onze K-BKZ parameters hebben we trekproeven gedaan bij een reksnelheid van 0,0167 s⁻¹. De spanning tijdens deze proeven was duidelijk groter dan nul zodat we weten dat de resultaten bij lage reksnelheden bekomen met de K-BKZ parameters van het IKT niet realistisch zijn.

Samengevat levert de analyse van de treksnelheden volgende conclusies. De K-BKZ parameters bekomen door het IKT zijn gefit met spanningsrekdata bij hoge reksnelheden. De spanningen bij hoge reksnelheden zijn hierdoor realistisch. Echter in het gebied van de lage reksnelheden leiden deze parameters tot een onderschatting van de spanning welke een gevolg is van de extrapolatie. De door ons bekomen K-BKZ parameters zijn gefit met spanningsrekdata bij lage reksnelheden. Bij hoge reksnelheden onderschatten onze parameters de spanning. Ook dat is een gevolg van extrapolatie doordat de trekproeven bij ons enkel mogelijk zijn bij lage reksnelheden. Bij lage reksnelheden is de spanning bekomen met onze K-BKZ parameters wel realistisch. Spanningen bekomen bij reksnelheden, gebruikt bij de fitting van beide parameters, zijn vergelijkbaar voor beide sets van parameters.

4.4.2.3 Analyse breedte, lengte en gemiddelde

We hebben omwille van het extrusieproces, K-BKZ parameters bepaalt onder drie richtingen in het vel: breedterichting, lengterichting en onder 45° (gemiddelde van de breedterichting en lengterichting). Voor de bepaling van een set K-BKZ parameters zijn minimaal 27 trekproeven nodig. Wanneer het werkelijk nodig is om de K-BKZ parameters onder verschillende richtingen in het vel te bepalen, verdubbelt dit aantal wat ook een verdubbeling van de in beslag genomen tijd betekent. Indien resultaten aantonen dat er weinig verschil merkbaar is in simulatieresultaten bekomen met de K-BKZ parameters onder de verschillende richtingen, is het niet nodig deze extra metingen uit te voeren. Als controle simuleerden we opnieuw de trekproef, ditmaal met K-KBZ parameters met dezelfde referentietemperatuur maar afkomstig van spanningsrekdata onder verschillende richtingen in het vel. Figuur 139 tot en met figuur 141 geeft de resultaten van deze simulaties weer.





Figuur 139: Gesimuleerde trekproef bij 130°C met K-BKZ parameters onder verschillende richtingen

Figuur 140: Gesimuleerde trekproef bij 140°C met K-BKZ parameters onder verschillende richtingen



Figuur 141: Gesimuleerde trekproef bij 150°C met K-BKZ parameters onder verschillende richtingen

De simulaties tonen aan dat het niet noodzakelijk is de K-BKZ parameters onder verschillende richtingen te bepalen. In de simulatie ligt de spanning, bekomen met de K-BKZ parameters afkomstig van spanningsrekdata volgens de lengte richting van het vel, hoger als de spanning volgens de overige richtingen. Het verschil is echter niet groot genoeg om de extra tijd, die de trekproeven in beslag nemen, te verantwoorden.

4.4.3 Simulatie equibiaxiale proef IKT

Het IKT maakt gebruik van een equibiaxiale proef voor het verkrijgen van spanningsrekdata nodig voor de fitting van de K-BKZ parameters. De spanningsrekdata gebruikt voor de fitting van onze K-BKZ parameters is afkomstig van een uniaxiale trekproef. Zoals eerder beschreven komt een thermovormproces eerder overeen met een equibiaxiale proef waardoor deze de voorkeur verdient op een uniaxiale trekproef. Door een equibiaxiale proef te simuleren in T-SIM is het mogelijk te bestuderen of het gebruik van een uniaxiale trekproef voor de bepaling van de K-BKZ parameters een invloed heeft op de resultaten van een equibiaxiale simulatie. De equibiaxiale proef vertrekt van het kunststofvel zichtbaar op volgende figuur.



Figuur 142: Kunststofvel voor simulatie stempelproef

Het kunststofvel is, overeenstemmend met de werkelijke stempelproef, volledig ingeklemd op een cirkel met diameter 40mm. Het is door deze cirkel dat de stempel, met diameter 36mm, beweegt om het vel uit te rekken. De temperatuur van het kunststofvel is opnieuw instelbaar. De werkelijke proef vindt plaats in een klimaatkast zodat de warmteoverdrachtcoëfficiënt ook hier nul is. De instelling van de snelheid van de stempel is analoog aan de instelling van de snelheid in de simulatie van de uniaxiale trekproef. De uiteindelijke simulatie is afgebeeld op onderstaande figuur.



Figuur 143: Simulatie stempelproef

Om aan de hand van deze simulaties tot conclusies te komen, is het nodig de spanning uit te zetten in functie van de rekratio. De spanning is in dit geval constant over een cirkelvormige doorsnede. De plaats van doorsnede verandert doorheen de tijd en wordt bepaald door de maximale spanning. Op onderstaande figuur geeft de kleur de spanningsverdeling weer.



Figuur 144: Spanningsverdeling stempelproef

De rode band geeft de positie van de doorsnede met de maximale spanning weer. Op deze positie maken we met de software een doorsnede en lezen we de spanning uit. Het spanningsverloop is zichtbaar op volgende figuur.



Figuur 145: Spanningsverloop stempelproef

De spanning zou constant moeten zijn over de volledige doorsnede. De figuur toont aan dat dit niet het geval is tijdens de simulatie. Er zit een grote spreiding op de spanning. Hierdoor is het onmogelijk een correcte waarde te geven aan de spanning op de verschillende tijdstippen en bijhorende spannings-rek curves op te stellen. Onderstaande figuur verduidelijkt de reden voor de slechte spanningsverdeling.



Figuur 146: Elementen in kunststofvel bij stempelproef

De aspect ratio van de elementen in de rode zones is zodanig hoog dat dit leidt tot spanningspieken. Bij deze simulatie is het aantal elementen reeds verhoogd. Doordat het vrijwel onmogelijk is een eenduidige waarde voor de spanning af te lezen hebben we de simulatie van de proef verder niet gebruikt.

4.5 Simulatie Samsonite koffer

Om de door ons bekomen K-BKZ parameters verder te vergelijken met de parameters bepaald door IKT voor hetzelfde materiaal, zijn er nog extra simulaties uitgevoerd. In tegenstelling tot de gesimuleerde trekproef gaat het nu om een werkelijk geproduceerd thermovormproduct namelijk een schaaldeel van een Samsonite koffer (figuur 147).



Figuur 147: Samsonite bagagekoffer [25]

Het gesimuleerde deel van deze koffer is de gegolfde kap aan de voorkant van de koffer. Bij het thermovormen van dit product is vooral de sterkte van het onderdeel van groot belang. Om deze reden zal de designer dan ook zeer geïnteresseerd zijn in de dikteverdeling doorheen het product. Het is dan ook logisch de simulaties in dit geval niet op basis van spanningen met elkaar te vergelijken maar wel op basis van de dikteverdelingen in een doorsnede.

Om het product te kunnen simuleren in T-SIM is er een matrijs nodig. In T-SIM volstaat een 3D tekening van de matrijs als input. Zoals beschreven in het gedeelte thermovormen is het mogelijk producten zowel rond een vrouwelijke als een mannelijke matrijs te vormen. Beide zijn ter beschikking zodat in beide gevallen de dikteverdeling bestudeerd is. Op figuur 148 en 149 zijn de matrijzen voorgesteld zoals gebruikt in de simulatie.



Figuur 148: Mannelijke matrijs voor het vormen van Samsonite kofferdeel



Figuur 149: Vrouwelijke matrijs voor het vormen van Samsonite kofferdeel

Beide matrijzen leveren hetzelfde product met identieke hoofdmaten maar verschillend dikteprofiel door het verschil in vormproces wat verder duidelijk wordt.

4.5.1 Simulatie van vacuüm vormen over mannelijke mal

Voor het vormen van het kofferonderdeel over de mannelijke vorm is er nog een extra mogelijkheid. Buiten het vormen in één stap is het ook mogelijk een proces bestaande uit twee stappen te simuleren. Het kofferonderdeel kan in twee stappen gevormd worden door het kunststof vel eerst voor te blazen. Dit zal opnieuw een andere meer homogene dikteverdeling opleveren.

In beide gevallen is het volgens de ontwikkelaars van T-SIM mogelijk een nauwkeurige simulatie uit te voeren. Het is echter gebleken dat softwareproblemen er voor zorgden dat er geen realistische simulatie mogelijk was voor het voorblazen in het vormproces. Dit is aangetoond in het begin van hoofdstuk 4. Om deze reden zijn de simulaties door ons beperkt tot het vormen in één stap.

Door deze simulatie uit te voeren met de verschillende parametersets, die door ons en door IKT bepaald werden, is het mogelijk de parameters onderling te vergelijken op basis van het gesimuleerde dikteprofiel.

De gebruikte parametersets zijn hetzelfde als die gebruikt bij de simulaties van de trekproef, hierdoor is het mogelijk om een eventuele link te leggen.

Vormen in één stap

Zoals uitgelegd in het gedeelte over thermovormen (hoofdstuk 1) zal bij het vormen in één stap de verwarmde kunststof plaat vervormen door het door middel van een vacuüm tegen de matrijs te drukken en zo te vervormen. In de beginsituatie zal het verwarmde kunststofvel dus boven de matrijs hangen zoals afgebeeld op figuur 150.



Figuur 150: Beginsituatie van thermovormsimulatie van een Samsonite kofferdeel

Aan de uniform rode kleur is duidelijk te zien dat het vel overal dezelfde temperatuur heeft zoals het geval is in het ideale proces. Omdat het vel niet onmiddellijk in contact komt met de matrijs zal het lichtjes doorzakken waardoor er al een kleine vervorming is voor de start van het eigenlijke vormproces. Deze doorzakking is zo klein dat het slechts voor een verdunning van 0,01 mm zorgt in het centrum van het vel.

Net zoals bij de simulatie van de trekproef is het nodig de wrijving en warmteoverdracht tussen het kunststofmateriaal en de matrijs in te geven om een zo nauwkeurig mogelijke simulatie te krijgen. Ook is het mogelijk de temperatuur van de matrijs, de omgevingstemperatuur en de

warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen de lucht en het materiaal in te voeren. Dat alles is ingegeven zoals afgebeeld op figuur 151.

Heat and Friction 1	
Tool selection Temperatures (°C) Tool # T 1 50	Apply changes in tool data Apply to all
Heat transfer coefficient (W/m^2/K)	
Tool 1 / HtTrans 750	
Friction coefficient	
Tool 1 / Mu_0 0,6	
Ambient Air Ambient Air Temperature Ambient Air Heat transfer	Material 5

Figuur 151: Invoeren van de warmteoverdracht en wrijving tussen materiaal en mal

De warmteoverdrachtcoëfficiënt ligt voor een aluminium matrijs tussen 500 W/m²/K en 1000 W/m²/K. De wrijvingscoëfficiënt is afhankelijk van de materiaalsoort en ruwheid van de matrijs, in T-SIM gedefinieerd zoals afgebeeld op figuur 152 [14].



Figuur 152: Definitie van de wrijvingscoëfficiënt in T-SIM [14]

Het blauwe blokje stelt een kunststofproefmonster voor gelegen op een oppervlak dat kan hellen onder een hoek α . De tangens van de hoek α wordt de wrijvingscoëfficiënt genoemd. Standaard staat deze op 1 bij de start van een nieuwe simulatie. Om de invloed van de coëfficiënt op onze simulaties te bestuderen, is de simulatie bij verschillende waarden uitgevoerd in een interval van 0 tot 2. Hieruit blijkt dat de invloed vanaf een waarde groter dan 0,5 in het geval van de Samsonite koffer geen invloed meer heeft op het uiteindelijke resultaat.

Om zeker te zijn dat de waarde voor polystyreen op de Samsonite matrijs niet kleiner is dan 0,5 zijn er enkele testen uitgevoerd op een inox plaat met identieke ruwheidswaarde (Ra=0,17). Voor de test is er vertrokken van een proefmonster op kamertemperatuur. De temperatuur is van belang aangezien, naarmate de temperatuur van het proefmonster stijgt, de wrijvingscoëfficiënt ook zal stijgen. Het is echter niet mogelijk om een temperatuurafhankelijke wrijvingscoëfficiënt in te stellen in T-SIM. Op figuur 153 is de gebruikte proefopstelling afgebeeld.



Figuur 153: Proefopstelling voor bepaling wrijvingscoëfficiënt tussen kunststof en matrijs

Aangezien de testmethode zoals hierboven beschreven, gebaseerd is op een geïmproviseerde proefopstelling en de hoekaflezing niet nauwkeurig is, is dezelfde meting ook op een wetenschappelijke manier gebeurd volgens de proefopstelling afgebeeld op figuur 154 en figuur 155.



Figuur 154: Proefopstelling voor het bepalen van de wrijvingscoëfficiënt volgens norm ASTM d1894 [26]



Figuur 155: Proefopstelling voor bepaling wrijvingscoëfficiënt tussen kunststof en matrijs m.b.v. een trekbank

In de rode cirkel op de foto ligt hetzelfde proefmonster als op figuur 153 opnieuw op de inox plaat maar in dit geval met een extra massa. Deze extra massa is aangebracht om de meetkrachten te verhogen. Het proefmonster is via een dun draadje verbonden met de trekbank die de kracht meet. Het meten van de wrijvingskracht gebeurt door met de trekbank het proefmonster voort te trekken over het oppervlak van de inox plaat. De kracht waarbij het staafje in beweging komt is de statische wrijvingskracht. De bekomen curves zijn afgebeeld op figuur 156.



Figuur 156: Resultaten van de bepaling van de statische wrijvingskracht

De verschillende grafieken zijn voor iedere meting ten opzichte van het nulpunt verschoven om een duidelijk beeld te krijgen van de afzonderlijk gemeten waarden. Er zijn 12 metingen gedaan waarvan de gemiddelde statische wrijvingskracht overeenkwam met 1,61N. Nu de statische wrijvingskracht en de massa van het proefmonster met de extra massa gekend is, is het mogelijk de wrijvingscoëfficiënt te bepalen. Aangezien de wrijvingscoëfficiënt de verhouding van de zwaartekracht op de statische wrijvingskracht is, zal de berekening verlopen volgens formule 39.

$$\tan \alpha = \frac{F_g}{F_w} \tag{39}$$

Hierin is F_g de zwaartekracht gelijk aan 0,758N en F_W de gemeten statische wrijvingskracht gelijk aan 1,61N. De wrijvingscoëfficiënt is dan gelijk aan 0,47. Deze waarde komt overeen met de waarde bepaald uit de eerste test volgens figuur 153 waar de gemeten hoek α gelijk was aan 26° en dus de tan(α) gelijk aan 0,49.

Er is reeds waargenomen dat vanaf een coëfficiënt hoger dan 0,5 tot 2 onze simulatie niet langer beïnvloed werd. Doordat de waarde op kamertemperatuur al bijna gelijk is aan 0,5 en het geweten is dat de waarde stijgt naarmate de temperatuur stijgt [13], mag voor de simulaties een waarden tussen 0,5 en 2 ingevuld worden.

Net zoals bij de simulatie van de trekproef is het vervolgens nodig de procesdata in te geven. De procesdata, voor het vormen in één stap, met de matrijsverplaatsing en het drukprofiel zijn ingegeven zoals getoond in figuur 157.



Figuur 157: Procesdata voor het vacuüm vormen in 1 stap over mannelijke vorm

De rode lijn op de figuur stelt het ingestelde drukprofiel voor, de groene lijn de verplaatsing van de matrijs. De figuur laat zien dat de matrijs na een tijd van ongeveer 5 seconden volledig in het vel geduwd is waarna er na een tijd van 1 seconde een onderdruk van 70kPa bekomen wordt, zodat het volledige vervormingsproces ongeveer 6 seconden duurt.

Door op basis van deze procesinstellingen de simulaties uit te voeren krijgen we een resultaat zoals afgebeeld in figuur 158.



Figuur 158: Resultaat van de simulatie voor het vacuüm vormen in 1 stap met mannelijke vorm

De gekleurde zones geven een indicatie voor de dikteverdeling in het uiteindelijke product. De rode zones zijn volgens de schaalverdeling de dunste zones met een dikte van minimum 0,26mm. De dikteverdeling wordt nauwkeurig bestudeerd door doorsnedes te nemen op verschillende plaatsen in het product zoals getoond op figuur 159 en 160.







Figuur 160: Dikteverdeling in de doorsnede volgens de groene lijn in de lengterichting

De rode markering op de figuur geeft het startpunt van de doorsnede aan. Met de arc lenght wordt dan de afstand gemeten over de groene curve vanaf deze markering. De doorsneden, zoals zichtbaar in bovenstaande figuren, zijn voor iedere simulatie met de verschillende K-BKZ parameters op dezelfde plaats genomen. Hierdoor kan er een zinvolle vergelijking gemaakt worden tussen de verschillen in de dikteverdeling voor iedere simulatie. De diktes zoals weergegeven aan de linkerkant van de figuur zijn geëxporteerd naar een Excel file zodat het mogelijk is de data op één grafiek te plaatsen.

Als eerste zijn de dikteverdelingen, verkregen met de parameters bepaald volgens de nieuwe methode op een proefmonster volgens de lengterichting van de geëxtrudeerde plaat, vergeleken met diegene verkregen door gebruik te maken van de parameters van IKT bij dezelfde referentietemperatuur. Als resultaat krijgen we de grafiek zoals getoond in figuur 161 en 162.







Figuur 162: Dikteverdeling volgens simulaties met verschillende materiaalfiles, doorsnede in lengterichting

In de breedterichting is op de grafieken bijna geen verschil te merkbaar tussen de verschillende simulaties volgens de verschillende parametersets. In de lengterichting is er echter wel een duidelijker verschil waarneembaar. Toch lijkt het verschil tussen beide dikteverdelingen in de meeste zones zeer klein. Op het eerste zicht lijkt het dat de parameters bepaald door een trekproef volgens de nieuwe methode zorgen voor een simulatie die goed overeenkomt met die volgens de parameters bepaald door IKT.

Door de procentuele fout van de dikte volgens de nieuwe methode te berekenen ten opzichte van de dikte volgens de simulaties met parameters van IKT, is er een duidelijkere voorstelling van de afwijking mogelijk. Het resultaat van deze berekeningen is te zien in tabel 9 en tabel 10.

Tabel 9: Verschillen in diktes volgens de doorsnede in de breedterichting

Fout op de dikte	(mm)	(%)
Gemiddelde	0,01	0,81
Maximum	0,03	3,24

Tabel 10: Verschillen in diktes volgens de doorsnede in de lengterichting

Fout op de dikte	(mm)	(%)
Gemiddelde	0,77	2,91
Maximum	0,96	31,22

In beide doorsneden ligt de gemiddelde fout ver onder de 5% die opgelegd was als de grens voor het beoordelen van de parameterbepaling. Vooral in de doorsnede volgens de breedterichting is het verschil nauwelijks merkbaar. In de lengterichting daarentegen is er wel een grote maximum uitwijking zoals al verwacht was uitgaande van de grafieken.

Een mogelijke verklaring voor het beperkte verschil in dikteverdelingen bij simulaties voor het kofferdeel is te vinden door te gaan vergelijken met de grafiek verkregen bij de trekproef met dezelfde procestemperatuur. We krijgen dan volgende figuur.



Figuur 163: Spanningsverloop bij de gesimuleerde trekproeven bij een temperatuur van 130°C

De rode lijn duidt de zone aan tot welke rekratio de parameters van IKT bepaald zijn. Het is ook duidelijk dat bij lage reksnelheden er bijna geen verschil is tussen beide simulatie resultaten. Het is pas vanaf reksnelheden van 1 s⁻¹ dat er een duidelijk verschil is tussen de simulaties. Het zou dus mogelijk zijn op deze manier een verklaring te geven voor de gesimuleerde dikteprofielen.

Om dat te kunnen doen is door ons de reksnelheid op verschillende plaatsen op het gesimuleerde kofferdeel berekend aan de hand van de simulaties. De reksnelheid kan in T-Sim berekend worden door voor een element van het kunststofvel op verschillende momenten tijdens de simulatie de rek te bepalen. Hoe dat in zijn werk gaat staat afgebeeld op figuur 164.



Figuur 164: Elementinformatie tijdens de simulatie

Door hetzelfde element te volgen over een gekend tijdsinterval en de waarden voor L1 (ϵ_x) en L2 (ϵ_y) te noteren is het mogelijk de reksnelheid te bepalen. Om een beeld te krijgen van de reksnelheid in verschillende gebieden is dit door ons op drie belangrijke gebieden toegepast. De door ons bekeken elementen liggen op het zijvlak, hoek en bovenvlak van het kofferdeel zoals afgebeeld op figuur 165.



Figuur 165: Gevolgde elementen op het kofferdeel

De rode punten stellen de plaatsen voor waar de reksnelheid is berekend. De punten op het zijvlak en bovenvlak liggen op de snijlijn, gebruikt voor het analyseren van het dikteprofiel in de breedterichting. Het derde punt in de benedenhoek ligt op de snijlijn in de lengterichting. De berekeningen zijn uitgezet in tabel 11.

Element	Frame	Tijd(s)	£x	ε _y				Reksnel	heid(s ⁻¹)
Linker hoek	50,00	4,93	1,11	1,00	Δt	$\Delta \epsilon_x$	$\Delta \epsilon_y$	$\Delta \epsilon_x / \Delta t$	$\Delta \epsilon_y / \Delta t$
	55,00	5,65	1,58	1,07	0,72	0,47	0,07	0,66	0,09
Linker flank	56,00	5,79	1,93	0,98	Δt	$\Delta \epsilon_x$	$\Delta \epsilon_y$	$\Delta \epsilon_x / \Delta t$	$\Delta \epsilon_y / \Delta t$
	58,00	6,08	2,57	0,98	0,29	0,64	0,00	2,23	0,00
Bovenvlak	46,00	4,35	1,01	1,00	Δt	$\Delta \epsilon_x$	$\Delta \epsilon_y$	$\Delta \epsilon_x / \Delta t$	$\Delta \epsilon_y / \Delta t$
	52,00	5,22	1,02	1,00	0,86	0,02	0,00	0,02	0,00

Tabel 11: Berekening reksnelheid

Het is duidelijk dat de reksnelheid op de meeste plaatsen zeer laag is tijdens het vormen van het kofferdeel. Slechts op één enkele plaats, op de flank van het onderdeel, bereikt de reksnelheid een maximum van 2,23 s⁻¹.

De lage reksnelheden in het grootste deel van het thermovormproduct geven aan de hand van figuur 163 een verklaring voor de simulatieresultaten. Aangezien er voor kleine reksnelheden en kleinere rekratio's geen verschil is tussen beide parametersets is er ook geen verschil in dikte in die zones. In zones waar wel een hogere reksnelheid aanwezig is zullen de waarden wel afwijken naar gelang de rekratio groter is.

De bovenstaande simulaties zijn uitgevoerd op basis van K-BKZ parameters bepaald bij temperaturen die exact overeenkomen met de procestemperaturen. Er zijn door ons echter ook parameters bepaald op lagere testtemperaturen zoals eerder aangegeven. Het effect van het gebruikt van andere referentietemperaturen is al besproken in het gedeelte over de trekproefsimulaties. Het is ook mogelijk te controleren of we bij deze simulaties vergelijkbare effecten waarnemen.

Het volledige proces zoals het hierboven beschreven, is opnieuw gesimuleerd met de K-BKZ parameters bepaald bij verschillende referentietemperaturen. Om de resultaten te vergelijken zijn de doorsneden exact hetzelfde genomen zoals op figuur 159 en 160. De zo bekomen dikteprofielen zijn dan getoond op figuur 166 en 167.





Figuur 166: De dikteverdeling volgens de snijlijn in de breedterichting met verschillende referentie temperaturen

Figuur 167: De dikteverdeling volgens de snijlijn in de lengterichting met verschillende referentie temperaturen

Opnieuw lijkt er volgens de grafieken weinig verschil te zijn tussen de verschillende simulaties. Het lijkt dat de referentietemperatuur bij deze simulatie weinig invloed heeft op de uiteindelijke dikteverdeling. Om verder te onderzoeken of dat werkelijk zo is zijn opnieuw de fouten uitgezet ten opzicht van de simulatie volgens de parameters bepaald door IKT in tabel 12 en 13.

Tabel 12: Verschil in diktes volgens de doorsnede in de lengterichting

Fout op de dikte	Ref.T: 140°C	Ref.T: 130°C	Ref.T: 120°C	
	%	%	%	
Gemiddelde	0,77	0,70	0,81	
Maximum	3,29	3,22	3,24	

Tabel 13: Verschil in diktes volgens de doorsnede in de breedterichting

Fout op de dikte	Ref.T: 140°C	Ref.T: 130°C	Ref.T: 120°C		
	%	%	%		
Gemiddelde	1,79	2,50	2,91		
Maximum	20,21	21,57	31,22		

De gemiddelde fouten bevestigen dit. De invloed van de testtemperaturen voor het bepalen van de K-BKZ parameters hebben in dit geval weinig invloed op de uiteindelijke dikteverdeling. In de lengtedoorsnede is wel een oplopende fout zichtbaar bij dalende testtemperaturen. Dat is een logisch verloop aangezien de simulatie zal extrapoleren naar de hoge starttemperaturen tijdens het vormproces. De grote maximum fouten kunnen een gevolg zijn van het onvolledig vormen aan de randen van het product maar dit blijkt niet het geval te zijn.

4.5.2 Simulatie van vacuüm vormen in vrouwelijke matrijs

Er kan ook een vrouwelijke matrijs gebruikt worden voor het vormen van hetzelfde product maar met een andere dikteverdeling. Door dit proces te simuleren is het mogelijk te bepalen of dezelfde effecten van de materiaalfiles op de simulatie waarneembaar zijn. Om deze simulatie uit te voeren moet naast de matrijs het procesverloop veranderen. Het procesverloop is voor deze simulaties ingesteld zoals afgebeeld op figuur 168.



Figuur 168: Procesdata voor het vacuümvormen in vrouwelijke matrijs

Om effecten van doorzakking te vermijden zal de matrijs vrijwel onmiddellijk tegen het kunststofvel aansluiten. Een kunststof vel zal door het opwarmen rubberachtig worden en onder invloed van het eigengewicht doorzakken waardoor er al een verdunning zal optreden. De druk neemt hierna volgens een realistisch verloop af zodat het product zal vormen zoals getoond in figuur 169.



Figuur 169: Resultaat van de simulatie voor het vormen in een vrouwelijke matrijs

Om een goede vergelijking te maken zijn opnieuw doorsnedes gemaakt in het product. Van deze doorsnedes is het mogelijk de dikteverdeling te vergelijken voor de verschillende simulaties. De dikteverdelingen bekomen voor het eindproduct in de verschillende doorsneden zijn afgebeeld op figuur 170 en 171. De doorsneden zijn zo gekozen dat de posities overeenkomen met die op het mannelijk gevormd product.



Figuur 170: Dikteverdeling in de doorsnede volgens de groene lijn


Figuur 171: Dikteverdeling in de doorsnede volgens de groene lijn

Op beide figuren zijn de overeenkomende punten tussen de grafiek en de simulatie aangeduid door het rode bolletje. Door te vergelijken met figuren 159 en 160 is het verschil in dikteverdeling tussen beide vormmethodes duidelijk. Waar bij het vormen met een mannelijke matrijs het dikste gedeelte aan bovenkant van het kofferdeel gelegen was, is het hier duidelijk dunner.

De dikteverdelingen bekomen volgens parameters bepaald met de nieuwe en huidige methode zijn afgebeeld op figuur 172 en 173. Aan de hand van deze grafieken is het mogelijk een vergelijking tussen beide parametersets te maken. Om de invloed van het vormproces op de dikteverdeling duidelijk te maken is op figuur 172 opnieuw de dikteverdeling na vormen met een mannelijke matrijs weergegeven.



Figuur 172: Dikteverdeling volgens simulaties met verschillende materiaalfiles, doorsnede in breedterichting





Het is duidelijk dat ook hier bijna geen verschil is tussen de twee verschillende simulaties. Het verschil is hier duidelijk nog kleiner dan bij het vormen met een mannelijke matrijs. Of dat ook het geval is bij simulaties op basis van materiaalfiles bepaald bij andere testtemperaturen is afgebeeld op figuur 174 en 175.



Figuur 174: De dikteverdeling volgens de snijlijn in de breedterichting voor verschillende referentietemperaturen





Ook hier is weinig verschil waarneembaar tussen de verschillende dikteverdelingen. Dat komt overeen met wat te zien was bij de simulaties van het proces met de mannelijke matrijs.

Door het feit dat er in beide simulaties, met mannelijke en vrouwelijke matrijs, zelfs geen verschil waarneembaar is bij simulaties op basis van K-BKZ parameters bepaald bij lagere referentietemperaturen hebben we ons toch de vraag gesteld of de dikteverdeling niet meer vormafhankelijk is dan materiaalafhankelijk. Om dat te achterhalen zijn de simulaties van het proces met de mannelijke matrijs opnieuw uitgevoerd maar met totaal verschillende materialen. De gebruikte materialen zijn afkomstig uit de standaard materialenbibliotheek van T-SIM. Er is gekozen voor polypropyleen en polycarbonaat, twee stijvere materialen dan polystyreen. Van deze simulaties is het dikteprofiel op dezelfde manier bepaald als in de voorgaande gevallen. Het resultaat is getoond in figuur 176 en 177.





Figuur 176: Dikteverdeling volgens simulaties met verschillende materiaalfiles, doorsnede in de breedterichting

Figuur 177: Dikteverdeling volgens simulaties met verschillende materiaalfiles, doorsnede in de lengterichting

Uit de grafieken volgt dat er inderdaad weinig verschil merkbaar is tussen de files in zones met lage reksnelheden. Er is wel een duidelijk verschil merkbaar in de omcirkelde zones waar de reksnelheid en rekratio groter zijn. In zones met hoge rekratio's en ook hogere reksnelheden zal polypropyleen en polycarbonaat stijver reageren en door de beperkte aanwezige kracht (-70kPa) zal het materiaal de matrijs niet raken en dus lokaal minder verdunnen. Het is dus niet zo dat de materiaalfile maar een beperkte rol speelt tijdens de simulatie.

We besluiten dat voor simulatie van dit product de door ons bepaalde parameters evenwaardige resultaten opleveren als die bepaald door IKT. Het gemiddelde procentuele verschil over de dikteverdeling blijft overal onder de vooropgestelde 5%. De goede overeenkomst tussen beide parameters is te wijten aan de lage reksnelheden en lage rekratio's. Voor simulaties van producten met hogere reksnelheden en rekratio's zullen de resultaten hoogstwaarschijnlijk grotere afwijkingen vertonen.

5 Algemeen besluit

Het doel van deze masterproef was de ontwikkeling van een methode voor de bepaling van de K-BKZ parameters, nodig voor het uitvoeren van een thermovormsimulatie. De ontwikkelde methode vertrekt van spanningsrekdata bekomen met uniaxiale trekproeven uitgevoerd bij drie verschillende snelheden en temperaturen. De gebruikte trekbank is de Z050 van het merk Zwick Roell en is voorzien van een klimaatkast. Uit een controle van de eigenschappen van de trekbank, bleek dat deze geschikt was voor de nauwkeurige bepaling van spanningsrekdata. Het viel echter op dat er een vertraging was tussen de start van de trekproef en de werkelijke start van de verplaatsing. Deze vertraging moesten we bij verdere berekeningen in rekening brengen.

Voor de bepaling van de spanningsrekdata is de trekbank uitgerust met een 1kN krachtsensor en gebeurt de uitlezing van de verplaatsing niet door middel van de uitwendige extensometers omdat deze voor slip en insnijdingen zorgen. De trekstaafjes zijn volgens ISO527 en hebben een meetlengte van slechts 20mm om de bekomen reksnelheid te verhogen. Na het meten en berekenen van de kerntemperatuur van de trekstaafjes, bleek dat de kern van een polystyreen trekstaafje, na 500s de temperatuur van de klimaatkast bereikt.

Vooraleer de bekomen spanningsrekdata verder te verwerken tot een bruikbare set K-BKZ parameters, is het nodig de spanning om te rekenen naar werkelijke spanning. Daarnaast is de verdere verwerking gebaseerd op slechts enkele punten, geselecteerd uit de volledige spannings-rekcurve. De procedure voor deze omrekening en selectie neemt veel tijd in beslag. We schreven dan ook een VBA-programma dat deze procedure volledig automatisch uitvoert.

De ontwikkelde methode is gebruikt voor de bepaling van de K-BKZ parameters van een polystyreen kunststofvel. Omwille van de mogelijke richtingsafhankelijkheid van de eigenschappen (d.i. anisotrope) ten gevolge van het productieproces, extrusie, zijn de K-BKZ parameters bepaald onder verschillende richtingen ten opzichte van de extrusierichting. Het IKT (Institut für Kunststofftechnik) heeft de K-BKZ parameters van hetzelfde polystyreen bepaald aan de hand van equibiaxiale druktesten zodat het mogelijk was een vergelijkende studie uit te voeren.

De studie toont aan dat het nodig is de testtemperaturen, voor de bepaling van de spanningsrekdata, goed gekozen moeten worden. De temperaturen die voorkomen tijdens de simulatie, gebaseerd op de bekomen K-BKZ parameters, moeten voor een accurate simulatie tussen de uiterste testtemperaturen liggen. Wanneer de temperatuur tijdens de simulatie buiten dit bereik treedt, zijn er sprongen in de spanning waarneembaar door verkeerde extrapolaties.

Verder blijkt dat de tijd, nodig voor de extra trekproeven om de anisotropie in het kunststofvel in rekening te brengen, niet in overeenstemming is met de extra bekomen nauwkeurigheid. Het is voldoende de K-BKZ parameters onder één richting in het kunststofvel te bepalen. Hier verdienen proefmonsters in de breedterichting de voorkeur omwille van een nauwkeurigere meting. De proefmonsters in de lengterichting krimpen bij hogere temperaturen waardoor er al een spanning merkbaar is voor de start van de proef.

Tot slot toont de studie aan dat de reksnelheid waarbij de K-BKZ parameters bepaald zijn (maximum 0,42s⁻¹ in Cel kunststoffen en maximum 25 s⁻¹ in het IKT), in overeenstemming moet zijn met de reksnelheden bekomen tijdens de thermovormprocessen. De maximale reksnelheid, bekomen met de beschikbare trekbank op Cel Kunststoffen, is echter te laag. Hierdoor ligt bij het simuleren van een trekproef de gesimuleerde spanning, op basis van deze K-BKZ parameters, lager dan de werkelijke spanning. Doordat er ook zeer lage reksnelheden gebruikt zijn bij de bepaling van de K-BKZ parameters, levert een simulatie bij lage reksnelheden nog steeds realistische resultaten. De K-BKZ parameters geleverd door het IKT, zijn bekomen bij een hoge maximale reksnelheid. Hierdoor is het mogelijk om met deze parameters processen te simuleren waarbij ook hoge reksnelheden optreden. Spanningen bekomen bij reksnelheden, gebruikt bij de fitting van beide K-BKZ parameters, zijn vergelijkbaar voor beide parameters.

Om het voorgaande te valideren is een simulatie van een product uitgevoerd op basis van beide K-BKZ parametersets. De bekomen maximale reksnelheden zijn in overeenstemming met één van de reksnelheden die gebruikt werden bij de fitting van beide K-BKZ parameters. Uit een vergelijking tussen beide dikteverdelingen blijkt dat de afwijking in simulatieresultaten, tussen onze K-BKZ parameters en de K-BKZ parameters van het IKT, binnen de opgelegde 5% ligt. Dit geldt wel enkel indien de bekomen reksnelheden overeenstemmen met één van de reksnelheden die gebruikt werden bij de fitting van beide K-BKZ parameters. Hieruit besluiten we dat het nodig is verdere testen uit te voeren met een trekbank die hogere snelheden toelaat om te analyseren of de uniaxiale trekproef een evenwaardig alternatief is voor de testen van het IKT indien het mogelijk gebruik te maken van een hydraulische trekbank. Een ander alternatief is het ontwerpen van een tool die de lage snelheid van de trekbank verhoogt. Om hierover een definitieve conclusie te geven is verder onderzoek nodig.

Doorheen het onderzoek zijn er in het gebruikte simulatiepakket (T-SIM) verschillende problemen met uiteenlopende oorzaken ontdekt. Het merendeel van de problemen zijn een gevolg van foutieve berekeningen van de temperatuur van het kunststofvel. Het gesimuleerde product is ook werkelijk gevormd. Omwille van de tekortkomingen in het simulatiepakket is er een grote afwijking tussen de dikteverdeling bekomen met simulatie en de werkelijke dikteverdeling van het product. Omdat het achterhalen van de problemen betreffende het simulatiepakket een studie op zich is, is dit in deze masterproef buiten beschouwing gelaten.

Als vervolg op dit onderzoek is het dus nodig de K-BKZ parameters te bepalen aan de hand van uniaxiale trekproeven bij hogere snelheden. Uit deze resultaten zal blijken of de nieuwe methode ook werkelijk een evenwaardig alternatief is voor de parameterbepaling van het IKT. De hogere snelheden kunnen enerzijds bereikt worden door een andere, hydraulische, trekbank te gebruiken. Anderzijds kan er ook een tool ontwikkeld worden die de snelheid van de huidige trekbank verhoogt.

Referentielijst

[1] KHLim. Cel Kunststoffen. In *onderzoek en ontwikkeling*. Geraadpleegd op 6 november 2013. http://www.khlim.be/expertise/cel-kunststoffen

[2] Encyclopædia Britannica. Vacuum thermoforming. In *plastics*. Geraadpleegd op 6 november 2013, http://kids.britannica.com/comptons/art-53836/Like-compression-molding-the-vacuum-thermoforming-process-uses-both-heat

[3] Van Berkel media. Alfatechnics levert blister- en thermovormmachines van Hamer. In *Nieuws*. Geraadpleegd op 6 november 2013, http://www.alfatechnics.com/img/thumb/thermo3.jpg

[4] Hegemann, B. *Werkstoffprüfung: Kennwertermittlung für die Thermoforming-Simulation*. Stuttgart: IKP.

[5] JansenThermoforming. Vacuumvormen HD - Thermoforming stap voor stap. In *Thermovormen*. Geraadpleegd op 13 november 2013, http://tube.7s-b.com/thermovormen/

[6] Vitalo.Global thermoforming. Geraadpleegd op 12 december 2013, http://www.vitalo.net/vitalo/ewcm.nsf/_/A33EE8A1F4E90F99C1257A5400349F87?opendocument

[7] Throne, J.L. (1996). Technology of thermoforming. (1ste druk). USA: Hanser Gardner Publications

[8] Illig, A. (2001). *Thermoforming a practical guide,* (1^{ste} druk). Germany: Kösel Kempten

[9] van der Vegt, A.K. & Govaert, L.E. (1991). *Polymeren: van keten tot polymeer*. (5^{de} druk). Delft: VSSD

[10] Novotny, P. & Saha, P. & Kouba, K. (1999). Fitting of K-BKZ Model Parameters for the Simulation of Thermoforming. *Intern Polymer Processing*, 14, 291-295

[11] Kaye, A. (1962). Non-Newtonian Flow in Incompressible Fluids. *THE COLLEGE OF AERONAUTICS CRANFIELD*, 134

[12] Bernstein, B. & Kearsly, E. A. & Zapas, L. J. (1963). A Study of Stress Relaxation with Finite Strain. *TRANSACTIONS OF THE SOCIETY OF RHEOLOGY*, 7, 391-410

[13] Hegemann, B., (2004). *Deformationsverhalten von Kunststoffen beim Thermoformen: experimentelle und virtuelle Bestimmung* [doctoraat]. Stuttgart: Institut für Kunststoffkunde und Kunststoffprüfung der Universität Stuttgart.

[14] Accuform. K-BKZ model. In *B-SIM V2.5 Reference - Blow molding simulation*. Geraadpleegd op 7 april 2014, http://www.t-sim.com/Refbsim/kbkz.htm

[15] Rolón-Garrido, V. & Wagner, M. (2009). The damping function in rheology. Rheol Acta, 48, 245-248.

[16] Ahmed, R. & Liang, R.F. & Mackley, M.R. (1995). The experimental observation and numerical prediction of planar entry flow and die swell for molten polyethylenes. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 59, 129-153.

[17] Carriere, C. & Inglett, G. (2002). Constitutive analysis of the nonlinear viscoelastic properties of cellulosic fiber gels produced from corn or oat hulls. *Food Hydrocolloids*, 17, 605-614.

[18] University of Cambridge. Extension ratio. In *teaching and learning packages*. Geraadpleegd op 4 mei 2014, http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/bioelasticity/extension-ratio.php

[19] Accuform. How to fit a measured data using T-SIMFIT. in T-SIMFIT Version 1.4 Manual.

[20] Accuform. T-SIM software. In *Simulation and optimization of thermoforming and blow molding*. Geraadpleegd op 15 april 2014, http://www.t-sim.com/WebPages/EN/ProductTSIM.html

[21] Menard, K. Dynamic Mechanical Analysis Basics: Part 3 Frequency Effects in Materials. Geraadpleegd op 18 april 2014,

 $http://shop.perkinelmer.com/content/ApplicationNotes/app_thermaldynmechanalybasicspart3.pdf$

[22] PerkinElmer. A Beginner's Guide. In *Dynamic Mechanical Analysis (DMA)*. geraadpleegd op 18 april 2014, http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-74546GDE_IntroductionToDMA.pdf

[23] ISO527

[24] Wikipedia. Heisler Chart. Geraadpleegd op 5 november 2013, http://en.wikipedia.org/wiki/Heisler_Chart

[25] Samonite. Lite-Locked. In *Bagage*. Geraadpleegd op 11 mei 2014, http://www.samsonite.be/lite-locked-spinner-69cm-zwart/produkt-nl.htm?or=6251707166

[26] ADMET. ADMET Home. In *ASTM D1894 Coefficient of Friction Test on Plastic How to Guide*. Geraadpleegd op 11 mei 2014, http://info.admet.com/specifications/bid/53489/ASTM-D1894-Coefficient-of-Friction-Test-on-Plastic-How-to-Guide

Bijlagen

Bijlage A

```
function F = heisler(tijd, lengte,t oven, t begin)
1=0;
for n=0:10000
   f =
(((4.*sin(pi.*(n+0.5)))./(2.*(pi.*(n+0.5))+(sin(2.*(pi.*(n+0.5)))))).*exp((-
(pi.*(n+0.5))^2.*tijd.*0.104)/lengte^2).*cos((pi.*(n+0.5)/lengte)));
    l=l+f;
end
F = (l*(t begin-t oven))+t oven;
lengte = 5;
oven_temp = 110;
begin_temp = 24;
Y = [];
T = [];
for t=0:1000
    q = heisler(t,lengte,oven_temp,begin_temp);
    Y = [Y q];
    T = [T t/2];
end
Y1 = [];
T1 = [];
for t=0:1000
    q = heisler(t,lengte,120,begin temp);
    Y1 = [Y1 q];
    T1 = [T1 t/2];
end
Y3 = [];
T3 = [];
for t=0:1000
    q = heisler(t,lengte,130,begin temp);
    Y3 = [Y3 q];
    T3 = [T3 t/2];
end
plot(T,Y,T1,Y1,T3,Y3)
title('Temperatuurverloop volgens Heisler-Gröber')
xlabel('tijd (s)')
ylabel('temperatuur (°C)')
grid
legend('110°C', '120°C', '130°C')
```

Bijlage B

Stap1: Data inladen

Om een goede werking van het verwerkingsprogramma te garanderen moeten de files met de krachtverplaatsingsdata op een correcte manier geëxporteerd worden. Een bruikbare file is te zien op de onderstaande afbeelding.

// 110-20-1 - Kladblok	
Bestand Bewerken Opmaak Beeld Help	
<pre>"Cross-section input";1; "mm²" "Specimen thickness a0"; 5,33; "mm" "Specimen width b0";3,7; "mm" "Gauge length";20,1687; "mm" "Series"; "110-20-1" "Test duration"; "Standard travel"; "Standard force"; "Strain" "s"; "mm"; "N"; "mm" 0,0400095;1,12482e-009; -0,256345;1,12482e-009 0,120009;1,12482e-009; -0,2563214;1,12482e-009 0,220009;1,12482e-009; -0,263214;1,12482e-009 0,340009;1,12482e-009; -0,263214;1,12482e-009 0,400009;0,0022784; -0,153312;0,0022784 0,420009;0,0022784; -0,155312;0,0022784 0,440009;0,0125696; -0,0176512;0,0125696 0,460009;0,0183808;0,0390172;0,0183808 0,480009;0,0246016;0,0802306;0,0246016 0,500009;0,0371968;0,133465;0,0371968 0,540009;0,050176;0,171243;0,050176 0,560009;0,056576;0,181547;0,056576 0,600009;0,056376;0,22154;0,0632832</pre>	

Het is essentieel dat de files exact dezelfde gegevens bevatten en de naam van de file als volgt opgebouwd is: "testtemperatuur"-"testsnelheid"-"herhaling". Vb.: 110-20-1. Een file zoals deze kan normaal samengesteld en geëxporteerd worden door de software van de gebruikte trekbank.

OPGELET! Zet de te verwerken files samen in 1 map.

Wanneer de files correct zijn opgebouwd en samen in 1 map zijn opgeslagen kan u aan de slag met het verwerkingsprogramma. Aangezien het programma geschreven is in VBA-Excel kan u best andere Excel files opslaan en afsluiten voor verder te gaan. Bij het opstarten ziet u volgend scherm.

Gegevens¥erwei	rker uniaxiale trekproef n	aar TSIM-FIT				×
					CEL	
	Laden				CUNSTRICT OF	
		J	Voortgang –			
	Koppels selecteren			Gegevens ingeladen		
				Koppels geselecteerd		
	Grafieken maken			Grafieken gemaakt		
				Geëxporteerd		
	Exporteren					
	Nieuwe verwerking				Excel bestand tonen	
					Afsluiten	

Om gegevens in te laden klikt u op de knop "Laden". Er zal een scherm verschijnen zodat u de map kan selecteren waar de krachtverplaatsingsdata zijn opgeslagen.

GegevensVerwerker uniaxiale trekproef n Laden	aar TSIM-FIT Map selecteren	CEL
Koppels selecteren	IKT Gegevens IKT Gegevens K-BKZ variatie parameters mechanisme	
Grafieken maken	 metingen breedte metingen breedte en lengte metingen hoge temp breedte metingen hoge temp lengte metingen hoge temp lengte 	
Exporteren	PC PP V	
Nieuwe verwerking	OK Annuleren	Excel bestand tonen
		Afsluiten

Als de krachtverplaatsingsdata op de correcte manier zijn geëxporteerd zal het programma de files laden en de omrekening naar spanningsrekdata uitvoeren.

GegevensVerwerker uniaxiale trekproef naar TSIM	
Laden	(Thereard the second seco
	Voortgang
Koppels selecteren	Gegevens ingeladen Voltooid
	Koppels geselecteerd
Grafieken maken	Grafieken gemaakt:
	Geëxporteerd
Exporteren	
1	
Nieuwe verwerking	Excel bestand tonen
	Afsluiten

De vorderingen kunnen gevolgd worden door tekstvakken in de rode kader te bekijken. Het laden van de data is nu voltooid.

Stap2: Koppels selecteren

De volgende stap in het verwerken van de gegevens is het selecteren van de spanningsrekkoppels. Door op de knop "Koppels selecteren" te klikken zal het programma dat automatisch uitvoeren. Er wordt gevraagd naar het aantal koppels dat er geselecteerd moeten worden en naar de snelheden waarbij de testen gebeurd zijn. De snelheden zijn nodig voor het opstellen van een exportfile in de laatste stap.

Gegevens¥erwe	erker uniaxiale trekproef n	aar TSIM-FIT	ĺ
	Laden	CE L. CUNSTATCHER	
		- Voortraan	
	Koppels selecteren	Gegevens ingeladen Voltopid	
		Input ? X steerd	
	Grafieken maken	kies aantal ratios (meestal tussen 10 en 15) 15	
		OK Annuleren	
	Exporteren		
	Nieuwe verwerking	Excel bestand tonen	
		Afsluiten	
			1
Gegevens¥erwe	rker uniaxiale trekproef n	aar TSIM-FIT	1
		CEL	
	Laden	CUNSTITUTEN	
		Voortgang	
	Koppels selecteren	Gegevens ingeladen Voltooid	
		geef de 1ste treksnelheid (laagste eerst in mm/min)	
	Grafieken maken		
		OK Annuleren	
	Exporteren		
	Nieuwe verwerking	Excel bestand tonen	
		Afsluiten	
			and it

Wanneer nu in het tekstvak naast koppels selecteren de tekst "Voltooid" staat is het proces succesvol uitgevoerd.

Stap3: Grafieken maken

De derde stap in het verwerkingsprogramma is het tonen van enkele grafieken van de geselecteerde spanningsrekkoppels. Deze stap is niet nodig voor de volledige werking van het programma maar is wel zeer nuttig voor het controleren van het verloop tot hier toe. De grafieken zullen in een nieuw venster geopend worden.



Er kan door verschillende grafieken gebladerd worden en op elk moment terug gegaan naar het verwerkingsprogramma.

Stap4: Exporteren

Wanneer u tevreden bent over de geselecteerde spanningsrekkoppels kan u terug in het verwerkingsprogramma een file exporteren waarin al de gegevens, nodig in T-SIMFIT, gebundeld zijn. De exportfile zal opgeslagen worden in de map waar de krachtverplaatsingsgegevens opgeslagen zijn.

///Input_1	rSimFit - Kla	adblok			
Bestand B	Bewerken O	pmaak Beel	ld Help		
strainr: "0,333mm	ates in 1 m/s"	mm/s "3,333m	m/s"	"8,333mm/s"	
lengte dikte breedte	20.182 5.341 3.644	mm mm mm			
1 1.367 1.734	110°⊂ 0.000 0.189 0.321	0.000 0.500 0.732	0.000 0.820 1.151		
2.101 2.468 2.835 3.202	0.447 0.571 0.691 0.810	0.940 1.137 1.335 1.534	1.419 1.667 1.908 2.158		
3.569 3.936 4.303 4.67	0.929 1.048 1.168 1.288	1.741 1.953 2.175 2.405	2.417 2.689 2.974 3.278		
5.037	1.411	2.644	3.595		•

Op ieder moment kan de Excel file waar de bewerkingen in gebeuren getoond worden. Dit raden we echter sterk af aangezien dit de verwerking sterk zal vertragen.

Wanneer u een nieuwe verwerking wil starten moet u op de knop "Nieuwe verwerking" klikken. In dit geval zal het Excel bestand volledig gewist worden en gaan eventueel eerder uitgevoerde stappen verloren.

OPGELET! Bij het afsluiten van het programma wordt de Excel file volledig gewist samen met eventuele vorderingen in het verwerkingsproces.

Bijlage C

Breedte 110_120_130

```
KBKZ Wagner2
0.05
                Time increment
/n
7 ==> Number of pairs
2.81557e-005 7683.42 ==> tau(s) & a(Pa)
0.00228852 7.64221e+006 ==> tau(s) & a(Pa)
0.07333 354809 ==> tau(s) & a(Pa)
0.386842 149430 ==> tau(s) & a(Pa)
3.32756 80201.4 ==> tau(s) & a(Pa)
69.4751 51931.4 ==> tau(s) & a(Pa)
1394.62 38259.4 ==> tau(s) & a(Pa)
1 0.0812643 ==> Alfa, Beta damping parameters
/w
             0 15.4745
                          68.4599==> Temperature T0 [C], WLF C1, WLF C2
0
      120
1050 ==> density (kg/m^3)
1200 ==> heat capacity (J/kg/K)
0.17 ==> therm. conductivity (W/m/K)
/e
Breedte 120 130 140
KBKZ Wagner2
0.05
                Time increment
/n
7 ==> Number of pairs
6.24725e-005 3.36771e+006 ==> tau(s) & a(Pa)
0.00941994 829643 ==> tau(s) & a(Pa)
0.103192 61418.5 ==> tau(s) & a(Pa)
1.00033 48206 ==> tau(s) & a(Pa)
9.99997 47008.7 ==> tau(s) & a(Pa)
100 34088.1 ==> tau(s) & a(Pa)
1000 12783.6 ==> tau(s) & a(Pa)
1 0.111849 ==> Alfa, Beta damping parameters
/w
                           206.912==> Temperature T0 [C], WLF C1, WLF C2
0
      130
             0
               41.3494
1050 ==> density (kg/m^3)
1200 ==> heat capacity (J/kg/K)
0.17 ==> therm. conductivity (W/m/K)
/e
```

Breedte 130_140_150

997.166 40292.6 ==> tau(s) & a(Pa)

0.17 ==> therm. conductivity (W/m/K)

0

1200 ==> heat capacity (J/kg/K)

1050 ==> density (kg/m^3)

1 0.077642 ==> Alfa, Beta damping parameters

10.9042

```
KBKZ Wagner2
0.05
                Time increment
/n
7 ==> Number of pairs
0.000123172 374886 ==> tau(s) & a(Pa)
0.0114357 49792.3 ==> tau(s) & a(Pa)
0.100054 3615.08 ==> tau(s) & a(Pa)
1.00035 46556.2 ==> tau(s) & a(Pa)
9.99996 42159.1 ==> tau(s) & a(Pa)
100 16005 ==> tau(s) & a(Pa)
1000 962.602 ==> tau(s) & a(Pa)
1 0.126889 ==> Alfa, Beta damping parameters
/w
0
      140
                 10.6754
                           63.6189==> Temperature T0 [C], WLF C1, WLF C2
             0
1050 ==> density (kg/m^3)
1200 ==> heat capacity (J/kg/K)
0.17 ==> therm. conductivity (W/m/K)
/e
Gemiddelde 110 120 130
KBKZ Wagner2
0.05
               Time increment
/n
7 ==> Number of pairs
0.000864792 9.10436e+006 ==> tau(s) & a(Pa)
0.0041703 3.04743e+006 ==> tau(s) & a(Pa)
0.102327 433523 ==> tau(s) & a(Pa)
0.942696 122121 ==> tau(s) & a(Pa)
9.96473 61405.7 ==> tau(s) & a(Pa)
96.9553 34265.8 ==> tau(s) & a(Pa)
```

52.1332==> Temperature T0 [C], WLF C1, WLF C2

/w

0

/e

120

Gemiddelde 120 130 140

```
KBKZ Wagner2
0.05
                Time increment
/n
7 ==> Number of pairs
0.00496704 49041.3 ==> tau(s) & a(Pa)
0.00541773 481115 ==> tau(s) & a(Pa)
0.449789 65080.5 ==> tau(s) & a(Pa)
1.40439 24554 ==> tau(s) & a(Pa)
8.80211 47899.5 ==> tau(s) & a(Pa)
84.1452 34709.3 ==> tau(s) & a(Pa)
958.727 16000.3 ==> tau(s) & a(Pa)
1 0.108056 ==> Alfa, Beta damping parameters
/w
0
      130
                 24.5775
                           129.656==> Temperature T0 [C], WLF C1, WLF C2
             0
1050 ==> density (kg/m^3)
1200 ==> heat capacity (J/kg/K)
0.17 ==> therm. conductivity (W/m/K)
/e
Gemiddelde 130 140 150
KBKZ Wagner2
0.05
                Time increment
/n
7 ==> Number of pairs
```

```
0.00308349 28730.1 ==> tau(s) & a(Pa)
4.97848e-005 14954.5 ==> tau(s) & a(Pa)
0.182805 1.72662e-006 ==> tau(s) & a(Pa)
1.23744 55856.1 ==> tau(s) & a(Pa)
13.3327 40343.7 ==> tau(s) & a(Pa)
92.0934 13128.6 ==> tau(s) & a(Pa)
644.684 5167.46 ==> tau(s) & a(Pa)
1 0.13427 ==> Alfa, Beta damping parameters
/w
     140
                36.9568
                          213.06==> Temperature TO [C], WLF C1, WLF C2
0
            0
1050 ==> density (kg/m^3)
1200 ==> heat capacity (J/kg/K)
0.17 ==> therm. conductivity (W/m/K)
/e
```

Lengte 110_120_130

```
KBKZ Wagner2
0.05
                Time increment
/n
7 ==> Number of pairs
3.87841e-005 97.8318 ==> tau(s) & a(Pa)
0.00449361 4.9876e+006 ==> tau(s) & a(Pa)
0.0886652 414926 ==> tau(s) & a(Pa)
0.786421 119300 ==> tau(s) & a(Pa)
5.61316 65336.1 ==> tau(s) & a(Pa)
75.5383 51804.7 ==> tau(s) & a(Pa)
1546.54 43076.3 ==> tau(s) & a(Pa)
1 0.0806687 ==> Alfa, Beta damping parameters
/w
0
      120
                 22.7798
                           97.0553==> Temperature T0 [C], WLF C1, WLF C2
             0
1050 ==> density (kg/m^3)
1200 ==> heat capacity (J/kg/K)
0.17 ==> therm. conductivity (W/m/K)
/e
Lengte 120 130 140
KBKZ Wagner2
0.05
                Time increment
/n
7 ==> Number of pairs
7.2491e-006 1.23323e+006 ==> tau(s) & a(Pa)
0.00330913 1.27092e+006 ==> tau(s) & a(Pa)
0.185139 29771.2 ==> tau(s) & a(Pa)
0.850636 66810.7 ==> tau(s) & a(Pa)
8.17206 47386.1 ==> tau(s) & a(Pa)
69.3776 33918.2 ==> tau(s) & a(Pa)
726.367 19455.8 ==> tau(s) & a(Pa)
1 0.101881 ==> Alfa, Beta damping parameters
/w
                           66.0501==> Temperature T0 [C], WLF C1, WLF C2
0
      130
             0
                 11.9005
1050 ==> density (kg/m^3)
1200 ==> heat capacity (J/kg/K)
0.17 ==> therm. conductivity (W/m/K)
/e
```

Lengte 130_140_150

```
KBKZ Wagner2
0.05
               Time increment
/n
7 ==> Number of pairs
0.00200248 116258 ==> tau(s) & a(Pa)
5.27048e-005 725373 ==> tau(s) & a(Pa)
0.158259 1.34003e-016 ==> tau(s) & a(Pa)
0.9513 52885.5 ==> tau(s) & a(Pa)
10.9078 46194.6 ==> tau(s) & a(Pa)
77.4511 18017.9 ==> tau(s) & a(Pa)
1102.91 5908.68 ==> tau(s) & a(Pa)
1 0.140321 ==> Alfa, Beta damping parameters
/w
                300.736
                          1691.6==> Temperature T0 [C], WLF C1, WLF C2
0
     140
            0
1050 ==> density (kg/m^3)
1200 ==> heat capacity (J/kg/K)
0.17 ==> therm. conductivity (W/m/K)
/e
```

Bijlage D

K-BKZ parameters IKT

```
KBKZ Wagner2
0.05 Time increment [s]
/n
        ==> Number of pairs
  12
2.371370000e-002 7.858470000e+001 ==> tau(s) & a(Pa)
2.738420000e-002 6.474960000e+002 ==> tau(s) & a(Pa)
3.162280000e-002 4.200130000e+003 ==> tau(s) & a(Pa)
3.651740000e-002 1.393910000e+004 ==> tau(s) & a(Pa)
4.216970000e-002 1.870700000e+004 ==> tau(s) & a(Pa)
4.869680000e-002 8.389190000e+003 ==> tau(s) & a(Pa)
5.623410000e-002 8.657540000e+002 ==> tau(s) & a(Pa)
1.00000000e-001 3.037620000e+005 ==> tau(s) & a(Pa)
1.333520000e+000 4.301550000e+002 ==> tau(s) & a(Pa)
1.539930000e+000 6.870860000e+004 ==> tau(s) & a(Pa)
1.778280000e+000 2.679480000e+004 ==> tau(s) & a(Pa)
2.053530000e+000 1.911910000e+002 ==> tau(s) & a(Pa)
00
       ==> Damping parameter(s)
/w
0 140 0.0 5 80 0 ==> Arh [1/C], T0 [C], [dummy], WLF C1 [K], WLF C2 [K], Tsolid [C]
999.9 ==> density (kg/m^3)
1234 ==> heat capacity (J/kg/K)
0.33 ==> therm. conductivity (W/m/K)
5 GamaBend
/e
```

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling: Ontwikkeling van testmethode voor de bepaling van de materiaalparameters voor het thermovormen van thermoplasten

Richting: master in de industriële wetenschappen: elektromechanica Jaar: 2014

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.

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

Voor akkoord,

Neyens, Maarten

Bex, Gert-Jan

Datum: 5/06/2014