

2013•2014
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Onderzoek naar de invloed op de mechanische eigenschappen van ronde
buisprofielen door het inwendig aanbrengen van schuim

Promotor :
dr. ir. Kris HENRIOULLE

Promotor :
dr. ir. ISABEL VAN DE WEYENBERG

Wouter Jannis

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

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2013•2014

Faculteit Industriële

ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Onderzoek naar de invloed op de mechanische eigenschappen van ronde buisprofielen door het inwendig aanbrengen van schuim

Promotor :
dr. ir. Kris HENRIOULLE

Promotor :
dr. ir. ISABEL VAN DE WEYENBERG

Wouter Jannis

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

Woord vooraf

Als laatstejaarsstudent Industrieel Ingenieur Elektromechanica aan de Universiteit Hasselt kreeg ik de opdracht om een masterthesis uit te werken. Deze thesis heb ik bij het bedrijf Flanders' DRIVE uitgevoerd, meer bepaald binnen de onderzoeksgroep *Lightweight Solutions*. Via de website van Flanders' DRIVE ben ik met het onderzoeksproject *Enhanced Vehicle Performance via Structural Reinforcements* in contact gekomen. Mijn thesis vormt een onderdeel van dit project en onderzoekt de invloed op de mechanische eigenschappen van ronde buisprofielen door het inwendig aanbrengen van structurele schuimen. Dat gebeurt door middel van buig- en impacttesten en testen op axiale belasting.

Mijn keuze voor dit onderwerp is gebaseerd op mijn interesse voor de voertuigindustrie. Deze voortdurend veranderende industrie spreekt me voornamelijk aan wegens de diverse toekomstmogelijkheden. Afgelopen academiejaar heb ik veel bijgeleerd over het uitvoeren van testen en hierbij heb ik de kennis van 4 jaar hogeschool regelmatig aangesneden. Natuurlijk ben ik gedurende dit onderzoek problemen en moeilijkheden tegengekomen, maar net hierdoor is dit een zeer leerrijke ervaring geweest.

Op de eerste plaats wil ik mijn promotor binnen Flanders' DRIVE dr. ir. Isabel Van de Weyenberg bedanken voor de begeleiding tijdens het uitwerken van mijn onderzoek. Dankzij haar hulp en ervaring heb ik in het academiejaar 2013-2014 veel bijgeleerd als toekomstig ingenieur.

Daarnaast ben ik dr. ir. Kris Henrioulle zeer dankbaar voor de ondersteuning bij het uitwerken van deze masterthesis. Ik waardeer zijn kritische mening en opmerkingen die deze thesis naar een hoger niveau hebben getild.

Ook Jeroen Lievens zou ik via deze weg graag bedanken voor het taalkundig advies. Tijdens zijn lessen heb ik veel bijgeleerd over verslaggeving en het correct gebruik van de Nederlandse taal.

De mensen van de onderzoeksgroep *lightweight solutions* hebben me steeds bijgestaan met raad en ze waren op elk moment bereid om hun expertise met mij te delen. In het bijzonder wil ik Peter Theunissen, Jan Stroobants en Frank Creemers bedanken.

Tevens wil ik nog Kris Bracke bedanken voor het mogelijk maken van een bezoek aan Recticel in Wetteren. Zijn uitgebreide rondleiding en uitleg heeft mij veel bijgebracht omtrent het onderzoek en de productie van schuim. Dit bezoek was voor mij persoonlijk een zeer mooie ervaring.

Tot slot zou ik ook graag een woordje van dank uiten aan mijn ouders voor de ondersteuning gedurende mijn studies. Zo had ik dankzij hen steeds de mogelijkheid om mezelf te verplaatsen in het verkeer.

Inhoudsopgave

Woord vooraf.....	1
Lijst van tabellen	7
Lijst van figuren.....	9
Verklarende woordenlijst.....	11
Abstract.....	13
Abstract in English.....	15
1 Inleiding.....	17
1.1 Situering.....	17
1.2 Probleemstelling	17
1.3 Doelstellingen	18
1.4 Materiaal en methode.....	19
2. Literatuurstudie.....	23
2.1 Inleiding.....	23
2.2 Tailored blanks en tubes.....	24
2.2.1 Tailored metal blanks en tubes	24
2.2.2 Tailored polymer blanks.....	25
2.3 Schuimen	26
2.3.1 Algemene specificaties.....	26
2.3.2 Polymeerschuim.....	28
2.3.3 Metaalschuim.....	31
3. Materiaalselectie.....	35
3.1 Profielen.....	35
3.1.1 Materiaal.....	35
3.1.2 Vorm en afmetingen.....	36
3.2 Schuimen	37
3.2.1 Selectiemethode en de geselecteerde schuimen	37
3.2.2 Bespreking geselecteerde schuimen	38
4 Type testen.....	41
4.1 Buigtesten.....	41
4.1.1 Profielgedrag.....	41
4.1.2 Proefopstelling.....	42
4.1.3 Sturing actuator	44
4.2 Impacttesten.....	47
4.2.1 Profielgedrag.....	48
4.2.2 Proefopstelling.....	49

4.2.3	Instellingen actuator	49
4.3	Testen op axiale belasting	50
4.3.1	Berekening benodigde drukkracht.....	50
4.3.2	Proefopstelling VUB	51
4.3.3	Instellingen actuator	53
5	Testcombinaties	55
5.1	Verschillende parameters	55
5.2	Design of Experiments	56
5.3	DesignEase®.....	57
6	Vorbereiden, vullen en testen van de profielen	59
6.1	Vorbereiden van de profielen	59
6.2	Profielen vullen met schuim.....	61
6.2.1	Injectie van 2C PU	61
6.2.2	Injectie van epoxyschuim	62
6.2.3	Vullen met MHS-schuim	62
6.2.4	Vullen met voorgevormde schuimelementen van XPS-schuim	63
6.3	Uitvoeren van de testen.....	64
6.3.1	4-puntsbuigtesten	64
6.3.2	Impacttesten.....	65
6.3.3	Testen op axiale belasting.....	66
7	Bepalen van de mechanische eigenschappen en de significante relaties	67
7.1	Bepalen van de maximale kracht tijdens de buigtest.....	67
7.2	Bepalen van de buigstijfheid.....	67
7.3	Bepalen van de energieabsorptie	69
7.4	Bepalen van de weerstand tegen axiale belastingen.....	72
7.5	Principe van het bepalen van significante relaties tussen testparameters	72
8	Analyseren van de testresultaten	75
8.1	Lege profielen	75
8.1.1	Absolute waarden.....	75
8.1.2	Waarden uitgedrukt ten opzichte van het gewicht.....	76
8.2	2C PU	76
8.3	Epoxyschuim	77
8.3.1	Relatief berekende waarden ten opzichte van lege profielen	77
8.3.2	Relatief berekende waarden uitgedrukt ten opzichte van het gewicht.....	78
8.4	XPS-schuim.....	79
8.5	MHS-schuim.....	80
8.5.1	Relatief berekende waarden ten opzichte van lege profielen	80
8.5.2	Relatief berekende waarden uitgedrukt ten opzichte van het gewicht.....	81

8.6	Bepalen van significante parameters en relaties	82
8.6.1	Significante parameters en relaties voor lege profielen.....	82
8.6.2	Significante parameters en relaties voor gevulde profielen	83
8.6.3	Invloed van de vulgraad op de testwaarden.....	86
8.7	Verklaring van de bekomen resultaten	86
8.7.1	Verklaring voor de waarden van de energieabsorptie.....	87
8.7.2	Verklaring voor de waarden van de weerstand tegen axiale belasting.....	87
8.7.3	Verklaring voor de waarden van de buigstijfheid	88
9	Besluit	89
	Literatuurlijst	91
	Bijlagenlijst.....	95

Lijst van tabellen

Tabel 1: chemische bestanddelen S235 JR.....	35
Tabel 2: mechanische eigenschappen S235 JR	35
Tabel 3: chemische bestanddelen AW 6060 T66.....	35
Tabel 4: mechanische eigenschappen AW 6060 T66	36
Tabel 5: gegevens over 2C PU, XPS-, epoxy- en MHS-schuim.....	38
Tabel 6: principe van <i>full factorial</i> experiment	56
Tabel 7: aantal testen i.f.v. het aantal factoren en het aantal variabelen	57
Tabel 8: overzicht type testen en bijhorende factoren met variabelen	58
Tabel 9: bepalen maximale kracht	67
Tabel 10: bepalen maximale drukkracht	72
Tabel 11: absolute waarden van de mechanische eigenschappen voor de lege profieltypes	75
Tabel 12: waarden mechanische eigenschappen uitgedrukt per gewichtseenheid voor de lege profieltypes.....	76
Tabel 13: relatieve waarden mechanische eigenschappen voor profielen gevuld met 2C PU.....	76
Tabel 14: relatieve waarden van de mechanische eigenschappen en gewichten voor profielen gevuld met epoxyschuim.....	77
Tabel 15: relatieve waarden mechanische eigenschappen uitgedrukt per gewichtseenheid voor profielen gevuld met epoxyschuim.....	78
Tabel 16: relatieve waarden mechanische eigenschappen uitgedrukt per gewichtseenheid voor profielen gevuld met XPS-schuim.....	79
Tabel 17: relatieve waarden van de mechanische eigenschappen en gewichten voor profielen gevuld met MHS-schuim.....	81
Tabel 18: relatieve waarden mechanische eigenschappen uitgedrukt per gewichtseenheid voor profielen gevuld met MHS-schuim.....	81
Tabel 19: overzicht significante parameters en relaties voor gevulde profielen	83

Lijst van figuren

Figuur 1: logo's projectpartners	18
Figuur 2: schematische opstelling 4-puntsbuigproef.....	19
Figuur 3: impacttest.....	20
Figuur 4: test op axiale belasting	20
Figuur 5: versterkingsring voorste deur.....	24
Figuur 6: <i>tailored tubes</i> in autoframe	24
Figuur 7: walsen van <i>tailored rolled blanks</i>	24
Figuur 8: ontwerp van een kinderstoel met versterkte delen	25
Figuur 9: opbouw gesloten celstructuur en open celstructuur.....	26
Figuur 10: kracht in functie van doorbuiging met bindmiddel en zonder	28
Figuur 11: stijfheid in functie van dichtheid	29
Figuur 12: energieabsorptie in functie van dichtheid.....	29
Figuur 13: energieabsorptie in functie van dichtheid (impacttest).....	30
Figuur 14: thermovorming van PET-schuim	31
Figuur 15: Aluminiumschuim in aluminium buisprofiel	31
Figuur 16: weergave van E-modulus i.f.v. dichtheid m.b.v. 'CES EduPack'	32
Figuur 17: overzicht productietechnieken metaalschuim.....	32
Figuur 18: vergelijken spanning-rek diagrammen van PE-schuim en het metaalschuim AlCu ₄	34
Figuur 19: aluminium en stalen profielen met Ø30x3 en Ø30x1,5	36
Figuur 20: homogeen 2C PU-schuim	38
Figuur 21: niet-homogeen 2C PU-schuim.....	38
Figuur 22: component A en B.....	39
Figuur 23: voorgevormd XPS-schuimelement	40
Figuur 24: weergave van de doorbuiging.....	41
Figuur 25: Dwarskrachten- en momentenlijn belast profiel	42
Figuur 26: toepassingsmogelijkheden <i>PLL 25k</i> actuator.....	42
Figuur 27: testopstelling vierpuntsbuiging	43
Figuur 28: detailweergave steun- en drukrollen	44
Figuur 29: eenvoudige regelkring met P-regelaar	45
Figuur 30: weergave van buigverloop.....	48
Figuur 31: Dwarskrachten- en momentenlijn belast profiel	48
Figuur 32: opstelling impacttest.....	49
Figuur 33: rustpositie ingeklemd profiel	52
Figuur 34: uiterste positie actuator (profiel bezweken)	52
Figuur 35: dwarsdoorsnede gelagerde opstelling	52

Figuur 36: weergave halfgevuld profiel.....	56
Figuur 37: overzichtsblad codering.....	60
Figuur 38: vulopstelling	61
Figuur 39: profiel met volledige 2C PU-vulling.....	61
Figuur 40: verwarmingskoffer met cartridges (60 °C)	62
Figuur 41: vulling profielen met epoxyschuim.....	62
Figuur 42: holle metaalkorrels.....	63
Figuur 43: vullen van profiel	63
Figuur 44: profiel gevuld met MHS-schuim.....	63
Figuur 45: voorgevormd schuimelement	63
Figuur 46: startpositie vierpuntsbuigtest	64
Figuur 47: uiterste stand actuator.....	64
Figuur 48: eindpositie vierpuntsbuigtest	64
Figuur 49: startpositie impacttest.....	65
Figuur 50: uiterste positie impactor	65
Figuur 51: eindpositie impacttest.....	65
Figuur 52: ingeklemd profiel	66
Figuur 53: bezweken profiel.....	66
Figuur 54: kracht-verplaatsingsgrafiek van een buigtest (B-S3RO-PNLHI-3)	68
Figuur 55: kracht-verplaatsingsgrafiek van een impacttest (I-S3RO-PNLHI-3)	69
Figuur 56: grafiek van verplaatsing (mm) in functie van de tijd (s).....	70
Figuur 57: grafiek van snelheid (mm/s) in functie van de tijd (s).....	71
Figuur 58: grafiek van versnelling (mm/s ²) in functie van de tijd (s).....	71
Figuur 59: grafiek van de buigstijfheid per gewicht van lege profielen in functie van de materiaalsoort en de wanddikte	73
Figuur 60: grafiek van de energieabsorptie per gewicht van lege profielen in functie van de materiaalsoort en de wanddikte	82
Figuur 61: grafische weergave DesignEase van de interactie tussen dichtheid en materiaalsoort.....	84
Figuur 62: grafische weergave interactie tussen vulgraad en materiaalsoort voor epoxyschuim, bij een wanddikte van 1,5 mm.....	85
Figuur 63: invloed van wanddikte en buisdiameter op het oppervlaktetraagheidsmoment.....	88

Verklarende woordenlijst

actuator	Veroorzaakt een invloed op zijn omgeving. In dit geval een uit- of ingaande hydraulische cilinder met een bepaalde krachtoverbrenging.
adhesief	Betekent letterlijk 'nauw samenhangend'. Lijmen zijn voorbeelden van adhesieve stoffen.
anisotropisch	Een materiaal is anisotropisch wanneer de materiaaleigenschappen afhankelijk zijn van de richting.
blaasmiddel	Chemische stof die aan kunststoffen wordt toegevoegd om voornamelijk gewicht te besparen en voor het veranderen van de isolatiewaarden.
cartridge	De houder of de tube die de 2 verschillende componenten van 2C PU-schuim bevat.
crosslinking (chemische vernetting)	De binding die ontstaat tussen aangrenzende atoomketens in een molecule.
Design of Experiments (DoE)	Dit is een statistische ontwerpmethode waarbij processen of ontwerpen onderzocht of verbeterd worden door het uitvoeren van verschillende proeven.
E-modulus	De E-modulus of elasticiteitsmodulus is een waarde voor de stijfheid van een materiaal.
epoxy	Deze thermohardende kunststof heeft een ringvormige structuur bestaande uit 2 koolstofatomen en 1 zuurstofatoom.
exotherme reactie	Dit is een (chemische) reactie waarbij er energie wordt vrijgezet, meestal in de vorm van warmte.
extrusie	Bij deze vervormingstechniek wordt het uitgangsmateriaal door een matrijs met de gewenste profielvorm geperst.
glastransitietemperatuur	Voor temperaturen hoger dan de glastransitietemperatuur gaan de ketens vloeien waardoor uiteindelijk de vaste schuimstructuur overgaat in een elastisch geheel. De stijfheid en energieabsorptie van het schuim gaan hierbij grotendeels verloren.
impactor	Het onderdeel dat contact maakt met het te testen profiel tijdens de impacttesten en dat aan de actuator is bevestigd.
krachtgestuurd	Sturingsmogelijkheid van de actuator waarbij de actuator zich verplaatst met een constant aangelegde kracht.
load cell - krachtcel	Het element dat de aangelegde kracht van de actuator opmeet.
poedermetallurgie	Bij dit proces worden metalen geproduceerd vanuit poedervorm en niet vanuit een gesmolten massa.
polyethyleen	Polyethyleen, tegenwoordig polyetheen genoemd, wordt geproduceerd door polymerisatie van etheen.
polystyreen (PS)	Een thermoplastisch polymeer, opgebouwd uit het monomeer styreen.
positiegestuurd	Sturingsmogelijkheid van de actuator waarbij de actuator met een constante snelheid beweegt.

precipitatie	Is de vorming van een niet-oplosbaar reactieproduct, ook neerslag genoemd.
PUR	PUR staat voor polyurethaan. Dit polymeer is opgebouwd uit isocyanaat (hard segment) en polyol (zacht segment).
sinteren	Tijdens het sinteren worden materiaalkorrels verhit tot net onder de smelttemperatuur. Op deze wijze ontstaan er ineengesmolten contactpunten tussen de verschillende korrels en wordt na afkoeling een sterk geheel bekomen.
statische fout	Deze fout geeft het verschil aan tussen de gemeten en de theoretische waarde.
<i>tailored blanks</i>	Het product bestaat uit platen van verschillende diktes, soms uit platen met verschillende materiaaleigenschappen, die door middel van laserlassen met elkaar verbonden zijn. Deze techniek zorgt ervoor dat de juiste materiaaleigenschap steeds op de juiste plaats aanwezig is.
<i>tailored tubes</i>	Hierbij wordt dezelfde techniek toegepast als voor <i>tailored blanks</i> het geval is. Er worden echter buisprofielen gebruikt in plaats van plaatmateriaal.
thermoplast	Kunststoffen die door de aanwezigheid van weinig onderlinge bindingen telkens zacht worden wanneer ze verhit worden en die telkens opnieuw hard worden na afkoeling.
thermoset/thermoharder	Blijft hard tijdens verhitting wegens de aanwezigheid van chemische vernetting. De polymeermassa verbrandt of verkoolt.
transfertfunctie	Deze functie, ook genaamd de systeemfunctie, beschrijft het verband tussen de in- en uitgang van een systeem.

Abstract

Deze thesis kadert binnen het driejarig project van Flanders' DRIVE, genaamd *Enhanced Vehicle Performance via Structural Reinforcements*. Dit project ontstond uit de strenger wordende eisen voor de veiligheid in de voertuigindustrie. Hieraan voldoen is steeds moeilijker en lichtere materialen met gelijkwaardige of verbeterde mechanische eigenschappen zijn dus noodzakelijk. Het doel is het realiseren van een toename van 10% van de mechanische eigenschappen van stalen en aluminium profielen, uitgedrukt per gewichtseenheid, door ze te vullen met schuim.

De eigenschappen buigstijfheid, energieabsorptie en weerstand tegen axiale belasting worden onderzocht door middel van buig- en impacttesten en testen op axiale belasting. Hierbij wordt de onderzoeksmethodiek *Design of Experiments* toegepast door materiaalsoort, wanddikte, vulgraad, dichtheid en type schuim te variëren. Zo worden aluminium en stalen buisprofielen, gevuld met de structurele schuimen 2C PU, XPS-, epoxy- en MHS-schuim, getest. Uiteindelijk volgt er een analyse met Matlab, Excel en DesignEase®.

Stijfheid en weerstand tegen axiale belasting, uitgedrukt per gewichtseenheid, vertonen geen significante toenames. De energieabsorptie per gewichtseenheid daarentegen toont voor epoxy- en XPS-schuim toenames van minstens 5%. De testcombinaties met een toegenomen energieabsorptie en een gelijkblijvende stijfheid zijn bruikbaar voor de voertuigindustrie.

Abstract in English

This thesis is part of a three-year project of Flanders' DRIVE, named "Enhanced Vehicle Performance via Structural Reinforcements". This project originated from the stringent requirements in terms of safety and fuel consumption within the automotive industry. Meeting these requirements is becoming harder, and hence lighter materials with similar or improved mechanical properties are necessary. The aim is to achieve an increase of 10% of the mechanical properties, expressed per unit of weight, of steel and aluminium tubes by filling them with foam.

Properties like bending stiffness, energy absorption and resistance to axial load are examined by means of bending and impact tests and tests on axial loads. For these examinations, the research methodology *Design of Experiments* is being used with varying material type, wall thickness, filling degree, density and foam type. In this way, aluminium and steel tubes, filled with the structural foams 2C PU, XPS-, epoxy- and MHS-foam are tested. Finally the measurements are analyzed with Matlab, Excel en DesignEase®.

Stiffness and resistance against axial loads, expressed per unit of weight, don't show significant increases. In contrast, the energy absorption per unit of weight for epoxy- and XPS-foam shows increases of at least 5%. Test combinations with an increased energy absorption and a constant stiffness may be used in the automotive industry.

1 Inleiding

Deze masterthesis onderzoekt de invloed op de mechanische eigenschappen van ronde buisprofielen bij het inwendig aanbrengen van verschillende soorten schuim. Op de eerste plaats geeft de onderstaande inleiding een overzichtelijk geheel van de verschillende motieven voor dit onderzoek door middel van een situering. Daarnaast komen de probleemstelling en de verschillende doelstellingen aan bod. Het onderdeel dat hierop volgt, namelijk *materiaal en methode*, beschrijft de uitwerking van het onderzoek. Tot slot vindt in dit laatste deel ook een vooruitblik plaats op het verdere verloop van deze masterthesis.

1.1 Situering

Als laatstejaarsstudent Industrieel Ingenieur Elektromechanica aan de Universiteit Hasselt voer ik mijn masterproef bij het bedrijf Flanders' DRIVE uit, meer bepaald binnen de onderzoeksgroep *Lightweight Solutions*. Deze onderzoeksgroep behoort tot de *Research & Development* afdeling. De overige vier onderzoeksgroepen binnen Flanders' DRIVE zijn: *Clean & Energy-Efficient Vehicles*, *Advanced Manufacturing processes*, *Intelligent Driver and Traffic Systems* en *Intelligent Development Tools*.

Flanders' DRIVE, gelegen te Lommel en sinds 2001 actief in de industrie, spitst zich toe op innovatie in de voertuigindustrie. Hiervoor heeft het een modern testcentrum en een uitgebreid netwerk van partners ter beschikking. Dit bedrijf is uitgegroeid tot een internationaal erkend onderzoekscentrum, gesteund door de Vlaamse overheid. Momenteel zijn er 45 mensen tewerkgesteld en zij staan onder leiding van mevrouw Renilde Craps.

De onderzoeksgroep *Lightweight Solutions* startte in januari 2013 een project met de naam *Enhanced Vehicle Performance via Structural Reinforcements*. Dit project onderzoekt de invloed van structurele versterkingen op de mechanische eigenschappen en het geluidsabsorberend vermogen van profielen en panelen. Mijn masterproef kadert volledig binnen dit driejarig project, maar beperkt zich tot het onderzoeken van de invloed op de mechanische eigenschappen van ronde buisprofielen door het inwendig aanbrengen van schuim.

1.2 Probleemstelling

Fabrikanten in de voertuigindustrie stellen steeds meer eisen op het gebied van veiligheid, emissiewaarden en brandstofverbruik. Om aan de strengere veiligheidseisen te voldoen, is een stijging van de stijfheid en het impactvermogen van voertuigen noodzakelijk. Een toename van de veiligheid gaat vaak gepaard met gewichtstoename, maar daar er tevens hoge eisen aan het brandstofverbruik worden gesteld, is dat niet wenselijk. Zo is het bijvoorbeeld niet altijd een optie om het gebruikte staal of aluminium toe te laten nemen in dikte om zo te voldoen aan de gestelde veiligheidseisen.

Het wordt steeds moeilijker om met de huidige materialen aan deze eisen te voldoen. Hierdoor is het nodig om steeds te zoeken naar nieuwe, lichtere materialen met gelijkwaardige of, indien mogelijk, verbeterde mechanische eigenschappen om de bestaande toepassingen te vervangen.

Stijfheid, energieabsorptie en weerstand tegen axiale belasting zijn de mechanische eigenschappen die in deze masterthesis onderzocht dienen te worden. Het onderzoeken van deze specifieke eigenschappen wordt bepaald door cases van een zestal partners van Flanders' DRIVE voor dit onderzoek, namelijk:



Figuur 1: logo's projectpartners

De voertuigindustrie gebruikt hoofdzakelijk staal en aluminium en dus voert dit onderzoek testen op beide materiaalsoorten uit. Daarnaast dient er gebruik te worden gemaakt van een ander materiaalsoort met een beter energieabsorberend vermogen dan deze metaalsoorten. Schuim is hiervoor een uitstekend materiaal, daar het over een zeer goede energieabsorptie beschikt [1]. Bovendien hebben schuimen een zeer lage dichtheid in vergelijking met staal of aluminium.

Uit bovenstaande gegevens blijkt al meteen een eerste probleem. De verscheidenheid aan mogelijke testprofielen is zeer groot, want zowel lengte, wanddikte en vorm van de profielen kunnen verschillend zijn. Hierdoor is het vastleggen van een aantal verschillende profieltypes niet eenvoudig.

Een tweede probleem wordt gevormd door de grote verscheidenheid van schuimsoorten. Al deze soorten testen is onmogelijk en bovendien niet zinvol. Dus ook hier dient een selectie van een beperkt aantal gemaakt te worden.

Een laatste probleem dat met dit onderzoek gepaard gaat, is de grote verscheidenheid aan materiaalcombinaties van schuimen en profielen. Het aantal testen dient beperkt te worden tot een uitvoerbaar aantal. Belangrijk hierbij is dat er wel voldoende testen gebeuren, zodat er wetenschappelijk gefundeerde conclusies gevormd kunnen worden over de eventuele toekomstmogelijkheden van deze techniek.

1.3 Doelstellingen

De doelstelling is het vinden van een combinatie van een schuim en een metalen buisprofiel, waarbij het schuim inwendig in het profiel wordt aangebracht en er sprake is van een betere verhouding van de mechanische eigenschappen per gewichtseenheid. Hierbij moet het gevulde profiel dus verbeterde mechanische eigenschappen hebben ten opzichte van een niet-gevuld profiel. De verhouding van de mechanische eigenschappen per gewicht van de gevulde profielen moet minstens 10% groter zijn dan het geval is voor niet-gevulde profielen. Stijfheid, energieabsorptie en weerstand tegen axiale belasting zijn de mechanische eigenschappen die onderzocht worden.

1.4 Materiaal en methode

De uitwerking van deze masterthesis volgt in grote lijnen het chronologisch verloop van het onderzoek. Om te beginnen wordt het resultaat van de literatuurstudie weergegeven. Deze literatuurstudie is opgedeeld in de hoofdstukken *tailored blanks and tubes*, *schuimen* en *sandwichpanelen*. Hierbij ligt de nadruk op het hoofdstuk schuimen en vormen de overige twee hoofdstukken een aanvulling op het onderwerp en de gebruikte principes. In het onderdeel *Schuimen* worden er op de eerste plaats enkele algemene aspecten van schuimen besproken, zoals bijvoorbeeld het verschil tussen open en gesloten celstructuren. Vervolgens wordt er dan dieper ingegaan op de eigenschappen en toepassingen van polymeer- en metaalschuimen.

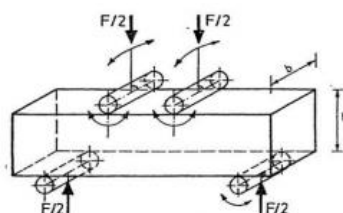
Hierna begint de eigenlijke omschrijving van het onderzoek met op de eerste plaats de selectie van de benodigde materialen. In het hoofdstuk *materiaalselectie* wordt de keuze van de materialen beschreven, gevolgd door een omschrijving van de uiteindelijk gekozen materialen. Hierbij wordt in eerste instantie de materiaalsoort en de afmetingen van de profielen behandeld. Tot slot worden de verschillende soorten schuimen weergegeven, samen met hun specificaties.

Zo wordt er door de projectpartners op de eerste plaats gekozen om aluminium en stalen profielen met een ronde dwarsdoorsnede van 30 mm en een lengte van 700 mm op te vullen. Dit opvullen gebeurt met de volgende schuimen: 2C PU, XPS-, epoxy- en MHS-schuim. Structureel bekeken zijn het vier verschillende soorten schuimen.

Naast de materiaalsoort en het type schuim worden nog drie andere parameters onderzocht. Zo wordt ook het effect van de wanddikte van het profiel bestudeerd. Zowel profielen met een wanddikte van 1,5 mm, als met een wanddikte van 3 mm worden getest. Een andere parameter bestaat in de vorm van de vulgraad. Tot slot wordt ook nog de invloed van de dichtheid van het schuim onderzocht. In de betreffende selectie van schuimen is dit enkel mogelijk bij XPS-schuim, daar de overige schuimen slechts over één dichtheid beschikken. Dat wordt mogelijk gemaakt door gebruik te maken van XPS-schuim met een lage en een hoge dichtheid.

In het vierde hoofdstuk volgt een uitgebreide uiteenzetting over de drie soorten testen, namelijk de buig- en impacttest en de test op axiale belasting. Bij de omschrijving van elk type test gaat er speciale aandacht uit naar de opbouw en aansturing van de verschillende proefopstellingen. Uiteindelijk worden de specifieke instellingen van de actuator weergegeven, aangezien deze parameters voor elk type test verschillen.

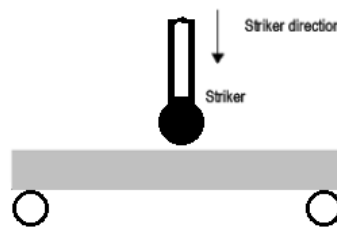
Op de eerste plaats worden de profielen aan een buigproef onderworpen om hieruit vervolgens de stijfheid te bepalen. Ook kan uit deze testen de maximaal optredende kracht gedurende de test bepaald worden. Figuur 2 toont de schematische opstelling van deze buigproef.



Figuur 2: schematische opstelling 4-puntsbuigproef [2]

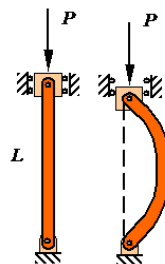
Voor de buigtesten wordt er geopteerd voor een 4-puntsbuigproef. De gegevens die tijdens deze test worden opgeslagen, kunnen door middel van Matlab worden weergegeven in een kracht-verplaatsingsgrafiek. De stijfheid is vervolgens te bepalen als de helling van het lineaire gebied van deze grafiek. Bijkomend wordt de maximaal optredende kracht tijdens deze test afgelezen als het hoogste punt van de kracht-verplaatsingsgrafiek.

Ten tweede wordt aan de hand van een impacttest het gedrag van de profielen tijdens een botsing, en dus de energieabsorptie, nagegaan. Figuur 3 toont de schematische opstelling die voor de impacttesten gebruikt wordt. Volgens N.A. Fleck et al. [3] is de oppervlakte onder de opgemeten curve een maat voor de energieabsorptie van de geteste profielen. Dus des te groter deze totale oppervlakte is, des te groter is het energieabsorberend vermogen.



Figuur 3: impacttest [4]

Als derde en laatste test wordt een test op axiale belasting uitgevoerd om op deze wijze de weerstand tegen axiale krachten vast te leggen. Deze opstelling verschilt in grote mate van die van de twee voorgaande testen en wordt door figuur 4 weergegeven. De krachten die voor deze test nodig zijn, zijn groter dan het krachtbereik van de actuators van Flanders' DRIVE. Hierdoor wordt er voor gekozen om deze testen uit te laten voeren door de *Vrije Universiteit Brussel* (VUB).



Figuur 4: test op axiale belasting [5]

Alvorens het uitvoeren van de eigenlijke testen, worden er in het volgende gedeelte bepaalde materiaalcombinaties opgesteld aan de hand van de statistische ontwerpmethode *Design of Experiments* (DoE). Door middel van deze ontwerpmethode is het niet nodig om daadwerkelijk alle mogelijke combinaties te testen voor het creëren van een inzicht op de invloed van variërende parameters. Op deze wijze wordt dus het aantal testen beperkt.

Nu alle elementen zijn vastgelegd, wordt er overgegaan op het praktische gedeelte van het onderzoek. Dit gedeelte houdt het voorbereiden, vullen en testen van de profielen in en wordt besproken in het zesde hoofdstuk. Op het einde van de testen wordt steeds een bestand verkregen met daarin minimaal de tijd, de aangelegde kracht en de verplaatsing van de actuator.

Vervolgens worden in het volgende onderdeel de gemaakte analyses op de bekomen testresultaten weergegeven. Hiervoor wordt eerst vastgelegd op welke wijze de maximale kracht, de buigstijfheid, de energieabsorptie en de weerstand tegen axiale belasting berekend of bepaald worden. Het berekenen van de mechanische eigenschappen gebeurt steeds met het programma Matlab R2010a. Hierna worden op de eerste plaats de absolute waarden van de lege profielen geanalyseerd. Hierdoor wordt het mogelijk om in het volgende onderdeel, naast de absolute waarden, ook de relatieve waarden van de gevulde profielen te bepalen. Tevens worden de getalwaarden van de eigenschappen ook steeds per massa-eenheid berekend. Het determineren van deze absolute en relatieve waarden gebeurt steeds met Microsoft Excel 2010.

Eveneens worden in dit hoofdstuk de relaties tussen de verschillende parameters geanalyseerd door middel van het programma DesignEase®. Dat gebeurt door op tweedegraadsniveau twee verschillende parameters gecombineerd weer te geven in een grafiek. Hieruit wordt dan de invloed van deze parameters op de mechanische eigenschappen afgeleid.

Tot slot worden de relevante resultaten samengevat in de conclusie. Hierbij worden de oorzaken voor het behalen van positieve resultaten, of voor het uitblijven ervan, opnieuw aangehaald. Er wordt afgesloten met een nadrukkelijke vermelding van de beste materiaalcombinatie volgens dit onderzoek. De conclusie wordt nog gevolgd door een volledige literatuur- en bijlagenlijst.

2. Literatuurstudie

2.1 Inleiding

De oplossing voor de strenger wordende eisen op het gebied van veiligheid en emissiewaarden binnen de voertuigindustrie bestaat in de vorm van lokale of structurele versterkingen. Hierdoor neemt immers de weerstand tegen impact toe [6]. Tevens mag er slechts sprake zijn van een geringe gewichtstoename of, in het meest gunstige geval, zelfs een daling van het gewicht. Zo zorgt een gewichtsafname van het voertuig ter waarde van 100 kilo, voor een reductie van het brandstofverbruik tussen 0,3 en 0,5 liter per 100 km [7].

Hieronder worden twee gevallen van lokale of structurele versterkingen weergegeven. Hierbij ligt de nadruk natuurlijk op het hoofdstuk schuimen, daar deze techniek in de thesis wordt onderzocht. Het overige hoofdstuk vormt een aanvulling op het onderwerp en de gebruikte principes.

Op de eerste plaats zijn de *tailored tubes* en de *tailored blanks* een mogelijkheid voor het creëren van lokale of structurele versterkingen. In de auto-industrie worden deze technieken veelvuldig toegepast. De term *tailored blanks* staat voor lasergelaste vormstukken. Deze vormstukken bestaan uit platen van verschillende diktes en, indien vereist, uit verschillende materiaaleigenschappen. Deze lokale aanpassing zorgt er steeds voor dat de juiste materiaaleigenschap op de juiste plaats aanwezig is.

Daarnaast wordt het opvullen van buisprofielen met schuim besproken. Hiervoor komen meerdere materialen in aanmerking. Zo zijn er in de industrie immers veel polymeer- en metaalschuimen voorhanden. Enkele mogelijke polymeerschuimen zijn: PUR-schuim, epoxyschuim en polystyreenschuim. Een veel gebruikt metaalschuim daarentegen is aluminiumschuim. Het belangrijkste principe bij deze techniek is dat de combinatie van profiel en schuim een grotere stijfheid heeft dan de som van de afzonderlijke stijfheden van beide elementen.

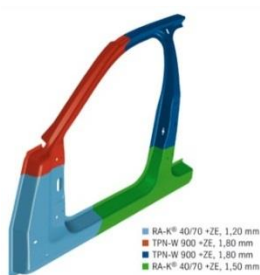
2.2 Tailored blanks en tubes

2.2.1 Tailored metal blanks en tubes

In de inleiding is reeds aangehaald dat *tailored blanks* lasergelaste vormstukken zijn die zorgen voor de aanwezigheid van de vereiste materiaaleigenschappen op de gewenste posities van een product. Op gelijkaardige manier zijn *tailored tubes* dan te beschrijven als buizen die zijn uitgerust met een plaatselijke verdikking of buizen die plaatselijk opgebouwd zijn uit verschillende materialen [6]. Op deze manier bevindt het juiste materiaal zich op de juiste plaats en niet op andere, overbodige, plaatsen. Zo bevindt er zich in gebieden onderhevig aan grote spanningen extra of sterker materiaal.

Tailored metal blanks bestaan vaak uit individuele metaalplaten met een variërende dikte en indien nodig met een variërende sterkte. Deze platen zijn door middel van laserlassen met elkaar verbonden. Vervolgens krijgt dit voorlopige product zijn definitieve vorm door middel van dieptrekken of persen. *Tailored tubes* worden op een gelijkaardige manier geproduceerd, maar hier wordt de bewerking van dieptrekken en persen meestal achterwege gelaten.

Beide productiemethoden worden vooral in de voertuigindustrie toegepast, waar ze de stijfheid, het gewicht, de materiaalkost en het gedrag tijdens een crash verbeteren [8]. Het zijn voornamelijk carrosserie onderdelen, zoals deuren (zie figuur 5) en motorkappen, die uit *tailored blanks* geproduceerd worden. Een voorbeeld van *tailored tubes* wordt weergegeven in figuur 6.

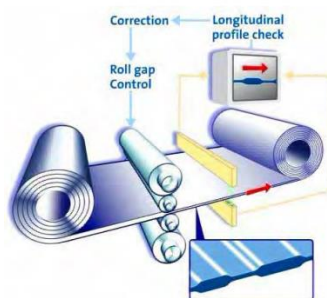


Figuur 5: versterkingsring voorste deur [9]



Figuur 6: tailored tubes in autoframe [10]

Plaatmateriaal met enkel variërende diktes kan ook geproduceerd worden door gebruik te maken van walsen. Er wordt dan gesproken over *tailored rolled blanks*. Het proces wordt hieronder (zie figuur 7) afgebeeld.



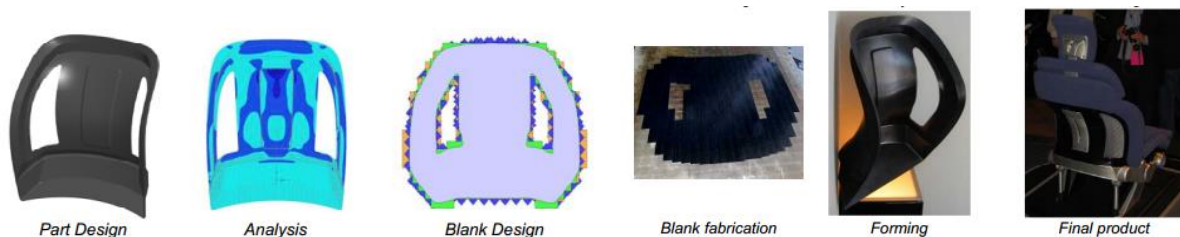
Figuur 7: walsen van tailored rolled blanks [11]

Op figuur 7 is een regelsysteem waar te nemen dat de actuele afstand tussen beide walsrollen opmeet, de gemeten waarde vergelijkt met de ingestelde waarde en vervolgens de positie van de walsrollen corrigeert indien nodig. De dikte van de gevormde plaat kan dus eenvoudig gewijzigd worden door gebruik te maken van software die de rollen zodanig aanstuurt dat op ieder moment de gewenste dikte bereikt kan worden.

2.2.2 Tailored polymer blanks

Voor *tailored polymer blanks* geldt, evenals voor de *tailored metal blanks*, dat het bestaat uit materiaal met een variërende dikte. De afzonderlijke materialen worden hierbij met behulp van laserlassen aan elkaar gesmolten, zodat één product bekomen wordt. Dat gebeurt door thermoplasten tot boven hun smelttemperatuur te verwarmen en vervolgens de afzonderlijke delen tegen elkaar te drukken. Zo wordt na afkoelen één product gevormd. Merk op dat deze technologie enkel gebruikt kan worden voor de groep van thermoplasten. Snel slijtende plaatsen worden voorzien van een dikkere laag kunststof om het totale product van een aanvaardbare levensduur te voorzien.

Er wordt over *tailored blanks* van polymeercomposieten gesproken als vezelversterkt materiaal in een polymeer matrix wordt opgelost. Deze vezels zorgen voor een toename van stijfheid en sterkte ten opzichte van de conventionele polymeeroplossing. Onderstaande afbeelding geeft weer hoe deze technologie wordt toegepast bij een kinderstoel.



Figuur 8: ontwerp van een kinderstoel met versterkte delen [12]

Sommige delen van een kinderstoel verslijten sneller dan voor andere delen het geval is. Hierdoor is het noodzakelijk dat er voor de sneller slijtende delen versterkende vezels worden toegepast. Om de exacte plaatsen te bepalen, wordt er gebruik gemaakt van software om een analyse op het model uit te voeren. Hieruit volgt dan een berekend ontwerp voor het te produceren product. Vervolgens wordt er een tussenproduct gefabriceerd op de wijze zoals hierboven reeds is uitgelegd. Het is noodzakelijk dat de vezels hierbij uiterst nauwkeurig ten opzichte van elkaar gepositioneerd worden. Tot slot wordt dit tussenproduct of *blank* aan thermovorming onderworpen.

Gebruikte vezels zijn onder andere glasvezels en de vaak toegepaste koolstofvezels, die onder meer gebruikt worden in hoog kwalitatieve fietskaders, alsook in de carrosserie van de Audi R8.

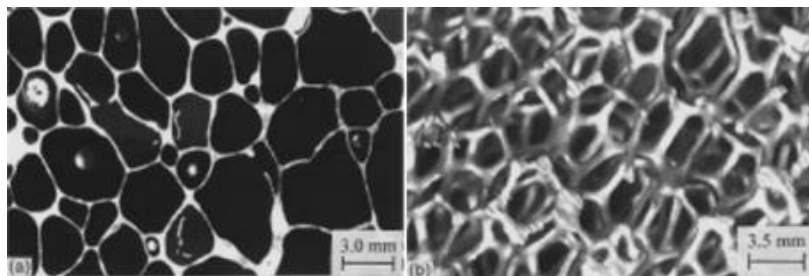
2.3 Schuimen

Volgens Anne Marie Helmenstine is een schuim een substantie waarin lucht of gasbellen in een vaste stof of vloeistof zijn opgesloten [13]. Op de eerste plaats worden hieronder enkele algemene eigenschappen van alle schuimsoorten weergegeven. Deze eigenschappen gelden dus zowel voor polymeer- als voor metaalschuimen. Hierna worden de polymeerschuimen uitgebreid besproken om tot slot te eindigen met de metaalschuimen.

2.3.1 Algemene specificaties

2.3.1.1 Open en gesloten celstructuur

Binnen de schuimen bestaat een onderscheid tussen open en gesloten celstructuren (zie figuur 9). Bij de open celstructuur staan de poriën met elkaar in contact, zodat lucht en of vloeistoffen zich van de ene holte naar de andere kunnen verplaatsen. Bij gesloten celstructuren daarentegen wordt elke porie volledig door vast materiaal omgeven.



Figuur 9: opbouw gesloten celstructuur (links) en open celstructuur (rechts) [14]

Het volume, ingenomen door de poriën, kan variëren van 75 tot maar liefst 95 procent van het schuimvolume. Beide celstructuren zijn geschikt om op te treden als energieabsorberend element of als toepassing voor lichtgewicht constructies. Ze beschikken immers beiden over een dichtheid die slechts 10 tot 25 procent bedraagt van de dichtheid van het oorspronkelijke, niet-poreuze materiaal. Merk op dat een open celstructuur veel gevoeliger is voor vervuiling, daar vuil en water in de open poriën kunnen doordringen.

2.3.1.2 Thermosets versus thermoplasten

Het grote verschil tussen deze 2 polymeren is hun gedrag bij opwarming. Een thermoset gaat bij herverhitting niet opnieuw overgaan in een vloeibare toestand. Daarentegen verbrandt of verkoolt het bij herverhitten. Zeer gekende thermosets zijn polyurethanen en epoxyharsen.

Thermoplasten echter gedragen zich volledig tegenovergesteld. Zo worden deze materialen terug vloeibaar wanneer ze herverhit worden. Het is dan mogelijk om de vloeibare massa in nieuwe vormen te gieten. PVC en polypropyleen (PP) zijn enkele bekende voorbeelden van deze groep van materialen.

2.3.1.3 Voorgevormde schuimelementen en injectie

Voorgevormde schuimelementen, in het Engels *preforms*, zijn elementen die volgens bepaalde vormen geproduceerd worden zonder dat het schuim rechtstreeks in het profiel geïnjecteerd wordt. In eerste instantie worden er grote blokken schuim geproduceerd om dan vervolgens deze blokken te versnijden in schuimelementen met de gewenste afmetingen. Voor een rond profiel met een inwendige diameter van 27 mm wordt dus een rond schuimelement met een diameter van 27 mm uit de grote blok schuim gesneden. Er zijn een aantal nadelen verbonden aan deze technologie, namelijk:

- het aanbrengen van schuimelementen in een profiel wordt moeilijker naarmate de lengte toeneemt en de vorm van het profiel complexer wordt;
- schuimen zijn flexibel en dat maakt het nauwkeurig versnijden moeilijk;
- het schuim moet handmatig worden bijgeschuurd, indien het niet in de profielopening past;
- het verlijmen van het schuim met de profielwand is een minder eenvoudig proces, vergeleken met injectie van het schuim.

Enkele voordelen daarentegen zijn:

- het schuim kan zeer nauwkeurig in het profiel gepositioneerd worden;
- het is een minder vuil proces dan injectie;
- de homogeniteit van het schuim is meestal beter dan bij schuiminjectie.

Injectie van het schuim is een tweede mogelijkheid om het schuim in de profielen aan te brengen. Hierbij worden de verschillende bestanddelen van het schuim apart aangevoerd tot precies voor de spuitkop. In deze spuitkop worden de verschillende bestanddelen met elkaar gemengd. Hierna wordt de vloeistof via de opening van de spuitkop op de bodem van het profiel aangebracht. Vanaf dat moment begint de substantie te reageren. Dat betekent dat het uiteindelijke schuim gevormd wordt, daar de substantie expandeert. De nadelen hieraan verbonden zijn:

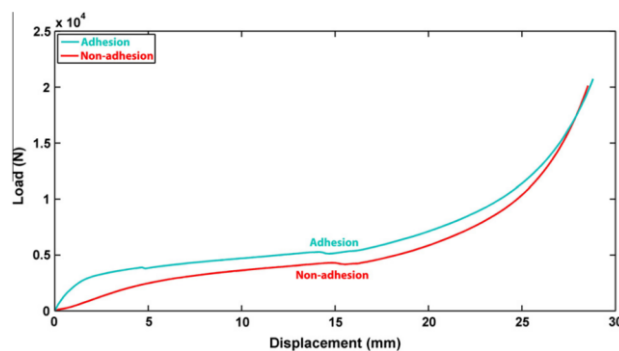
- het schuim kan minder nauwkeurig gepositioneerd worden, daar het schuim telkens iets anders expandeert;
- het bepalen van de correcte instellingen van de parameters is een tijdsintensief proces;
- de apparatuur voor het vullen is veel complexer dan voor voorgevormde schuimelementen het geval is.

Deze technologie heeft echter ook een aantal voordelen:

- dankzij een kleverige toestand tijdens de reactie, vindt er een optimale hechting tussen de profielwand en het schuim plaats;
- het volledige vulproces verloopt zeer snel, ongeveer in een tiental seconden;
- het schuim is steeds optimaal passend, wat bij voorgevormde schuimelementen niet steeds het geval is.

2.3.1.4 Invloed op de mechanische eigenschappen

Door een schuim aan te brengen in een profiel kan de stijfheid van dit nieuw geheel hoger worden dan de som van de afzonderlijke stijfheden van het schuim en het profiel. Volgens A. Niknejad et al. [15] is er wel een belangrijke voorwaarde voor dit verschijnsel en dat is een goede hechting van het schuim aan het profiel. Het is immers deze hechting tussen het schuim en het profiel die, dankzij de bijkomende wrijving, zorgt voor de toename van de stijfheid. Figuur 10 geeft het verschil weer tussen een polyurethaanschuim waarbij er wel sprake is van een goede hechting tussen het ronde, koperen profiel en het schuim en een schuim waarbij dit niet het geval is.



Figuur 10: kracht in functie van doorbuiging met bindmiddel en zonder [15]

Op bovenstaande afbeelding kan de grotere stijfheid bij een goede hechting afgeleid worden uit de grotere helling van de blauwe lijn. Voor dit polyurethaanschuim, met een dichtheid van 256 kg/m^3 , zorgt een goede hechting eveneens voor een groter energieabsorberend vermogen. Dit vermogen, dat gekenmerkt wordt door de oppervlakte onder de curve, kan met maar liefst 20% toenemen.

Eveneens geldt voor alle soorten schuimen dat het effect van de stijfheidstoename van een met schuim gevuld profiel door een aantal parameters beïnvloed wordt. Zo wordt dit versterkend effect verzwakt door een afname van de diameter en de profiellengte en door een toename van de wanddikte. Een dunne, lange buis met een grote diameter is dus het meest geschikt.

Verder neemt de stijfheid van dit schuim eveneens toe naarmate de dichtheid van het schuim stijgt en dus neemt ook de stijfheid van het gevulde profiel toe. Merk op dat een toename van de dichtheid om een grotere stijfheid te verkrijgen maar zinvol is, zolang de verhouding stijfheid/gewicht toeneemt.

2.3.2 Polymeerschuim

Daar het aanbod polymeerschuimen zeer uitgebreid is, worden hier enkel de belangrijkste besproken, namelijk de polyurethaan-, de epoxy- en de thermoplastische schuimen. Van deze laatste groep wordt enkel het polystyreenschuim besproken. Nog andere thermoplastische schuimen zijn: polypropyleen-, polyethyleen- en PVC-schuimen.

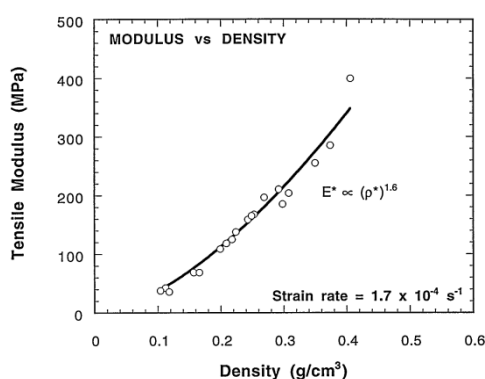
2.3.2.1 Polyurethaanschuim

Polyurethaanschuim (PUR) ontstaat wanneer isocyaan (hard materiaal) en polyol (zacht materiaal) met elkaar reageren volgens een exotherme reactie. Hierbij ontstaat een thermohardend schuim met een gesloten celstructuur [16]. Hierdoor wordt waterindringing verhinderd. Dit thermohardend schuim kan rechtstreeks in het profiel aangebracht worden door middel van een injectiesysteem, voorzien van een passende spuitgietkop, ofwel door gevormde schuimelementen. Indien het schuim uit zichzelf niet voldoende hecht, kan er gebruik worden gemaakt van een bindmiddel zoals lijm. Dat is echter niet van toepassing, daar polyurethaan tijdens zijn exotherme reactie kleverig is, waardoor het gemakkelijk hecht aan andere materialen. Al dan niet is er nood aan het uitoefenen van druk of een stijging van de temperatuur om de verbinding volledig tot stand te brengen. Polyurethaanschuim wordt veelvuldig toegepast als warmte- en geluidsisolatie, maar ook als verstevigend schuim.

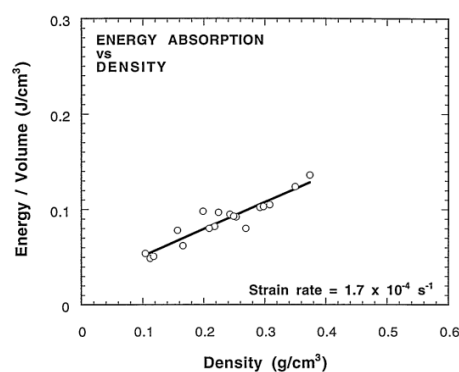
Volgens de *Polyurethane Foam Association* [17] zijn er twee processen mogelijk voor het produceren van polyurethaanschuim. Een eerste proces bestaat uit het produceren van schuim door luchtbellen in een gesmolten polyurethaan massa te blazen. Het gevormde schuim wordt vervolgens door middel van een transportband afgevoerd. Na één volledige dag afgekoeld en uitgehard te zijn, kan het schuim versneden worden.

Bij het andere proces wordt het schuimmengsel in mallen aangebracht, waarin vervolgens een chemische reactie, de schuimvorming, plaatsvindt. Belangrijk hierbij is dat het mengsel vloeibaar blijft tot de volledige ruimte gevuld is.

Net zoals voor alle soorten schuim de mechanische eigenschappen afhankelijk zijn van de dichtheid, geldt dat ook voor polyurethaanschuim. Figuur 11 geeft het verband weer tussen de E-modulus en de dichtheid en figuur 12 tussen het energieabsorberend vermogen en de dichtheid in het geval van een quasi-statische compressie.



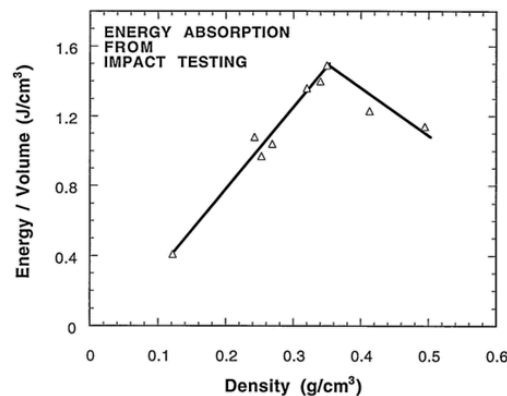
Figuur 11: stijfheid in functie van dichtheid [1]



Figuur 12: energieabsorptie in functie van dichtheid [1]

Uit bovenstaande afbeeldingen blijkt dat bij een toenemende dichtheid, de stijfheid toeneemt. Dat is zeer logisch daar een grotere dichtheid betekent dat er sprake is van een minder poreus schuim en dat er dus minder holten met lucht aanwezig zijn. Gassen hebben een zeer lage mechanische sterkte, dus des te minder gas er aanwezig is, des te groter de stijfheid van het schuim.

Wanneer er daarentegen impacttesten worden uitgevoerd, en er dus geen sprake is van quasi-statische compressie, geldt er volgens S. H. Goods [1] een ander verband dan in de vorige grafieken. Dit nieuwe verband wordt in figuur 13 weergegeven.



Figuur 13: energieabsorptie in functie van dichtheid (impacttest) [1]

Bij impact is er dus sprake van een optimale dichtheid. Zo neemt vanaf een bepaalde dichtheid de energieabsorptie niet langer meer toe bij een toenemende dichtheid, maar kent de energieabsorptie een afname. Dat kan duidelijk worden waargenomen in bovenstaande grafiek, waarbij de energieabsorptie een maximale waarde bereikt voor een dichtheid van ongeveer 0,35 g/cm³.

2.3.2.2 Epoxyschuim

Epoxyschuim bestaat uit een matrix van epoxyhars waarin verschillende vezels of additieven opgelost kunnen worden. Dankzij de vezels die in het epoxyhars worden opgelost, wordt het kwetsbare schuim sterker. De meest toegepaste vezels zijn glas- en koolstofvezels. Net zoals voor PUR-schuim het geval is, wordt ook hier het schuim ingespoten of met behulp van voorgevormde schuimelementen aangebracht in het te verstevigen profiel. Een mogelijk productieproces voor het produceren van epoxyschuim volgens Samsudin et al. [18], gebeurt aan de hand van geëxpandeerde polystyreen korrels. De poriën in het schuim ontstaan hierbij door het wegsmelten van de polystyreenkorrels. Over het algemeen heeft epoxyschuim een hogere dichtheid dan schuimen die door middel van blazen tot stand komen.

2.3.2.3 Thermoplastische schuimen

Bij thermoplastische schuimen is het, in tegenstelling tot polyurethaan- en epoxyschuimen, niet mogelijk om het schuim met behulp van een injectiesysteem aan te brengen. Er wordt hierbij dus enkel gebruik gemaakt van vaste schuimelementen. Thermoplastisch schuim is zeer goed recycleerbaar. Thermosets daarentegen zijn minder goed tot niet-recycleerbaar, daar er crosslinking aanwezig is [19]. De meeste polyurethaanschuimen behoren tot de thermosets. De belangrijkste verschillen tussen thermosets en thermoplasten is in het begin van het hoofdstuk *schuimen* reeds aangehaald.

Thermoplastische schuimen kunnen na het productieproces vervormd worden door middel van thermovormen. Hierbij wordt het materiaal op de eerste plaats verwarmd tot een zekere temperatuur, variërend voor elk schuim. Vervolgens wordt door middel van druk of vacuüm de gewenste vorm met behulp van een mal gecreëerd (zie figuur 14). Polyurethaanschuim daarentegen laat zich na de productie niet meer vervormen door een warmteproces. Daar dit type schuim een thermoset is, verbrandt of verkoolt het immers wanneer het opnieuw verhit wordt. Het zet zich niet terug om in een vloeibare massa.



Figuur 14: thermovorming van PET-schuim [20]

2.3.3 Metaalschuim

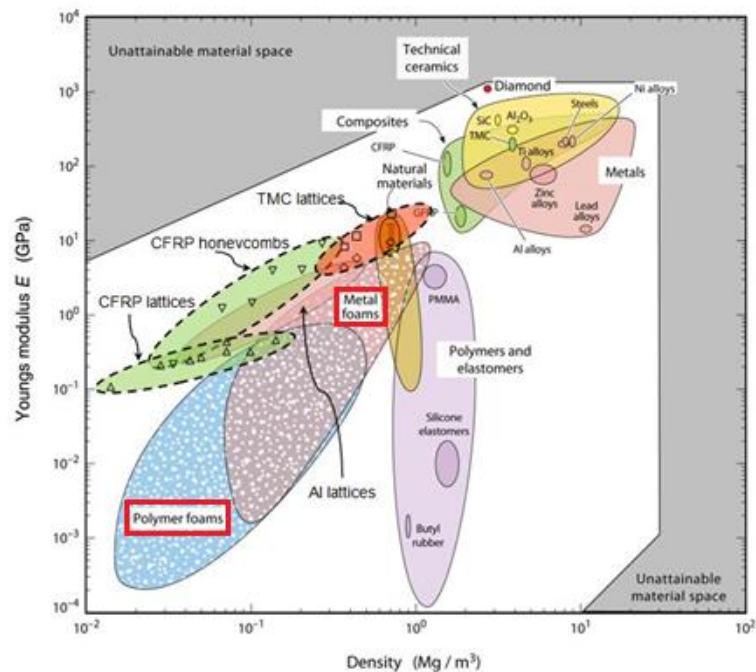
2.3.3.1 Algemene specificaties

Metaalschuim bestaat uit een celstructuur van vaste metalen met daarin poriën, oftewel luchtholten, die een groot deel van het totale volume innemen (zie figuur 15). Ook binnen deze schuimen kan er een onderscheid gemaakt worden tussen open en gesloten celschuimen. De meeste metaalschuimen bestaan uit aluminium, maar ook van koper, nikkel, titanium en roestvast staal kunnen metaalschuimen gemaakt worden [21]. Een pluspunt van metaalschuim is dat het zeer goed recycleerbaar is. Deze goede recycleerbaarheid is te wijten aan het feit dat het schuim eenvoudigweg terug omgesmolten kan worden tot het conventioneel metaal.



Figuur 15: Aluminiumschuim in aluminium buisprofiel [22]

Bij metaalschuimen blijft de vervorming na aanleggen van een belasting zichtbaar en vanaf een gegeven moment wordt een punt bereikt waarop het schuim geen verdere vervorming meer toelaat. Merk op dat metaalschuim een opvallend hogere stijfheid per gewicht heeft dan polymeerschuim (zie afbeelding 16).

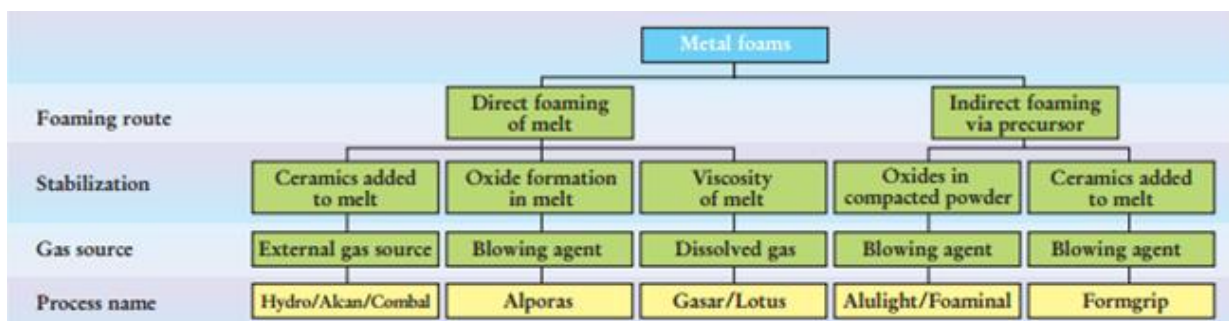


Figuur 16: weergave van E-modulus i.f.v. dichtheid m.b.v. 'CES EduPack' [23]

Bovenstaande afbeelding geeft de stijfheid van verschillende materialen in functie van hun dichtheid weer. Zo blijkt duidelijk dat de hoger gelegen metaalschuimen een grotere stijfheid-gewichtsverhouding hebben dan de polymeerschuimen. Merk wel op dat de metaalschuimen ook een hogere dichtheid hebben. De stijfheid neemt echter in grotere mate toe bij de overgang van polymeren naar metalen, dan dat de dichtheid toeneemt bij eenzelfde overgang.

2.3.3.2 Overzicht productie metaalschuim

Onderstaande afbeelding geeft een overzicht van de verschillende technieken voor de productie van metaalschuim. Helaas zijn deze technieken meestal vrij complex. Daarenboven zijn deze verschillende processen zeer kostelijk en weinig robuust. Hierdoor zijn ze minder geschikt voor toepassingen in de voertuigindustrie.



Figuur 17: overzicht productietechnieken metaalschuim [24]

De gesloten celstructuur komt tot stand wanneer er in een metaal gasbellen optreden die vervolgens door het omringende metaal worden ingesloten. De gevormde poriën hebben gemiddeld een grootte van 1–8 mm. De gasbellen kunnen op een aantal verschillende manieren of technieken tot stand komen, namelijk:

- door gas in de vloeistof te blazen;
- door precipitatie van eerder opgeloste gassen in de vloeistof;
- door het oplossen van blaasmiddelen in het gesmolten metaal;
- met het principe van *Metal Hollow Spheres*.

Voor de derde mogelijkheid worden de blaasmiddelen meestal op voorhand gemengd met een droge poedervorm van het metaal om vervolgens in de vloeistoffase van het metaal gasbellen te creëren.

Een andere en laatste mogelijkheid voor het creëren van een schuim met een gesloten celstructuur wordt mogelijk gemaakt door *Metal-Hollow-Sphere*-balletjes (MHS-balletjes). Deze techniek wordt door Hollomet gebruikt en werd in samenwerking met *Fraunhofer-Institut für Manufacturing Technology and Advanced Materials* (IFAM) ontwikkeld [25]. Hierbij worden MHS-balletjes gevormd door polystyreenkorrels en bindmiddel in contact te brengen met metaalpoeder. De afkorting MHS wordt soms nog voorafgegaan door de term *Adhesive Bonded*, wat weergeeft dat er een bindmiddel wordt toegepast tijdens de productie.

Door vervolgens het polystyreen bij een temperatuur van 1200°C te verdampen doorheen de poreuze openingen van het metaal omhulsel, ontstaat een holle, metalen korrel (MHS). Wanneer meerdere van deze korrels onder hoge druk in een verwarmde mal gebracht worden, lassen de verschillende onderdelen zich aan elkaar vast. Zo ontstaat een schuim, opgebouwd uit uniforme luchtbellen.

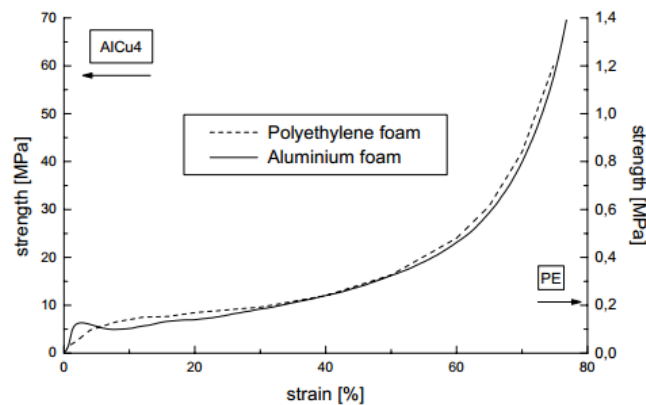
De open celstructuur op zijn beurt kan door middel van een gietproces of door poedermetallurgie geproduceerd worden en de celgrootte varieert van 0,2 – 5 mm. Wanneer er gebruik wordt gemaakt van poedermetallurgie, wordt er een schuim bekomen met betere mechanische eigenschappen dan bij metaalschuim dat op een andere wijze geproduceerd wordt. Dit gegeven werd aangetoond door de onderzoeksgroep Rabiei van de universiteit van North Carolina [26].

2.3.3.3 Vergelijking met polymeerschuim

Er bestaat nog geen enkel metaalschuim dat zo goed ontwikkeld is als een polymeerschuim. Doordat er geen grote industriële toepassingen bestaan voor metaalschuim wordt hier minder onderzoek naar gedaan en bevinden de toepassingen zich meestal nog in een beginfase. Hierdoor is dit laatst vermelde schuim duur om te produceren. De afwezigheid van belangrijke toepassingen is voornamelijk te wijten aan de minder robuuste processen. Zo zijn de productieprocessen voor metaalschuim zeer fijngevoelig aan veranderingen van de parameters. Daarnaast draagt ook een onvoldoende kennis van deze schuimsoort niet bij tot een breed toepassingsgebied.

Metaalschuim is net als polymeerschuim uiterst geschikt om te gebruiken voor lastdragende constructies. Hierbij beschikken ze over een groot volume en een laag gewicht. Evenzeer kan het schuim ook gebruikt worden als energieabsorberend materiaal.

Onderstaande afbeelding vergelijkt de spannings-rek-curve van een polyethyleenschuim (polymeerschuim) met een AlCu₄-schuim (metaalschuim). Beide schuimen hebben ongeveer dezelfde relatieve dichtheid, daar het aluminiumschuim voor 83% uit luchtholten bestaat en het polymeerschuim voor 87%.



Figuur 18: vergelijken spanning-rek diagrammen van PE-schuim en het metaalschuim AlCu₄ [27]

Uit deze grafiek blijkt dat de energieabsorptie van het aluminiumschuim ongeveer 29 maal groter is dan voor polyethyleenschuim het geval is. Dat kan afgeleid worden door de schaal op de linker y-as te vergelijken met die van de rechter y-as. Zo is de waarde 70 MPa ongeveer 29 maal groter dan 2,4 MPa.

3. Materiaalselectie

In dit hoofdstuk wordt verteld op welke wijze de keuze voor de profielen en de verschillende schuimen gemaakt wordt. Voor de profielkeuze dient er nog een opsplitsing gemaakt te worden tussen de materiaalsoort en de afmetingen.

3.1 Profielen

3.1.1 Materiaal

Voor de keuze van het soort materiaal wordt er gekeken binnen het materiaalgebruik van de voertuigindustrie. Hieruit blijkt dat deze industrie voornamelijk gebruik maakt van staal en aluminium als constructiematerialen voor voertuigen. Daarom wordt er door de projectpartners beslist om deze twee metalen op te nemen in het onderzoek.

Als staalsoort wordt er gekozen voor S235 JR. Deze laaggelegeerde staalsoort heeft een minimale rekgrens van 235 N/mm². Onderstaande tabellen (zie tabel 1 en 2) geven de belangrijkste bestanddelen en mechanische eigenschappen van deze materiaalsoort weer.

Tabel 1: chemische bestanddelen S235 JR [28]

S235JR Chemical Composition(max %):

Grade	C%	Si %	Mn %	P %	S %	N %	Cu %
S235JR	0.23	-	1.50	0.045	0.045	0.014	0.60

Tabel 2: mechanische eigenschappen S235 JR [28]

S235JR Mechanical Properties.

Thickness (mm)	Min Yield (Mpa)	Tensile (Mpa)
8mm-100mm	215Mpa-235Mpa	360-510Mpa
101mm-200mm	185-195Mpa	350-490Mpa

Voor aluminium wordt er geopteerd voor AW 6060 T66. Deze aluminiumsoort wordt veel toegepast en de buizen worden door middel van extrusie geproduceerd. De chemische samenstelling van dit product wordt in tabel 3 weergegeven.

Tabel 3: chemische bestanddelen AW 6060 T66 [29]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.30 – 0.6	0.10 - 0.30	max. 0.10	max. 0.10	0.35 – 0.6	max 0.05	max 0.15	max 0.10

De mechanische eigenschappen van aluminium verschillen in belangrijke mate van die van staal. Zo heeft staal een elasticiteitsmodulus van 210 GPa en heeft aluminium een elasticiteitsmodulus die 3 keer kleiner is, namelijk 70 GPa. Enkele andere mechanische eigenschappen van deze specifieke aluminiumsoort worden hieronder weergegeven (zie tabel 4).

Tabel 4: mechanische eigenschappen AW 6060 T66 [30]

Geëxtrudeerde buizen							
Hardheids- toestand	Afmetingen in mm E (3)	R _m MPa		R _{p0,2} MPa		A %	A ₅₀ %
		min.	max.	min.	max.	min.	min.
T66 (5)	≤ 15	215	-	160	-	8	6

3.1.2 Vorm en afmetingen

Stalen en aluminium profielen komen in een groot aantal vormen en afmetingen voor, maar het is niet economisch om elke soort te testen en bovendien is het ook totaal nutteloos. Het is immers de bedoeling dat er een globaal beeld gevormd wordt over de invloed van het schuim in verschillende profielafmetingen. Voor het onderzoek van Flanders' DRIVE wordt er geopteerd om zowel ronde als vierkante profielen te testen en bovendien vindt er voor beide vormen een variatie van de wanddikte plaats. De uiteindelijke profielen die voor deze testen gebruikt worden, zijn telkens 700 mm lang en de dwarsdoorsnedes bedragen:

- vierkante buizen van 30x30x1,5,
- vierkante buizen van 30x30x3,
- ronde buizen van Ø30x1,5,
- ronde buizen van Ø30x3.

Voor deze thesis wordt er echter enkel gebruik gemaakt van ronde, aluminium en stalen profielen (zie figuur 19) met een lengte van 700 mm en met onderstaande dwarsdoorsnedes:

- ronde buizen van Ø30x1,5,
- ronde buizen van Ø30x3.



Figuur 19: aluminium (links) en stalen (rechts) profielen met Ø30x3 en Ø30x1,5

3.2 Schuimen

3.2.1 Selectiemethode en de geselecteerde schuimen

Het aantal schuimsoorten in de industrie is zeer omvangrijk en het is dan ook niet vanzelfsprekend om een beperkt aantal soorten uit deze immense groep te selecteren. Praktisch gezien is het onmogelijk om met elk type schuim testen uit te voeren en dus dient er een strenge selectie doorgevoerd te worden.

Op de eerste plaats wordt er een grote opsomming gemaakt van veel voorkomende schuimen. Al deze schuimen worden getoetst aan diverse eigenschappen, door aan ieder schuim een waarde tussen -2 en +2 toe te kennen voor verschillende eigenschappen. De partners van Flanders' DRIVE hebben op hun beurt een cijfer van 0 tot 5 aan elke eigenschap gegeven. Door deze twee waarden vervolgens met elkaar te vermenigvuldigen wordt een eindcijfer bekomen. Na normalisering van deze resultaten kon er gemakkelijker bepaald worden welke schuimen onderzocht gingen worden. Uiteindelijk werden er door Flanders' DRIVE acht schuimen geselecteerd, namelijk:

- SMPU (*shape memory* polyurethaan),
- 2C PU (2 componenten polyurethaan),
- epoxy,
- MHS-schuim (staalschuim gebaseerd op *Metal Hollow Spheres*),
- XPS-schuim (geëxtrudeerd polystyreenschuim),
- HSPU (*high strength* polyurethaan),
- PMI (polymethacrylimide),
- PEI (polyetherimide),

Deze lijst van negen schuimen is echter nog steeds te uitgebreid om tijdens deze masterthesis te onderzoeken en daarom wordt voor deze thesis een verdergaande selectie doorgevoerd. Hierdoor wordt er een nieuwe lijst van vier soorten schuim overgehouden, namelijk:

- 2C PU,
- epoxy,
- XPS-schuim,
- MHS-schuim.

Deze vier schuimen zijn op zo een wijze uit de bovenstaande lijst van negen schuimen gekozen, zodat er telkens een ander type schuim onderzocht wordt. Hieronder wordt op de eerste plaats een algemeen overzicht van de vier verschillende schuimen weergegeven. Vervolgens wordt elk schuim afzonderlijk besproken om zo een inzicht te krijgen in de onderlinge verschillen.

3.2.2 Bespreking geselecteerde schuimen

Onderstaande tabel geeft een overzichtelijk geheel van de vier verschillende schuimen die in dit onderzoek toegepast worden.

Tabel 5: gegevens over 2C PU, XPS-, epoxy- en MHS-schuim

Schuimsoort	Merknaam	Producent	Aanbrengingswijze	Dichtheid	Opmerking
2 Componenten polyurethaan	2C PU	Recticel	Geïnjecteerd (door Recticel)	$\pm 55 \text{ kg/m}^3$	/
Polystyreen-schuim	XPS-schuim	Cellutec	Vorgevormde elementen (door mezelf)	Laag: 37 kg/m^3 Hoog: 42 kg/m^3	Richtingsgevoelig door extrusie
Metaalschuim	MHS-schuim	Hollomet GmbH	Geïnjecteerd (door Hollomet)	$\pm 320 \text{ kg/m}^3$	Het metaal is een FeCuP-legering
Epoxy	Epoxy-schuim	Henkel	Geïnjecteerd (door mezelf)	$\pm 700 \text{ kg/m}^3$	Uitgehard bij 60°C

De kolom aanbrengingswijze duidt op het verschil tussen rechtstreekse injectie van het schuim of het gebruik van vorgevormde schuimelementen. Bij rechtstreekse injectie worden de verschillende bestanddelen in het profiel gespoten om hier vervolgens te reageren en te expanderen. Bij vorgevormde schuimelementen daarentegen wordt een grote blok schuim gevormd door de bestanddelen in een grotere, open ruimte te laten reageren en expanderen. Vervolgens worden de benodigde schuimelementen uit deze grote blok gesneden, waarna ze in een holle buis aangebracht kunnen worden. Dat kan al dan niet in combinatie met verlijming.

3.2.2.1 2 Componenten polyurethaan

2 Componenten polyurethaan, oftewel 2C PU, bestaat uit twee hoofdcomponenten, namelijk isocyaan en polyol. Daarnaast wordt er nog een kleine hoeveelheid additief aan deze hoofdcomponenten toegevoegd. De exacte samenstelling hiervan wordt echter geheim gehouden door de producent. Een goede menging van deze verschillende bestanddelen is zeer belangrijk. Enkel een goede menging levert immers een homogeen schuim op met gelijke eigenschappen voor elke positie in het schuim. Hieronder wordt zowel een voorbeeld van een goede menging, als van een slechte menging getoond (zie figuur 20 en 21).



Figuur 20: homogeen 2C PU-schuim



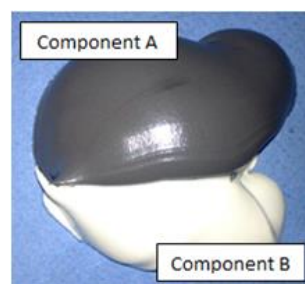
Figuur 21: niet-homogeen 2C PU-schuim

De rechter afbeelding toont duidelijk nog witte lijnen die duiden op een te hoge concentratie van één van de componenten op deze specifieke locatie. Bij de linker figuur is er sprake van een betere menging van de verschillende bestanddelen en dus wordt er een homogener schuim bekomen.

Hierboven is reeds aangehaald dat zowel voorgevormde schuimelementen, als rechtstreekse injectie van het schuim in de profielen mogelijk is. Voor het 2 componenten schuim wordt er gekozen voor rechtstreekse injectie, zodat er automatisch sprake is van hechting tussen het schuim en de profielwand. Het schuim komt hierbij tot stand doordat 2 reagerende stoffen als een vloeistof in het profiel worden aangebracht, waarna deze stoffen expanderen. Tijdens deze expansie bevindt het materiaal zich gedurende enkele seconden in een kleverige toestand en hierdoor ontstaat de automatische hechting tussen schuim en profielwand.

3.2.2.2 Epoxy

Epoxy wordt in de voertuigindustrie reeds toegepast als structurele versterking voor onderdelen bestaande uit holle ruimten [31]. Een voorbeeld van dergelijke onderdelen zijn autodeuren. Door deze holle ruimte op te vullen met epoxyschuim kennen de stijfheid en de energieabsorptie van het geheel een beduidende toename. In eerste instantie lijkt dit materiaal niet op schuim, daar er weinig tot geen luchtballen in het uitgeharde materiaal aanwezig zijn. Deze epoxy bezit echter wel de eigenschap om in een voldoende grote ruimte gedeeltelijk te expanderen of dus te verschuimen. De gebruikte profielen beschikken echter over een beperkt volume en dus zijn er maar weinig luchtholten in deze matrix aanwezig. De epoxy bestaat uit twee componenten A en B (zie figuur 22) die afzonderlijk in cartridges van 175 ml zijn aangebracht. Deze twee componenten reageren met elkaar, zodat er een exotherme reactie plaatsvindt. Dat resulteert uiteindelijk in een uitgehard materiaal. Zie bijlage 1 voor meer informatie omtrent dit type schuim.

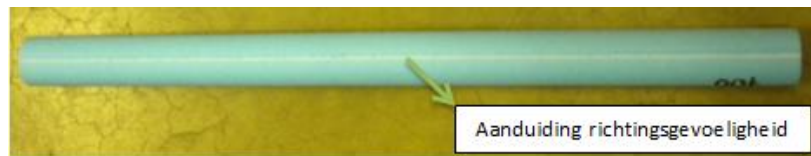


Figuur 22: component A (grijs) en B (wit)

3.2.2.3 Polystyreenschuim

Het polystyreenschuim dat in dit onderzoek gebruikt wordt, wordt als voorgevormd schuimelement afgeleverd. Deze elementen worden door middel van extrusie geproduceerd. Dat betekent dus dat een vloeibare massa door een extrusiekop met de gewenste vorm wordt geperst. Belangrijk om op te merken is dat dit type schuim richtingsafhankelijk is, wat aangeduid wordt door de inkeping (zie figuur 23). Deze richtingsafhankelijkheid betekent dat het schuim in

de richting loodrecht op de inkeping stijver is dan in het andere geval. Deze afhankelijkheid is te wijten aan het extrusieproces. De celstructuur is hierdoor anisotroop en dus dient er in toepassingen rekening gehouden te worden met de plaats van aanleggen van belastingen.



Figuur 23: voorgevormd XPS-schuimelement

In dit onderzoek wordt er nu gebruik gemaakt van twee soorten XPS-schuim, namelijk IMPAXX300 en IMPAXX700. Het eerste type schuim beschikt over een dichtheid van 37 kg/m^3 en het tweede over een dichtheid van 42 kg/m^3 . Het verschil tussen beide dichtheden is niet groot, maar het verschil tussen deze twee types schuim wordt voornamelijk gevormd door de verschillende compressiesterkte (zie bijlage 2 en 3). Zo leidt een hogere compressiesterkte tot een betere energieabsorptie. Voor verdere informatie omtrent deze twee schuimsoorten wordt verwezen naar bijlage 2 en 3.

3.2.2.4 MHS-schuim

Het MHS-schuim dat toegepast wordt, is een schuim dat gebaseerd is op een FeCuP-legering. Voor de productiewijze van de korrels waaruit dit schuim wordt opgebouwd, wordt verwezen naar de literatuurstudie. In dit specifieke geval hebben de gebruikte korrels ongeveer een diameter van 2,6 mm, ook benoemd als D50. De korrels worden vermengd met lijm om daarna in het profiel aangebracht te worden. Tot slot wordt dit geheel verwarmd tot een temperatuur van ongeveer 200°C , zodat het mengsel van korrels en lijm uithardt. Van dit materiaal kan helaas ook geen datafiche worden weergegeven wegens het bedrijfsgeheim.

4 Type testen

Er worden drie verschillende testen uitgevoerd op de materiaalcombinaties die aan de hand van DesignEase worden opgesteld. Deze testen, respectievelijk buig- en impacttesten en testen op axiale belasting, worden hieronder individueel besproken. Hierbij ligt de nadruk voornamelijk op de proefopstelling en op de instellingen voor de aansturing van de actuator.

4.1 Buigtesten

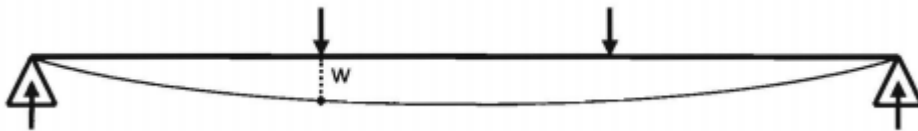
Voor het uitvoeren van de buigtesten wordt geopteerd voor een vierpuntsbuiging. Bij dit type buigtest wordt een groter volume van het profiel blootgesteld aan grote krachten. Als gevolg hiervan is er meer kans dat defecten in het te testen materiaal opgemerkt worden tijdens het testen of bij de resultatenverwerking. Op deze manier is de kans voor het opmerken van defecten door een slechte schuimvulling immers het grootst. Bij een driepuntsbuiging treedt de maximale spanning enkel op ter hoogte van de aangelegde kracht.

4.1.1 Profielgedrag

Om een beter inzicht te krijgen in de krachtwerking die aangrijpt op het profiel, is het zinvol om even het theoretisch, oftewel het ideale buigverloop te bespreken. Belangrijk hierbij zijn de krachten en de momenten die op het profiel inwerken.

4.1.1.1 Buigverloop van een belast profiel

De afbeelding hieronder geeft het theoretische buigverloop van een belast profiel weer in het geval van een vierpuntsbuiging.

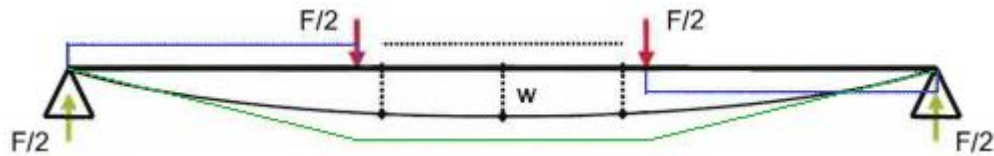


Figuur 24: weergave van de doorbuiging [2]

De neerwaarts gerichte pijlen duiden op de 2 puntbelastingen en de opwaarts gerichte pijlen representeren de reactiekrachten die optreden ter hoogte van de linker en rechter oplegging. Op bovenstaande afbeelding is duidelijk dat de grootste doorbuiging optreedt tussen de twee aangelegde krachten.

4.1.1.2 Dwarskrachten- en momentenlijn van een belast profiel

Onderstaande figuur geeft het verloop van de dwarskrachten en de optredende momenten bij een vierpuntsbuiging weer.



Figuur 25: Dwarskrachten- en momentenlijn belast profiel [2]

De paarse lijnen geven de dwarskrachten weer die in het profiel aanwezig zijn tijdens het aanleggen van een belasting met kracht F . De groene lijn daarentegen laat het verloop van de momenten zien die optreden op de verschillende posities van het profiel.

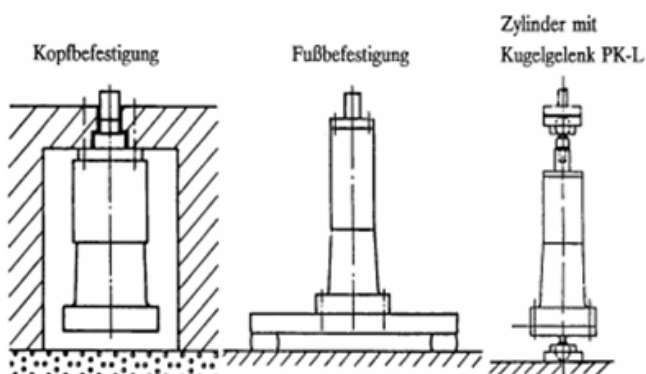
4.1.2 Proefopstelling

4.1.2.1 Keuze en specificaties van de actuator

Voor de buig- en impacttesten wordt er gebruik gemaakt van een *PLL 25k* actuator. Deze actuator, die voor het laatst in maart 2014 is gekalibreerd, werd in 2003 geproduceerd. De ordernummer is 101556 en de serienummer bedraagt 2000. De belangrijkste specificaties zijn:

- een werkdruk van 280 bar,
- een slag van 100 mm,
- een maximum snelheid van 2,5 m/sec,
- een nominale kracht van 25 kN.

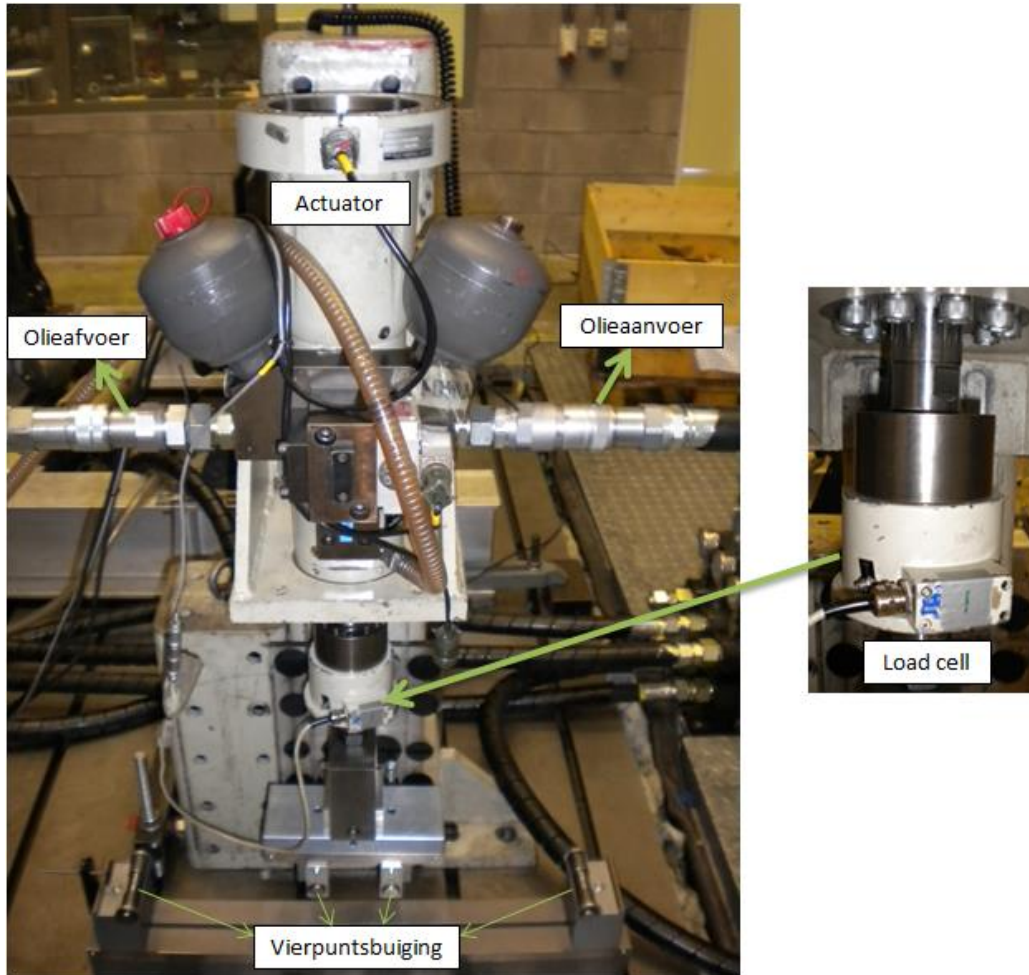
De *PLL 25k* beschikt aan beide zijden van de zuigerstang over dezelfde oppervlakte en deze stang wordt door middel van hydrostatische lagers geleid. Er is standaard een verplaatsingsopnemer ingebouwd, zodat de verplaatsing van de zuigerstang kan opgemeten worden tijdens het testen. Voor verdere informatie omtrent technische gegevens wordt verwezen naar bijlage 4. Figuur 26 toont nog kort de verschillende toepassingsmogelijkheden van de actuator.



Figuur 26: toepassingsmogelijkheden PLL 25k actuator

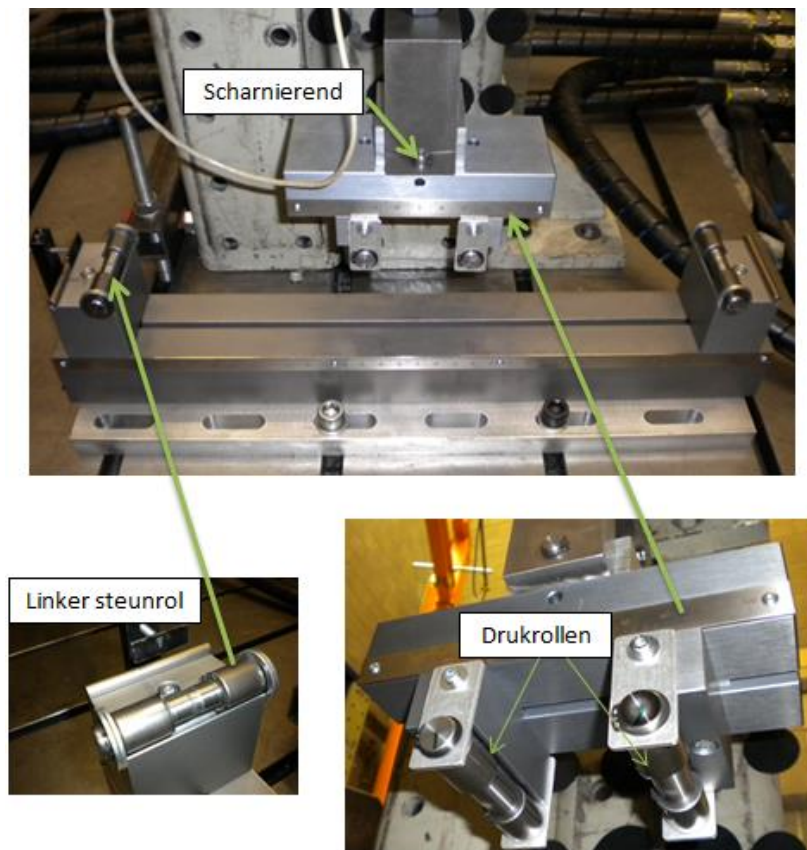
4.1.2.2 Gehele proefopstelling

Hieronder worden enkele afbeeldingen getoond van de werkelijke proefopstelling. Een eerste afbeelding (zie figuur 27) toont de volledige testopstelling met tevens de drukleidingen voor aan- en afvoer van olie.



Figuur 27: testopstelling vierpuntsbuiging

Op deze afbeelding zijn duidelijk de actuator en de load cell te onderscheiden. De actuator is hierboven reeds besproken en komt dus verder niet meer aan bod. De load cell is het element dat de aangelegde kracht van de actuator op het profiel opmeet. Dit meetelement is verbonden met een computer en hierdoor is het voor de software mogelijk om deze data te verwerken. Tevens wordt de positie van de actuator constant opgemeten om deze gegevens uiteindelijk in grafieken weer te geven. Helemaal vanonder bevindt zich dan de eigenlijke opstelling van de vierpuntsbuiging. Dit gedeelte van de opstelling wordt op de volgende pagina afgebeeld (zie figuur 28).



Figuur 28: detailweergave steun- en drukrollen

Onderaan bevindt zich een linker en rechter steunrol. De afstand tussen deze rollen bedraagt 650 mm en dat is dan ook de afstand waarover de buiging plaatsvindt. Iets hoger gelegen dan deze steunrollen en ongeveer op de hartlijn van de opstelling zijn 2 drukrollen gesitueerd die op 100 mm van elkaar zijn opgesteld. Het zijn deze 4 contactpunten samen die voor een vierpuntsbuiging zorgen bij het aanleggen van een kracht door de actuator. Elk van deze rollen is voorzien van de nodige lagering en is uitgevoerd met een diameter gelijk aan 20 mm (cfr. ASTM D790). Dat laat toe dat de steunrollen om hun as kunnen roteren wanneer het profiel gebogen wordt. Vooral de lagering van de steunrollen is zeer belangrijk, aangezien het profiel naar beneden wordt gedrukt waardoor de profieluiteinden naar binnen bewegen. Indien hier geen lagering toegepast zou worden, zou het profiel over de steunrollen glijden in plaats van te rollen. De wrijving die hierbij optreedt zou een negatieve invloed op het testresultaat teweeg kunnen brengen.

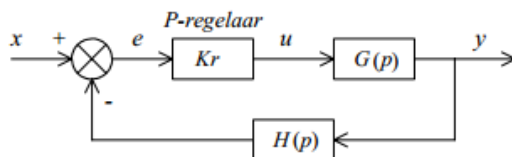
4.1.3 Sturing actuator

Voor de sturing van de actuator zijn er meerdere mogelijkheden. Op de eerste plaats dient er een onderscheid gemaakt te worden tussen positie- en krachtsturing. Daarnaast zijn er nog talrijke variaties in snelheid mogelijk en ook andere parameters kunnen gewijzigd worden. Deze variaties worden hieronder verder besproken als de instellingen van de actuator. Speciale aandacht gaat echter naar de PID-regeling van de actuator. Voor de PID-regeling wordt regelmatig gebruik gemaakt van de cursus *Basis Regeltechniek* van dr. ir. Baeten J. [32].

4.1.3.1 PID-regeling van de actuator

De PID-regelaar is een veel voorkomende regelaar in de meet- en regeltechniek en wordt ook gebruikt bij de aansturing van de actuator in de opstelling van de testen. Er bestaat steeds een verschil tussen de uitgestuurde waarde die zorgt voor de verplaatsing van de actuator en de gemeten waarde (=teruggekoppelde waarde). Dit verschil moet beperkt worden, daar het een fout voorstelt. Het is hier dan ook dat de PID-regelaar in werking treedt. Deze regeling zorgt er voor dat de fout beperkt blijft en daarvoor maakt de regelaar gebruik van 3 acties, namelijk:

- P-actie (proportioneel): In figuur 29 is te zien hoe de P-actie zorgt voor een versterking of verzwakking, afhankelijk van het gewenste effect, van het foutsignaal 'e'. De transfertfunctie is gelijk aan 'Kr'. Grote Kr-waarden gaan gepaard met een goede ruisonderdrukking, een grotere statische nauwkeurigheid en een sneller systeem. Bij foutieve Kr-waarden, te hoge waarden, is er een risico op een instabiele situatie.



Figuur 29: eenvoudige regelkring met P-regelaar [32]

- I-actie (integrerend): De I-actie zorgt voor eliminatie van alle statische fouten die na deze I-actie optreden. De integrator past immers het stuursignaal aan totdat de geconstateerde fout nul wordt. Ook hier leiden te hoge waarden, maar ook te lage waarden, mogelijk tot een instabiel systeem. De I-actie wordt gekenmerkt door de transfertfunctie $\frac{1}{\tau p}$.
- D-actie (differentiërend): De D-actie daarentegen wordt gedefinieerd door de transfertfunctie τp . De D-actie reageert als het ware op de snelheid van het veranderen van de fout. Ook hier kunnen foutieve waarden, te grote waarden, tot een instabiel systeem leiden. Deze D-actie wordt hier achterwege gelaten, daar dit de afstelling onnodig complexer zou maken.

4.1.3.2 Aansturing actuator

Een eerste onderscheid dat gemaakt kan worden bij het uitvoeren van de testen is het toepassen van de kracht- of positiegestuurde functie van de actuator. Beide methoden worden getest, maar uit de opgemeten grafieken blijkt duidelijk dat beter gebruik kan worden gemaakt van een positiegestuurde actuator voor de buigtesten. Bij een krachtgestuurde regeling is er immers sprake van een niet-stabiel verloop van de meetwaarden.

Alvorens het uitvoeren van de eigenlijke testen worden er enkele testmetingen uitgevoerd om de parameters P en I te bepalen. Hieronder worden de resultaten bij verschillende instellingen voor P en I weergegeven en kort besproken.

Wanneer de actuator positiegestuurd werkt, daalt de actuator met een constante snelheid. Doordat het testprofiel weerstand biedt tegen het constant dalen van de actuator, moet deze laatste een grotere kracht aanleggen om zich met dezelfde snelheid voort te bewegen. De juiste instelling voor P en I wordt bepaald door verschillende profielen met verschillende waarden voor P en I te testen en vervolgens de gemeten grafieken te bespreken. De waarden voor deze twee parameters die geen plotse, onlogische pieken vertonen in de gemeten waarden, worden als instelwaarden voor alle komende testen gebruikt.

De drie testprofielen die hieronder besproken worden, zijn drie ronde, aluminium profielen met een lengte van 700 mm, een diameter van 30 mm en een wanddikte van 3 mm. De kracht en de verplaatsing van de actuator worden telkens weergegeven in een grafiek en vervolgens wordt voor elk profiel ingezoomd op eventuele plaatselijke pieken.

Testprofiel 1

Tijdens deze proeftest wordt voor P een waarde van 0 ingesteld en voor I een waarde van 1. Na het uitvoeren van de test wordt de grafiek met de meetresultaten van kracht en positie in functie van de tijd (zie bijlage 5) geopend om vervolgens het verloop van deze twee grafieken te beoordelen. Hieruit blijkt duidelijk dat beide grafieken in het begin van de test over een opvallende en onverwachte piek beschikken. Deze uitschieter is zeer goed zichtbaar indien hierop wordt ingezoomd. Deze lokale pieken moeten steeds vermeden worden en dat kan door een juiste keuze voor de waarden van P en I. Deze instelling voor P en I blijkt dus foutief te zijn en daarom worden er andere waarden gekozen totdat een correct beeld, een beeld zonder lokale uitschieters, bekomen wordt. Merk op dat deze uitschieter ook duidelijk terug te vinden is in de numerieke weergave van de verschillende meetwaarden (zie bijlage 5).

Testprofiel 2

Bij deze test wordt er voor P een waarde van -5,0 ingesteld en voor I een waarde van 0,50. Opnieuw is er aan het begin van deze buigingstest een opvallende verandering in het verloop van de meetwaarden waar te nemen (zie bijlage 6). Hieruit kan besloten worden dat ook deze instellingen voor P en I nog niet de juiste zijn.

Testprofiel 3

De volgende test wordt uitgevoerd met 5,0 als instelling voor P en 0,50 als instelling voor I. Wanneer er nu gekeken wordt naar de grafieken (zie bijlage 7), is er niets opvallends te zien in het verloop van de meetwaarden. Er zijn dus geen storingen in het verloop waar te nemen. De actuator wordt dus voor alle komende testen ingesteld met $P=5,0$ en $I=0,50$.

4.1.3.3 Instellingen actuator

Hieronder worden beknopt de instelparameters van de aansturing van de actuator opgesomd. De afstelling van de PID-regeling komt hierbij niet meer aan bod, daar deze regeling hierboven reeds uitgebreid aan bod is gekomen. De verschillende instellingen zijn:

- aansturing: positiegestuurd,
- snelheid: 1 mm/s,
- voorbelasting: 0,1 kN,
- rustpositie: +45 mm,
- startpositie: +25 mm,
- eindpositie: -50 mm,
- meetfrequentie: 20 Hz.

Zoals in het voorgaande onderdeel reeds is uitgelegd, wordt er gekozen voor positiesturing van de actuator. De snelheid waarmee de actuator wordt uitgestuurd, bedraagt 1 millimeter per seconde. Daarnaast is het ook noodzakelijk dat op het profiel een voorbelasting wordt aangelegd. Na iedere test begeeft de actuator zich steeds terug naar zijn rustpositie, die op +45 mm gelegen is. Wanneer de actuator zich in deze positie bevindt, is er steeds voldoende ruimte om het profiel op de steunrollen aan te brengen. Hierna wordt de actuator door handmatige bediening naar onder verplaatst tot de gewenste voorbelasting van 0,1 kN een feit is. Hierbij bedraagt de positie van de actuator ongeveer 25 mm. Vervolgens wordt de test gestart en wordt de aansturing softwarematig geregeld.

De actuator blijft dalen totdat de positie -50 mm bereikt is. Deze negatieve waarde is het gevolg van het feit dat de actuator naar beneden beweegt. Na het bereiken van deze eindpositie begeeft hij zich terug naar boven, naar zijn rustpositie. De totaal afgelegde afstand van de actuator gedurende de test bedraagt dus 75 mm. Hij verplaatst zich immers van +25 mm tot -50 mm. Gedurende de test meet de load cell de aangelegde kracht en de verplaatsing van de actuator op. Dat gebeurt aan een frequentie van 20 metingen per seconde, oftewel met een meetfrequentie van 20 Hz. Rekening houdend met een snelheid van 1 mm/s, een verplaatsing van 75 mm en 20 metingen per seconde, worden de kracht en de verplaatsing per test 1500 maal gemeten.

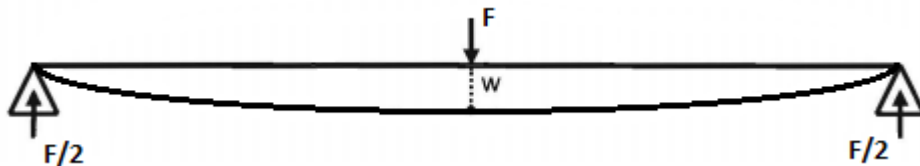
4.2 Impacttesten

Op de eerste plaats wordt in dit onderdeel kort het profielgedrag tijdens de impacttesten beschreven door middel van het buig- en krachtenverloop. Daarna komt de eigenlijke opstelling uitgebreid aan bod om uiteindelijk af te ronden met de specifieke instellingen van de actuator voor dit type testen.

4.2.1 Profielgedrag

4.2.1.1 Buigverloop van een profiel tijdens impact

Bij het onderdeel *Buigtesten* zijn het fysisch buigverloop en de optredende krachten en momenten reeds besproken. Het buigverloop van een impacttest wordt hieronder afgebeeld.

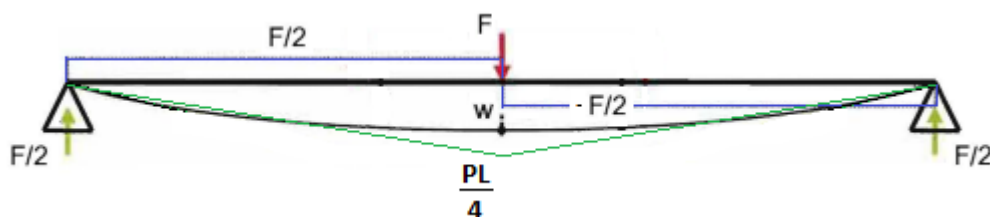


Figuur 30: weergave van buigverloop [33]

Dit verloop is gelijkaardig aan dat van een vierpuntsbuigtest, met als enige verschil dat er bij de impacttest op slechts 1 positie een externe kracht inwerkt. Bovendien grijpt deze kracht in het midden van het profiel aan. Deze toestand komt dus overeen met een driepuntsbuiging op het midden van het te testen profiel. Er is echter wel een belangrijk verschil tussen een impacttest en een driepuntsbuigtest. Zo gebeurt de impacttest aan een veel hogere snelheid. De buigtest is als het ware een quasi-statische test. De neerwaarts gerichte pijl duidt op de impactkracht van de impactor. De opwaarts gerichte pijlen representeren de reactiekrachten van de linker en rechter oplegging. Uit bovenstaande figuur blijkt duidelijk dat de grootste vervorming optreedt ter hoogte van de impactpositie.

4.2.1.2 Dwarskrachten- en momentenlijn tijdens impact

Onderstaande figuur geeft het verloop van de dwarskrachten en de optredende momenten bij impact oftewel een driepuntsbuiging weer.

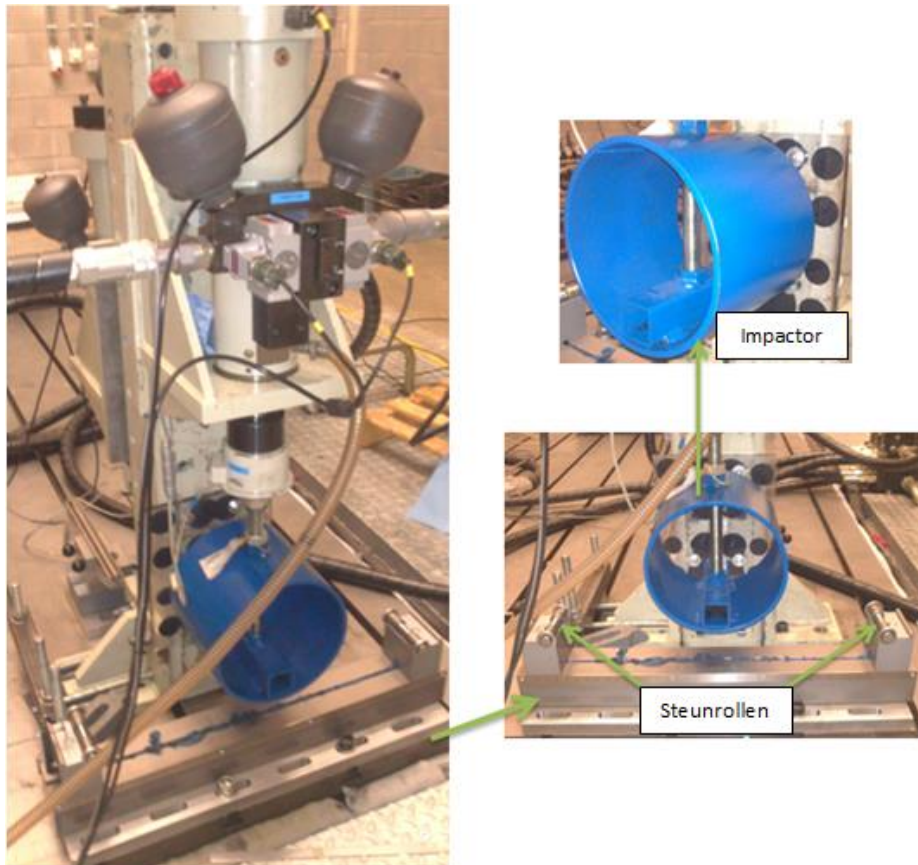


Figuur 31: Dwarskrachten- en momentenlijn belast profiel

De paarse lijnen geven de dwarskrachten weer die in het profiel aanwezig zijn tijdens het aanleggen van een belasting met kracht F . De groene lijn daarentegen laat het verloop van de momenten zien die optreden op de verschillende posities van het profiel. In het midden van het profiel treedt het grootste moment op en dit moment wordt bepaald door de opgelegde lengte van het profiel en de kracht tijdens impact.

4.2.2 Proefopstelling

Voor de impacttesten wordt er grotendeels gebruik gemaakt van de testopstelling van de buigtesten. Enkel het gedeelte van de actuator dat contact maakt met het profiel wordt verwisseld. Zo wordt er ditmaal gebruik gemaakt van een impactor, een ronde buis (cfr. FMVSS 214) met een diameter van 254 mm. Hieronder wordt de volledige opstelling van de impacttest weergegeven.



Figuur 32: opstelling impacttest

De spanwijdte tussen de steunrollen bedraagt nog steeds 650 mm, daar de basis van de opstelling niet wordt aangepast wanneer wordt overgeschakeld van buig- naar impacttesten. De actuator die voor de buigtesten toegepast wordt, wordt ook hier gebruikt.

4.2.3 Instellingen actuator

Daar de impacttesten met dezelfde actuator uitgevoerd worden als de buigtesten, wordt de PID-regeling niet opnieuw besproken voor de impacttest. De instellingen van de PID-regelaar voor de impacttest komen immers overeen met de instellingen die reeds voor de buigtest gebruikt werden. Daarnaast is er ook hier sprake van specifieke instelparameters van de actuator, namelijk:

- aansturing: positiegestuurd,
- snelheid: 2 m/sec,

- maximale versnelling: 53 m/s^2 ,
- geen voorbelasting,
- startpositie of rustpositie: +55 mm,
- impactpositie: +41 mm,
- eindpositie: -40 mm,
- meetfrequentie: 1000 Hz.

Ook hier wordt geopteerd voor positiesturing. De snelheid op het moment van impact bedraagt 2 m/s. Deze snelheid is eerder aan de lage kant voor een impacttest en daarom wordt er ook gesproken van *low velocity* impact. Deze eerder lage impactsnelheid is wenselijk wegens veiligheidsoverwegingen, maar ook wegens de beperkingen van de actuator. De snelheid is echter beduidend hoger dan de snelheid waarmee buigtesten worden uitgevoerd. Daarom is er dus wel degelijk sprake van een impacttest. De actuator vertrekt vanuit zijn startpositie die op +55 mm gelegen is. Om op de impactpositie, die +41 mm bedraagt, over een snelheid van 2 m/s te beschikken, is een welbepaalde versnelling van de actuator noodzakelijk. De maximale versnelling die gedurende de aanloop optreedt, bedraagt 53 m/s^2 .

Het is duidelijk dat in tegenstelling tot de buigtest, de impacttest geen voorbelasting vereist. De impactor moet daarentegen wel met een snelheid van 2 m/s in contact gebracht worden met het profiel. Deze test verloopt veel sneller dan een buigtest en de eindpositie van de actuator bedraagt ditmaal -40 mm. Gedurende het testverloop worden de geleverde kracht en de positie van de actuator 1000 maal per seconde gemeten. De meetfrequentie is dus 50 keer groter dan voor de buigtesten het geval was. Deze grote hoeveelheid metingen is mogelijk en noodzakelijk doordat de impacttest gemiddeld slechts 2,5 seconden duurt.

4.3 Testen op axiale belasting

Om een geschikte proefopstelling te bouwen, is het noodzakelijk dat de maximale kracht die aangelegd moet kunnen worden op voorhand ongeveer gekend is. Hiervoor wordt dus op de eerste plaats een kleine berekening gemaakt. Daarna kan de eigenlijke opstelling, die hieronder in het tweede gedeelte uitgebreid besproken wordt, opgesteld worden. Tot slot worden ook hier de instellingen van de actuator weergegeven.

4.3.1 Berekening benodigde drukkracht

Voor de berekening van de kracht die geleverd moet kunnen worden, wordt er vertrokken van een stalen profiel met de grootste dikte, namelijk 3 mm. Wanneer de opstelling krachtig genoeg is voor het laten bezwijken van dit stalen profiel, voldoet de opstelling ook voor alle andere soorten profielen. Er kunnen nu twee vormen van bezwijken van het profiel optreden. Op de eerste plaats kan het profiel bezwijken aan het overschrijden van de vloeispanning. Daarnaast is ook het bezwijken aan knik een mogelijkheid. Om de door de actuator te leveren kracht te bepalen, wordt voor beide gevallen een berekening doorgevoerd. De opstelling is zodanig ontworpen dat het profiel zowel boven als onder scharnierend wordt opgesteld ($K = 1$).

Formule voor knik:

$$F = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

Vergelijking 1: formule voor knik

met F = max. kracht

E = elasticiteitsmodulus

I = traagheidsmoment

L = niet-ingeklemde lengte

K = effectieve lengte factor

Knikberekening rond, stalen profiel met wanddikte 3 mm

$$E_{staal} = 210 \times 10^3 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Rightarrow I = \frac{d_u^4}{64} - \frac{d_i^4}{64} = \frac{\pi \cdot (30 \text{ mm})^4}{64} - \frac{\pi \cdot (24 \text{ mm})^4}{64} = 23,47 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

en $K = 1$

$$\Rightarrow F_{kr} = \frac{\pi^2 \times 210 \times 10^3 \times (23,47 \times 10^3 \text{ mm}^4)}{(1 \times 700 \text{ mm})^2} = 99,3 \text{ kN}$$

Berekening kracht van rond, stalen profiel met wanddikte 3 mm bij bezwijken aan vloeï

$$\sigma_{staal} = 235 \frac{N}{mm^2}$$

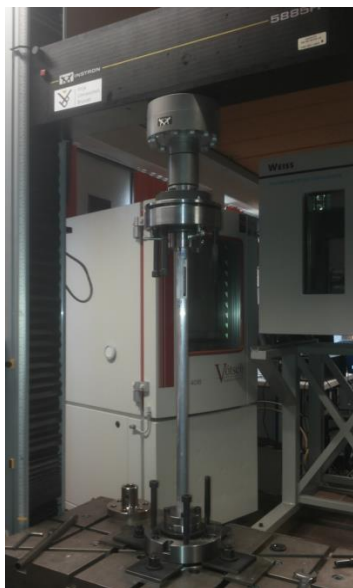
$$\sigma = \frac{F}{A} \Rightarrow F = \sigma \cdot A_{dwarsdoorsnede} = 235 \frac{N}{mm^2} \cdot 254,47 \text{ mm}^2 = 59,8 \text{ kN}$$

Uit bovenstaande berekeningen kan besloten worden dat een rond stalen profiel met een wanddikte van 3 mm en een lengte van 700 mm eerder bezwijkt aan het overschrijden van de vloeigrens dan aan knik. Wegens het vullen, is het niet mogelijk om een langere profiellengte dan 700 mm te nemen om zo het profiel te laten bezwijken aan knik. Voor het dimensioneren van de actuator wordt toch uitgegaan van de knikkracht van 99,3 kN. Deze kracht is immers het 'slechtste geval', daar de opstelling hiervoor het zwaarst uitgevoerd dient te worden. De huidige actuator (PLL 25k) van Flanders' DRIVE wordt dus niet krachtig genoeg bevonden om de testen uit te voeren. Daarom wordt ook besloten om de testen op axiale belasting elders uit te voeren en wel aan de Vrije Universiteit Brussel (VUB). Hier zijn immers actuatoren tot 250 kN beschikbaar. Een bijkomend voordeel hiervan is dat de mensen van de VUB over een grote kennis van dergelijke testen beschikken en hun expertise komt hierbij zeer goed van pas.

4.3.2 Proefopstelling VUB

Voor het uitvoeren van de eigenlijke testen wordt er gebruik gemaakt van een trekbank waarmee ook drukproeven uitgevoerd kunnen worden. De maximale drukkracht van dit toestel bedraagt 250 kN, wat ruim voldoende is voor het uitvoeren van de testen op axiale belasting.

Hieronder worden twee afbeeldingen getoond die de actuator enerzijds weergeven in zijn rustpositie (zie figuur 33) en anderzijds in zijn uiterst verticale positie (zie figuur 34). Over het daadwerkelijk uitvoeren van de kniktesten wordt in een later hoofdstuk meer verteld.



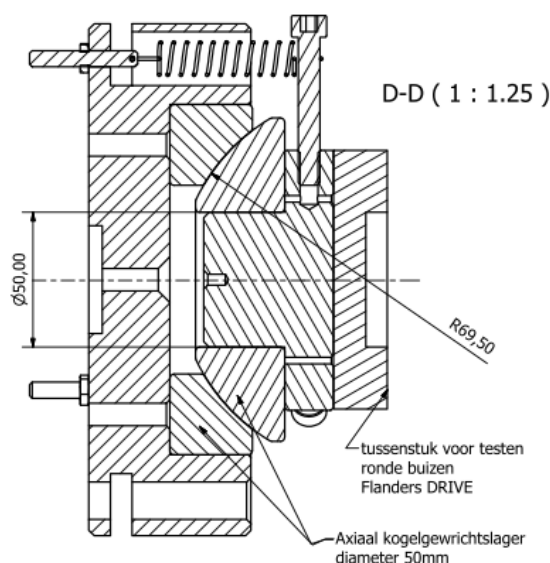
Figuur 33: rustpositie ingeklemd profiel



Figuur 34: uiterste positie actuator (profiel bezweken)

Daarnaast is er sprake van enkele extra voorzieningen voor het optimaal uitvoeren van de testen. Op de eerste plaats wordt met extra voorzieningen gedoeld op de eenvoudige mallen die voor deze test gemaakt worden. Deze mallen garanderen dat het te testen profiel op zijn plaats blijft tijdens het aanleggen van de belasting en dat het dus niet kan wegschieten. Dat gebeurt doordat het profiel boven en onder wordt ingesloten door een houder of mal van aluminium met een kleine verzinking van ongeveer 10 mm in de vorm van de dwarsdoorsnede van het profiel.

Een tweede bijkomende voorziening is het op een ingenieuze wijze gebruik maken van een gelagerd systeem aan de boven- en onderzijde van de opstelling. De afbeelding hieronder toont een doorsnede van dit systeem dat speciaal voor het uitvoeren van deze testen is ontworpen.



Figuur 35: dwarsdoorsnede gelagerde opstelling

De specifieke opstelling maakt het mogelijk voor de boven- en onderkant van het profiel om te roteren tijdens de test. De opstelling bestaat uit een axiaal kogelgewrichtslager die sferisch is uitgevoerd en een diameter van 50 mm heeft. De radius van deze sferische vorm bedraagt 69,50 mm. Rechts op de tekening kan een hulp- of tussenstuk waargenomen worden. Dit tussenstuk is zo ontworpen dat het middelpunt van het sferische oppervlak samenvalt met het snijpunt van de hartlijn van het tussenstuk en de basis van het tussenstuk waarop het profiel wordt ingeklemd. Hierdoor valt het middelpunt van het sferisch oppervlak natuurlijk ook samen met de hartlijn van het te testen profiel. Hierdoor wordt steeds gegarandeerd dat er enkel en alleen axiale krachten op het profiel inwerken, daar de kracht steeds samenvalt met de hartlijn van het te testen profiel. Op deze wijze moet er dus geen rekening gehouden worden met andere krachten, zoals afschuifkrachten en momenten, omdat deze eenvoudigweg niet optreden. In bijlage 8 kunnen nog twee extra tekeningen in verband met dit onderdeel teruggevonden worden.

4.3.3 Instellingen actuator

Er wordt opnieuw gekozen voor positiesturing en niet voor het alternatief, namelijk krachtsturing. Dat betekent dus dat de verticale verplaatsing van de drukstempel met een constante waarde per minuut gebeurt. De maximale drukkracht die tijdens deze test optreedt, is duidelijk zichtbaar en komt overeen met het punt van falen. Hieronder worden de relevante instellingen weergegeven:

- aansturing: positiegestuurd,
- snelheid: 10 mm/minuut,
- startpositie/rustpositie: 0 mm,
- eindpositie compressie: -10 mm,
- eindpositie decompressie: 0 mm,
- meetfrequentie: 50 Hz.

Ook dit type test is positiegestuurd, aangezien de mensen van de VUB hiervoor opteerden wegens veiligheidsoverwegingen. Bij krachtsturing zou er immers een onveilige situatie kunnen optreden wanneer het profiel bezwijkt onder de aangelegde kracht. Op dat moment wordt de weerstand van het profiel tegen axiale belasting zeer klein, waardoor de actuator zeer snel zou versnellen om zijn kracht constant te houden. Door de positiesturing beweegt de actuator met een constante snelheid van 10 mm/minuut, wat een veel rustiger en veiliger verloop impliceert.

De startpositie van het ingeklemde profiel wordt gelijkgesteld aan nul en vervolgens wordt de test gestart. Voor een volledig grafiekverloop wordt zowel compressie als decompressie van het profiel uitgevoerd en opgemeten. Op de eerste plaats wordt er over een afstand van 10 mm compressie op het profiel toegepast. Wanneer het onderste compressiepunt is bereikt, wordt de actuator terug over een afstand van 10 mm omhoog bewogen tot in zijn rustpositie. Deze decompressie laat toe dat het profiel zich terug gedeeltelijk strekt vanwege de elastische vervormingsenergie die wordt opgeslagen in het profiel tijdens compressie. Gedurende de compressie en decompressie worden de geleverde kracht en de positie van de actuator opgemeten met een meetfrequentie van 50 Hz.

5 Testcombinaties

Om testen uit te voeren is het noodzakelijk om op voorhand te bepalen welke elementen of parameters er onderzocht gaan worden. Dit hoofdstuk geeft dan ook op de eerste plaats een overzicht van deze verschillende parameters. Daarnaast worden in dit deel ook de statistische ontwerpmethode *Design of Experiments* en de werking van het programma DesignEase® verklaard.

5.1 Verschillende parameters

Om een duidelijk beeld te verkrijgen van de mogelijke invloed van de schuimen kunnen er verschillende parameters gevarieerd worden. Hieronder staan mogelijke variërende parameters opgesomd met hun bijhorende waarden. Voor deze thesis worden enkel de parameters gevarieerd die vetgedrukt worden weergegeven, namelijk:

- **materiaalsoort: aluminium of staal;**
- **wanddikte: 1,5 mm of 3 mm;**
- profielvorm: rond of vierkant;
- uiteinden buis: open of gesloten;
- **type schuim: 9 soorten;**
- adhesief: verlijmd of niet;
- **dichtheid: laag of hoog;**
- **vulgraad: leeg, half gevuld of volledig gevuld;**
- positie schuim: aan de binnenkant of aan de buitenkant.

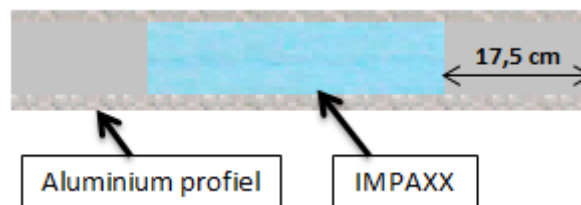
De materiaalsoort is een eerste parameter die gevarieerd wordt. Hierbij worden de mogelijkheden beperkt tot aluminium en staal zoals reeds uitgelegd.

Daarnaast is het ook zeer zinvol om de invloed van de schuimen bij 2 verschillende wanddiktes te onderzoeken en zo na te gaan of de wanddikte een invloed heeft op de grootte van de invloed. Hiertoe wordt er gekozen voor een wanddikte van 1,5 mm en voor een wanddikte van 3 mm.

Ook het type schuim dat in de holle profielen wordt aangebracht is een variërende parameter. Zoals reeds aangegeven, wordt in dit onderzoek enkel de invloed van 2C PU, XPS-, epoxy- en MHS-schuim onderzocht. Er worden dus 4 soorten schuim behandeld, terwijl dit aantal 9 bedraagt voor het driejarig project van Flanders' DRIVE.

Een vierde parameter komt overeen met een variërende dichtheid. De variatie van de dichtheid wordt enkel toegepast voor XPS-schuim en dus niet voor de overige 3 schuimen. Deze laatstgenoemde schuimen worden steeds met 1 bepaalde en dus constante dichtheid getest.

De laatste parameter die gevarieerd wordt is de vulgraad. Een vulgraad gelijk aan nul komt overeen met een volledig leeg profiel. Logischerwijs komt een volledig gevuld profiel overeen met een profiel dat over zijn volledige lengte opgevuld is. Half gevulde profielen zijn slechts voor 50% gevuld (zie figuur 36).



Figuur 36: weergave halfgevuuld profiel

5.2 Design of Experiments

De uit te voeren testen worden volledig aan de hand van de onderzoeksmethodiek *Design of Experiments* (DoE) bepaald. DoE oftewel ‘experimenteel ontwerpen’ is een statistische ontwerpmethode waarbij processen of ontwerpen onderzocht of verbeterd worden door het uitvoeren van verschillende proeven. Hierbij worden één of meerdere parameters van het proces of ontwerp gecontroleerd gewijzigd om op deze wijze de invloed van de verschillende parameters op het ontwerp of proces weer te geven. Merk op dat de opgemeten resultaten van de verschillende testen steeds aan de statistische normaalverdeling moeten voldoen.

Wanneer er slechts enkele parameters zijn die telkens over twee of drie variabelen beschikken, dan is het mogelijk om alle mogelijke combinaties van parameters en variabelen te testen. Er wordt dan gesproken over een *full factorial* experiment. Een voorbeeld wordt in onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 6: principe van *full factorial* experiment (+ en – staan voor de 2 waarden die een parameter kan aannemen) [33]

RUN	Combination	Factors		
		A	B	C
1	(1)	-	-	-
2	a	+	-	-
3	b	-	+	-
4	ab	+	+	-
5	c	-	-	+
6	ac	+	-	+
7	bc	-	+	+
$8 = 2^3$	abc	+	+	+

Bovenstaande tabel toont het aantal uit te voeren experimenten voor 3 parameters met elk 2 variabelen in het geval van een *full factorial* experiment. Dit aantal wordt weergegeven door de uiterst linkse kolom. De laatste drie kolommen geven de verschillende parameters van het proces of ontwerp weer, voorgesteld met A, B en C. Tot slot duidt de tweede kolom op de combinaties van de verschillende parameters. De combinaties ab, ac en bc vormen tweedegraads relaties. Eenvoudig gezegd wordt er bij een dergelijke relatie gekeken hoe bijvoorbeeld parameter B verandert, indien parameter A gewijzigd wordt.

Indien er sprake is van meer dan 3 parameters met elk meer dan 2 variabelen, wordt het uitvoeren van deze experimenten al snel complex door het grote aantal uit te voeren proeven. Op de volgende pagina wordt weergegeven (zie tabel 7) in welke mate het aantal uit te voeren testen toeneemt indien het aantal parameters groter wordt.

Tabel 7: aantal testen i.f.v. het aantal factoren en het aantal variabelen [34]

Number of Factors	Number of Levels per Factor	Number of Runs Full Factorial
2	2	4
2	3	9
3	2	8
3	3	27
4	2	16
4	3	81
5	2	32
5	3	243
6	2	64
6	3	729
7	2	128
7	3	2187
8	2	256
8	3	6561

Uit deze tabel blijkt duidelijk dat het aantal experimenten zeer sterk toeneemt wanneer het aantal parameters en variabelen met enkele aantallen stijgen. Bovendien wordt in dit onderzoek elke combinatie driemaal getest bij wijze van statistische controle. Ter verduidelijking wordt hieronder kort berekend hoeveel experimenten er voor een *full factorial* experiment nodig zouden. Hierbij wordt er rekening gehouden met het aantal parameters (5), hun bijhorende variabelen en het driemaal uitvoeren van elke combinatie. Er zijn 3 parameters met 2 variabelen, één enkele parameter met 4 variabelen en één parameter met 3 variabelen. Het totaal aantal uit te voeren experimenten bedraagt dan:

$$\# \text{experimenten} = (2 \times 2 \times 2 \times 4 \times 3) \times 3 = 288$$

Dit aantal komt overeen met het aantal experimenten voor enkel de buig- of impacttesten of de testen op axiale belasting. Dus voor deze 3 types testen samen bedraagt het aantal uit te voeren proeven 864. Het uitvoeren van al deze testen is praktisch gezien onmogelijk wegens geld- en tijdgebrek. Om deze enorme aantallen terug te schroeven wordt er dus niet gekozen voor een *full factorial* experiment, maar wel voor een *fractional factorial* experiment. Hierbij worden niet alle mogelijke combinaties uitgevoerd, maar wordt er voor gekozen om slechts een selectie van alle combinaties te testen. Door middel van interpolatie van de gemeten resultaten, uitgevoerd door het programma DesignEase®, worden de ontbrekende combinaties bepaald. Door goede combinaties te creëren is het dus toch mogelijk om een algemeen beeld te vormen over de invloed van de verschillende parameters op de resultaten van de experimenten. Door gebruik te maken van een *fractional factorial* experiment worden er nu 315 experimenten uitgevoerd in plaats van 864 zoals voor *full factorial* het geval was.

5.3 DesignEase®

DesignEase® is het softwareprogramma dat gebruikt wordt voor het opstellen van de experimenten en voor het bepalen van de testvolgorde. Op de eerste plaats worden de uit te voeren experimenten in subonderdelen opgesplitst, genaamd 'deel-DoE's'. Per DoE wordt steeds het type schuim vastgelegd op één bepaalde soort. Zo komen de 4 schuimen die in dit onderzoek aan bod komen elk overeen met één bepaalde DoE. 2C PU komt overeen met DoE1, epoxyschuim

met DoE2, XPS-schuim met DoE3 en MHS-schuim met DoE4. Binnen elke afzonderlijke DoE worden er steeds nog enkele parameters vastgezet. Zo wordt dus bijvoorbeeld een testreeks opgesteld van enkel ronde buizen, opgevuld met 1 type schuim met een constante dichtheid, terwijl de overige parameters wel variëren. Hierdoor kunnen er complete deelresultaten bekomen worden wanneer bijvoorbeeld nog niet alle materialen voorhanden zijn. Hieronder wordt voor dit onderzoek een overzicht gegeven van de parameters die per DoE vastliggen en van de parameters die variëren. Tevens worden het aantal testen per type test weergegeven.

Tabel 8: overzicht type testen en bijhorende factoren met variabelen

	2C PU	Epoxy	XPS-schuim	MHS-schuim
<i>Parameter</i>	<i>Variabele(n)</i>	<i>Variabele(n)</i>	<i>Variabele(n)</i>	<i>Variabele(n)</i>
Materiaalsoort	Aluminium/staal	Aluminium/staal	Aluminium/staal	Aluminium/staal
Wanddikte	1,5 mm of 3 mm	1,5 mm of 3 mm	1,5 mm of 3 mm	1,5 mm of 3 mm
Profielvorm	rond	rond	rond	rond
Buisuiteinden	open	open	open	open
Type schuim	2C PU	Epoxy	XPS-schuim	MHS-schuim
Adhesief	niet verlijmd	niet verlijmd	niet verlijmd	niet verlijmd
Dichtheid	standaard: ± 55 kg/m ³	standaard: ± 700 kg/m ³	laag of hoog: 37 en 42 kg/m ³	standaard: ± 320 kg/m ³
Vulgraad	0%, 50% of 100%	0%, 50% of 100%	0%, 50% of 100%	0%, 50% of 100%
Positie schuim	Binnenkant	Binnenkant	Binnenkant	Binnenkant
#experimenten	30	21	33	21

Wanneer in bovenstaande tabel slechts 1 variabele wordt getoond, is er sprake van een constante parameter. Er is reeds aangehaald dat niet alle variaties van de parameters onderzocht worden tijdens dit project. De parameters die in de linker kolom in het vet worden weergegeven, stellen de variërende parameters voor.

Het grote voordeel van deze opsplitsing in verschillende DoE's is het feit dat wanneer er een wijziging dient doorgevoerd te worden in één van de parameters, dat enkel dient te gebeuren binnen één en dezelfde DoE, zodat de overige DoE's niet wijzigen. Daarnaast worden de proeven steeds volledig uitgevoerd per DoE en per type test. Zo worden de buigtesten van DoE2 dus steeds op dezelfde dag uitgevoerd. De omgevingsinvloeden van externe factoren zoals temperatuur en luchtvochtigheid van de testruimte zijn dus steeds gelijk voor alle testen van een bepaalde DoE van bijvoorbeeld buiging.

Zoals in het begin reeds is aangehaald, bepaalt DesignEase® ook de testvolgorde van de experimenten. Elk type profiel dat met een bepaald schuim is opgevuld wordt driemaal getest dus in principe zou het mogelijk zijn om 3 van dergelijke profielen steeds achter elkaar te testen. Het is echter beter om dat te vermijden. Stel nu dat de externe factoren tijdens één volledige testreeks toch zouden veranderen en dat dezelfde profielen achter elkaar getest zouden worden, dan zou er een belangrijke fout optreden in de testresultaten. Wanneer er echter een willekeurige testvolgorde bepaald wordt en er dus afwisselend verschillende profielen getest worden, dan zou de fout veel kleiner zijn, daar er steeds een gemiddelde van de testresultaten van 3 dezelfde profielen wordt genomen.

6 Voorbereiden, vullen en testen van de profielen

In dit hoofdstuk worden de praktische zaken aangehaald. Dat houdt onder andere het voorbereiden en het vullen van de profielen in. Ook het uitvoeren van de drie verschillende testen op elk profieltype komt hierbij aan bod.

6.1 Voorbereiden van de profielen

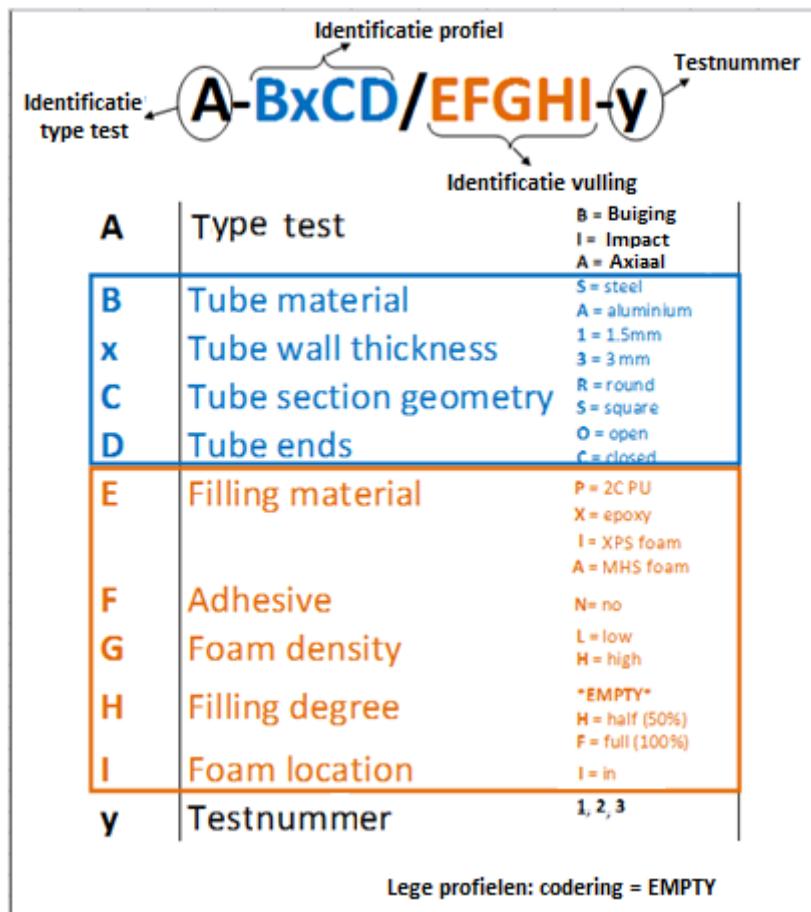
De aangeleverde profielen zijn reeds op lengten van 700 mm verzaagd, maar vertonen bij levering veel braam aan de afgezaagde uiteinden. Deze braam, die naar de binnenzijde van het profiel is gericht, kan er voor zorgen dat de voorgevormde schuimelementen niet aangebracht kunnen worden. De diameter van deze schuimelementen komt immers overeen met de, volgens de specificaties opgegeven, inwendige diameter van het profiel. Door het verwijderen van de braam treedt het bovenstaande probleem dus niet op tijdens het vullen. Tevens is het verwijderen van de bramen nodig voor een vlot verloop van de testen op axiale belasting. Voor dit type testen is het immers noodzakelijk dat de afzaagkanten zeer vlak zijn om een gelijke verdeling van de drukbelasting op het profiel te krijgen. Er moet dus steeds vermeden worden dat de drukkracht enkel op een beperkt gedeelte van de onder- en bovenkant van het profiel wordt aangelegd. De resulterende kracht zou anders niet meer in het midden van het profiel aangrijpen, waardoor er ongewenste afschuifkrachten en momenten kunnen optreden.

Daarnaast dienen de stalen profielen ook grondig gereinigd te worden. Indien dat niet zou gebeuren, kunnen er problemen optreden met betrekking tot de hechting tussen het geïnjecteerd schuim en de profielwand. Op de stalen profielen bevindt zich steeds een oliefilm, alsook andere onzuiverheden. Deze onzuiverheden zijn het gevolg van het productieproces. Zo wordt de oliefilm aangebracht om corrosie tegen te gaan. Het is dus steeds belangrijk dat de profielen maximaal twee weken na reiniging geïnjecteerd worden met schuim. Indien hier meer tijd over verstrijkt, bouwt zich een corrosielaag op doordat de olie het profieloppervlak niet langer beschermt. Deze corrosielaag zou opnieuw een goede hechting tussen het schuim en het profiel verhinderen, wat net vermeden dient te worden.

De reiniging gebeurt door het profiel gedurende 30 seconden onder te dompelen in een oplossing die voor 50% uit water bestaat en voor 50% uit het ontvettingsmiddel *EC 58 DESOCLEAN*. Dit product is een industrieel ontvettingsmiddel. Na het onderdompelen wordt er enkele malen langs de binnenkant van het profiel geveegd om het profiel vervolgens te laten drogen.

De aluminium profielen tot slot behoeven geen grondige reiniging. Zo worden deze profielen niet ontvet en worden enkel de kleine spanen van de zaagbewerking verwijderd.

Na het reinigen en ontbramen worden de profielen gelabeld. Het labelen van de verschillende profielen is zeer belangrijk om de juiste testvolgorde te kunnen aanhouden en om de profielen na het vullen van elkaar te kunnen onderscheiden. Het is dan ook noodzakelijk om een eenduidig labelsysteem op te stellen. Op de volgende pagina wordt een overzicht gegeven van de codering die wordt toegepast om de verschillende profielen te labelen (zie figuur 37).



Figuur 37: overzichtsbld codering

Bovenstaande figuur geeft een duidelijk overzicht van de verschillende elementen van de codering. Op de eerste plaats wordt er een onderscheid gemaakt op basis van het type test, namelijk buiging (B), impact (I) en axiale belasting (A). Daarnaast wordt de overige codering opgesplitst in 2 grote delen. Zo worden eerst de parameters materiaalsoort, wanddikte, profielgeometrie en profieluiteinden weergegeven. Het gedeelte na de schuine streep duidt op de parameters van de vulling van het profiel. Hierbij worden dus de waarden van de parameters vulmateriaal, verlijming, dichtheid, vulgraad en positie van het schuim weergegeven.

Tot slot wordt de codering afgesloten met het cijfer 1, 2 of 3. Er worden telkens 3 profielen van dezelfde combinatie getest om hiervan een gemiddelde waarde te berekenen. Om eventuele afwijkingen in de testresultaten te kunnen verklaren, is het noodzakelijk dat er binnen dezelfde combinatie nog een onderscheid gemaakt kan worden tussen de 3 profielen. Het is dus daarom dat er nog een cijfer van 1 tot en met 3 wordt toegevoegd aan de codering, zodat deze laatstgenoemde uniek wordt voor elk getest profiel.

6.2 Profielen vullen met schuim

Hieronder wordt op de eerste plaats de injectie van 2C PU en epoxyschuim besproken. Hierna vindt de bespreking van de vulling met MHS-schuim plaats, om tot slot af te ronden met het aanbrengen van de voorgevormde schuimelementen van XPS-schuim.

6.2.1 Injectie van 2C PU

Dit schuim wordt door middel van een industriële robot aangebracht door de producent. Deze robot brengt een exact afgewogen hoeveelheid vloeistof in de profielen aan door de twee verschillende aanvoerleidingen gedurende een bepaalde tijd te openen. Elke aanvoerleiding bevat één van de componenten die in de spuitkop gemengd worden tot een uniforme vloeistofmassa. Deze massa valt tot onderaan in het profiel en expandeert vervolgens tot een schuim waardoor het volledige profiel gevuld wordt. Tijdens het doseren bedraagt het debiet van beide aanvoerleidingen 40 gram per seconde. Voor halfgepulde profielen wordt een vultijd van 0,12 seconden gebruikt en voor volledig gevulde profielen een vultijd van 0,9 seconden. Het is duidelijk dat de tijd voor volledige vulling ongeveer zeven maal groter is dan voor de vulling van halfgepulde profielen. Als gevolg hiervan verlaat het te veel aan schuim het profiel aan de bovenzijde, waarna het handmatig verwijderd wordt door de operator.

De optredende expansie is het gevolg van een chemische reactie tussen de twee verschillende componenten. Tijdens de reactie komt er veel warmte vrij en dus is er sprake van een exotherme reactie. Om het proces van expanderen optimaal te laten verlopen, is het zinvol om de grondstoffen en de profielen voor te verwarmen. De grondstoffen worden in de opslagtanks verwarmd tot een temperatuur van 45 °C. De profielen daarentegen worden ongeveer voorverwarmd tot een temperatuur van 65 °C. Dat gebeurt door middel van de groene warmtestraler die rechts van de opstelling gemonteerd wordt. Dit verwarmingselement verwarmt de profielen gedurende 1 tot 2 minuten voor om vervolgens de vloeistof te injecteren. De totale opstelling, alsook een volledig gevuld profiel, worden hieronder weergegeven.



Figuur 38: vulopstelling



Figuur 39: profiel met volledige 2C PU-vulling

Om de warmte vast te houden in de ruimte waar de profielen zijn opgesteld, wordt de voorkant van bovenstaande opstelling tijdens het proces afgeschermd met een isolatieplaat. Hierboven (zie figuur 39) is een volledig gevuld profiel te zien en de vulling hiervan is relatief eenvoudig.

Voor de vulling van de half gevulde profielen daarentegen, is het proces moeilijker. Zo moet de vulling op 17,5 cm van de onderkant starten en moet de expansie van het schuim rond 17,5 cm van de bovenkant beëindigd zijn. Voor het aanbrengen van de vloeibare massa op 17,5 cm van de onderkant wordt er gebruik gemaakt van een siliconenstop die tot op de gewenste positie in het profiel kan geplaatst worden. De vloeistof wordt dan op deze stop aangebracht en schuimt vervolgens op tot ongeveer 17,5 cm van de bovenkant van het profiel, mits het nauwkeurig afstellen van de toevoerleidingen. Natuurlijk is het niet mogelijk om voor elk profiel de halve vulling telkens op exact 17,5 cm van de bovenkant te laten stoppen. De vulgraad van dergelijke profielen bedraagt dan niet exact 50%, maar fluctueert tussen 50% en 60%. Daar het gewicht bij een 60%-vulling iets hoger ligt dan bij een 50%-vulling, betekent dat de eigenschappen per gewichtseenheid iets lager liggen voor deze 60%-vulling.

6.2.2 Injectie van epoxyschuim

Het epoxyschuim wordt zelf aangebracht. De producent verzorgt enkel de levering van cartridges en bijhorende hulpmiddelen voor het aanbrengen van het schuim. Deze hulpmiddelen zijn enkele verwarmingskoffertjes en daarnaast nog twee luchtdrukpistolen voor het leegduwen van de cartridges. De cartridges worden in de verwarmingskoffertjes eerst verwarmd tot een temperatuur van 60 °C. Hierdoor worden de twee componenten in de cartridge minder viskeus, wordt een betere menging gegarandeerd en is er sprake van een goede chemische vernetting van de epoxy. Met behulp van het luchtdrukpistool wordt de cartridge geleidigd. Vooraan de cartridge wordt een mengelement bevestigd zodat de twee componenten, die afzonderlijk in de cartridges worden opgeslagen, met elkaar vermengd worden wanneer het schuim wordt aangebracht. Hieronder staat een verwarmingskoffertje met enkele cartridges afgebeeld (zie figuur 40), alsook het proces van het aanbrengen van het epoxyschuim door middel van een luchtdrukpistool (zie figuur 41).



Figuur 40: verwarmingskoffer met cartridges (60 °C)



Figuur 41: vulling profielen met epoxyschuim

6.2.3 Vullen met MHS-schuim

Bij het vullen van de profielen met MHS-schuim wordt er geen gebruik gemaakt van voorgevormde schuimelementen en ook niet van injectie. De MHS-korrels (zie figuur 42), die bekomen worden wanneer het polystyreen en het bindmiddel verwijderd zijn, worden handmatig in het profiel aangebracht. Figuur 43 op de volgende pagina geeft weer op welke wijze de profielen door de producent gevuld worden. Flanders' DRIVE beschikt immers niet over de nodige infrastructuur en kennis voor het aanbrengen van metaalschuim.



Figuur 42: holle metaalkorrels



Figuur 43: vullen van profiel

Eenmaal het volledige profiel met korrels gevuld is, worden beide uiteinden van het profiel afgeplakt om de korrels op hun plaats te houden. Hierna worden de gevulde profielen in een oven geplaatst, zodat de lijm kan uitharden bij een temperatuur van 200 °C. Hierbij vloeien de korrels in elkaar over en vormen zo een sterk geheel. Na een bepaalde tijdsduur, die omwille van het bedrijfsgeheim niet gekend is, worden de profielen uit de oven verwijderd. Het resultaat van dit hele proces is een metaalschuim met een homogene structuur en dunne celwanden (zie figuur 44).



Figuur 44: profiel gevuld met MHS-schuim

6.2.4 Vullen met voorgevormde schuimelementen van XPS-schuim

XPS-schuim is het enige schuim van de 4 schuimtypes dat in de vorm van voorgevormde schuimelementen in het profiel wordt aangebracht (zie figuur 45). Hierbij wordt er geen gebruik gemaakt van adhesieve stoffen zoals lijm. Het aanbrengen van dit type schuim wordt volledig door mezelf verwezenlijkt. Belangrijk bij dit schuim zijn de twee verschillende dichtheden die onderzocht worden. In tegenstelling tot de overige drie schuimtypes wordt bij XPS-schuim de dichtheid niet vastgelegd op een constante waarde. Zo wordt er enerzijds XPS-schuim met een dichtheid van 37 kg/m³ toegepast en anderzijds XPS-schuim met een dichtheid van 42 kg/m³. Belangrijk is dat bij de vulling van de profielen opgelet wordt welke profielen voorzien worden van schuim met een lage dichtheid en welke met schuim van een hoge dichtheid.



Figuur 45: voorgevormd schuimelement

De plaatsing en de positie van het schuim in het profiel worden gegarandeerd door de wrijving die er heerst tussen het schuim en de profielwand. Het schuim wordt zo uitgesneden dat het nauw aansluit met het profiel. In sommige gevallen is het zelfs vereist dat het schuim lichtjes wordt geschuurd om in het profiel geschoven te kunnen worden. Dat gebeurt door het schuim manueel te bewerken met schuurpapier.

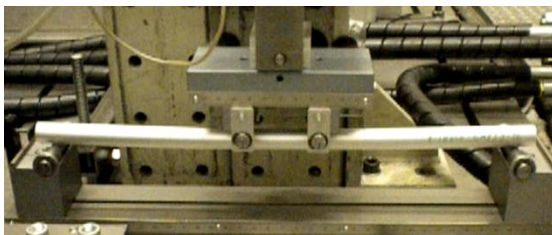
6.3 Uitvoeren van de testen

Elk type schuim wordt aan drie verschillende testen onderworpen. Eerst worden er vierpuntsbuig- en impacttesten uitgevoerd. Daarna vinden de testen op axiale belasting plaats, maar deze worden door ervaren mensen van de VUB verwezenlijkt. Alle testen worden gedaan met de testinstellingen zoals die reeds in het hoofdstuk *Type testen* zijn uitgelegd. De testen worden steeds per DoE en per type test uitgevoerd. Zo worden misverstanden zoals het verwisselen van gelijkaardige profielen van verschillende DoE's vermeden.

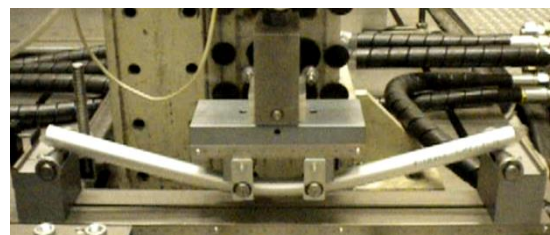
Er moet nog opgemerkt worden dat de testen op profielen gevuld met XPS-schuim speciale aandacht vereisen. Zo moet het profiel hierbij steeds nauwkeurig gepositioneerd worden, daar XPS-schuim richtingsgevoelig is. Bij elke test met dit type schuim moet de markering die op het schuim is aangebracht naar boven gelegen zijn om optimaal gebruik te maken van zijn mechanische eigenschappen.

6.3.1 4-puntsbuigtesten

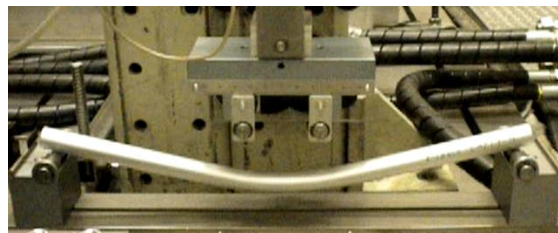
De eerste testen die uitgevoerd worden, zijn de 4-puntsbuigtesten. Een voorbeeld van een volledige test wordt hieronder in 3 stappen weergegeven.



Figuur 46: startpositie vierpuntsbuigtest



Figuur 47: uiterste stand actuator

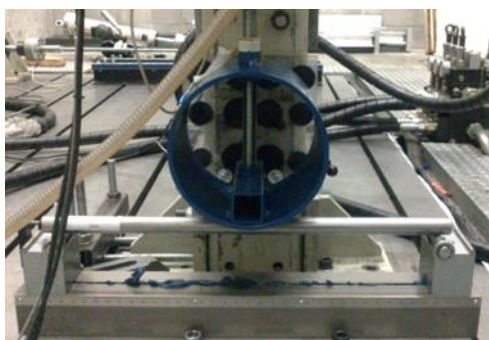


Figuur 48: eindpositie vierpuntsbuigtest

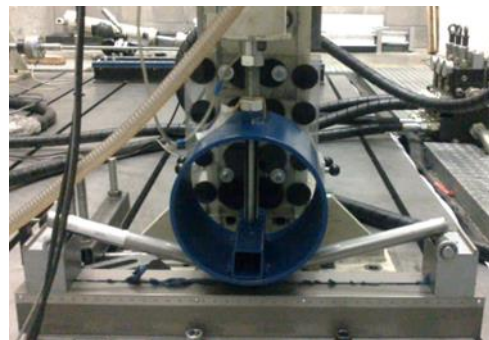
Figuur 46 geeft de startpositie van de test weer. Dat betekent dat de voorbelasting van 0,1 kN, die bij elke buigtest dient aangelegd te worden, reeds is ingesteld. De actuator heeft zich dan reeds verplaatst van zijn rustpositie, die overeenkomt met +45 mm, naar de startpositie van +25 mm. Vanaf dat moment kan de test softwarematig opgestart worden. De actuator beweegt zich nu voort met een snelheid van 1 mm/s totdat de eindpositie van -50 mm bereikt is (zie figuur 47). De neergaande beweging duurt ongeveer 75 seconden en na een totale tijdsduur van 84 seconden bevindt de actuator zich terug in zijn rustpositie van +45 mm (zie figuur 48). Het profiel vertoont nu een duidelijk blijvende vervorming als gevolg van de inwerkende buigkracht.

6.3.2 Impacttesten

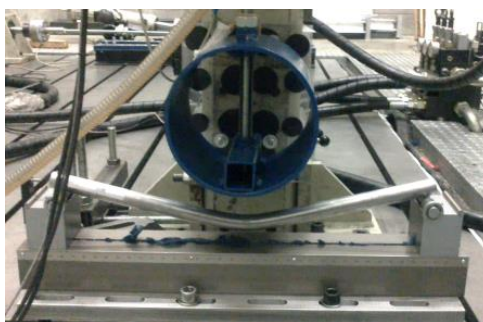
Net als de buigtesten worden ook de impacttesten zelf uitgevoerd. Hieronder worden de verschillende fases van een impactproef weergegeven.



Figuur 49: startpositie impacttest



Figuur 50: uiterste positie impactor



Figuur 51: eindpositie impacttest

Op figuur 49 wordt de startpositie van de impacttest afgebeeld. De impactor, die aan de stang van de actuator is bevestigd, bevindt zich op dit moment op positie +55 mm, oftewel op ± 14 mm boven het te testen profiel. Wanneer het uiteinde van de impactor op deze positie is gepositioneerd, kan de eigenlijke test gestart worden. De start en het verloop van de impacttesten gebeurt steeds softwarematig. Op het moment van impact bedraagt de positie van de actuator +41 mm. Figuur 50 geeft de positie van de impactor weer wanneer de onderste positie, die overeenkomt met -40 mm, is bereikt. Vanaf dit moment begeeft de actuator zich automatisch naar boven, tot zijn rusttoestand is gerealiseerd (zie figuur 51). De volledige test duurt ongeveer 2,5 seconden, waarna vervolgens de opgemeten resultaten worden opgeslagen om in het volgende hoofdstuk verwerkt te worden.

6.3.3 Testen op axiale belasting

De uitvoering van een test op axiale belasting aan de VUB wordt hieronder weergegeven door middel van twee figuren, meer bepaald figuur 52 en 53.



Figuur 52: ingeklemd profiel



Figuur 53: bezwiken profiel

Figuur 52 toont de startpositie van de test. Hierbij bevindt het profiel zich reeds tussen de onder- en bovenmal. Hiertoe worden de twee mallen eerst van elkaar weggeschoven. Vervolgens wordt het profiel in de onderste mal geplaatst om dan de bovenste mal naar beneden te verplaatsen, totdat het profiel volledig ingeklemd is. Vanaf dat moment wordt de positie van de actuator gelijkgesteld aan nul. Hierdoor beginnen de meetgegevens steeds bij een verplaatsing van 0 mm, wat de interpretatie van de gegevens vergemakkelijkt. Uiteindelijk wordt dan de test opgestart, waarbij de actuator zich met een snelheid van 10 mm/min verplaatst. De actuator verplaatst zich over een afstand van 10 mm naar beneden en vervolgens opnieuw over een afstand van 10 mm naar boven. Het naar boven bewegen verloopt met dezelfde snelheid, zodat er sprake is van een decompressie. Dat wordt gedaan om een goede kracht-verplaatsingsgrafiek te bekomen.

De rechter afbeelding (zie figuur 53) die hierboven wordt weergegeven, laat een bezwiken profiel zien. Visueel valt minder goed op dat het profiel daadwerkelijk faalt. Uit de meetgegevens daarentegen blijkt duidelijk van wel, daar hier een maximale kracht geconstateerd wordt tijdens de test. Hieruit kan afgeleid worden dat de actuator extra kracht moet leveren om zijn verplaatsing van 10 mm/min aan te houden. In het begin gaat dat nog relatief eenvoudig en bedraagt de aan te leggen kracht slechts enkele kN. Naargelang de test vordert, levert het profiel meer weerstand en dus neemt de kracht sterk toe. Deze kracht blijft toenemen tot het punt dat het profiel bezwijkt onder de aangelegde kracht. Vanaf dat moment gaat de weerstand van het profiel tegen axiale belasting verloren en neemt de aan te leggen kracht van de actuator sterk af. Dit punt van maximaal aangelegde kracht geeft dus de weerstand tegen axiale belasting weer.

7 Bepalen van de mechanische eigenschappen en de significante relaties

Vooraleer de resultaten geanalyseerd kunnen worden, is het belangrijk om vast te leggen wat er precies berekend en geanalyseerd moet worden en hoe dat in zijn werk gaat. Zo wordt uit het testresultaat van een buigtest de maximale kracht gedurende de test en de buigstijfheid van het al dan niet gevulde profiel afgeleid. De impacttesten daarentegen dienen voor de bepaling van de energieabsorptie. Tot slot geven de testen op axiale belasting een inzicht in de weerstand van het profiel tegen axiale krachten.

In dit onderdeel wordt uitgebreid uitgelegd op welke wijze de verschillende mechanische eigenschappen uit de testresultaten worden berekend. Al deze mechanische eigenschappen worden steeds op basis van de gemeten waarden van kracht en verplaatsing van de actuator bepaald.

Eenmaal bepaald is welke eigenschappen berekend en geanalyseerd moeten worden, worden de testresultaten op de eerste plaats geanalyseerd met behulp van MATLAB R2010a. Dat gebeurt door middel van een specifiek programma in Matlab dat reeds door Flanders' DRIVE gemaakt is voor eerdere projecten.

7.1 Bepalen van de maximale kracht tijdens de buigtest

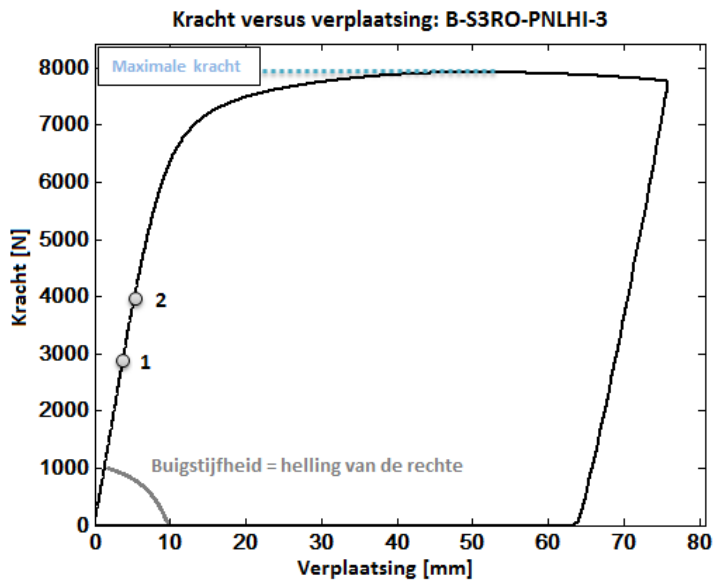
De maximale kracht die tijdens de buigtest optreedt, kan zeer eenvoudig bepaald worden met Matlab. Het programma leest alle meetpunten van de buigtest in om vervolgens uit deze lijst van waarden de grootste kracht te registreren. De krachtsensor registreert de kracht geleverd op het profiel als een negatieve waarde en dus is de grootste kracht gelijk aan de meest negatieve waarde. Hieronder wordt een klein deel, namelijk van 27,45 seconden tot en met 27,80 seconden, van de dataopslag weergegeven (zie tabel 9). Via een eenvoudige bewerking kan uit deze lijst de maximale waarde gevonden worden. Merk op dat de totale dataopslag loopt van 0 seconden tot en met 84,55 seconden.

Tabel 9: bepalen maximale kracht

s	mm	kN
27,5	-2,41089	-1,82953
27,55	-2,45972	-1,83105
27,6	-2,50854	-1,83258
27,65	-2,56042	-1,83105
27,7	-2,60925	-1,83105

7.2 Bepalen van de buigstijfheid

Het bepalen van de buigstijfheid is al minder eenvoudig dan het bepalen van de maximale kracht. Voor de buigstijfheid van een getest profiel te kennen, is een kleine berekening vereist. Deze eigenschap kan bepaald worden aan de hand van de opgemeten krachten en posities. Wanneer de kracht op elk tijdstip wordt uitgezet ten opzichte van de overeenkomstige positie van de actuator, wordt een gelijkaardige kracht-verplaatsingsgrafiek zoals op de volgende pagina bekomen.



Figuur 54: kracht-verplaatsingsgrafiek van een buigtest (B-S3RO-PNLHI-3)

De buigstijfheid kan nu berekend worden als de helling van het lineaire gedeelte van bovenstaande grafiek. Dat betekent dat de stijfheid overeenkomt met de verhouding van de verandering van de kracht op de verandering van de verplaatsing, voor respectievelijk een punt 1 en 2. De algemene formule voor het berekenen van de buigstijfheid wordt hieronder weergegeven:

$$\text{Buigstijfheid} = \frac{\text{toename kracht van punt 1 naar 2}}{\text{verplaatsing van positie 1 naar 2}} = \frac{F_2 - F_1}{x_2 - x_1}$$

Vergelijking 2: formule berekenen buigstijfheid

met F_1 = kracht in het eerste meetpunt

F_2 = kracht in het tweede meetpunt

x_1 = positie in het eerste meetpunt

x_2 = positie in het tweede meetpunt

Voorbeeldberekening

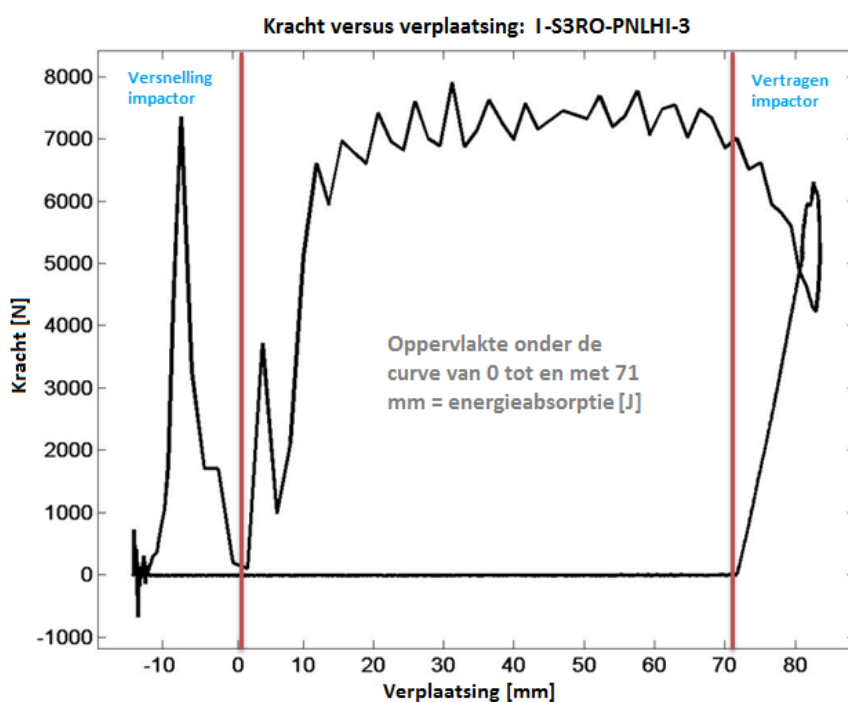
In deze voorbeeldberekening wordt de berekening van de buigstijfheid eenmalig volledig weergegeven. Daar deze stijfheid berekend wordt door de verhouding van twee verschillen, is het noodzakelijk dat er eerst twee punten op het lineaire gedeelte van de grafiek worden gekozen. Deze punten, respectievelijk punt 1 en 2, kunnen willekeurig op het lineaire gedeelte gekozen worden. Best is wel dat er minstens 1kN verschil in beide waarden zit, zodat kleine meetafwijkingen weinig invloed hebben op de berekening van de stijfheid. Punt 1 beschikt in bovenstaand geval over een kracht van 1,98 kN en een verplaatsing van 2,59 mm. Punt 2 daarentegen is hoger op de rechte gelegen en heeft een kracht van 2,99 kN met een bijhorende verplaatsing van 3,89 mm. Wanneer deze waarden in vergelijking 2 worden ingevuld, geldt:

$$\text{Buigstijfheid} = \frac{2,99 \text{ kN} - 1,98 \text{ kN}}{3,89 \text{ mm} - 2,59 \text{ mm}} = \pm 777 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Merk op dat deze berekende waarde steeds enkele procenten kan verschillen wanneer voor punt 1 en 2 andere waarden op de rechte gekozen worden. Stel dat voor punt 1 nu 1,00 kN en 1,33 mm gekozen wordt en voor punt 2 2,30 kN en 2,99 mm. Dat leidt tot een stijfheid van 783 N/mm en dus is er sprake van een procentuele afwijking van 0,7% van de stijfheid. Het is dus duidelijk dat een goede keuze van deze 2 punten zeer belangrijk is en daarom worden deze punten steeds vastgelegd op 0,5 kN en 1 kN. Deze punten zijn zodanig gekozen dat ze toepasbaar zijn voor de berekening van de stijfheid van alle mogelijke testcombinaties. Dat betekent dus dat deze 2 krachtwaarden zich voor elk getest profiel op het lineaire gedeelte van de kracht-verplaatsingsgrafiek bevinden.

7.3 Bepalen van de energieabsorptie

Het berekenen van de energieabsorptie tijdens impact is iets minder eenvoudig als de bepaling van de stijfheid. De geabsorbeerde energie kan echter ook uit een kracht-verplaatsingsgrafiek afgeleid worden. Dus ook de energieabsorptie is afhankelijk van de opgemeten krachten en posities op de verschillende tijdstippen. Hieronder wordt op de eerste plaats een voorbeeld van een dergelijke grafiek weergegeven, meer bepaald de grafiek van de impacttest op het profiel 'I-S3RO-PNLHI-3'.



Figuur 55: kracht-verplaatsingsgrafiek van een impacttest (I-S3RO-PNLHI-3)

Op bovenstaande grafiek is te zien dat de grafiek niet bij een verplaatsing van 0 mm begint, maar wel bij een negatieve waarde. Dat is het gevolg van het feit dat het moment van impact gelijk wordt gesteld aan een verplaatsing van 0 mm. De opgemeten grafieken van alle testen worden op deze wijze getransformeerd. Deze transformatie is steeds correct daar de impactor altijd op hetzelfde moment contact maakt met het te testen profiel. Alle profielen beschikken immers over dezelfde buitendiameter van 30 mm. In wat volgt worden de drie verschillende gebieden, die op bovenstaande grafiek onderscheiden kunnen worden, verder verklaard. Zo geeft het

eerste gebied de versnelling van de impactor weer. Het tweede gebied komt overeen met de eigenlijke energieabsorptie of het met constante snelheid bewegen van de impactor. Het derde gebied tot slot geeft het vertragen van de impactor weer.

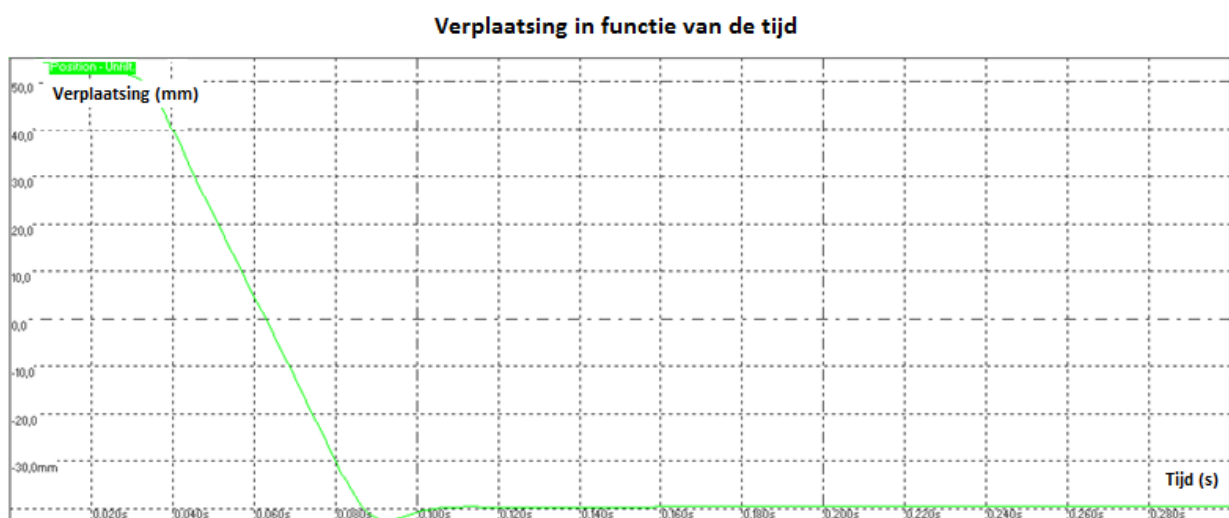
Het eerste gebied wordt gekenmerkt door een hoge, enkelvoudige piek en beslaat het gebied links van 0 mm verplaatsing. Deze krachtpiek is te wijten aan het feit dat de impactor dient te versnellen totdat hij een constante snelheid heeft bereikt. Belangrijk hierbij is dat de impactor geen contact maakt met het te testen profiel alvorens een constante snelheid is bereikt. Dat deze krachtpiek te wijten is aan de versnelling blijkt duidelijk uit de traagheidswet, de eerste wet van Newton (zie vergelijking 3). Deze wet toont aan dat indien er geen kracht op de massa inwerkt, er ook geen sprake kan zijn van een versnelling. De optredende kracht is dus noodzakelijk voor de gewenste versnelling van de impactor.

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Vergelijking 3: eerste wet van Newton

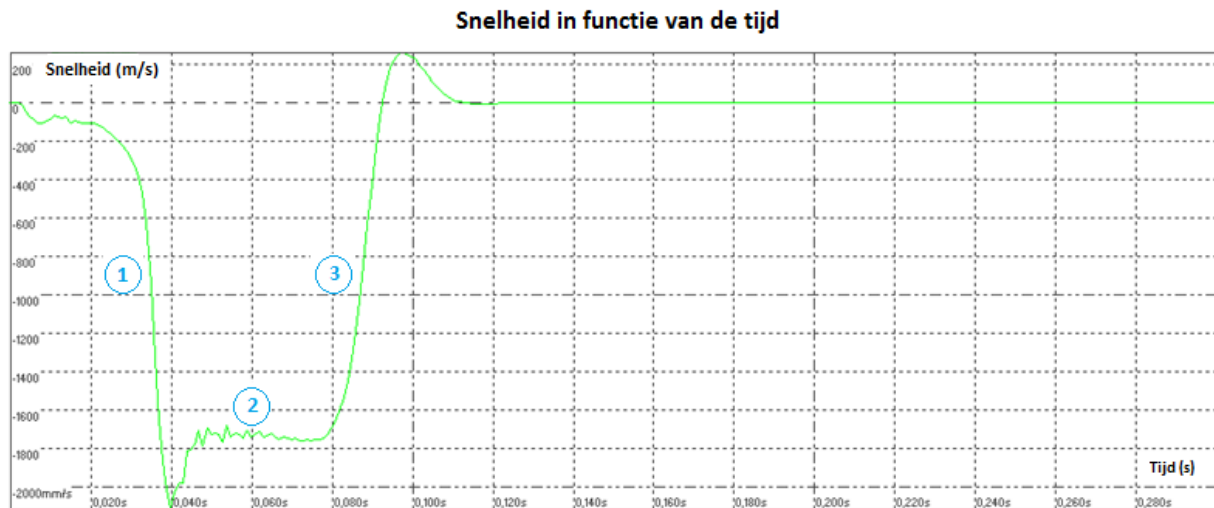
Het tweede gebied, het gebied tussen de twee rode lijnen, is de maat voor de energieabsorptie. Dat is te wijten aan het feit dat de oppervlakte onder de curve gelijk is aan de energieabsorptie voor een verplaatsing van 0 tot en met 71 mm. De oppervlakte onder de curve wordt steeds voor elk type test en elk type schuim berekend tussen deze twee waarden. Dat is immers nodig voor het onderling vergelijken van de verschillende profielcombinaties. De waarde voor energieabsorptie wordt berekend met behulp van Matlab. Het derde gebied wordt hieronder gelijktijdig besproken met de verdere uiteenzetting over de verplaatsing, snelheid en versnelling van de actuator in het eerste gebied.

Om aan te tonen dat de impactor bij aanvang van de test versnelt en vanaf het moment van contact tot net voor zijn eindpositie met constante snelheid beweegt, worden hieronder 3 grafieken weergegeven. Ook het vertragen van de impactor naar het einde van de test toe wordt hierop afgebeeld. De eerste grafiek stelt de verplaatsing in functie van de tijd voor (zie figuur 56). De tweede geeft de snelheid in functie van de tijd weer (zie figuur 57) en de derde tot slot toont de versnelling (zie figuur 58), ook weer ten opzichte van de tijd.



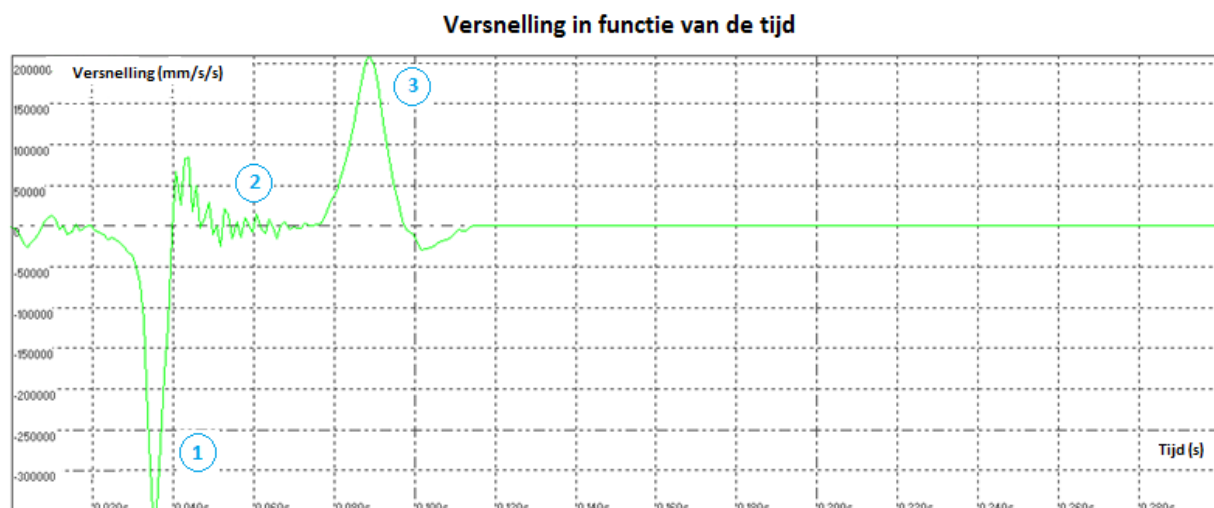
Figuur 56: grafiek van verplaatsing (mm) in functie van de tijd (s)

Figuur 56 geeft weer op welke wijze de verplaatsing van de actuator evolueert in functie van de tijd. Deze verplaatsingsgrafiek is voorgesteld door een eenvoudige rechte die vanuit de startpositie +55 mm vertrekt. Deze grafiek dient enkel ter verduidelijk van de twee andere grafieken. De snelheid is immers de eerste afgeleide van de verplaatsing en de versnelling vormt de tweede afgeleide. De volgende grafieken worden dus bekomen door respectievelijk de eerste en de tweede afgeleide van de verplaatsingsgrafiek te nemen.



Figuur 57: grafiek van snelheid (mm/s) in functie van de tijd (s)

Bovenstaande grafiek stelt de snelheid in functie van de tijd voor en wordt op zijn beurt gekenmerkt door 3 verschillende zones. De eerste zone geeft de toename van de snelheid weer wanneer er nog geen contact plaatsvindt met het profiel. Vanaf het moment dat er contact is, is er sprake van een snelheid die ongeveer constant wordt gehouden. Deze constante snelheid kan in figuur 57 aanschouwd worden als de tweede zone. Wanneer de test op zijn einde loopt, dient de actuator snelheid te minderen, totdat volledige stilstand van de impactor bekomen wordt. Deze dalende snelheid wordt weergegeven door zone 3.



Figuur 58: grafiek van versnelling (mm/s²) in functie van de tijd (s)

De grafiek van de versnelling in functie van de tijd, zoals hierboven afgebeeld, is compatibel met de grafiek van de snelheid in functie van de tijd. Zo is een snelheidstoename enkel mogelijk indien er een bepaalde versnelling wordt aangelegd. Deze versnelling wordt aangegeven door

zone 1 van bovenstaande figuur. Juist alvorens er contact met het profiel optreedt, dient de snelheid constant te zijn en bevindt de versnelling zich in zone 2. Dat betekent dat de versnelling vanaf een bepaald moment begint af te nemen, totdat ze 0 is en dat blijft ook zo tot precies voor het einde van de test. Vanaf dan bevindt de versnelling zich in de derde zone. In deze zone zijn de waarden negatief in plaats van positief. Dat is logisch aangezien er nu geen versnelling vereist wordt, maar wel een vertraging van de impactor. Wanneer de test stopt, zijn zowel snelheid en versnelling gelijk aan nul.

7.4 Bepalen van de weerstand tegen axiale belastingen

Voor het bepalen van de weerstand tegen axiale belastingen wordt er, net als bij het bepalen van de maximale kracht van een buigtest, geen berekening uitgevoerd. Voor het analyseren van deze eigenschap wordt er enkel gekeken naar de maximale drukkracht die optreedt tijdens de test. Het gaat hierbij om een drukkracht, dus met maximale kracht wordt eigenlijk de meest negatieve kracht bedoeld. Ook hier wordt dus eenvoudigweg de maximale krachtwaarde uit de lijst van meetgegevens geselecteerd en weergegeven door middel van Matlab (zie tabel 10).

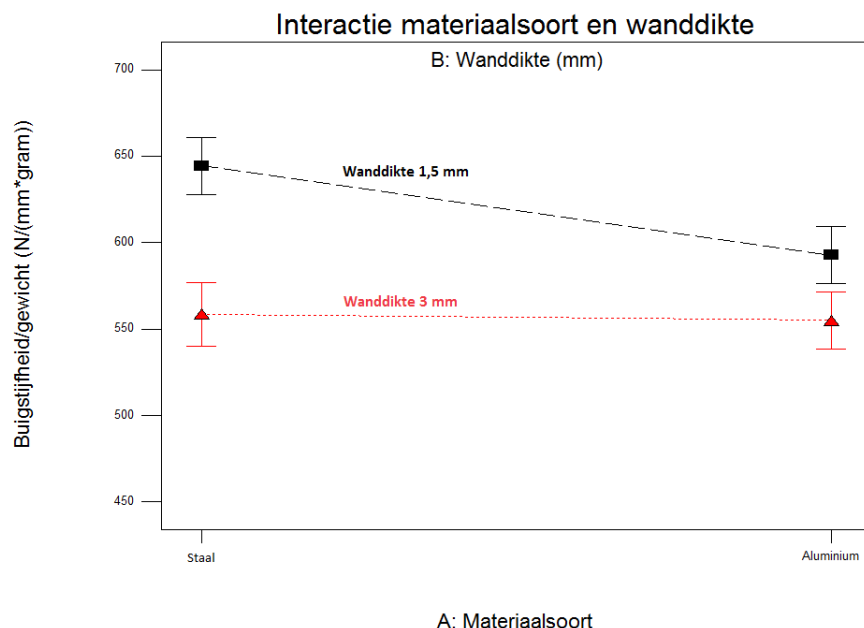
Tabel 10: bepalen maximale drukkracht

Tijd (s)	Verplaatsing (mm)	Kracht (kN)
16,02	-2,666	-46,168
16,08	-2,676	-46,194
16,14	-2,686	-46,208
16,2	-2,696	-46,211
16,26	-2,706	-46,198
16,32	-2,716	-46,175
16,38	-2,726	-46,133
16,44	-2,736	-46,079

7.5 Principe van het bepalen van significante relaties tussen testparameters

In dit onderdeel wordt uitgelegd op welke manier eventuele relaties tussen verschillende testparameters bepaald worden. De relevante en significante relaties tussen de verschillende testparameters worden vastgesteld aan de hand van het programma DesignEase®. Dit programma onderzoekt of er al dan niet sprake is van een relatie tussen de testparameters door alle geanalyseerde waarden te combineren. Er wordt geopteerd om enkel te kijken naar relaties op tweedegraads niveau. Dat betekent dus dat telkens de interactie tussen twee parameters beoordeeld wordt. De eventuele relatie die bestaat tussen drie parameters zou te complex zijn voor dit onderzoek. Het doel van dit onderzoek is immers het vormen van een duidelijk overzicht van de invloed van elk type schuim op de mechanische eigenschappen van buisprofielen. Bovendien is het design niet voldoende krachtig om derdegraads interacties aan te tonen, zonder het aantal uit te voeren testen te vergroten.

De eventuele relaties tussen de parameters kunnen door DesignEase® worden weergegeven door middel van grafieken. Om de manier van relatiebepaling te begrijpen, wordt op de volgende pagina een voorbeeld gegeven (zie figuur 59).



Figuur 59: grafiek van de buigstijfheid per gewicht van lege profielen in functie van de materiaalsoort en de wanddikte

Bovenstaande grafiek geeft de meetwaarden voor onge vulde profielen weer, daar aan de hand hiervan het principe van het programma het eenvoudigst uit te leggen is. Op deze grafiek staat op de x-as de materiaalsoort afgebeeld en op de y-as de buigstijfheid per gewichtseenheid. Daarnaast kunnen er op de grafiek twee lijnen onderscheiden worden. De bovenste lijn (zwart) bevat de meetwaarden voor profielen met een wanddikte van 1,5 mm. Meetwaarden voor profielen met een wanddikte van 3 mm daarentegen, worden gekenmerkt door de onderste (rode) lijn. De meetwaarden van de stalen profielen bevinden zich uiterst links op de grafiek en de waarden van de aluminium profielen rechts.

Het eventuele verband tussen de parameters wordt nu bepaald door de helling van de twee rechten met elkaar te vergelijken. Wanneer beide rechten evenwijdig liggen, is er nooit sprake van interactie tussen de voorgestelde parameters. In het geval dat de rode en de zwarte lijn evenwijdig ten opzichte van elkaar gepositioneerd waren, zou dat betekenen dat wanneer de wanddikte van een stalen en een aluminium profiel zou toenemen, de buigstijfheid per gewichtseenheid in dezelfde mate zou toenemen. In dat geval zou er dus geen interactie bestaan tussen de wanddikte en de materiaalsoort. Er geldt nu echter wel dat er sprake is van interactie tussen deze twee parameters. Zo neemt de buigstijfheid per gewicht beduidend meer toe bij een toename van de wanddikte voor staal dan voor aluminium en dat terwijl deze waarde voor beide materiaalsoorten ongeveer gelijk is voor de dikke profielen.

Deze interactie kan nu worden waargenomen door een verschillende helling van beide rechten. Zo is op bovenstaande figuur duidelijk zichtbaar dat de helling van de zwarte lijn groter is dan die van de rode. Hieruit wordt de interactie tussen de materiaalsoort en de wanddikte dus afgeleid. Op deze wijze worden in het volgende hoofdstuk de optredende interacties tussen de verschillende testparameters bepaald.

8 Analyseren van de testresultaten

Voor elk type schuim worden de maximale kracht bij buiging, de buigstijfheid, de energieabsorptie bij impact en de weerstand tegen axiale belasting voor de verschillende profielen bepaald. Eerst worden de resultaten van de lege profieltypes weergegeven. Vervolgens worden de relatieve resultaten van de verhouding mechanische eigenschap per gewicht voor elk schuimtype besproken.

Tot slot worden de significante parameters en relaties tussen deze verschillende parameters bepaald door middel van DesignEase®.

De volledige weergave van de absolute en relatieve waarden van de verschillende profielen kan in bijlage worden teruggevonden. De weergave van de resultaten in de bijlage wijkt af van de wijze waarop ze in dit hoofdstuk beschreven worden. Het doel van onderstaande indeling is dat de belangrijke resultaten meteen kunnen worden onderscheiden.

8.1 Lege profielen

De resultaten van de lege profielen dienen als referentie voor de met 2C PU, XPS-, epoxy- en MHS-schuim gevulde profielen. Een eventuele toe- of afname van de waarden van de gevulde profielen wordt dan procentueel uitgedrukt ten opzichte van de waarden voor lege profielen.

8.1.1 Absolute waarden

De volledige weergave van de absolute waarden van de lege profielen kan in bijlage worden teruggevonden (zie bijlage 9 tot en met 12). Hierbij worden de resultaten per type test weergegeven. In onderstaande tabel worden beknopt de absolute resultaten per profieltype weergegeven. Met resultaten per profieltype wordt hier, en in het vervolg van het hoofdstuk, bedoeld op de gemiddelde waarden van de profielen met dezelfde testparameters.

Tabel 11: absolute waarden van de mechanische eigenschappen voor de lege profieltypes

Codering	F max. (kN)	Stijfheid (N/mm)	Energieabsorptie (Joule)	Weerstand tegen axiale belasting (kN)
A1RO-EMPTY	1,73	155,06	95173,11	26,20
A3RO-EMPTY	3,19	264,02	196860,82	46,30
S1RO-EMPTY	3,31	432,18	199897,98	53,24
S3RO-EMPTY	7,47	733,05	475593,38	96,22

Uit deze absolute waarden blijkt duidelijk dat de buigstijfheid van staal ongeveer driemaal groter is dan voor aluminium het geval is. De maximaal optredende kracht, de energieabsorptie en de weerstand tegen axiale belasting zijn logischerwijs ook beduidend groter voor staal dan voor aluminium bij gelijke wanddiktes. De betekenis van de codering kan teruggevonden worden op figuur 37 van hoofdstuk 6.

8.1.2 Waarden uitgedrukt ten opzichte van het gewicht

Hieronder worden de mechanische eigenschappen van de verschillende lege profieltypes per eenheid gewicht uitgedrukt. De volledige resultatenweergave kan opnieuw in bijlage worden teruggevonden (zie bijlage 13 tot en met 15).

Tabel 12: waarden mechanische eigenschappen uitgedrukt per gewichtseenheid voor de lege profieltypes

Codering	F max./gewicht (kN/kg)	Stijfheid/gewicht (N/mm/kg)	Energieabs./gewicht (Joule/gram)	Weerstand tegen axiale belast./gewicht (kN/kg)
A1RO-EMPTY	6,73	602,57	368,89	101,68
A3RO-EMPTY	6,76	558,97	421,55	99,07
S1RO-EMPTY	4,83	630,92	291,40	77,79
S3RO-EMPTY	5,61	550,34	361,57	72,69

Bovenstaande tabel toont reeds enkele interessante gegevens. Zo is de maximale kracht die tijdens de buigtesten optreedt voor aluminium beduidend groter dan voor staal wanneer er rekening wordt gehouden met het profielgewicht. Een ander opvallend fenomeen is het feit dat zowel een aluminium als een stalen profiel met een grotere wanddikte een lagere stijfheid en een lagere weerstand tegen axiale belasting heeft per kilogram gewicht bekeken. Daarentegen geldt dat zowel voor staal en aluminium een grotere wanddikte leidt tot een grotere energieabsorptie. De energieabsorptie per gram gewicht tot slot is steeds groter voor aluminium dan voor een gelijkaardig stalen profiel.

8.2 2C PU

Het eerste schuim dat geanalyseerd wordt is 2C PU. Er wordt voor gekozen om enkel de relatieve resultaten uitgedrukt ten opzichte van het gewicht te tonen en te bespreken. Alle absolute en relatieve waarden kunnen in bijlage aanschouwd worden (zie bijlage 16 tot en met 22). Onderstaande tabel geeft procentueel weer in welke mate de verhouding mechanische eigenschap per gewicht toeneemt of afneemt ten opzichte van het overeenkomstig lege profiel.

Tabel 13: relatieve waarden mechanische eigenschappen voor profielen gevuld met 2C PU

Codering	F max./gewicht (%)	Stijfheid/gewicht (%)	Energieabs./gewicht (%)	Weerstand tegen axiale belasting/gewicht (%)
A1RO-PNLHI	-6,65	-8,50	1,27	-8,89
A3RO-PNLHI	6,40	-7,15	-4,96	-9,20
A3RO-PNLFI	2,66	-7,17	-5,58	-19,54
S1RO-PNLHI	8,26	-0,79	2,84	-6,02
S1RO-PNLFI	-5,91	-3,64	0,31	-9,37
S3RO-PNLHI	3,13	-4,12	-5,06	-7,12
S3RO-PNLFI	-3,08	-5,35	-4,57	-4,93

Bovenstaande tabel toont de procentuele toe- of afname van de mechanische eigenschappen van 2C PU gevulde profielen ten opzichte van lege profielen. Waarden die groter zijn als 5% worden in het groen aangeduid, dat geldt ook zo voor alle komende tabellen.

Voor halfgevulde, ronde, aluminium profielen met wanddikte 3 mm (A3RO-PNLHI) is er sprake van een toename van de maximale kracht met 6,4%. Bij hetzelfde profieltype met volledige vulling (A3RO-PNLFI) ligt deze waarde (2,66%) beduidend lager. Het grote nadeel dat aan deze toename van de maximale kracht verbonden is, is de afname van de stijfheid en de energieabsorptie. Deze twee eigenschappen zijn immers zeer belangrijk in de voertuigindustrie.

Voor halfgevulde, ronde, stalen profielen met een wanddikte van 1,5 mm (S1RO-PNLHI) wordt er een stijging van de maximale kracht met 8,26% waargenomen. In tegenstelling tot de bovenstaande toename, is er in dit geval slechts een daling van de stijfheid met 0,79% en zelfs een toename van de energieabsorptie met 2,84%. Indien er verdere testen met 2C PU uitgevoerd worden, zou deze materiaalcombinatie verder onderzocht kunnen worden door de wanddikte te laten afnemen.

De overige profielcombinaties kennen hoofdzakelijk een sterke afname van de mechanische eigenschappen ten opzichte van de originele, lege profielen. Merk op dat de buigstijfheid in geen enkel geval toeneemt, de energieabsorptie slechts driemaal met beperkte percentages en de weerstand tegen axiale belasting neemt bij elke combinatie heel sterk af. Zo wordt in het extreemste geval zelfs een afname van 19,54% waargenomen.

8.3 Epoxyschuim

Ook voor dit schuim wordt de procentuele toe- of afname van de eigenschappen in functie van het gewicht weergegeven en verklaard. Op de eerste plaats worden de relatieve waarden van de eigenschappen en het gewicht afzonderlijk uitgedrukt. Dat heeft als doel om waar te nemen in welke mate de waarden van de verschillende eigenschappen toe- of afnemen zonder rekening te houden met het gewicht en omgekeerd. Op de tweede plaats wordt dan de procentuele toe- of afname van de eigenschappen in functie van het gewicht besproken.

8.3.1 Relatief berekende waarden ten opzichte van lege profielen

Epoxyschuim heeft een zeer grote dichtheid in vergelijking met de andere schuimen. Daarom wordt er in eerste instantie afzonderlijk naar de toe- of afname van de eigenschappen en naar de toename van het gewicht gekeken. Tabel 14 toont de verschillende relatieve waarden.

Tabel 14: relatieve waarden van de mechanische eigenschappen en gewichten voor profielen gevuld met epoxyschuim

Codering	F max. (%)	Stijfheid (%)	Energieabsorptie (%)	Weerstand tegen axiale belasting (%)	Gemiddelde gewichtstoename (%)
A1RO-XNLHI	18,85	2,02	14,72	-0,58	56,22
A3RO-XNLHI	19,82	3,57	6,67	-11,12	27,73
A3RO-XNLFI	12,16	1,11	2,75	-11,86	44,46
S1RO-XNLHI	14,15	4,10	38,56	-1,69	22,43
S1RO-XNLFI	13,81	4,09	23,64	-2,24	41,80
S3RO-XNLHI	2,441	2,778	7,63	-1,34	7,01
S3RO-XNLFI	6,237	1,334	8,20	-5,16	16,27

Alle absolute en relatieve waarden van de analyses van de met epoxyschuim gevulde profielen kunnen opnieuw in bijlage worden teruggevonden (zie bijlage 23 tot en met 26). Uit tabel 14 blijkt duidelijk de positieve invloed van deze schuimsoort op de relatieve waarden van de energieabsorptie alsook op de maximale kracht tijdens het buigen. Zo verbetert de energieabsorptie van halfge vulde, stalen profielen met een wanddikte van 1,5 mm (S1RO-XNLHI) met maar liefst 38,56%, wanneer de gewichtstoename buiten beschouwing wordt gelaten.

Een ander opvallend gegeven is de slechts geringe toename van de stijfheid bij het inwendig aanbrengen van epoxyschuim. Voor de dikke, stalen profielen is er zelfs sprake van een afname, zelfs wanneer het gewicht nog niet in rekening wordt gebracht. Dat betekent dus dat het profiel stijver was toen het nog niet gevuld was en dat dit schuim in dit geval een zeer negatieve invloed heeft op het oorspronkelijk profiel. Voor de weerstand tegen axiale belasting geldt voor elk gevuld profieltype dat de absolute waarden voor lege profielen groter zijn. Hierbij is dus ook sprake van een zeer nadelige invloed van het schuim.

Door het apart weergeven van de relatieve gewichtstoename van gevulde profielen ten opzichte van lege profielen, worden de enorme gewichtstoenames bij de verschillende profieltypes benadrukt. Bij een halfge vuld, aluminium profiel met een wanddikte van 1,5 mm (A1RO-XNLHI) vindt er maar liefst een gewichtstoename van 56,22% plaats. Het epoxyschuim zorgt in dit geval voor zo een grote extra massa, dat de toenames van stijfheid, energieabsorptie en maximale kracht ruimschoots teniet worden gedaan.

8.3.2 Relatief berekende waarden uitgedrukt ten opzichte van het gewicht

In dit onderdeel worden de eigenschappen voor epoxyschuim uitgedrukt per gewichtseenheid. Zo wordt bepaald of en voor welke profielen het zinvol is om ze eventueel te vullen met dit type schuim. Onderstaande tabel bevat de geanalyseerde testgegevens.

Tabel 15: relatieve waarden mechanische eigenschappen uitgedrukt per gewichtseenheid voor profielen gevuld met epoxyschuim

Codering	F max./gewicht (%)	Stijfheid/gewicht (%)	Energieabs./gewicht (%)	Weerstand tegen axiale belasting/gewicht (%)
A1RO-XNLHI	-24,01	-34,57	-29,26	-36,96
A3RO-XNLHI	-6,19	-18,92	-16,95	-29,72
A3RO-XNLFI	-22,41	-29,90	-29,78	-41,50
S1RO-XNLHI	-6,89	-14,87	9,37	-19,99
S1RO-XNLFI	-19,89	-26,59	-10,53	-32,08
S3RO-XNLHI	-4,85	-10,83	-1,27	-9,91
S3RO-XNLFI	-7,05	-15,33	-9,06	-16,67

Voor de weergave van alle waarden van de eigenschappen, uitgedrukt per massa eenheid, wordt verwezen naar de bijlagen (zie bijlage 27 tot en met 29). Hierboven is zichtbaar dat de eigenschappen uitgedrukt per massa eenheid er voor alle geteste profielen op achteruit gaan, met uitzondering van één profieltype. Deze uitzondering bestaat in de vorm van een halfge vuld, stalen profiel met een wanddikte van 1,5 mm (S1RO-XNLHI). Hierbij neemt de energieabsorptie

per gram gewicht immers toe met 9,37%. Dat is reeds een grote toename en kan niet meer als toevallig beschouwd worden, daar de drie testwaarden van dit profieltype geen uitschieter vertonen. Het nadeel dat hieraan verbonden is, is de afname van de stijfheid per gewichtseenheid.

Ondanks deze afname vormt deze testcombinatie een bruikbare toepassing in de voertuigindustrie. Dankzij de toename van de energieabsorptie met ongeveer 10% kan dit profieltype, mits optimalisatie, eventueel ingezet worden voor impacttoepassingen tijdens ongevallen. Belangrijk hierbij is dat er dan wel minder strenge eisen aan de stijfheid zijn verbonden, vanwege de slechts geringe toename van de absolute stijfheidswaarde voor deze combinatie.

8.4 XPS-schuim

Het derde schuim dat geanalyseerd wordt, is XPS-schuim. Dit schuim is het enige waarvan de dichtheid varieert tussen twee waarden. Tijdens deze testen wordt dus voornamelijk de invloed van de dichtheid van het schuim op de mechanische eigenschappen van de profielen nagegaan. Ook hier wordt er voor gekozen om enkel de relatieve resultaten uitgedrukt ten opzichte van het gewicht te tonen en te bespreken. Opnieuw kunnen alle absolute en relatieve waarden in bijlage aanschouwd worden (zie bijlage 30 tot en met 36). Tabel 16 hieronder toont de procentuele toe- of afname van de verhouding mechanische eigenschap per gewicht ten opzichte van de overeenkomstige lege profielen.

Tabel 16: relatieve waarden mechanische eigenschappen uitgedrukt per gewichtseenheid voor profielen gevuld met XPS-schuim

Codering	F max./gewicht (%)	Stijfheid/gewicht (%)	Energieabs./gewicht (%)	Weerstand tegen axiale belasting/gewicht (%)
A1RO-INLHI	-3,57	-3,59	1,27	-4,92
A1RO-INLFI	-4,98	-5,37	0,62	-6,45
A1RO-INHHI	8,70	-3,98	7,59	-4,78
A3RO-INLHI	6,23	-3,09	-8,02	-0,66
A3RO-INHFI	4,30	-4,87	-4,94	-2,07
S1RO-INHHI	-1,75	-0,28	5,09	-2,21
S1RO-INHFI	-3,70	-3,94	4,52	-3,49
S3RO-INLHI	3,24	0,29	0,79	0,85
S3RO-INHHI	2,19	1,79	3,06	-2,43
S3RO-INLFI	2,85	-4,71	-1,44	-1,77

XPS-schuim beschikt over een lage dichtheid en dus voegt dit type schuim slechts een geringe massa toe aan het profiel. Dat betekent dus dat de mechanische eigenschappen slechts met enkele procenten moeten toenemen om de uiteindelijke verhouding mechanische eigenschap per gewicht te laten stijgen.

Het valt onmiddellijk op dat de relatieve waarden van de stijfheid en de weerstand tegen axiale belasting per kilogram gewicht eerder afnemen dan toenemen.

Daarentegen zijn er echter ook beduidend positieve waarden te onderscheiden voor de maximale kracht en de energieabsorptie. Een halfgevuld, aluminium profiel met een wanddikte van 1,5 mm en met XPS-schuim van hoge dichtheid (A1RO-INHHI) kent een toename van 7,59% voor de energieabsorptie en een toename van 8,7% voor de maximale kracht tijdens de buigtest. Nadelig hierbij is de afname van de stijfheid met $\pm 4\%$ en van de weerstand tegen axiale belasting met $\pm 5\%$.

Van de materiaalcombinaties van tabel 16 zijn er nog twee andere die mogelijk gunstig zijn om toegepast te worden in de voertuigindustrie. Een halfgevuld, stalen profiel met een wanddikte van 1,5 mm en gevuld met XPS-schuim van hoge dichtheid (S1RO-INHHI) beschikt over een goede toename van de energieabsorptie, namelijk 5,09%. Hierbij neemt de stijfheid per gewicht slechts af met 0,28%, wat als verwaarloosbaar gezien kan worden.

Daarnaast heeft ook een halfgevuld, stalen profiel met een wanddikte van 3 mm en met XPS-schuim van hoge dichtheid (S3RO-INHHI) positieve waarden. Zo nemen zowel de maximale kracht, de stijfheid, als de energieabsorptie per gram gewicht toe. Deze toenames zijn echter eerder aan de lage kant en dus niet voldoende om echt van een verbetering te spreken ten opzichte van een leeg profiel. Merk op dat voornamelijk profielen met XPS-schuim van hoge dichtheid goede waarden behalen op de testen.

Wat ook opvalt is de invloed van de dichtheid. Zo is de energieabsorptie voor een halfgevuld, aluminium profiel met een wanddikte van 1,5 mm en gevuld met XPS-schuim van lage dichtheid (A1RO-INLHI) gelijk aan 1,27%. Voor hetzelfde profiel, met dezelfde vulgraad en schuim van hoge dichtheid (A1RO-INHHI) bedraagt de energieabsorptie 7,59%. Er is dus sprake van een verschil van 6,32% procent tussen XPS-schuim van lage of hoge dichtheid.

8.5 MHS-schuim

MHS-schuim is het laatste type schuim dat geanalyseerd wordt. In tegenstelling tot de andere schuimen zijn er voor profielen gevuld met MHS-schuim geen testen op axiale belasting uitgevoerd. Dat is te wijten aan het feit dat het vullen van de profielen vertraging heeft opgelopen, waardoor het uitvoeren van de testen aan de VUB niet meer kon plaatsvinden voor het beëindigen van dit onderzoek.

Zoals voor epoxyschuim het geval is, worden ook hier de relatieve waarden van de eigenschappen en het gewicht afzonderlijk uitgedrukt. Op de tweede plaats wordt dan de procentuele toe- of afname van de eigenschappen in functie van het gewicht getoond.

8.5.1 Relatief berekende waarden ten opzichte van lege profielen

MHS-schuim heeft met 320 kg/m^3 de tweede grootste dichtheid van de onderzochte schuimen. Om nu de toename van het gewicht, alsook de toename van de eigenschappen te benadrukken, worden beiden afzonderlijk weergegeven in de tabel op de volgende pagina (zie tabel 17).

Tabel 17: relatieve waarden van de mechanische eigenschappen en gewichten voor profielen gevuld met MHS-schuim

Codering	F max. (%)	Stijfheid (%)	Energieabsorptie (%)	Gemiddelde gewichtstoename (%)
A1RO-ANLHI	13,36	0,45	20,48	48,06
A3RO-ANLHI	15,21	-3,62	5,33	17,93
A3RO-ANLFI	14,46	-3,40	5,79	23,43
S1RO-ANLHI	10,87	-2,24	19,51	16,64
S1RO-ANLFI	9,89	-0,10	22,11	22,34
S3RO-ANLHI	7,34	-2,84	4,07	6,28
S3RO-ANLFI	3,95	-3,27	1,59	6,94

De absolute en relatieve waarden van de met MHS-schuim gevulde profielen worden in bijlage weergegeven (zie bijlage 37 tot en met 39). Tabel 17 toont dat de maximale kracht en de energieabsorptie toenemen, terwijl echter ook het gewicht van de gevulde profielen beduidend toeneemt. Zo is er bij een halfgevuuld, aluminium profiel met een wanddikte van 1,5 mm (A1RO-ANLHI) sprake van een relatieve gewichtstoename van 48,06%.

De tabel toont ook dat de relatieve waarden van de stijfheid in de meeste gevallen negatief zijn, wat betekent dat de absolute stijfheid vóór het vullen groter was dan ná het vullen. Zo is er sprake van afnames tot 3,62%.

8.5.2 Relatief berekende waarden uitgedrukt ten opzichte van het gewicht

In het laatste gedeelte van deze numerieke analyse worden de eigenschappen voor profielen gevuld met MHS-schuim per gewichtseenheid uitgedrukt in onderstaande tabel.

Tabel 18: relatieve waarden mechanische eigenschappen uitgedrukt per gewichtseenheid voor profielen gevuld met MHS-schuim

Codering	F max./gewicht (%)	Stijfheid/gewicht (%)	Energieabs./gewicht (%)
A1RO-ANLHI	-23,12	-31,81	-14,76
A3RO-ANLHI	-2,24	-18,21	-16,66
A3RO-ANLFI	-7,27	-21,73	-15,21
S1RO-ANLHI	-4,92	-16,16	2,73
S1RO-ANLFI	-10,18	-18,34	-0,03
S3RO-ANLHI	0,96	-8,57	-1,85
S3RO-ANLFI	-3,08	-9,55	-6,77

Alle waarden van de eigenschappen uitgedrukt per massa-eenheid, kunnen in bijlage aanschouwd worden (zie bijlage 40 en 41). Uit de resultaten van bovenstaande tabel blijkt duidelijk dat MHS-schuim geen positieve bijdrage levert aan de mechanische eigenschappen van het geheel van buisprofiel en schuim. Op twee uitzonderingen na zijn zelfs alle waarden negatief. Hiermee presteert MHS-schuim het slechtst van alle vier de geteste schuimen.

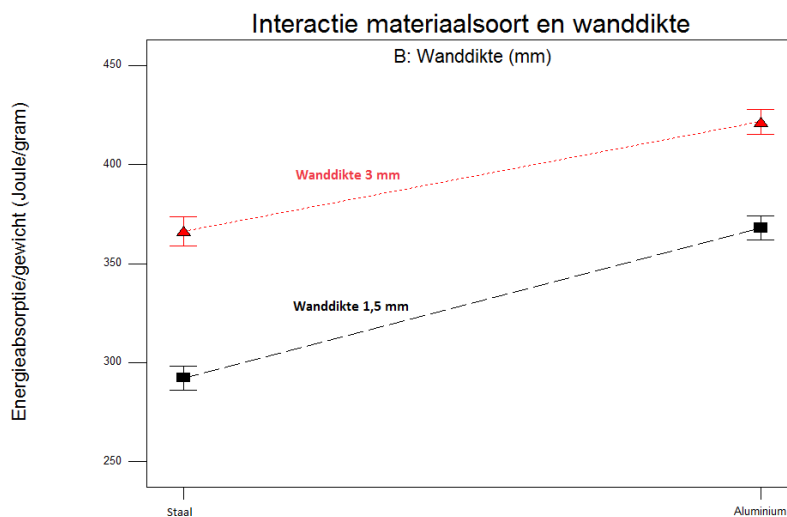
8.6 Bepalen van significante parameters en relaties

In hoofdstuk 7 is reeds uitgelegd op welke wijze eventuele relaties tussen verschillende testparameters bepaald kunnen worden. Dit onderdeel geeft de significante parameters en relaties tussen deze parameters weer.

8.6.1 Significante parameters en relaties voor lege profielen

Op de eerste plaats wordt de interactie tussen parameters van de lege profielen onderzocht. Voor lege profielen is er enkel sprake van de parameters materiaalsoort en wanddikte. Hiervoor geldt dat er voor weerstand tegen axiale belasting per gewicht geen interactie optreedt tussen materiaalsoort en wanddikte.

Daarentegen treedt er wel interactie op tussen deze parameters voor de buigstijfheid per gewichtseenheid. Zo heeft een toename van de wanddikte in het geval van staal een grotere positieve invloed op deze waarde dan in het geval van aluminium. Voor de interactie bij de energieabsorptie per gewicht moet er naar onderstaande afbeelding gekeken worden.



Figuur 60: grafiek van de energieabsorptie per gewicht van lege profielen in functie van de materiaalsoort en de wanddikte

Uit bovenstaande afbeelding kan afgeleid worden dat er in zeer kleine mate interactie optreedt, daar de hellingen van de 2 rechten onderling lichtjes verschillen. Sprake van een opvallende interactie tussen de materiaalsoort en de wanddikte is er echter niet.

8.6.2 Significante parameters en relaties voor gevulde profielen

Voor gevulde profielen bestaan de parameters niet enkel uit materiaalsoort en wanddikte, maar ook uit de vulgraad en voor XPS-schuim ook uit de dichtheid van het schuim. Onderstaande tabel geeft voor elke mechanische eigenschap aan welke parameters en relaties significant zijn.

Tabel 19: overzicht significante parameters en relaties voor gevulde profielen

	Buigstijfheid/gewicht	Energieabsorptie/ gewicht	Weerst. tegen axiale belasting/gewicht
2C PU			
Significante parameters	• materiaalsoort (↓) • wanddikte (↓) • vulgraad (↓)	• materiaalsoort (↑) • wanddikte (↑) • vulgraad (↓)	• materiaalsoort (↑) • vulgraad (↓)
Significante relaties	interactie wanddikte en materiaalsoort (↓)	• interactie materiaalsoort en wanddikte (↑) • interactie wanddikte en vulgraad (↓)	/
Epoxyschuim			
Significante parameters	• materiaalsoort (↓) • wanddikte (↓) • vulgraad (↓)	• wanddikte (↑) • vulgraad (↑) en (↓)	• materiaalsoort (↑) • wanddikte (↓) • vulgraad (↓)
Significante relaties	• interactie vulgraad en wanddikte (↑) • interactie vulgraad en materiaalsoort (↓)	interactie vulgraad en materiaalsoort (↓)	• interactie vulgraad en wanddikte (↑) • interactie vulgraad en materiaalsoort(↓)
XPS-schuim			
Significante parameters	• materiaalsoort (↓) • wanddikte (↓) • vulgraad (↓)	• materiaalsoort (↑) • wanddikte (↑) • dichtheid (↑)	• materiaalsoort (↑) • wanddikte (↓) • vulgraad (↓)
Significante relaties	interactie wanddikte en materiaalsoort (↓)	• interactie materiaalsoort en wanddikte (↑) • interactie vulgraad en wanddikte (↓) • interactie materiaalsoort en dichtheid (↑)	/
MHS-schuim			
Significante parameters	• materiaalsoort (↑) • vulgraad (↓)	• materiaalsoort (↑) • wanddikte (↑) • vulgraad (↓)	/
Significante relaties	• interactie materiaal - soort en wanddikte(↓) • interactie vulgraad en wanddikte (↓) • interactie vulgraad en materiaalsoort (↓)	interactie vulgraad en materiaalsoort (↓)	/

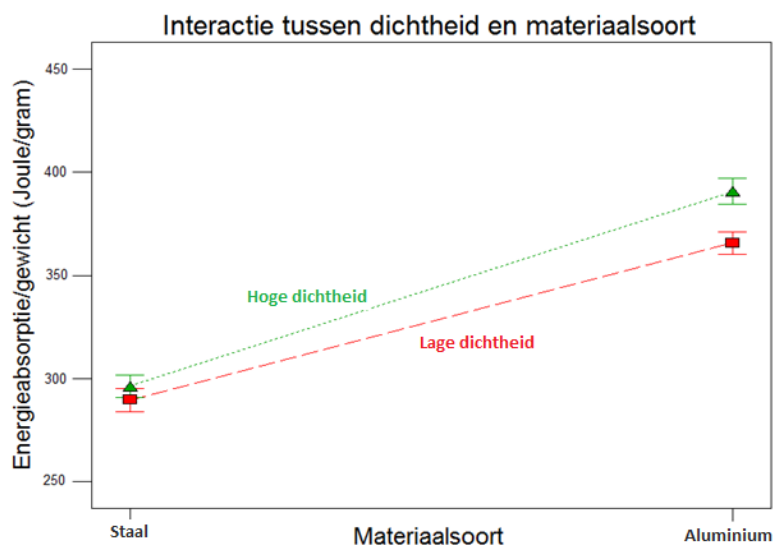
Wanneer nu gezegd wordt dat een bepaalde parameter significant is voor een bepaalde eigenschap, wordt bedoeld dat deze parameter de desbetreffende mechanische eigenschap per gewicht beïnvloedt. Dus wanneer de vulgraad voor de energieabsorptie per gram gewicht significant is, zorgt deze parameter voor een toe- of afname van het energieabsorberend vermogen per gram gewicht.

Als er daarentegen sprake is van een significante interactie tussen de vulgraad en de materiaalsoort, dan geldt dat de invloed van bijvoorbeeld een halve vulling een ander effect teweeg brengt voor een stalen, dan voor een aluminium profiel. Op gelijkaardige wijze kunnen ook de andere significante relaties geïnterpreteerd worden.

Elke significante parameter en relatie kan nu voor elk schuim en elke mechanische eigenschap aangetoond worden door middel van grafieken, geconstrueerd door DesignEase. Daar dat echter tot een onoverzichtelijk geheel leidt, wordt er besloten om slechts één significante parameter en één significante relatie uit te werken. Dat is veroorloofd, aangezien tabel 19 reeds weergeeft welke parameters en relaties significant zijn. De weergave hiervan in grafieken heeft als enig voordeel dat er een grafisch verloop van de relatie waargenomen kan worden.

Tabel 19 toont aan dat er voor profielen gevuld met XPS-schuim sprake is van invloed van de dichtheid van het schuim op de energieabsorptie per gram gewicht. Deze invloed wordt ook bevestigd door de vergelijking te maken met de relatieve waarden uit tabel 16. Zo is de energieabsorptie voor een halfgevuld, aluminium profiel met een wanddikte van 1,5 mm en gevuld met XPS-schuim van lage dichtheid (A1RO-INLHI) gelijk aan 1,27%. Voor hetzelfde profiel, met dezelfde vulgraad en schuim van hoge dichtheid (A1RO-INHHI) bedraagt de energieabsorptie 7,59%.

Daarnaast geeft bovenstaande tabel ook een significante relatie tussen de dichtheid en de materiaalsoort weer voor de energieabsorptie per gram gewicht van profielen gevuld met XPS-schuim. Hieronder wordt een grafiek van DesignEase afgebeeld die deze invloed weergeeft (zie figuur 61).

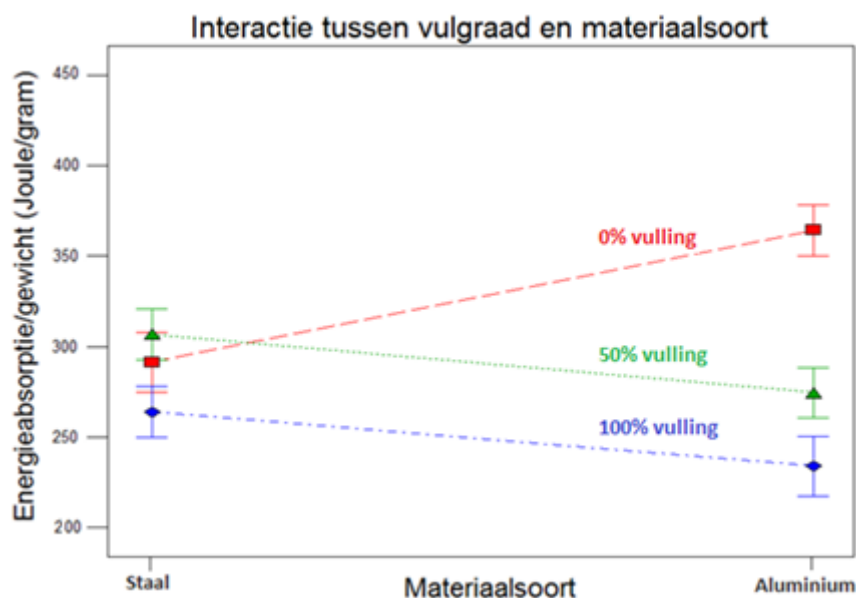


Figuur 61: grafische weergave DesignEase van de interactie tussen dichtheid en materiaalsoort

De rechte van de lage dichtheid (rood) loopt niet evenwijdig met de rechte van de hoge dichtheid (groen) en daarom is er sprake van interactie tussen de dichtheid en de materiaalsoort. Dit principe van evenwijdige of snijdende rechten werd reeds in hoofdstuk 7 uiteengezet. Daarnaast kan met bovenstaande grafiek ook de significantie van enkel de parameter dichtheid aangetoond worden. Zo ligt de groene lijn beduidend hoger dan de rode. Dat betekent dat zowel stalen als aluminium profielen die opgevuld zijn met hoge dichtheid XPS-schuim, steeds een hogere energieabsorptie per gram gewicht hebben dan profielen opgevuld met lage dichtheid XPS-schuim.

Merk op dat de dichtheid van de twee types XPS-schuim slechts 5 kg/m^3 verschilt en dat het dus zeer zinvol is om verder onderzoek te verrichten naar een optimale dichtheid van het schuim. Zo behoort een verdere toename van de energieabsorptie per gram gewicht tot een realistische mogelijkheid voor het geval van een optimale dichtheid.

Tot slot wordt ook nog de interactie tussen de vulgraad en de materiaalsoort voor de energieabsorptie per gram gewicht van profielen gevuld met epoxyschuim weergegeven (zie figuur 62).



Figuur 62: grafische weergave interactie tussen vulgraad en materiaalsoort voor epoxyschuim, bij een wanddikte van 1,5 mm

Uit bovenstaande grafiek blijkt duidelijk dat er sprake is van interactie. Zo snijden de lijnen van gevulde profielen (groen en blauw) de lijn voor lege profielen (rood). Hieruit kan tevens de toename van de energieabsorptie per gram gewicht van een halfgevuuld, stalen profiel afgeleid worden. Deze toename kan in de grafiek aanschouwd worden wanneer er naar de linker punten op de grafiek wordt gekeken. Merk op dat de overige parameter, namelijk wanddikte, wordt vastgelegd op 1,5 mm voor het opstellen van de grafiek. Het feit dat de groene lijn aan de linker kant boven de rode lijn gepositioneerd is, visualiseert nu deze toename.

8.6.3 Invloed van de vulgraad op de testwaarden

De invloed van de vulgraad op de mechanische eigenschappen per gewichtseenheid wordt apart besproken door middel van enkele grafieken, opgesteld met DesignEase. De grafieken die besproken worden, zijn gebaseerd op de testresultaten van 2C PU. De conclusies die hieruit afgeleid worden, gelden echter ook gedeeltelijk voor XPS-, MHS- en epoxyschuim. Merk op dat de 50%-vulling van profielen gevuld met 2C PU niet exact 50% bedraagt, maar fluctueert tussen 50% en 60% als gevolg van het veranderlijk opschuimen tijdens de productie. Daar het gewicht bij een 60%-vulling iets hoger ligt dan bij een 50%-vulling, liggen de eigenschappen per gewichtseenheid iets lager voor de 60%-vulling.

Op de eerste plaats worden in bijlage vier grafieken getoond die de invloed van de vulgraad op de stijfheid, de energieabsorptie en de weerstand tegen axiale belasting grafisch weergeven (zie bijlage 42 tot en met 45). Deze weergave gebeurt steeds voor aluminium profielen met een wanddikte van 1,5 mm. Voor andere profieltypes verschillen de grafieken dan weer, maar dit onderdeel heeft als doel om een overkoepelend inzicht te geven in de invloed van de vulgraad.

Uit bijlage 42 en 45 blijkt dat naarmate de vulgraad toeneemt, de buigstijfheid en de weerstand tegen axiale belasting per gewichtseenheid afnemen. Hieruit blijkt nogmaals dat het weinig zinvol is om inwendig schuim aan te brengen in de buisprofielen voor het laten toenemen van deze eigenschappen. Dit principe is tevens geldig voor elke geteste combinatie van profieltype en schuimsoort.

Bijlage 43 daarentegen toont een ander beeld. Zo is er sprake van een kleine toename van de energieabsorptie per gram gewicht voor profielen gevuld met 2C PU. Voor een volledige vulling van hetzelfde profieltype wordt echter een lagere waarde bekomen dan voor een halfgevuuld of zelfs een leeg profiel. Deze vaststelling kan ook gedaan worden voor een profieltype van epoxyschuim en voor meerdere profieltypes van XPS-schuim. Dat komt dus overeen met de relatieve waarden van de energieabsorptie van het voorgaande deel. Dit gegeven betekent dat voornamelijk het schuim ter hoogte van de impact bijdraagt tot een groter energieabsorberend vermogen. Dat is logisch, daar het schuim op de overige posities weinig tot niet vervormt en dus ook geen energie absorbeert.

Tot slot geldt voor MHS-schuim, en alle andere profieltypes van 2C PU, XPS- en epoxyschuim waarvoor negatieve relatieve waarden van de energieabsorptie gevonden werden, een verloop zoals in bijlage 44 wordt weergegeven. Hierbij is er enkel sprake van een afname van de energieabsorptie per gram gewicht bij een toenemende vulgraad.

8.7 Verklaring van de bekomen resultaten

Bij aanvang van dit onderzoek werd er van uitgegaan dat er geen grootse resultaten behaald zouden worden voor de stijfheid en de weerstand tegen axiale belasting. Daarentegen werden er interessante resultaten verwacht in de vorm van toenames van de energieabsorptie per gram gewicht. Met toenames wordt hier dan bedoeld op stijgingen van minstens 5%, maar het meest wenselijk zijn natuurlijk stijgingen van $\pm 10\%$ of meer. De stijfheid en weerstand tegen axiale

belasting dienden echter ook onderzocht te worden om de invloed van het schuim op deze eigenschappen na te gaan. Zo is een toename van de energieabsorptie slechts zinvol wanneer de stijfheid en weerstand tegen axiale belasting ongeveer gelijk blijven of in het gunstigste geval toenemen.

Uit de geanalyseerde resultaten blijkt dat er wel degelijk sprake is van stijgingen van minstens 5% voor de energieabsorptie (9,37% voor S1RO-XNLHI). Ook de maximale kracht die optreedt tijdens de buigtesten neemt in sommige gevallen beduidend toe. De stijfheid en de weerstand tegen axiale belasting daarentegen kennen geen belangrijke toenames. Deze vaststellingen worden hieronder verder verklaard.

8.7.1 Verklaring voor de waarden van de energieabsorptie

Uit de resultaten blijkt dat de energieabsorptie per gram gewicht voor XPS- en epoxyschuim verschillende malen gekenmerkt wordt door een significante toename. Dat is namelijk het geval voor de volgende profieltypen:

- I-S1RO-XNLHI (9,37%)
- I-A1RO-INHHI (7,59%)
- I-S1RO-INHHI (5,09%)

Deze toenames voor XPS-schuim zijn te wijten aan het feit dat het schuim zeer goed energie kan absorberen. Zo bestaat het schuim uit een complex netwerk van luchtholten en membranen die zeer grote vervormingen toelaten. De toename voor het profiel gevuld met epoxyschuim dankt de toename voornamelijk aan de chemische vernetting van de thermohardende kunststof epoxy.

Wanneer er verder onderzoek wordt gedaan in de richting van bovenstaande profielcombinaties, is het mogelijk dat er nog hogere waarden bekomen worden. Merk op dat vooral het XPS-schuim met een hoge dichtheid positieve resultaten teweeg brengt. Het bepalen van een optimale dichtheid leidt waarschijnlijk tot verbeterde resultaten. Let hierbij op dat er volgens S.H. Goods et al. [1] een dichtheid van het schuim bestaat waarvoor de energieabsorptie daalt bij het verder toenemen van de dichtheid.

8.7.2 Verklaring voor de waarden van de weerstand tegen axiale belasting

De grootste relatieve toename van de weerstand tegen axiale belasting per kilogram gewicht bedraagt slechts 0,85%, wat volgens de theorie te verwachten is. De weerstand tegen axiale belasting wordt immers in belangrijke mate bepaald door het oppervlaktetraagheidsmoment. Zo wordt de weerstand tegen knik, wat ook een vorm van weerstand tegen axiale belasting is, door onderstaande formule bepaald.

$$F = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

Vergelijking 4: formule weerstand tegen knik

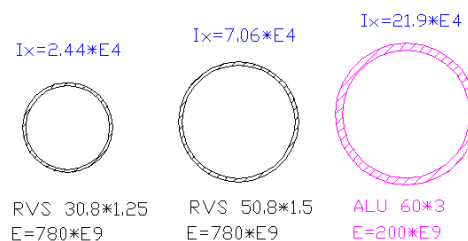
Hieruit blijkt duidelijk dat des te groter het oppervlaktetraagheidsmoment, des te groter de weerstand tegen knik en dat geldt ook voor de weerstand tegen axiale belasting. Door het vergroten van de dwarsdoorsnede van het profiel, zou dus meer weerstand tegen axiale belasting gecreëerd worden dan door het opvullen met schuim. De weerstand tegen axiale belasting voor gevulde profielen wordt gevormd door de som van de weerstand van het lege profiel en de weerstand van het desbetreffende schuim.

8.7.3 Verklaring voor de waarden van de buigstijfheid

Net zoals voor de weerstand tegen axiale belasting het geval is, wordt ook de grootte van de buigstijfheid hoofdzakelijk bepaald door het oppervlaktetraagheidsmoment. Daardoor bedraagt de grootste relatieve toename van de stijfheid per kilogram gewicht slechts 1,79%. Voor eventuele afnames van de relatieve stijfheid gelden dezelfde mogelijke oorzaken als voor de afnames van de relatieve weerstand tegen axiale belasting. In de volgende alinea wordt een betere oplossing gegeven voor het laten toenemen van de stijfheid en de weerstand tegen axiale belasting.

De stijfheid en de weerstand tegen axiale belasting nemen sneller toe door de wanddikte te vergroten dan door het inwendig aanbrengen van schuim. Het schuim waarmee de buisprofielen worden opgevuld, beschikt in de meeste gevallen over een lage stijfheid, veel lager dan voor staal of aluminium het geval is. Dat is zeker zo voor XPS-schuim en 2C PU. Epoxy- en MHS-schuim hebben dan weer een veel grotere stijfheid dan XPS-schuim en 2C PU, maar mede dankzij luchtholten ligt deze stijfheid steeds beduidend lager dan die van staal of aluminium.

Door een toename van de wanddikte wordt er bovendien materiaal aan de buitenzijde van het profiel toegevoegd, waardoor de dwarsdoorsnede, en dus ook het traagheidsmoment, toeneemt. De hoge dichtheid van staal daarentegen, zorgt op zijn beurt wel voor een grotere gewichtstoename. Hieronder wordt dit principe geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld (zie figuur 63).



Figuur 63: invloed van wanddikte en buisdiameter op het oppervlaktetraagheidsmoment [35]

Bovenstaande afbeelding toont dat het traagheidsmoment van de rechter buisdoorsnede ongeveer 9 maal groter is dan die van de linker buis. De wanddikte neemt echter slechts toe met een factor 2,4 en de buisdiameter slechts met een factor 2. Toch neemt het traagheidsmoment met een factor 9 toe en dat is te wijten aan het feit dat de dwarsdoorsnede meer dan evenredig. Dit principe is dus een betere oplossing om de stijfheid en ook de weerstand tegen axiale belasting te laten toenemen wanneer een grotere buitendiameter is toegelaten. Profielen in bestaande toepassingen mogen echter meestal niet toenemen in omvang, vanwege een beperkte inbouwruimte.

9 Besluit

Uit dit onderzoek kan geconcludeerd worden dat het zinvol is om verder onderzoek te verrichten naar de mogelijkheden van deze techniek op het gebied van energieabsorptie. Voor de energieabsorptie per gram gewicht worden er immers een drietal gunstige profielcombinaties met een voldoende significante toename aangetroffen, namelijk:

- stalen profiel met een wanddikte van 1,5 mm en halfgevuld met epoxyschuim (+9,37%);
- aluminium profiel met een wanddikte van 1,5 mm en halfgevuld met XPS-schuim van hoge dichtheid (+7,59%);
- stalen profiel met een wanddikte van 1,5 mm en halfgevuld met XPS-schuim van hoge dichtheid (+5,09%).

Daarentegen bedraagt de grootste relatieve toename van de weerstand tegen axiale belasting per kilogram gewicht slechts 0,85% en de grootste relatieve toename van de stijfheid per kilogram gewicht slechts 1,79%. Deze techniek is dus totaal geen oplossing voor het laten toenemen van deze twee mechanische eigenschappen. De maximale kracht per gewicht die tijdens de buigtesten optreedt, neemt dan weer in sommige gevallen beduidend toe voor 2C PU en XPS-schuim.

Uit de resultaten blijkt bovendien dat MHS-schuim geen positieve bijdrage levert aan de mechanische eigenschappen van het geheel van buisprofiel en schuim. Op twee uitzonderingen na zijn zelfs alle relatieve waarden negatief. Hiermee presteert MHS-schuim het slechtst van alle vier de geteste schuimen.

De doelstelling van dit onderzoek was het behalen van toenames van minstens 10% voor de stijfheid, de energieabsorptie en de weerstand tegen axiale belasting per gewichtseenheid. Uit het onderzoek blijkt echter dat een dergelijke toename met dit principe niet mogelijk is voor de stijfheid en weerstand tegen axiale belasting. Voor de energieabsorptie per gram gewicht wordt de doelstelling wel ongeveer behaald. Merk op dat een toename van de energieabsorptie slechts zinvol is wanneer de stijfheid en weerstand tegen axiale belasting ongeveer gelijk blijven of zelfs toenemen. Zo kent een aluminium profiel met een wanddikte van 1,5 mm dat halfgevuld is met XPS-schuim van hoge dichtheid een afname van de stijfheid met $\pm 4\%$ en een afname van de weerstand tegen axiale belasting met $\pm 5\%$. Dat is dus een groot nadeel dat aan de toename van de energieabsorptie verbonden is.

Uit de berekeningen blijkt ook dat naarmate de vulgraad toeneemt, de buigstijfheid en de weerstand tegen axiale belasting per gewichtseenheid afnemen. Daarentegen is er over het algemeen sprake van een kleine toename van de energieabsorptie per gewicht voor halfgepulde profielen. Voor een volledige vulling van hetzelfde profieltype wordt echter een lagere waarde bekomen. Deze vaststelling kan gedaan worden voor één profieltype van epoxyschuim en voor meerdere profieltypes van XPS-schuim en 2C PU. Dit gegeven betekent dat voornamelijk het schuim ter hoogte van de impact bijdraagt tot een groter energieabsorberend vermogen. Dat komt doordat het schuim op de overige posities weinig tot niet vervormt en dus ook geen energie absorbeert.

Wat ook opvalt is de invloed van de dichtheid. Zo is de energieabsorptie voor een halfgevuld, aluminium profiel met een wanddikte van 1,5 mm en gevuld met XPS-schuim van lage dichtheid (37 kg/m^3) gelijk aan 1,27%. Voor hetzelfde profiel, met dezelfde vulgraad en schuim van hoge dichtheid (42 kg/m^3) bedraagt de energieabsorptie 7,59%. Het verhogen van de dichtheid van XPS-schuim met slechts 5 kg/m^3 brengt dus reeds merkbare verschillen teweeg voor het energieabsorberend vermogen.

Wanneer nu de optimale dichtheid van dit specifieke schuim gevonden wordt, wordt tevens het optimaal energieabsorberend vermogen bekomen. Verder onderzoek dient verricht te worden in de richting van de drie eerder vermelde profielcombinaties. Bijkomend kunnen er in verdere onderzoeken nog verbeteringen worden doorgevoerd door profielen met een minimale wanddikte te testen.

Tot slot wordt besloten dat deze techniek niet gebruikt kan worden voor een toename van de buigstijfheid of de weerstand tegen axiale belasting. Zo is in het onderdeel *Verklaring van de resultaten* reeds aangetoond dat het zinnvoller is om de wanddikte van het buisprofiel te vergroten voor een toename van deze twee eigenschappen. Deze eigenschappen worden immers hoofdzakelijk bepaald het oppervlaktetraagheidsmoment en dus ook door de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het profiel.

Literatuurlijst

- [1] S. H. Goods, C. L. Neuschwanger, C. Henderson, and D. M. Skala, "Mechanical properties and energy absorption characteristics of a polyurethane foam," Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), Mar. 1997.
- [2] S. Mulders, "Populieren, een onderzoek naar de constructieve eigenschappen en mogelijkheden voor de bouw | WoodChallenge," *Technische Universiteit Eindhoven*, 2008. [Online]. Available: <http://www.woodchallenge.nl/Populieren>. [Accessed: 07-Apr-2014].
- [3] A.-M. Harte, N. A. Fleck, and M. F. Ashby, "Energy absorption of foam-filled circular tubes with braided composite walls," *Éditions Sci. médicales Elsevier SAS*, pp. 31–50, 2000.
- [4] Azom, "Determination of Impact Energy Using the Charpy Test," *Azom*, 2013. [Online]. Available: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2763>.
- [5] M. Negahban, "Buckling of Columns," *University of Nebraska*, 2000. [Online]. Available: <http://emweb.unl.edu/NEGAHBAN/Em325/21-Buckling of columns/Buckling of columns.htm>.
- [6] V. A. Ciubotariu, "Crashworthiness improvement of hexagonal tubular structures by using tailor welded blanks," *DAAAM Int.*, vol. 23, pp. 0099–0102, 2012.
- [7] European Commision, "Reducing car weight and cutting down greenhouse gas emissions," 2012.
- [8] F. I. Saunders and R. H. Wagoner, "The use of tailor welded blanks in automotive applications - GetInfo," *Simul. Mater. Process. Theory, Methods Appl.*, pp. 157–164, 1995.
- [9] ThyssenKrupp, "ThyssenKrupp AG - InCar - Der innovative Lösungsbaukasten von ThyssenKrupp," *ThyssenKrupp*. [Online]. Available: http://incar.thyssenkrupp.com/4_07_080_SW04_Verstaerkungsring.html?lang=de. [Accessed: 27-Feb-2014].
- [10] L. Patberg and U. Kneiphoff, "Tailored Tubes Applications for Steel Body Frames - ATZ online," *ATZ worldwide eMagazines Edition*, 2002. [Online]. Available: <http://www.atzonline.com/Article/1037/Tailored-Tubes-Applications-for-Steel-Body-Frames.html>. [Accessed: 26-Feb-2014].
- [11] M. Rehse, "Flexible Rolling of Tailor Rolled Blanks - Innovative light weight design in steel."
- [12] A. Burkhart and D. Cramer, "Download Reprint of ACCE 2005 paper FINAL - ebookxp.com," *SPE Automotive Composites Conference & Exposition*. USA, p. 9, 2005.
- [13] A. M. Helmenstine, "Foam Definition - Definition of Foam." [Online]. Available: <http://chemistry.about.com/od/chemistryglossary/g/Foam-Definition.htm>. [Accessed: 01-Mar-2014].
- [14] A.-M. Harte, N. A. Fleck, and M. F. Ashby, "Fatigue failure of an open cell and a closed cell aluminium alloy foam," *Acta Mater.*, vol. 47, no. 8, pp. 2511–2524, Jun. 1999.

- [15] A. Niknejad, S. A. Elahi, and G. H. Liaghat, "Experimental investigation on the lateral compression in the foam-filled circular tubes," *Mater. Des.*, vol. 36, pp. 24–34, Apr. 2012.
- [16] R. D. Baixo, "Polyurethane Foam With High Support Factor and Airflow," Sao Paulo (Brazil).
- [17] Polyurethane Foam Association, "Flexible Polyurethane Foam: Industry at a Glance," 2010.
- [18] S. S. Samsudin, "Development and characterization of epoxy syntactic foam filled with epoxy hollow spheres," *Express Polym. Lett.*, vol. 5, no. 7, pp. 653–660, May 2011.
- [19] K. Sivertsen, "Polymer foams," 2007.
- [20] K. Feichtinger, W. Ma, and T. Touzot, "NOVEL THERMOPLASTIC FOAM STRUCTURAL CORE MATERIAL WITH ENHANCED THERMOFORMABILITY, FATIGUE ENDURANCE AND ELEVATED TEMPERATURE PROPERTIES." [Online]. Available: <http://65.54.113.26/Publication/11998069/novel-thermoplastic-foam-structural-core-material-with-enhanced-thermoformability-fatigue>. [Accessed: 26-Feb-2014].
- [21] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, and H. N. G. Wadley, *Metal Foams - A Design Guide*. Butterworth Heinemann, 2000.
- [22] J. Banhart and J. Baumeister, "Deformation characteristics of metal foams," *J. Mater. Sci.*, vol. 33, no. 6, pp. 1431–1440, Mar. 1998.
- [23] P. Moongkhamklang, V. S. Deshpande, and H. N. G. Wadley, "The compressive and shear response of titanium matrix composite lattice structures," *Acta Mater.*, vol. 58, no. 8, pp. 2822–2835, May 2010.
- [24] D. L. WEAIRE, "On the Road Again: Metal Foams Find Favor." American Institute of Physics, pp. 37–42, 2002.
- [25] H. Göhler, U. Jehring, K. Kuemmel, J. Meinert, P. Quadbeck, G. Stephani, B. Kieback, W. Hungerbach, and J. Hübelt, "Metallic hollow sphere structures - status and outlook." p. 9.
- [26] L. Vendra and A. Rabiei, "Evaluation of modulus of elasticity of composite metal foams by experimental and numerical techniques," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, no. 7–8, pp. 1784–1790, Mar. 2010.
- [27] J. Banhart and C.-J. Yu, "Mechanical Properties of Metallic Foams." pp. 37 – 48.
- [28] L. HENAN GANG IRON AND STEEL CO., "EN 10025-2 S235JR high strength structural steel plate-HENAN GANG IRON AND STEEL CO., LTD," *HENAN GANG IRON AND STEEL CO., LTD*, 2013. [Online]. Available: <http://www.steelspecs.com/EN10025-2/EN10025-2S235JRSTEELPLTAE.html>. [Accessed: 07-Apr-2014].
- [29] Nedal Aluminium, "Alloy data sheet EN AW-6060," 2005.
- [30] GARFIELD ALUMINIUM BV, "EN AW-6060 (AlMgSi)," *GARFIELD ALUMINIUM BV*, 2009. [Online]. Available: <http://www.garfield.nl/nl/x/1110>.
- [31] Henkel, "Terocore 1015 - Henkel," *Henkel*. [Online]. Available: <http://www.henkelna.com/product-search-1554.htm?nodeid=8797991501825>. [Accessed: 17-Apr-2014].

- [32] J. Baeten, "Basis Regeltechniek." pp. 4.1 – 4.17, 2005.
- [33] SiliconFarEast, "Design of Experiments: Factorial Experiment Design Tables," *SiliconFarEast*, 2004. [Online]. Available: <http://www.siliconfareast.com/factorialtables.htm>.
- [34] MoreSteam, "Design of Experiments (DOE)," *MoreSteam*. [Online]. Available: <https://www.moresteam.com/toolbox/design-of-experiments.cfm>. [Accessed: 07-Apr-2014].
- [35] J. Heynen, "No Title," *Scarlet*, 2003. [Online]. Available: <http://home.scarlet.be/yuc-janheyne/sterkte.htm>.

Bijlagenlijst

Bijlage 1: datafiche Terocore-1401CA-25 (epoxyschuim).....	97
Bijlage 2: datafiche IMPAXX 300 (XPS-schuim)	99
Bijlage 3: datafiche IMPAXX 700 (XPS-schuim)	100
Bijlage 4: technische gegevens van de actuator	101
Bijlage 5: positie en kracht i.f.v. de tijd voor $P = 0$ en $I = 1,0$ (testprofiel 1)	102
Bijlage 6: positie en kracht i.f.v. de tijd voor $P = -5,0$ en $I = 0,50$ (testprofiel 2).....	102
Bijlage 7: positie en kracht i.f.v. de tijd voor $P = +5,0$ en $I = 0,50$ (testprofiel 3)	103
Bijlage 8: technische tekening van opstelling met axiaal kogelgewrichtslager	103
Bijlage 9: absolute waarden van de buigtest voor lege profielen	104
Bijlage 10: gemiddelde absolute waarden van de buigtest voor lege profielen	104
Bijlage 11: gemiddelde absolute waarden energieabsorptie voor lege profielen	105
Bijlage 12: gemiddelde absolute waarden weerstand tegen axiale belasting voor lege profielen	105
Bijlage 13: waarden van de buigtest per kilogram gewicht voor lege profielen	106
Bijlage 14: waarden van de energieabsorptie per gram gewicht voor lege profielen.....	106
Bijlage 15: waarden van de weerstand tegen axiale belasting per kilogram gewicht voor lege profielen	107
Bijlage 16: absolute waarden van de buigtest voor 2C PU	107
Bijlage 17: relatieve waarden van de buigtest voor 2C PU.....	108
Bijlage 18: waarden van de buigtest per kilogram gewicht voor 2C PU.....	109
Bijlage 19: absolute en relatieve waarden van de energieabsorptie voor 2C PU	110
Bijlage 20: waarden van de energieabsorptie per gram gewicht voor 2C PU	111
Bijlage 21: absolute en relatieve waarden van de weerstand tegen axiale belasting voor 2C PU	112
Bijlage 22: waarden van de weerstand tegen axiale belasting per kilogram gewicht voor 2C PU	113
Bijlage 23: absolute waarden van de buigtest voor epoxyschuim.....	114
Bijlage 24: relatieve waarden van de buigtest voor epoxyschuim	115
Bijlage 25: absolute en relatieve waarden van de energieabsorptie voor epoxy	116
Bijlage 26: absolute en relatieve waarden van de weerstand tegen axiale belasting voor epoxyschuim	117
Bijlage 27: waarden van de buigtest per kilogram gewicht voor epoxyschuim	118
Bijlage 28: waarden van de energieabsorptie per gram gewicht voor epoxyschuim.....	119
Bijlage 29: waarden van de weerstand tegen axiale belasting per kilogram gewicht voor epoxyschuim	120
Bijlage 30: absolute waarden van de buigtest voor XPS-schuim.....	121

Bijlage 31: relatieve waarden van de buigtest voor XPS-schuim	122
Bijlage 32: absolute en relatieve waarden van de energieabsorptie voor XPS-schuim.....	123
Bijlage 33: absolute en relatieve waarden van de weerstand tegen axiale belasting voor XPS-schuim	124
Bijlage 34: waarden van de buigtest per kilogram gewicht voor XPS-schuim	125
Bijlage 35: waarden van de energieabsorptie per gram gewicht voor XPS-schuim.....	126
Bijlage 36: waarden van de weerstand tegen axiale belasting per kilogram gewicht voor XPS-schuim	127
Bijlage 37: absolute waarden van de buigtest voor MHS-schuim.....	128
Bijlage 38: relatieve waarden van de buigtest voor MHS-schuim	129
Bijlage 39: absolute en relatieve waarden van de energieabsorptie voor MHS-schuim.....	130
Bijlage 40: waarden van de buigtest per kilogram gewicht voor MHS-schuim	131
Bijlage 41: waarden van de energieabsorptie per gram gewicht voor MHS-schuim.....	132
Bijlage 42: grafische weergave van de invloed van de vulgraad op de buigstijfheid	132
Bijlage 43: grafische weergave van de invloed van de vulgraad op de energieabsorptie voor profielen met een positieve relatieve toename (2C PU)	133
Bijlage 44: grafische weergave van de invloed van de vulgraad op de energieabsorptie voor profielen met een negatieve relatieve toename (MHS-schuim)	133
Bijlage 45: grafische weergave van de invloed van de vulgraad op de weerstand tegen axiale belasting.....	134

Terocore-1401CA-25

Two Component Structural Foam for Increasing
Stiffness, Strength, Fatigue and Vibration Behaviour
Pumpable, Curing at Room Temperature

Basis: Epoxy Resin

Issue: 2005-03-16

Product Description

Terocore-1401CA-25 is a two component, slightly expanding, high strength, patented structural foam based on epoxy resins with high compression resistance and low density. Terocore-1401CA-25 is free of solvents, PVC and isocyanates. The material cures at room temperature by chemical reaction of component A and B. Heating both components up to 50°C will accelerate the chemical reaction. Dependent on the geometry and amount of material, the degree of foam can vary.

Application Areas

Terocore-1401CA-25 contains hollow microspheres, by which its stiffness, strength and fatigue limit are increased. The material is used e.g. for cavities, metal sheets and structural parts. Terocore-1401CA-25 can be applied from cartridges for prototypes or repair jobs and from drums for line production.

Technical Data

	Terocore-1401-AA-25 Component A	Terocore-1401BC-AA-25 Component B
Colour:	dark grey	white / light grey
Odour:	characteristic	of amines
Density:	approx. 0,84 g/cm ³	approx. 0,56 g/cm ³
Flowmeter at 20°C:	30 s/20 g	26 s/20 g
Nozzle:	4 mm	
Pressure:	2 bar	
Mixing ratio by volume:	2	: 1
	Mixture (Component A + B) Terocore-1401CA-25	
Colour:	grey	
Odour:	no smell after full curing	
Potlife according to Bohlin (oscillating)		
at 20°C:	90 min	
at 30°C:	60 min	
Density (cured):	approx. 0,6 g/cm ³	
Compressive strength:	15–20 MPa	
E-Modulus:	700±50 MPa	
Poisson's ratio:	0,22–0,26	
Volume change:	0–30 % (depending on the curing conditions/volume/geometry)	
Water absorption:	< 0,5 % weight gain	
Test conditions:	24 hours at 98 % humidity and 40°C	
In service temperature rang	-40°C to 90°C	
Short exposure (up to 1h):	110°C	

Preliminary remark

Prior to application it is necessary to read the Safety Data Sheet for information about precautionary measures and safety recommendations. Also, for chemical products exempt from compulsory labelling, the relevant precautions should always be observed.

Pretreatment of the substrates

The surfaces for plane application must be dry and free of oil, grease and dust. For cleaning Cleaner-D or Cleaner-FL from Henkel Teroson can be used.

Application from cartridges

Terocore-1401CA-25 is available in cartridges in a mixing ratio of 2:1 (by volume). For application unscrew the upper cap with the attached cap (with the quadratic opening) and screw on the attached mixer to the thread. (Important: use only original mixer, otherwise no exact mixing can be guaranteed!)

When used in cavities and for structural parts the parts to be strengthened are completely or partially filled with Terocore-1401CA-25. (Important: Terocore-1401CA-25 expands approx. 0–30 %!) If necessary a hole with a diameter of 7–14 mm should be drilled, through which the material can be applied. The openings are finally closed with a tape. Functional openings, which still have to be used after filling with Terocore-1401CA-25 have to be kept free by suitable measures prior to inserting the material. Possibly the openings can be laid bare prior to final curing of the foam.

If there is still material in the cartridges after application of the needed amount of Terocore-1401CA-25 remove the mixer, clean the material outlets thoroughly, insert the safety plug and screw on the caps (with the round opening) again. The remaining material can be used later by screwing on a new mixer.

Curing

Terocore-1401CA-25 cures without additional exterior heat only by chemical reaction after mixing component A and B at room temperature. Attention: With larger amounts of Terocore-1401CA-25, this reaction can lead to a strong development of heat. The development of heat and consequently the hardening time as well as the degree of expansion are determined by the application temperature, the geometry of the body to be filled and the amount of material used. With thin layers on flat surfaces, the development of heat and expansion is minimal. With larger flat surfaces, the material temperature can reach up to 160°C. The increase in volume is then about 30%. It may then be necessary to wear protective gloves when handling or transporting the parts, which have been filled. After about 8 to 24 hours (depending on temperature, application, amount inserted and free surface), the material is set hard.

Cleaning

Fresh, non-cured material should immediately be removed with a dry rag from the substrates or the cartridge and gun tips. Residues of Terocore-1401CA-25 may be removed with suitable solvents (e.g. naphtha). The cured product can only be removed mechanically.

Storage

Frost-sensitive	conditionally, extended storage at low temperatures can lead to crystallisation of component A, though this can be reversed by a short period of warming to 60°C
Recommended storage temp.	15°C to 25°C
Shelf-life	Cartridge 12 months

Packaging

Universal-Cartridge	175 ml
---------------------	--------

Product Information



Tech Data Sheet

IMPAXX™ 300 Energy Absorbing Foam

IMPAXX™ 300 Energy Absorbing Foam is a higher-performing, and lower-cost alternative to traditional energy absorbing solutions such as polyurethane and expanded polypropylene bead foams.

IMPAXX foam is a highly engineered, extruded, thermoplastic foam that utilizes Dow proprietary process technology to maximize efficiency and minimize weight. It is a strong, low-density, closed-cell foam.

IMPAXX foam is highly suited for applications in a variety of industries requiring enhanced safety features through energy absorbing countermeasures.

Color: Blue

Sizes available: sheets, basic blocks and custom-fabricated parts.

Physical Properties ¹	Test Method	Direction	Value U.S. / Metric
Density	ASTM D 3575, Suffix W, Method B DIN 53420	N/A	2.3 pcf 37 Kg/m ³
Compression Strength @ 10%	ASTM D1621, 23°C	Vertical	Psi / kPa 50.1 / 345
@ 25%		Vertical	54.4 / 375
@ 50%		Vertical	63.0 / 434
Compression Strength @ 25%	ASTM D1621, -15°C	Vertical	Psi / kPa 56.8 / 392
@ 50%		Vertical	68.4 / 471
Compression Strength @ 25%	ASTM D1621, 60°C	Vertical	Psi / kPa 48.7 / 335
@ 50%		Vertical	52.0 / 359
Thermal Stability (linear change @ 80°C)	ASTM D 3575, Suffix S or DIN 53431	N/A	< 1%
Flammability**	FMVSS 302		Pass
Fogging	SAE J1756		100 Fog Number
Water Absorption	ASTM D3575, Suffix L	N/A	< 3%

(1) The data presented for this product is for unfabricated foam. While values shown are typical of the product, they should not be construed as specification limits.

** Results from this test do not represent performance under actual fire conditions.

-See reverse side for additional properties and product information.

©™Trademark of The Dow Chemical Company

Form No. 299 51012

Product Information



Tech Data Sheet

IMPAXX™ 700 Energy Absorbing Foam

IMPAXX™ 700 Energy Absorbing Foam is a higher-performing, and lower-cost alternative to traditional energy absorbing solutions such as polyurethane and expanded polypropylene bead foams.

IMPAXX foam is a highly engineered, extruded, thermoplastic foam that utilizes Dow proprietary process technology to maximize efficiency and minimize weight. It is a strong, low-density, closed-cell foam.

IMPAXX foam is highly suited for applications in a variety of industries requiring enhanced safety features through energy absorbing countermeasures.

Color: Blue

Sizes available: sheets, basic blocks and custom-fabricated parts.

Physical Properties ¹	Test Method	Direction	Value U.S. / Metric
Density	ASTM D 3575, Suffix W, Method B DIN 53420	N/A	2.7 pcf 42 Kg/m ³
Compression Strength @ 10%	ASTM D1621, 23°C	Vertical	Psi / kPa 101 / 700
@ 25%		Vertical	104 / 718
@ 50%		Vertical	121 / 835
Compression Strength @ 25%	ASTM D1621, -15°C	Vertical	Psi / kPa 114 / 788
@ 50%		Vertical	138 / 954
Compression Strength @ 25%	ASTM D1621, 80°C	Vertical	Psi / kPa 73 / 504
@ 50%		Vertical	85 / 586
Thermal Stability (linear change @ 80°C)	ASTM D 3575, Suffix S or DIN 53431	N/A	< 2%
Flammability**	FMVSS 302	Extrusion	Pass
Fogging	SAE J1756		100 Fog Number
Water Absorption	ASTM D3575, Suffix L	N/A	6%

(1) The data presented for this product is for unfabricated foam. While values shown are typical of the product, they should not be construed as specification limits.

** Results from this test do not represent performance under actual fire conditions.

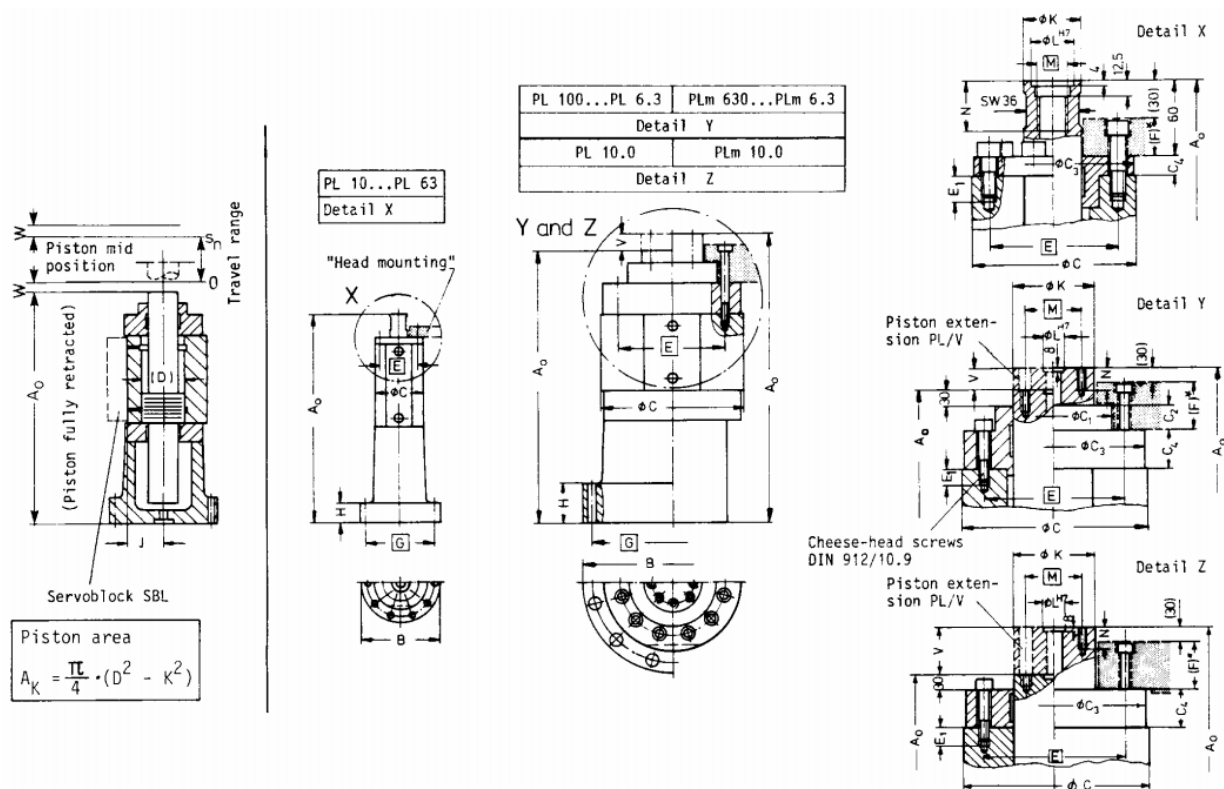
- See reverse side for additional properties and product information.

©™Trademark of The Dow Chemical Company

Form No. 299 51014

Bijlage 4: technische gegevens van de actuator

Size range [kN] (nominal force)		10 to 63	100/160	250/400	630	1000	1600	2500	4000	6300	10000
Models (actuator coding)		PL 10 PL 16 PL 25 PL 40 PL 63	PL 100 PL 160	PL 250 PL 400	PL 630 PLm 630	PL 1.0 PLm 1.0	PL 1.6 PLm 1.6	PL 2.5 PLm 2.5	PL 4.0 PLm 4.0	PL 6.3 PLm 6.3	PL 10.0 PLm 10.0
s_n [mm] → Code letter for nom. stroke s_n											
Dimension A_0	40	H	479	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	K	539	605	605	705 750	705 750	838 898	960 1040	1137 1241	1362 1552
	250	N	829	905	905	1005 1050	1005 1050	1138 1198	1260 1340	1417 1521	1612 1802
	400	P	-	1205	1205	1305 1350	1305 1350	1438 1498	1560 1640	1717 1821	1912 2102
B			205	275	370	470 -	550 -	700 -	880 -	1080 -	1340 -
C			126	224	315	370	440	550	680	870	1090
C ₁			-	125	190	236	300	375	475	630	800
C ₂			-	28	39	50	50	70	90	116	100
C ₃			125	205	280	360	430	540	670	860	1080
C ₄			15	54	60	79	82	94	112	140	222
E			∅ 100 10 x M 12	∅ 160 12 x M 12	∅ 224 12 x M 16	∅ 280 12 x M 20	∅ 355 12 x M 24	∅ 450 12 x M 30	∅ 560 12 x M 36	∅ 710 24 x M 36	∅ 900 24 x M 42
E ₁			20	25	30	30	50	55	65	65	75
G			∅ 180 10 x ∅ 11	∅ 250 12 x ∅ 14	∅ 335 12 x ∅ 18	∅ 425 12 x ∅ 22	∅ 500 12 x ∅ 26	∅ 630 12 x ∅ 32	∅ 800 12 x ∅ 38	∅ 1000 24 x ∅ 48	∅ 1250 24 x ∅ 55
H			50	60	70	80	90	106	125	160	200
J			57	105	145,5	180	216	272	337	432	540
K			45	80	125	160	200	250	315	400	500
L			35	20	40	40	40	132	160	200	250
M			M 24	∅ 45 8 x M 10	∅ 71 8 x M 16	∅ 112 8 x M 24	∅ 112 8 x M 24	∅ 200 12 x M 24	∅ 250 12 x M 30	∅ 315 12 x M 42	∅ 400 16 x M48 x 3
N			50	25	30	45	45	45	50	60	70
V (extension)			-	35	45	45 -	45 -	60 -	80 -	104 -	190 -
Overflow W			18	18	8	5	5	5	5	5	5
Weight [kg]	PL-H		35	-	-	-	-	-	-	-	-
	PL-K		38	155	295	500	740	1320	2350	4600	8700
	PL-N		65	240	435	730	1060	1820	3100	5800	10400
	PL-P		-	300	560	960	1380	2330	3900	7100	12300

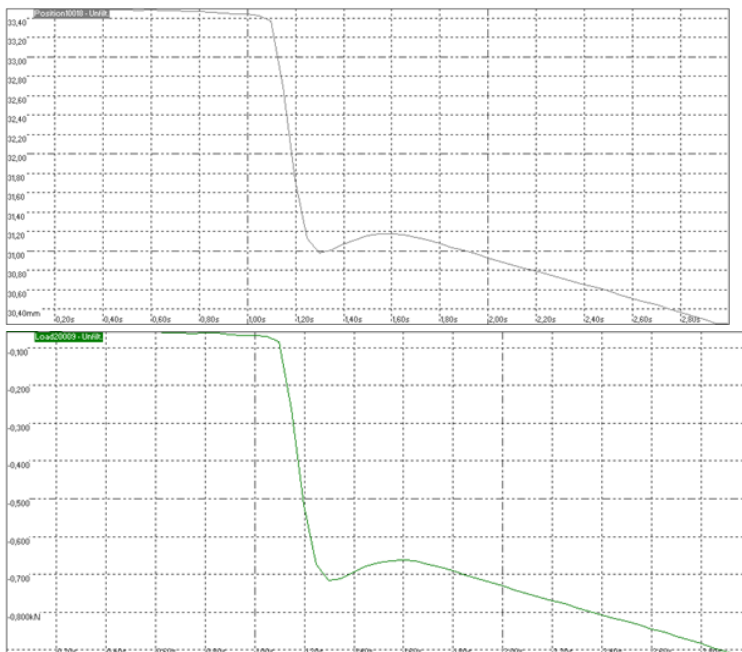


Bijlage 5: positie en kracht i.f.v. de tijd voor P = 0 en I = 1,0 (testprofiel 1)



Kracht kN	Positie mm
-0,46234	1,45263
-0,63019	2,0935
-0,62561	2,06909
-0,55237	1,79443
-0,49286	1,57471
-0,46692	1,47705
-0,46539	1,474
-0,48065	1,52588
-0,50049	1,59302
-0,51422	1,651
-0,52948	1,70593
-0,54321	1,75171
-0,55542	1,80359
-0,56763	1,84631
-0,58136	1,89209
-0,59204	1,92871

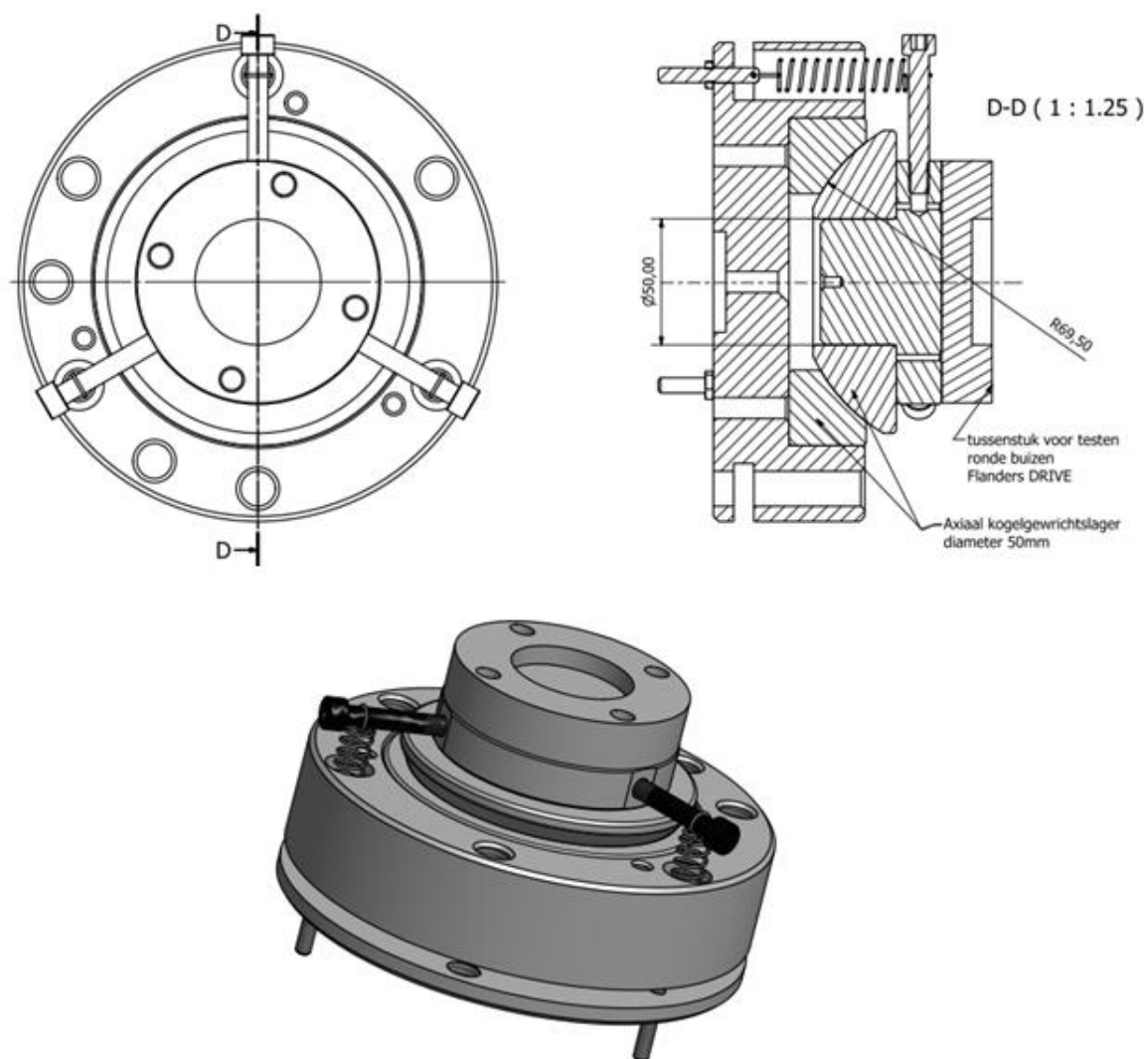
Bijlage 6: positie en kracht i.f.v. de tijd voor P = -5,0 en I = 0,50 (testprofiel 2)



Bijlage 7: positie en kracht i.f.v. de tijd voor $P = +5,0$ en $I = 0,50$ (testprofiel 3)



Bijlage 8: technische tekening van opstelling met axiaal kogelgewrichtslager



Bijlage 9: absolute waarden van de buigtest voor lege profielen

Codering	F max. (kN)	Stijfheid (N/mm)	Gewicht (gram)
B-A1RO-EMPTY-1	1,740	155,58	257
B-A1RO-EMPTY-2	1,763	155,18	257
B-A1RO-EMPTY-3	1,692	154,42	258
B-A3RO-EMPTY-1	3,360	260,76	467
B-A3RO-EMPTY-2	2,820	268,92	483
B-A3RO-EMPTY-3	3,399	262,39	467
B-S1RO-EMPTY-1	3,242	409,95	684
B-S1RO-EMPTY-2	3,322	439,86	687
B-S1RO-EMPTY-3	3,368	446,72	684
B-S3RO-EMPTY-1	7,473	734,74	1353
B-S3RO-EMPTY-2	7,374	741,56	1349
B-S3RO-EMPTY-3	7,559	722,85	1294

Bijlage 10: gemiddelde absolute waarden van de buigtest voor lege profielen

Codering	Gemiddelde F max. (kN)	Vershil (%)	Gemiddelde stijfheid (N/mm)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
B-A1RO-EMPTY-1	1,732	/	155,06	/	257,3	/
B-A1RO-EMPTY-2						
B-A1RO-EMPTY-3						
B-A3RO-EMPTY-1	3,193	/	264,02	/	472,3	/
B-A3RO-EMPTY-2						
B-A3RO-EMPTY-3						
B-S1RO-EMPTY-1	3,311	/	432,18	/	685,0	/
B-S1RO-EMPTY-2						
B-S1RO-EMPTY-3						
B-S3RO-EMPTY-1	7,469	/	733,05	/	1332,0	/
B-S3RO-EMPTY-2						
B-S3RO-EMPTY-3						

Bijlage 11: gemiddelde absolute waarden energieabsorptie voor lege profielen

Codering	Energieabsorptie (Joule)	Gewicht (gram)	Gemiddelde EA (Joule)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
I-A1RO-EMPTY-1	97414,17	258	95173,11	/	258,0	/
I-A1RO-EMPTY-2	95190,39	258				
I-A1RO-EMPTY-3	92914,76	258				
I-A3RO-EMPTY-1	197064,90	466	196860,82	/	467,0	/
I-A3RO-EMPTY-2	191373,95	468				
I-A3RO-EMPTY-3	202143,61	467				
I-S1RO-EMPTY-1	199199,06	687	199897,98	/	686,0	/
I-S1RO-EMPTY-2	199156,68	684				
I-S1RO-EMPTY-3	201338,19	687				
I-S3RO-EMPTY-1	458177,40	1314	475593,38	/	1315,3	/
I-S3RO-EMPTY-2	477848,64	1315				
I-S3RO-EMPTY-3	490754,09	1317				

Bijlage 12: gemiddelde absolute waarden weerstand tegen axiale belasting voor lege profielen

Codering	Weerstand tegen axiale belast. (kN)	Gewicht (gram)	Gemiddelde weerstand tegen axiale belast. (kN)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
A-A1RO-EMPTY-1	26,228	258	26,20	/	257,7	/
A-A1RO-EMPTY-2	25,857	258				
A-A1RO-EMPTY-3	26,512	257				
A-A3RO-EMPTY-1	45,600	468	46,30	/	467,3	/
A-A3RO-EMPTY-2	46,241	467				
A-A3RO-EMPTY-3	47,047	467				
A-S1RO-EMPTY-1	53,724	682	53,24	/	684,3	/
A-S1RO-EMPTY-2	51,888	683				
A-S1RO-EMPTY-3	54,093	688				
A-S3RO-EMPTY-1	94,342	1321	96,22	/	1323,7	/
A-S3RO-EMPTY-2	97,690	1326				
A-S3RO-EMPTY-3	96,629	1324				

Bijlage 13: waarden van de buigtest per kilogram gewicht voor lege profielen

Codering	F _{max} /gewicht (kN/kg)	Stijfheid/gewicht (N/mm/kg)	F _{max} /gewicht (kN/kg)	Vershil (%)	Stijfheid/gewicht (N/mm/kg)	Vershil (%)
B-A1RO-EMPTY-1	6,770	605,38	6,729	/	602,57	/
B-A1RO-EMPTY-2	6,860	603,83				
B-A1RO-EMPTY-3	6,558	598,52				
B-A3RO-EMPTY-1	7,195	558,36	6,760	/	558,97	/
B-A3RO-EMPTY-2	5,839	556,77				
B-A3RO-EMPTY-3	7,278	561,85				
B-S1RO-EMPTY-1	4,740	599,35	4,833	/	630,92	/
B-S1RO-EMPTY-2	4,836	640,27				
B-S1RO-EMPTY-3	4,924	653,09				
B-S3RO-EMPTY-1	5,523	543,05	5,607	/	550,34	/
B-S3RO-EMPTY-2	5,466	549,71				
B-S3RO-EMPTY-3	5,842	558,61				

Bijlage 14: waarden van de energieabsorptie per gram gewicht voor lege profielen

Codering	Energieabsorptie/gewicht (Joule/gram)	Gemiddelde EA/gewicht (Joule/gram)	Vershil (%)
I-A1RO-EMPTY-1	377,57	368,89	/
I-A1RO-EMPTY-2	368,96		
I-A1RO-EMPTY-3	360,13		
I-A3RO-EMPTY-1	422,89	421,55	/
I-A3RO-EMPTY-2	408,92		
I-A3RO-EMPTY-3	432,86		
I-S1RO-EMPTY-1	289,95	291,40	/
I-S1RO-EMPTY-2	291,16		
I-S1RO-EMPTY-3	293,07		
I-S3RO-EMPTY-1	348,69	361,57	/
I-S3RO-EMPTY-2	363,38		
I-S3RO-EMPTY-3	372,63		

Bijlage 15: waarden van de weerstand tegen axiale belasting per kilogram gewicht voor lege profielen

Codering	Weerstand tegen axiale belasting/gewicht (kN/kg)	Gemiddelde weerstand tegen axiale belasting/gewicht (kN/kg)	Vershil (%)
A-A1RO-EMPTY-1	101,659	101,68	/
A-A1RO-EMPTY-2	100,221		
A-A1RO-EMPTY-3	103,160		
A-A3RO-EMPTY-1	97,436	99,07	/
A-A3RO-EMPTY-2	99,017		
A-A3RO-EMPTY-3	100,743		
A-S1RO-EMPTY-1	78,774	77,79	/
A-S1RO-EMPTY-2	75,971		
A-S1RO-EMPTY-3	78,624		
A-S3RO-EMPTY-1	71,417	72,69	/
A-S3RO-EMPTY-2	73,673		
A-S3RO-EMPTY-3	72,983		

Bijlage 16: absolute waarden van de buigtest voor 2C PU

Codering	F max. (kN)	Stijfheid (N/mm)	Gewicht (gram)
B-A1RO-PNLHI-1	1,700	150,17	275
B-A1RO-PNLHI-2	1,707	148,64	276
B-A1RO-PNLHI-3	1,782	156,60	275
B-A3RO-PNLHI-1	3,505	244,89	483
B-A3RO-PNLHI-2	3,419	260,76	482
B-A3RO-PNLHI-3	3,484	245,31	482
B-A3RO-PNLFI-1	3,454	261,98	493
B-A3RO-PNLFI-2	3,379	247,86	494
B-A3RO-PNLFI-3	3,431	257,61	492
B-S1RO-PNLHI-1	3,668	438,24	701
B-S1RO-PNLHI-2	4,018	439,63	702
B-S1RO-PNLHI-3	3,319	438,44	700
B-S1RO-PNLFI-1	3,209	420,00	712
B-S1RO-PNLFI-2	3,235	441,42	715
B-S1RO-PNLFI-3	3,302	441,47	716
B-S3RO-PNLHI-1	7,570	625,61	1304
B-S3RO-PNLHI-2	7,523	753,61	1334
B-S3RO-PNLHI-3	7,929	723,01	1343
B-S3RO-PNLFI-1	7,297	616,11	1316
B-S3RO-PNLFI-2	7,552	757,53	1379
B-S3RO-PNLFI-3	7,099	732,78	1344

Bijlage 17: relatieve waarden van de buigtest voor 2C PU

Codering	Gemiddelde F max. (kN)	Vershil (%)	Gemiddelde stijfheid (N/mm)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
B-A1RO-PNLHI-1	1,730	-0,12	151,81	-2,10	275,3	7,0
B-A1RO-PNLHI-2						
B-A1RO-PNLHI-3						
B-A3RO-PNLHI-1	3,469	8,65	250,32	-5,19	482,3	2,12
B-A3RO-PNLHI-2						
B-A3RO-PNLHI-3						
B-A3RO-PNLFI-1	3,421	7,15	255,81	-3,11	493,0	4,38
B-A3RO-PNLFI-2						
B-A3RO-PNLFI-3						
B-S1RO-PNLHI-1	3,668	10,80	438,77	1,52	701,0	2,34
B-S1RO-PNLHI-2						
B-S1RO-PNLHI-3						
B-S1RO-PNLFI-1	3,249	-1,88	434,30	0,49	714,3	4,28
B-S1RO-PNLFI-2						
B-S1RO-PNLFI-3						
B-S3RO-PNLHI-1	7,674	2,75	700,74	-4,41	1327,0	-0,38
B-S3RO-PNLHI-2						
B-S3RO-PNLHI-3						
B-S3RO-PNLFI-1	7,316	-2,05	702,14	-4,22	1346,3	1,08
B-S3RO-PNLFI-2						
B-S3RO-PNLFI-3						

Bijlage 18: waarden van de buigtest per kilogram gewicht voor 2C PU

Codering	F _{max} /gewicht (kN/kg)	Stijfheid/gewicht (N/mm/kg)	F _{max} /gewicht (kN/kg)	Vershil (%)	Stijfheid/gewicht (N/mm/kg)	Vershil (%)
B-A1RO-PNLHI-1	6,181	546,07	6,282	-6,65	551,37	-8,50
B-A1RO-PNLHI-2	6,185	538,56				
B-A1RO-PNLHI-3	6,480	569,47				
B-A3RO-PNLHI-1	7,257	507,01	7,193	6,40	518,98	-7,15
B-A3RO-PNLHI-2	7,093	541,00				
B-A3RO-PNLHI-3	7,228	508,94				
B-A3RO-PNLFI-1	7,006	531,39	6,940	2,66	518,91	-7,17
B-A3RO-PNLFI-2	6,840	501,74				
B-A3RO-PNLFI-3	6,974	523,59				
B-S1RO-PNLHI-1	5,233	625,16	5,233	8,26	625,92	-0,79
B-S1RO-PNLHI-2	5,724	626,25				
B-S1RO-PNLHI-3	4,741	626,34				
B-S1RO-PNLFI-1	4,507	589,89	4,548	-5,91	607,95	-3,64
B-S1RO-PNLFI-2	4,524	617,37				
B-S1RO-PNLFI-3	4,612	616,58				
B-S3RO-PNLHI-1	5,805	479,76	5,783	3,14	527,68	-4,12
B-S3RO-PNLHI-2	5,639	564,92				
B-S3RO-PNLHI-3	5,904	538,35				
B-S3RO-PNLFI-1	5,545	468,17	5,434	-3,08	520,91	-5,35
B-S3RO-PNLFI-2	5,476	549,33				
B-S3RO-PNLFI-3	5,282	545,22				

Bijlage 19: absolute en relatieve waarden van de energieabsorptie voor 2C PU

Codering	Energieabsorptie (Joule)	Gewicht (gram)	Gemiddelde EA (Joule)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
I-A1RO-PNLHI-1	103910,26	276	102856,34	8,07	275,3	6,72
I-A1RO-PNLHI-2	101194,09	275				
I-A1RO-PNLHI-3	103464,67	275				
I-A3RO-PNLHI-1	191187,10	483	193382,68	-1,77	482,7	3,36
I-A3RO-PNLHI-2	194240,01	482				
I-A3RO-PNLHI-3	194720,91	483				
I-A3RO-PNLFI-1	191932,75	492	195698,92	-0,59	491,7	5,28
I-A3RO-PNLFI-2	201352,26	492				
I-A3RO-PNLFI-3	193811,76	491				
I-S1RO-PNLHI-1	213120,30	704	210758,48	5,43	703,3	2,53
I-S1RO-PNLHI-2	205321,33	705				
I-S1RO-PNLHI-3	213833,81	701				
I-S1RO-PNLFI-1	212497,40	715	209185,86	4,65	715,7	4,33
I-S1RO-PNLFI-2	205627,68	716				
I-S1RO-PNLFI-3	209432,50	716				
I-S3RO-PNLHI-1	448865,42	1331	455080,11	-4,31	1326,0	0,81
I-S3RO-PNLHI-2	456877,17	1342				
I-S3RO-PNLHI-3	459497,74	1305				
I-S3RO-PNLFI-1	479603,22	1353	469569,39	-1,27	1361,0	3,47
I-S3RO-PNLFI-2	471396,52	1385				
I-S3RO-PNLFI-3	457708,44	1345				

Bijlage 20: waarden van de energieabsorptie per gram gewicht voor 2C PU

Codering	Energieabsorptie/gewicht (Joule/gram)	Gemiddelde EA/gewicht (Joule/gram)	Verschil (%)
I-A1RO-PNLHI-1	376,49	373,57	1,27
I-A1RO-PNLHI-2	367,98		
I-A1RO-PNLHI-3	376,24		
I-A3RO-PNLHI-1	395,83	400,66	-4,96
I-A3RO-PNLHI-2	402,99		
I-A3RO-PNLHI-3	403,15		
I-A3RO-PNLFI-1	390,11	398,03	-5,58
I-A3RO-PNLFI-2	409,25		
I-A3RO-PNLFI-3	394,73		
I-S1RO-PNLHI-1	302,73	299,67	2,84
I-S1RO-PNLHI-2	291,24		
I-S1RO-PNLHI-3	305,04		
I-S1RO-PNLFI-1	297,20	292,30	0,31
I-S1RO-PNLFI-2	287,19		
I-S1RO-PNLFI-3	292,50		
I-S3RO-PNLHI-1	337,24	343,26	-5,06
I-S3RO-PNLHI-2	340,44		
I-S3RO-PNLHI-3	352,11		
I-S3RO-PNLFI-1	354,47	345,05	-4,57
I-S3RO-PNLFI-2	340,36		
I-S3RO-PNLFI-3	340,30		

**Bijlage 21: absolute en relatieve waarden van de weerstand tegen axiale belasting voor 2C
PU**

Codering	Weerstand tegen axiale belasting (kN)	Gewicht (gram)	Gemiddelde weerstand tegen axiale belast. (kN)	Verschil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Verschil (%)
A-A1RO-PNLHI-1	25,619	275,0	25,45	-2,88	274,7	6,60
A-A1RO-PNLHI-2	26,002	274,0				
A-A1RO-PNLHI-3	24,715	275,0				
A-A3RO-PNLHI-1	40,854	481,0	43,23	-6,61	480,7	2,85
A-A3RO-PNLHI-2	46,071	480,0				
A-A3RO-PNLHI-3	42,779	481,0				
A-A3RO-PNLFI-1	40,658	510,0	40,64	-12,21	509,3	8,99
A-A3RO-PNLFI-2	47,667	514,0				
A-A3RO-PNLFI-3	33,600	504,0				
A-S1RO-PNLHI-1	51,237	697,0	51,25	-3,73	701,0	2,43
A-S1RO-PNLHI-2	51,098	704,0				
A-S1RO-PNLHI-3	51,405	702,0				
A-S1RO-PNLFI-1	50,162	721,0	51,09	-4,02	724,7	5,89
A-S1RO-PNLFI-2	53,041	728,0				
A-S1RO-PNLFI-3	50,081	725,0				
A-S3RO-PNLHI-1	93,820	1355,0	89,80	-6,67	1329,7	0,45
A-S3RO-PNLHI-2	89,717	1336,0				
A-S3RO-PNLHI-3	85,868	1298,0				
A-S3RO-PNLFI-1	90,733	1312,0	92,48	-3,88	1338,3	1,11
A-S3RO-PNLFI-2	92,712	1355,0				
A-S3RO-PNLFI-3	94,009	1348,0				

**Bijlage 22: waarden van de weerstand tegen axiale belasting per kilogram gewicht voor 2C
PU**

Codering	Weerstand tegen axiale belasting/gewicht (kN/kg)	Gemiddelde weerstand tegen axiale belasting/gewicht (kN/kg))	Vershil (%)
A-A1RO-PNLHI-1	93,160	92,64	-8,89
A-A1RO-PNLHI-2	94,898		
A-A1RO-PNLHI-3	89,873		
A-A3RO-PNLHI-1	84,936	89,95	-9,20
A-A3RO-PNLHI-2	95,981		
A-A3RO-PNLHI-3	88,938		
A-A3RO-PNLFI-1	79,722	79,71	-19,54
A-A3RO-PNLFI-2	92,737		
A-A3RO-PNLFI-3	66,667		
A-S1RO-PNLHI-1	73,511	73,11	-6,02
A-S1RO-PNLHI-2	72,582		
A-S1RO-PNLHI-3	73,226		
A-S1RO-PNLFI-1	69,573	70,50	-9,37
A-S1RO-PNLFI-2	72,859		
A-S1RO-PNLFI-3	69,077		
A-S3RO-PNLHI-1	69,240	67,52	-7,12
A-S3RO-PNLHI-2	67,153		
A-S3RO-PNLHI-3	66,154		
A-S3RO-PNLFI-1	69,156	69,11	-4,93
A-S3RO-PNLFI-2	68,422		
A-S3RO-PNLFI-3	69,740		

Bijlage 23: absolute waarden van de buigtest voor epoxyschuim

Codering	F max. (kN)	Stijfheid (N/mm)	Gewicht (gram)
B-A1RO-XNLHI-1	2,009	157,49	415
B-A1RO-XNLHI-2	1,853	155,48	374
B-A1RO-XNLHI-3	2,312	161,59	417
B-A3RO-XNLHI-1	3,934	280,45	609
B-A3RO-XNLHI-2	3,721	271,46	606
B-A3RO-XNLHI-3	3,823	268,43	595
B-A3RO-XNLFI-1	3,860	268,80	716
B-A3RO-XNLFI-2	3,546	268,14	687
B-A3RO-XNLFI-3	3,338	263,95	644
B-S1RO-XNLHI-1	4,294	451,37	866
B-S1RO-XNLHI-2	3,573	448,69	851
B-S1RO-XNLHI-3	3,470	449,69	799
B-S1RO-XNLFI-1	3,522	442,16	950
B-S1RO-XNLFI-2	3,448	444,51	959
B-S1RO-XNLFI-3	4,334	462,82	1005
B-S3RO-XNLHI-1	7,388	750,52	1403
B-S3RO-XNLHI-2	7,517	592,38	1413
B-S3RO-XNLHI-3	7,914	756,31	1460
B-S3RO-XNLFI-1	8,346	678,91	1556
B-S3RO-XNLFI-2	8,158	744,92	1542
B-S3RO-XNLFI-3	7,711	740,74	1548

Bijlage 24: relatieve waarden van de buigtest voor epoxyschuim

Codering	Gemiddelde F max. (kN)	Vershil (%)	Gemiddelde stijfheid (N/mm)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
B-A1RO-XNLHI-1	2,058	18,85	158,19	2,02	402,0	56,22
B-A1RO-XNLHI-2						
B-A1RO-XNLHI-3						
B-A3RO-XNLHI-1	3,826	19,83	273,45	3,57	603,3	27,74
B-A3RO-XNLHI-2						
B-A3RO-XNLHI-3						
B-A3RO-XNLFI-1	3,581	12,16	266,96	1,12	682,3	44,46
B-A3RO-XNLFI-2						
B-A3RO-XNLFI-3						
B-S1RO-XNLHI-1	3,779	14,15	449,92	4,10	838,7	22,43
B-S1RO-XNLHI-2						
B-S1RO-XNLHI-3						
B-S1RO-XNLFI-1	3,768	13,81	449,83	4,09	971,3	41,80
B-S1RO-XNLFI-2						
B-S1RO-XNLFI-3						
B-S3RO-XNLHI-1	7,651	2,441	753,41	2,778	1431,5	7,47
B-S3RO-XNLHI-2						
B-S3RO-XNLHI-3						
B-S3RO-XNLFI-1	7,935	6,237	742,83	1,334	1545,0	15,99
B-S3RO-XNLFI-2						
B-S3RO-XNLFI-3						

Bijlage 25: absolute en relatieve waarden van de energieabsorptie voor epoxy

Codering	Energieabsorptie (Joule)	Gewicht (gram)	Gemiddelde EA (Joule)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
I-A1RO-XNLHI-1	110822,8	424	109185,41	14,72	417,7	61,89
I-A1RO-XNLHI-2	131004,2	420				
I-A1RO-XNLHI-3	85729,3	409				
I-A3RO-XNLHI-1	218652,5	598	209991,82	6,67	599,7	28,41
I-A3RO-XNLHI-2	214987,2	618				
I-A3RO-XNLHI-3	196335,8	583				
I-A3RO-XNLFI-1	192148,9	615	202270,71	2,75	685,0	46,68
I-A3RO-XNLFI-2	198059,9	709				
I-A3RO-XNLFI-3	216603,4	731				
I-S1RO-XNLHI-1	288520,7	872	276981,44	38,56	869,0	26,68
I-S1RO-XNLHI-2	275051,5	869				
I-S1RO-XNLHI-3	267372,2	866				
I-S1RO-XNLFI-1	223093,9	930	247152,25	23,64	947,7	38,14
I-S1RO-XNLFI-2	256296,3	927				
I-S1RO-XNLFI-3	262066,6	986				
I-S3RO-XNLHI-1	510563,4	1426	511873,82	7,63	1433,0	8,95
I-S3RO-XNLHI-2	480206,8	1400				
I-S3RO-XNLHI-3	544851,3	1473				
I-S3RO-XNLFI-1	527377,0	1589	514601,21	8,20	1565,0	18,98
I-S3RO-XNLFI-2	512168,2	1567				
I-S3RO-XNLFI-3	504258,5	1539				

Bijlage 26: absolute en relatieve waarden van de weerstand tegen axiale belasting voor epoxyschuim

Codering	Weerstand tegen axiale belasting (kN)	Gewicht (gram)	Gemiddelde weerst. tegen ax. belast. (kN)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
A-A1RO-XNLHI-1	25,952	403	26,05	-0,58	406,3	57,70
A-A1RO-XNLHI-2	25,369	397				
A-A1RO-XNLHI-3	26,820	419				
A-A3RO-XNLHI-1	44,944	582	41,15	-11,12	591,7	26,61
A-A3RO-XNLHI-2	38,329	600				
A-A3RO-XNLHI-3	40,178	593				
A-A3RO-XNLFI-1	34,278	686	40,81	-11,86	703,0	50,43
A-A3RO-XNLFI-2	43,847	715				
A-A3RO-XNLFI-3	44,291	708				
A-S1RO-XNLHI-1	51,230	829	52,33	-1,69	840,7	22,85
A-S1RO-XNLHI-2	51,340	835				
A-S1RO-XNLHI-3	54,431	858				
A-S1RO-XNLFI-1	53,068	990	52,04	-2,24	985,0	43,94
A-S1RO-XNLFI-2	52,394	982				
A-S1RO-XNLFI-3	50,671	983				
A-S3RO-XNLHI-1	99,461	1462	94,93	-1,34	1449,3	9,49
A-S3RO-XNLHI-2	93,982	1443				
A-S3RO-XNLHI-3	91,353	1443				
A-S3RO-XNLFI-1	83,277	1423	91,26	-5,16	1505,0	13,70
A-S3RO-XNLFI-2	98,406	1552				
A-S3RO-XNLFI-3	92,094	1540				

Bijlage 27: waarden van de buigtest per kilogram gewicht voor epoxyschuim

Codering	F _{max} /gewicht (kN/kg)	Stijfheid/gewicht (N/mm/kg)	F _{max} /gewicht (kN/kg)	Vershil (%)	Stijfheid/gewicht (N/mm/kg)	Vershil (%)
B-A1RO-XNLHI-1	4,841	379,50	5,113	-24,01	394,24	-34,57
B-A1RO-XNLHI-2	4,955	415,72				
B-A1RO-XNLHI-3	5,544	387,51				
B-A3RO-XNLHI-1	6,460	460,51	6,342	-6,19	453,20	-18,92
B-A3RO-XNLHI-2	6,140	447,96				
B-A3RO-XNLHI-3	6,425	451,14				
B-A3RO-XNLFI-1	5,391	375,42	5,245	-22,41	391,86	-29,90
B-A3RO-XNLFI-2	5,162	390,30				
B-A3RO-XNLFI-3	5,183	409,86				
B-S1RO-XNLHI-1	4,958	521,21	4,500	-6,89	537,09	-14,87
B-S1RO-XNLHI-2	4,199	527,25				
B-S1RO-XNLHI-3	4,343	562,82				
B-S1RO-XNLFI-1	3,707	465,44	3,872	-19,89	463,16	-26,59
B-S1RO-XNLFI-2	3,595	463,52				
B-S1RO-XNLFI-3	4,312	460,52				
B-S3RO-XNLHI-1	5,266	534,94	5,335	-4,85	490,73	-10,83
B-S3RO-XNLHI-2	5,320	419,24				
B-S3RO-XNLHI-3	5,421	518,02				
B-S3RO-XNLFI-1	5,364	436,32	5,212	-7,05	465,97	-15,33
B-S3RO-XNLFI-2	5,291	483,08				
B-S3RO-XNLFI-3	4,981	478,51				

Bijlage 28: waarden van de energieabsorptie per gram gewicht voor epoxyschuim

Codering	Energieabsorptie/gewicht (Joule/gram)	Gemiddelde EA/gewicht (Joule/gram)	Vershil (%)
I-A1RO-XNLHI-1	261,37	260,97	-29,26
I-A1RO-XNLHI-2	311,91		
I-A1RO-XNLHI-3	209,61		
I-A3RO-XNLHI-1	365,64	350,09	-16,95
I-A3RO-XNLHI-2	347,88		
I-A3RO-XNLHI-3	336,77		
I-A3RO-XNLFI-1	312,44	296,03	-29,78
I-A3RO-XNLFI-2	279,35		
I-A3RO-XNLFI-3	296,31		
I-S1RO-XNLHI-1	330,87	318,71	9,37
I-S1RO-XNLHI-2	316,51		
I-S1RO-XNLHI-3	308,74		
I-S1RO-XNLFI-1	239,89	260,72	-10,53
I-S1RO-XNLFI-2	276,48		
I-S1RO-XNLFI-3	265,79		
I-S3RO-XNLHI-1	358,04	356,98	-1,27
I-S3RO-XNLHI-2	343,00		
I-S3RO-XNLHI-3	369,89		
I-S3RO-XNLFI-1	331,89	328,80	-9,06
I-S3RO-XNLFI-2	326,85		
I-S3RO-XNLFI-3	327,65		

Bijlage 29: waarden van de weerstand tegen axiale belasting per kilogram gewicht voor epoxyschuim

Codering	Weerstand tegen axiale belasting/gewicht (kN/kg)	Gemiddelde weerstand tegen axiale belasting/gewicht (kN/kg)	Vershil (%)
A-A1RO-XNLHI-1	64,397	64,10	-36,96
A-A1RO-XNLHI-2	63,902		
A-A1RO-XNLHI-3	64,010		
A-A3RO-XNLHI-1	77,223	69,62	-29,72
A-A3RO-XNLHI-2	63,882		
A-A3RO-XNLHI-3	67,754		
A-A3RO-XNLFI-1	49,968	57,95	-41,50
A-A3RO-XNLFI-2	61,324		
A-A3RO-XNLFI-3	62,558		
A-S1RO-XNLHI-1	61,797	62,24	-19,99
A-S1RO-XNLHI-2	61,485		
A-S1RO-XNLHI-3	63,439		
A-S1RO-XNLFI-1	53,604	52,84	-32,08
A-S1RO-XNLFI-2	53,354		
A-S1RO-XNLFI-3	51,547		
A-S3RO-XNLHI-1	68,031	65,49	-9,91
A-S3RO-XNLHI-2	65,130		
A-S3RO-XNLHI-3	63,308		
A-S3RO-XNLFI-1	58,522	60,58	-16,67
A-S3RO-XNLFI-2	63,406		
A-S3RO-XNLFI-3	59,801		

Bijlage 30: absolute waarden van de buigtest voor XPS-schuim

Codering	F max. (kN)	Stijfheid (N/mm)	Gewicht (gram)
B-A1RO-INLHI-1	1,745	154,86	265
B-A1RO-INLHI-2	1,728	153,25	265
B-A1RO-INLHI-3	1,686	153,72	265
B-A1RO-INLFI-1	1,756	156,92	273
B-A1RO-INLFI-2	1,721	153,28	272
B-A1RO-INLFI-3	1,747	155,68	272
B-A1RO-INHHI-1	2,329	155,61	267
B-A1RO-INHHI-2	1,787	153,43	268
B-A1RO-INHHI-3	1,743	154,42	266
B-A3RO-INLHI-1	3,451	243,61	474
B-A3RO-INLHI-2	3,382	263,55	472
B-A3RO-INLHI-3	3,350	260,93	472
B-A3RO-INHFI-1	3,522	254,21	502
B-A3RO-INHFI-2	3,457	262,63	489
B-A3RO-INHFI-3	3,406	265,96	482
B-S1RO-INHHI-1	3,386	439,33	695
B-S1RO-INHHI-2	3,221	437,50	696
B-S1RO-INHHI-3	3,308	436,82	697
B-S1RO-INHFI-1	3,255	395,63	701
B-S1RO-INHFI-2	3,181	440,32	702
B-S1RO-INHFI-3	3,361	439,82	702
B-S3RO-INLHI-1	7,339	738,19	1315
B-S3RO-INLHI-2	7,673	708,04	1313
B-S3RO-INLHI-3	7,986	746,10	1344
B-S3RO-INHHI-1	7,432	747,09	1330
B-S3RO-INHHI-2	7,369	745,32	1325
B-S3RO-INHHI-3	7,931	730,49	1313
B-S3RO-INLFI-1	7,881	655,34	1309
B-S3RO-INLFI-2	7,326	740,93	1366
B-S3RO-INLFI-3	7,798	698,90	1318

Bijlage 31: relatieve waarden van de buigtest voor XPS-schuim

Codering	Gemiddelde F max. (kN)	Vershil (%)	Gemiddelde stijfheid (N/mm)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
B-A1RO-INLHI-1	1,720	-0,69	153,94	-0,72	265,0	2,98
B-A1RO-INLHI-2						
B-A1RO-INLHI-3						
B-A1RO-INLFI-1	1,741	0,56	155,29	0,15	272,3	5,83
B-A1RO-INLFI-2						
B-A1RO-INLFI-3						
B-A1RO-INHHI-1	1,953	12,78	154,48	-0,37	267,0	3,76
B-A1RO-INHHI-2						
B-A1RO-INHHI-3						
B-A3RO-INLHI-1	3,394	6,31	256,03	-3,03	472,7	0,07
B-A3RO-INLHI-2						
B-A3RO-INLHI-3						
B-A3RO-INHFI-1	3,462	8,41	260,93	-1,17	491,0	3,95
B-A3RO-INHFI-2						
B-A3RO-INHFI-3						
B-S1RO-INHHI-1	3,305	-0,17	437,88	1,32	696,0	1,61
B-S1RO-INHHI-2						
B-S1RO-INHHI-3						
B-S1RO-INHFI-1	3,266	-1,36	425,25	-1,60	701,7	2,43
B-S1RO-INHFI-2						
B-S1RO-INHFI-3						
B-S3RO-INLHI-1	7,666	2,64	730,78	-0,31	1324,0	-0,60
B-S3RO-INLHI-2						
B-S3RO-INLHI-3						
B-S3RO-INHHI-1	7,577	1,455	740,96	1,079	1322,7	-0,701
B-S3RO-INHHI-2						
B-S3RO-INHHI-3						
B-S3RO-INLFI-1	7,668	2,673	698,39	-4,728	1331,0	-0,075
B-S3RO-INLFI-2						
B-S3RO-INLFI-3						

Bijlage 32: absolute en relatieve waarden van de energieabsorptie voor XPS-schuim

Codering	Energieabsorptie (Joule)	Gewicht (gram)	Gemiddelde EA (Joule)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
I-A1RO-INLHI-1	101629,1	265	98997,75	4,02	265,0	2,71
I-A1RO-INLHI-2	96276,0	265				
I-A1RO-INLHI-3	99088,1	265				
I-A1RO-INLFI-1	102531,3	273	101080,39	6,21	272,3	5,56
I-A1RO-INLFI-2	99573,1	272				
I-A1RO-INLFI-3	101136,8	272				
I-A1RO-INHHI-1	107488,8	268	105966,80	11,34	267,0	3,49
I-A1RO-INHHI-2	105554,0	266				
I-A1RO-INHHI-3	104857,6	267				
I-A3RO-INLHI-1	183304,1	472	185183,31	-5,93	477,7	2,28
I-A3RO-INLHI-2	186036,3	472				
I-A3RO-INLHI-3	186209,5	489				
I-A3RO-INHFI-1	200694,3	501	198400,35	0,78	495,0	6,00
I-A3RO-INHFI-2	191181,4	485				
I-A3RO-INHFI-3	203325,4	499				
I-S1RO-INHHI-1	213823,1	695	212311,78	6,21	693,3	1,07
I-S1RO-INHHI-2	211034,9	691				
I-S1RO-INHHI-3	212077,3	694				
I-S1RO-INHFI-1	211476,1	703	214619,77	7,37	704,7	2,72
I-S1RO-INHFI-2	216122,1	705				
I-S1RO-INHFI-3	216261,1	706				
I-S3RO-INLHI-1	495736,4	1325	480111,17	0,95	1317,3	0,15
I-S3RO-INLHI-2	487635,8	1316				
I-S3RO-INLHI-3	456961,3	1311				
I-S3RO-INHHI-1	493813,2	1330	493697,56	3,81	1325,0	0,74
I-S3RO-INHHI-2	489435,1	1329				
I-S3RO-INHHI-3	497844,4	1316				
I-S3RO-INLFI-1	469254,2	1328	471002,65	-0,97	1321,7	0,48
I-S3RO-INLFI-2	470250,8	1317				
I-S3RO-INLFI-3	473502,9	1320				

Bijlage 33: absolute en relatieve waarden van de weerstand tegen axiale belasting voor XPS-schuim

Codering	Weerstand tegen axiale belast. (kN)	Gewicht (gram)	Gemiddelde weerstand tegen axiale belast. (kN)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
A-A1RO-INLHI-1	25,445	265	25,65	-2,09	265,3	2,98
A-A1RO-INLHI-2	26,221	265				
A-A1RO-INLHI-3	25,287	266				
A-A1RO-INLFI-1	25,928	273	26,03	-0,64	273,7	6,21
A-A1RO-INLFI-2	25,864	274				
A-A1RO-INLFI-3	26,299	274				
A-A1RO-INHHI-1	26,410	268	25,88	-1,21	267,3	3,75
A-A1RO-INHHI-2	26,059	266				
A-A1RO-INHHI-3	25,175	268				
A-A3RO-INLHI-1	45,586	472	46,45	0,33	472,0	1,00
A-A3RO-INLHI-2	47,315	472				
A-A3RO-INLHI-3	35,518	493				
A-A3RO-INHFI-1	46,223	482	46,73	0,93	481,7	3,07
A-A3RO-INHFI-2	47,019	484				
A-A3RO-INHFI-3	46,938	479				
A-S1RO-INHHI-1	54,043	693	52,69	-1,02	692,7	1,22
A-S1RO-INHHI-2	52,369	696				
A-S1RO-INHHI-3	51,657	689				
A-S1RO-INHFI-1	52,751	700	52,73	-0,95	702,3	2,63
A-S1RO-INHFI-2	52,994	703				
A-S1RO-INHFI-3	52,439	704				
A-S3RO-INLHI-1	97,653	1326	96,94	0,75	1322,3	-0,10
A-S3RO-INLHI-2	97,518	1319				
A-S3RO-INLHI-3	95,649	1322				
A-S3RO-INHHI-1	95,650	1317	93,91	-2,40	1324,0	0,03
A-S3RO-INHHI-2	90,035	1315				
A-S3RO-INHHI-3	96,053	1340				
A-S3RO-INLFI-1	96,879	1370	95,69	-0,56	1340,3	1,26
A-S3RO-INLFI-2	98,752	1321				
A-S3RO-INLFI-3	91,426	1330				

Bijlage 34: waarden van de buigtest per kilogram gewicht voor XPS-schuim

Codering	F _{max} /gewicht (kN/kg)	Stijfheid/gewicht (N/mm/kg)	F _{max} /gewicht (kN/kg)	Vershil (%)	Stijfheid/gewicht (N/mm/kg)	Vershil (%)
B-A1RO-INLHI-1	6,585	584,37	6,489	-3,57	580,92	-3,59
B-A1RO-INLHI-2	6,521	578,29				
B-A1RO-INLHI-3	6,362	580,09				
B-A1RO-INLFI-1	6,432	574,82	6,394	-4,98	570,23	-5,37
B-A1RO-INLFI-2	6,327	563,52				
B-A1RO-INLFI-3	6,423	572,36				
B-A1RO-INHHI-1	8,723	582,80	7,314	8,70	578,60	-3,98
B-A1RO-INHHI-2	6,668	572,49				
B-A1RO-INHHI-3	6,553	580,51				
B-A3RO-INLHI-1	7,281	513,93	7,181	6,23	541,71	-3,09
B-A3RO-INLHI-2	7,165	558,37				
B-A3RO-INLHI-3	7,097	552,81				
B-A3RO-INHFI-1	7,016	506,40	7,051	4,30	531,75	-4,87
B-A3RO-INHFI-2	7,070	537,08				
B-A3RO-INHFI-3	7,066	551,78				
B-S1RO-INHHI-1	4,872	632,13	4,749	-1,75	629,14	-0,28
B-S1RO-INHHI-2	4,628	628,59				
B-S1RO-INHHI-3	4,746	626,71				
B-S1RO-INHFI-1	4,643	564,38	4,654	-3,70	606,04	-3,94
B-S1RO-INHFI-2	4,531	627,23				
B-S1RO-INHFI-3	4,788	626,52				
B-S3RO-INLHI-1	5,581	561,36	5,789	3,24	551,92	0,29
B-S3RO-INLHI-2	5,844	539,26				
B-S3RO-INLHI-3	5,942	555,13				
B-S3RO-INHHI-1	5,588	561,72	5,730	2,19	560,19	1,79
B-S3RO-INHHI-2	5,562	562,50				
B-S3RO-INHHI-3	6,040	556,35				
B-S3RO-INLFI-1	6,021	500,64	5,767	2,85	524,44	-4,71
B-S3RO-INLFI-2	5,363	542,41				
B-S3RO-INLFI-3	5,917	530,28				

Bijlage 35: waarden van de energieabsorptie per gram gewicht voor XPS-schuim

Codering	Energieabsorptie/gewicht (Joule/gram)	Gemiddelde EA/gewicht (Joule/gram)	Vershil (%)
I-A1RO-INLHI-1	383,51	373,58	1,27
I-A1RO-INLHI-2	363,31		
I-A1RO-INLHI-3	373,92		
I-A1RO-INLFI-1	375,57	371,16	0,62
I-A1RO-INLFI-2	366,08		
I-A1RO-INLFI-3	371,83		
I-A1RO-INHHI-1	401,08	396,87	7,59
I-A1RO-INHHI-2	396,82		
I-A1RO-INHHI-3	392,73		
I-A3RO-INLHI-1	388,36	387,77	-8,02
I-A3RO-INLHI-2	394,14		
I-A3RO-INLHI-3	380,80		
I-A3RO-INHFI-1	400,59	400,75	-4,94
I-A3RO-INHFI-2	394,19		
I-A3RO-INHFI-3	407,47		
I-S1RO-INHHI-1	307,66	306,22	5,09
I-S1RO-INHHI-2	305,41		
I-S1RO-INHHI-3	305,59		
I-S1RO-INHFI-1	300,82	304,56	4,52
I-S1RO-INHFI-2	306,56		
I-S1RO-INHFI-3	306,32		
I-S3RO-INLHI-1	374,14	364,41	0,79
I-S3RO-INLHI-2	370,54		
I-S3RO-INLHI-3	348,56		
I-S3RO-INHHI-1	371,29	372,62	3,06
I-S3RO-INHHI-2	368,27		
I-S3RO-INHHI-3	378,30		
I-S3RO-INLFI-1	353,35	356,38	-1,44
I-S3RO-INLFI-2	357,06		
I-S3RO-INLFI-3	358,71		

Bijlage 36: waarden van de weerstand tegen axiale belasting per kilogram gewicht voor XPS-schuim

Codering	Weerstand tegen axiale belasting/gewicht (kN/kg)	Gemiddelde weerstand tegen axiale belasting/gewicht (kN/kg)	Verschil (%)
A-A1RO-INLHI-1	96,019	96,68	-4,92
A-A1RO-INLHI-2	98,947		
A-A1RO-INLHI-3	95,064		
A-A1RO-INLFI-1	94,974	95,12	-6,46
A-A1RO-INLFI-2	94,394		
A-A1RO-INLFI-3	95,982		
A-A1RO-INHHI-1	98,545	96,82	-4,78
A-A1RO-INHHI-2	97,966		
A-A1RO-INHHI-3	93,937		
A-A3RO-INLHI-1	96,581	98,41	-0,66
A-A3RO-INLHI-2	100,244		
A-A3RO-INLHI-3	72,045		
A-A3RO-INHFI-1	95,898	97,01	-2,07
A-A3RO-INHFI-2	97,147		
A-A3RO-INHFI-3	97,992		
A-S1RO-INHHI-1	77,984	76,07	-2,21
A-S1RO-INHHI-2	75,243		
A-S1RO-INHHI-3	74,974		
A-S1RO-INHFI-1	75,359	75,08	-3,49
A-S1RO-INHFI-2	75,383		
A-S1RO-INHFI-3	74,487		
A-S3RO-INLHI-1	73,645	73,31	0,85
A-S3RO-INLHI-2	73,933		
A-S3RO-INLHI-3	72,352		
A-S3RO-INHHI-1	72,627	70,93	-2,43
A-S3RO-INHHI-2	68,468		
A-S3RO-INHHI-3	71,681		
A-S3RO-INLFI-1	70,715	71,40	-1,77
A-S3RO-INLFI-2	74,755		
A-S3RO-INLFI-3	68,741		

Bijlage 37: absolute waarden van de buigtest voor MHS-schuim

Codering	F max. (kN)	Stijfheid (N/mm)	Gewicht (gram)
B-A1RO/ANLHI-1	1,971	153,99	414
B-A1RO/ANLHI-2	1,966	155,68	377
B-A1RO/ANLHI-3	1,952	157,59	352
B-A3RO/ANLHI-1	3,681	249,24	559
B-A3RO/ANLHI-2	3,651	254,67	571
B-A3RO/ANLHI-3	3,704	259,47	541
B-A3RO/ANLFI-1	3,637	256,73	582
B-A3RO/ANLFI-2	3,659	249,24	585
B-A3RO/ANLFI-3	3,668	259,20	582
B-S1RO/ANLHI-1	3,599	420,51	776
B-S1RO/ANLHI-2	3,623	429,58	816
B-S1RO/ANLHI-3	3,790	417,38	805
B-S1RO/ANLFI-1	3,670	419,80	839
B-S1RO/ANLFI-2	3,649	436,61	838
B-S1RO/ANLFI-3	3,595	438,83	837
B-S3RO/ANLHI-1	8,432	714,09	1432
B-S3RO/ANLHI-2	8,045	711,37	1427
B-S3RO/ANLHI-3	7,574	711,20	1388
B-S3RO/ANLFI-1	7,810	576,29	1423
B-S3RO/ANLFI-2	7,756	721,58	1426
B-S3RO/ANLFI-3	7,726	696,59	1423

Bijlage 38: relatieve waarden van de buigtest voor MHS-schuim

Codering	Gemiddelde F max. (kN)	Vershil (%)	Gemiddelde stijfheid (N/mm)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
B-A1RO/ANLHI-1	1,963	13,36	155,75	0,45	381,0	48,06
B-A1RO/ANLHI-2						
B-A1RO/ANLHI-3						
B-A3RO/ANLHI-1	3,679	15,21	254,46	-3,62	557,0	17,93
B-A3RO/ANLHI-2						
B-A3RO/ANLHI-3						
B-A3RO/ANLFI-1	3,655	14,46	255,06	-3,40	583,0	23,43
B-A3RO/ANLFI-2						
B-A3RO/ANLFI-3						
B-S1RO/ANLHI-1	3,671	10,87	422,49	-2,24	799,0	16,64
B-S1RO/ANLHI-2						
B-S1RO/ANLHI-3						
B-S1RO/ANLFI-1	3,638	9,89	431,75	-0,10	838,0	22,34
B-S1RO/ANLFI-2						
B-S1RO/ANLFI-3						
B-S3RO/ANLHI-1	8,017	7,34	712,22	-2,84	1415,7	6,28
B-S3RO/ANLHI-2						
B-S3RO/ANLHI-3						
B-S3RO/ANLFI-1	7,741	3,65	709,09	-3,27	1424,5	6,94
B-S3RO/ANLFI-2						
B-S3RO/ANLFI-3						

Bijlage 39: absolute en relatieve waarden van de energieabsorptie voor MHS-schuim

Codering	Energieabsorptie (Joule)	Gewicht (gram)	Gemiddelde EA (Joule)	Vershil (%)	Gemiddeld gewicht (gram)	Vershil (%)
I-A1RO/ANLHI-1	111560,98	371	114664,42	20,48	365,0	41,47
I-A1RO/ANLHI-2	116431,40	373				
I-A1RO/ANLHI-3	116000,87	351				
I-A3RO/ANLHI-1	207654,10	607	207344,67	5,33	590,7	26,48
I-A3RO/ANLHI-2	204326,69	595				
I-A3RO/ANLHI-3	210053,21	570				
I-A3RO/ANLFI-1	210674,60	584	208260,55	5,79	582,7	24,77
I-A3RO/ANLFI-2	202761,05	581				
I-A3RO/ANLFI-3	211346,01	583				
I-S1RO/ANLHI-1	234559,38	820	238894,63	19,51	798,7	16,42
I-S1RO/ANLHI-2	244288,11	807				
I-S1RO/ANLHI-3	237836,41	769				
I-S1RO/ANLFI-1	241768,44	841	244098,67	22,11	838,0	22,16
I-S1RO/ANLFI-2	245910,97	836				
I-S1RO/ANLFI-3	244616,59	837				
I-S3RO/ANLHI-1	489603,42	1382	494963,53	4,07	1394,7	6,03
I-S3RO/ANLHI-2	501707,46	1400				
I-S3RO/ANLHI-3	493579,71	1402				
I-S3RO/ANLFI-1	472363,89	1428	483164,15	1,59	1433,3	8,97
I-S3RO/ANLFI-2	494746,49	1439				
I-S3RO/ANLFI-3	482382,09	1433				

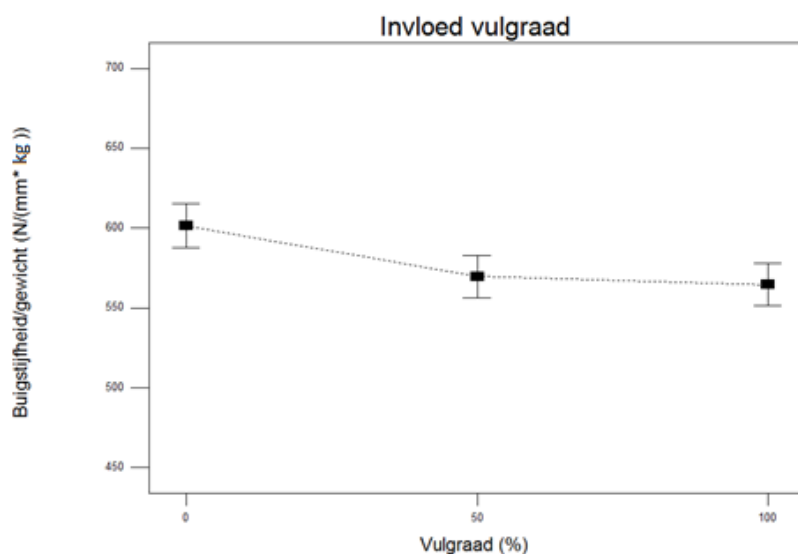
Bijlage 40: waarden van de buigtest per kilogram gewicht voor MHS-schuim

Codering	F _{max} /gewicht (kN/kg)	Stijfheid/gewicht (N/mm/kg)	F _{max} /gewicht (kN/kg)	Vershil (%)	Stijfheid/gewicht (N/mm/kg)	Vershil (%)
B-A1RO/ANLHI-1	4,761	371,95	5,174	-23,12	410,87	-31,81
B-A1RO/ANLHI-2	5,215	412,95				
B-A1RO/ANLHI-3	5,545	447,70				
B-A3RO/ANLHI-1	6,585	445,86	6,609	-2,24	457,16	-18,21
B-A3RO/ANLHI-2	6,394	446,01				
B-A3RO/ANLHI-3	6,847	479,62				
B-A3RO/ANLFI-1	6,249	441,11	6,269	-7,27	437,51	-21,73
B-A3RO/ANLFI-2	6,255	426,05				
B-A3RO/ANLFI-3	6,302	445,36				
B-S1RO/ANLHI-1	4,638	541,90	4,595	-4,92	528,94	-16,16
B-S1RO/ANLHI-2	4,440	526,44				
B-S1RO/ANLHI-3	4,708	518,48				
B-S1RO/ANLFI-1	4,374	500,36	4,341	-10,18	515,22	-18,34
B-S1RO/ANLFI-2	4,354	521,01				
B-S1RO/ANLFI-3	4,295	524,29				
B-S3RO/ANLHI-1	5,888	498,67	5,661	0,96	503,19	-8,57
B-S3RO/ANLHI-2	5,638	498,51				
B-S3RO/ANLHI-3	5,457	512,39				
B-S3RO/ANLFI-1	5,488	404,98	5,434	-3,08	497,77	-9,55
B-S3RO/ANLFI-2	5,439	506,02				
B-S3RO/ANLFI-3	5,429	489,52				

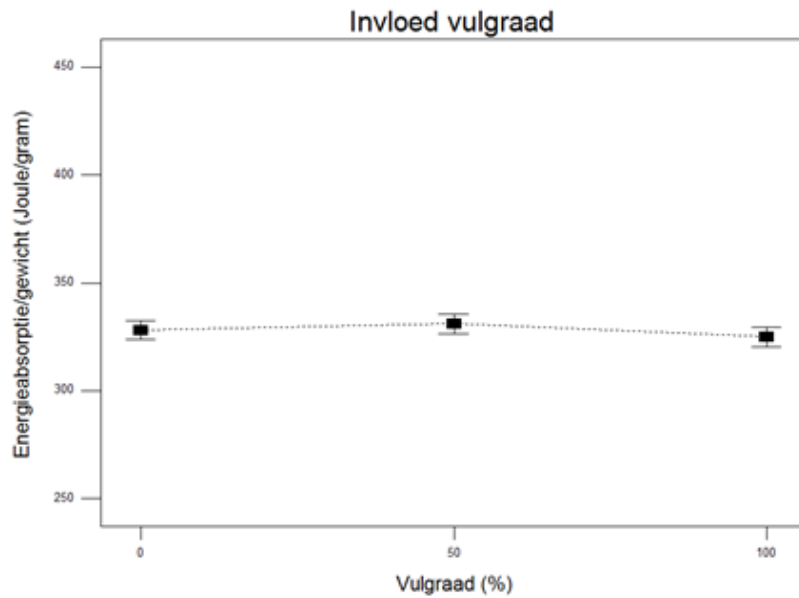
Bijlage 41: waarden van de energieabsorptie per gram gewicht voor MHS-schuim

Codering	Energieabsorptie/gewicht (Joule/gram)	Gemiddelde EA/gewicht (Joule/gram)	Vershil (%)
I-A1RO/ANLHI-1	300,70	314,45	-14,76
I-A1RO/ANLHI-2	312,15		
I-A1RO/ANLHI-3	330,49		
I-A3RO/ANLHI-1	342,10	351,34	-16,66
I-A3RO/ANLHI-2	343,41		
I-A3RO/ANLHI-3	368,51		
I-A3RO/ANLFI-1	360,74	357,42	-15,21
I-A3RO/ANLFI-2	348,99		
I-A3RO/ANLFI-3	362,51		
I-S1RO/ANLHI-1	286,05	299,35	2,73
I-S1RO/ANLHI-2	302,71		
I-S1RO/ANLHI-3	309,28		
I-S1RO/ANLFI-1	287,48	291,29	-0,03
I-S1RO/ANLFI-2	294,15		
I-S1RO/ANLFI-3	292,25		
I-S3RO/ANLHI-1	354,27	354,90	-1,85
I-S3RO/ANLHI-2	358,36		
I-S3RO/ANLHI-3	352,05		
I-S3RO/ANLFI-1	330,79	337,07	-6,77
I-S3RO/ANLFI-2	343,81		
I-S3RO/ANLFI-3	336,62		

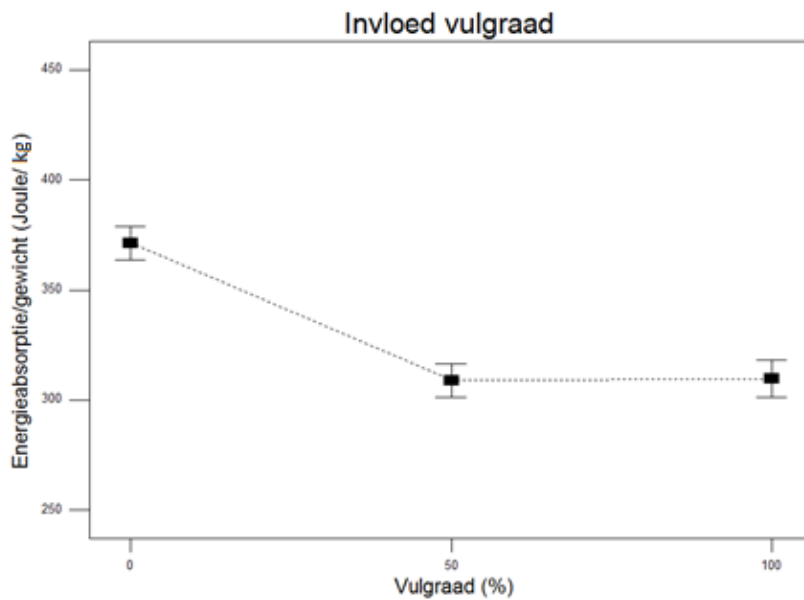
Bijlage 42: grafische weergave van de invloed van de vulgraad op de buigstijfheid



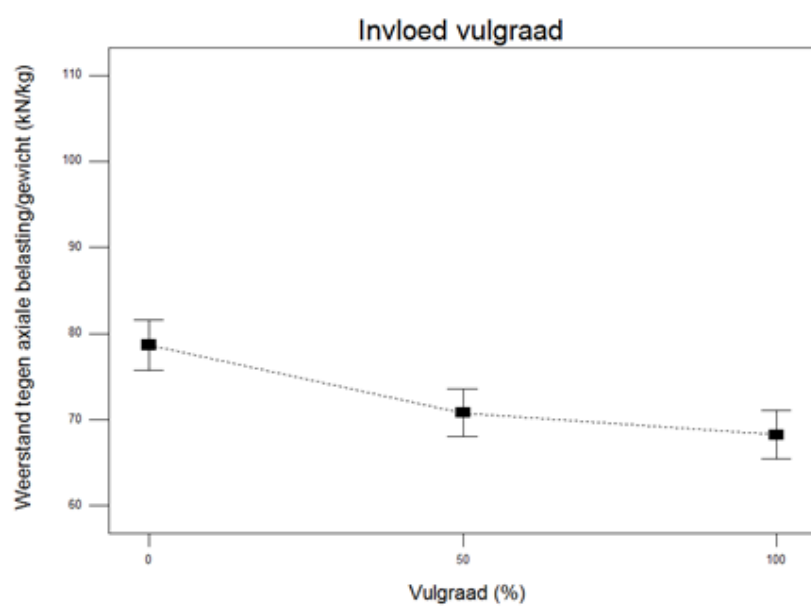
Bijlage 43: grafische weergave van de invloed van de vulgraad op de energieabsorptie voor profielen met een positieve relatieve toename (2C PU)



Bijlage 44: grafische weergave van de invloed van de vulgraad op de energieabsorptie voor profielen met een negatieve relatieve toename (MHS-schuim)



Bijlage 45: grafische weergave van de invloed van de vulgraad op de weerstand tegen axiale belasting



Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Onderzoek naar de invloed op de mechanische eigenschappen van ronde buisprofielen door het inwendig aanbrengen van schuim

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.

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

Voor akkoord,

Jannis, Wouter

Datum: **3/06/2014**