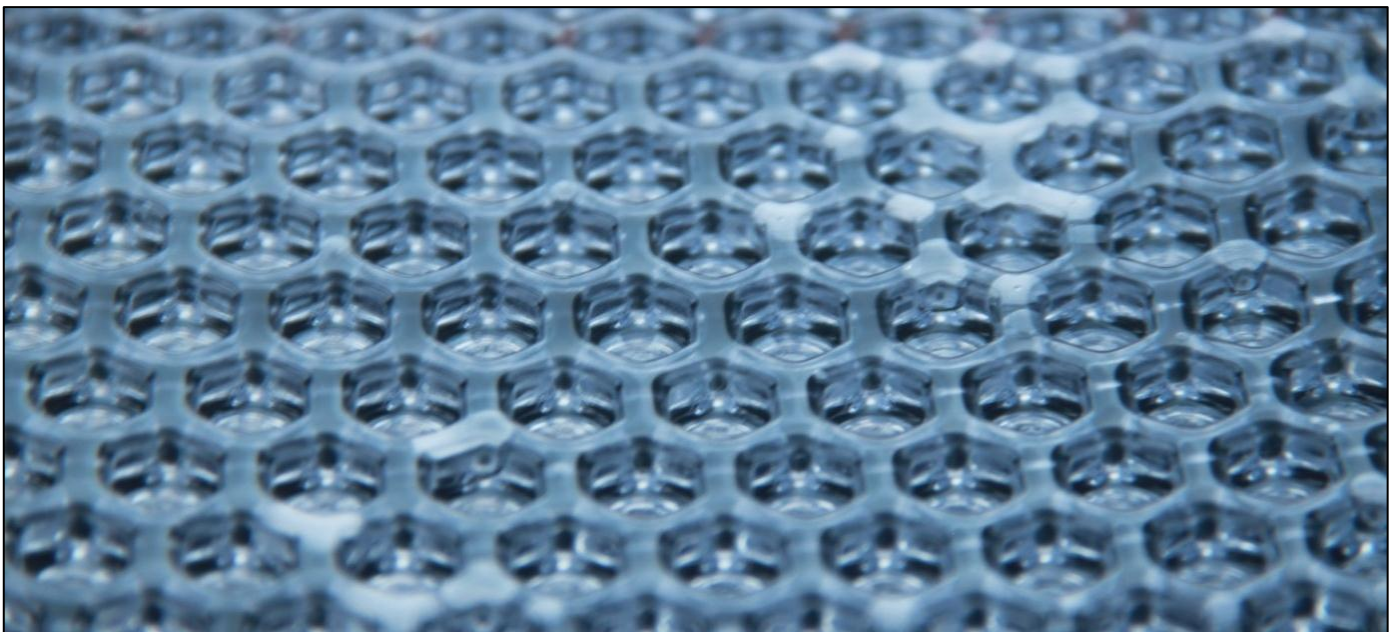


Bacheloropdracht:

# Nieuwe scheenbeschermers voor profvoetballers

van concept tot ontwerp



I.R. Dawson  
Juli 2013  
Industrieel Ontwerpen



UNIVERSITEIT TWENTE.



# Nieuwe scheenbeschermers voor profvoetballers

*van concept tot ontwerp*

## **Auteur**

I.R. Dawson  
s0195111

## **Opleiding**

Bachelor Industrieel Ontwerpen  
Universiteit Twente  
Enschede, Nederland

## **Opdracht uitgevoerd bij**

Roessingh Research and Development  
Roessinghsbleekweg 33b  
7522 AH Enschede  
Nederland

## **Bachelorexamen**

23 augustus 2013, 11:00  
Horst N229

## **Examencommissie**

dr. ir. G.M. Bonnema  
ir. E.E.G. Hekman  
dr. J. Reenalda

Voorzitter  
UT-begeleider  
Bedrijfsbegeleider



## Voorwoord

Aan de lezer,

Dit verslag is geschreven ter afronding van mijn bacheloropleiding Industrieel Ontwerpen aan Universiteit Twente. Dit verslag markeert daarnaast het einde van mijn periode bij Roessingh Research and Development, waar ik met veel plezier het in dit verslag omschreven onderzoek heb uitgevoerd.

Mijn dank gaat uit naar Jasper Reenalda en Edsko Hekman voor hun begeleiding en nuttige inbreng gedurende de uitvoer van dit onderzoek. Daarnaast wil ik ook Laurent Warnet, Juliet Haarman en Jeroen Olsman bedanken voor hun hulp.

Imro Dawson  
Enschede, juli 2013



## Samenvatting

In deze studie wordt een nieuw scheenbeschermerconcept met *shear thickening fluid* doorontwikkeld en gevalideerd. Dit concept is afkomstig uit een eerdere studie, waarin een scheenbeschermer ontwikkeld is die zowel veilig als comfortabel is. Hiermee zou het aantal blessures bij voetbal teruggebracht moeten worden, omdat spelers niet meer hoeven te kiezen tussen een veilige en oncomfortabele of een comfortabele en onveilige scheenbeschermer.

Deze studie is erop gericht om de verpakking van de *shear thickening fluid* van het nieuwe scheenbeschermerconcept produceerbaar te maken. Samen met de *shear thickening fluid* moet de verpakking ervoor zorgen dat de scheenbeschermer comfortabel is tijdens normale handelingen, zoals lopen, en uithardt op het moment dat er een inslag plaatsvindt, zoals een trap van een medespeler.

De ontworpen verpakking bestaat uit twee vellen van het elastomeer POE, welke door middel van blaasvormen gevormd worden tot een holle honingraatstructuur. Tijdens het blaasvormen worden de twee vellen verwerkt tot een flexibele verpakking voor de *shear thickening fluid*. Vervolgens wordt deze verpakking na het blaasvormen gevuld met de *shear thickening fluid* om zo het beschermende deel van de nieuwe scheenbeschermer te voltooiën. In totaal hebben de beschermende delen een gewicht van 222,2 gram per been. Daarnaast wordt de productieprijs van de scheenbeschermer geschat op €46,69 per speler bij maatproductie en €19,19 per speler in het geval van confectiematen.

Om de maakbaarheid van het ontwerp aan te tonen zijn er prototypes gemaakt. Daarnaast zijn er met deze prototypes slagproeven uitgevoerd om zo de geboden bescherming van de nieuwe scheenbeschermer te onderzoeken.

De slagproeven hebben aangetoond aan dat de nieuwe scheenbeschermer de druk van een inslag slecht verdeelt ten opzichte van een bestaande scheenbeschermer. De bestaande scheenbeschermer verdeelt de druk over een groter oppervlak en verdeelt de druk daarnaast ook geleidelijker en zonder de druk op enkele plaatsen te concentreren. Een betere drukverdeling is gerelateerd aan een betere bescherming tegen blessures.

Daarnaast is er tijdens de slagproeven waargenomen dat de nieuwe scheenbeschermer de energie van inslagen goed absorbeert. Zo kwam de slagpen tijdens de slagproeven met het prototype direct tot stilstand, terwijl de slagpen bij de bestaande scheenbeschermer enkele keren stuitte. Het ontbreekt aan meetgegevens om de waargenomen absorptie te onderbouwen. Hierdoor is het onduidelijk of de absorptie van de nieuwe scheenbeschermer kan compenseren voor het slecht verdelen van de druk.

Ten slotte is er tijdens de slagproeven ook gemeten met het concurrerende *shear thickening*-materiaal D3O. Dit materiaal toonde tijdens het experiment soortgelijke resultaten als het prototype: slechte verdeling van de druk en goede absorptie. Het D3O-materiaal heeft echter een veel lagere dichtheid dan het prototype.

Concluderend is uit dit onderzoek gebleken dat de nieuwe scheenbeschermer in vergelijking met een bestaande scheenbeschermer de druk slecht verdeelt, maar de energie van de inslag goed absorbeert. Door de soortgelijke prestaties en lagere dichtheid van D3O, wordt dit materiaal, mits het voldoende absorbeert om voor de drukverdeling te compenseren, gezien als een geschiktere optie voor een scheenbeschermer dan het concept van deze studie.



## Summary

In this study a new shin guard concept containing shear thickening fluid is developed and validated. This concept originates from a previous study where a shin guard is designed that is both safe and comfortable. With this shin guard the number of injuries in soccer should decrease because soccer players would no longer have to choose between a safe and uncomfortable or a comfortable and unsafe shin guard.

The aim of this study is to make the packaging of the shear thickening fluid manufacturable. The combination of the packaging and the shear thickening fluid are meant to make the shin guard comfortable during normal activities, like walking, and become hard when an impact occurs, like a kick from another player.

The designed packaging consists of two sheets of the elastomer POE that get shaped into a hollow honeycomb by blow molding. During blow molding both sheets are processed into the packaging of the shear thickening fluid. Next, the packaging gets filled with shear thickening fluid in order to finish the protective part of the new shin guard. The total weight of the protective parts is 222,2 grams per leg. Additionally, the production costs of the shin guard are estimated at €46,69 for one player when they are custom made and €19,19 when they are made in confection sizes.

Prototypes have been made during this study to prove the manufacturability of the design. Additionally, impact tests have been conducted with these prototypes to investigate the protection that is offered by the new shin guard.

The impact tests demonstrate that the new shin guard distributes the pressure caused by the impact poorly compared to an existing shin guard. The existing shin guard spreads the pressure over a larger surface area and subsequently distributes the pressure more gradual. A better pressure distribution is related to better protection against injuries.

Additionally, it has been observed that the new shin guard absorbs impact energy well. Upon impact the striker came to an immediate halt after it hit the new shin guard during impact tests, while the striker bounced a few times after it hit the existing shin guard. Data to support the observed absorption is lacking. Because of this, it is unclear whether or not the absorption of the new shin guards is sufficient to compensate for its poor pressure distribution.

Lastly, the shear thickening material D3O was also investigated during the impact tests. This material showed similar results to the new shin guard: poor distribution of the pressure and good absorption. The density of the D3O material is much lower than that of the prototype, though.

Concluding, this study has shown that the new shin guard performs worse on pressure distribution and better on energy absorption compared to an existing shin guard. Because of the similar performance and the lower density of D3O, this material is believed to be a better candidate for a new shin guard than the concept developed in this study, provided that its absorption is good enough to compensate for the poor pressure distribution.

# Inhoudsopgave

<b>1 Inleiding</b> .....	<b>13</b>
1.1 Blessure-incidentie.....	13
1.2 Scheenbeschermers.....	13
1.2.1 Nieuwe scheenbeschermers voor profvoetballers .....	14
1.3 Doelstelling.....	15
<b>2 Analyse</b> .....	<b>17</b>
2.1 Doelgroep.....	17
2.2 Bescherming van het onderbeen.....	17
2.2.1 Blessures aan het onderbeen .....	17
2.2.2 Bescherming van een scheenbeschermer .....	17
2.3 Uitgangspositie van het concept .....	18
2.4 Concept .....	19
2.4.1 Shear thickening fluid .....	19
2.4.2 Verpakking van shear thickening fluid .....	20
2.4.3 Bevestiging van scheenbeschermer .....	21
2.5 Validatie van het concept .....	21
2.6 Verbeterpunten concept .....	22
2.6.1 Materiaal en productie .....	22
2.6.2 Validatie .....	22
2.6.3 Europese normen.....	23
2.6.4 Effect van temperatuur .....	23
2.6.5 Cesiumchloride .....	24
2.7 Uitgangspositie ontwerp en validatie .....	24
2.8 Functies, eisen en wensen .....	25
2.8.1 Functies .....	25
2.8.2 Eisen en wensen.....	25
<b>3 Ontwerp</b> .....	<b>31</b>
3.1 Materiaalselectie .....	31
3.2 Verwerking van geselecteerde materialen .....	32
3.2.1 Vormen .....	32
3.2.2 Verbinden .....	33
3.3 Concepten .....	35
3.3.1 Concept 1 - 3d-printen .....	35
3.3.2 Concept 2, 3 en 4 - Folie .....	36
3.3.3 Concept 5 en 6 - Poreuze kern .....	38
3.3.4 Concept 7 en 8 - Slangen.....	39
3.3.5 Concept 9 en 10 - Spuitgieten.....	41
3.4 Conceptkeuze .....	43

3.4.1	Vergelijking van de concepten.....	43
3.4.2	Conceptkeuze.....	46
3.5	<i>Eindontwerp</i> .....	47
3.5.1	Afmetingen.....	47
3.5.2	Compartimenten, vulopeningen en mallen .....	48
3.5.3	Gewicht .....	49
3.5.4	Productiestappen verpakking.....	49
3.6	<i>Totaalproduct</i> .....	52
3.6.1	Maatproductie.....	52
3.6.2	Productie totaalproduct .....	53
3.6.3	Kosten.....	53
3.7	<i>Controleren van eisen</i> .....	54
<b>4</b>	<b>Validatie</b> .....	<b>55</b>
4.1	<i>Prototypes</i> .....	55
4.1.1	Prototypebouw .....	55
4.1.2	Kromming .....	56
4.1.3	Resultaten prototypebouw .....	56
4.1.4	Discussie en conclusie prototypebouw .....	57
4.2	<i>Slagproeven</i> .....	58
4.2.1	Materiaal & Methode .....	58
4.2.2	Resultaten .....	62
4.2.3	Discussie van de slagproeven .....	66
4.2.4	Conclusie van de slagproeven .....	69
<b>5</b>	<b>Discussie, conclusie en aanbevelingen</b> .....	<b>71</b>
5.1	<i>Discussie en conclusie</i> .....	71
5.2	<i>Aanbevelingen</i> .....	71
<b>6</b>	<b>Referenties</b> .....	<b>73</b>
<b>Bijlage A</b>	<b>Stakeholder-analyse van Haarman</b> .....	<b>75</b>
<b>Bijlage B</b>	<b>Programma van Eisen van Haarman</b> .....	<b>76</b>
<b>Bijlage C</b>	<b>Geschikte materialen</b> .....	<b>77</b>
<b>Bijlage D</b>	<b>Verwerkingsmogelijkheden geselecteerde materialen</b> .....	<b>78</b>
<b>Bijlage E</b>	<b>Kostenschatting maatproductie</b> .....	<b>79</b>
<b>Bijlage F</b>	<b>Controle van het Programma van Eisen en Wensen</b> .....	<b>81</b>
<b>Bijlage G</b>	<b>Fotoverslag prototypebouw</b> .....	<b>82</b>
<b>Bijlage H</b>	<b>Resultaten validatie Haarman</b> .....	<b>85</b>
<b>Bijlage I</b>	<b>Carbon</b> .....	<b>86</b>



## 1 Inleiding

Voetbal is een sport die door zeer veel mensen uitgeoefend wordt. Uit een inventarisatie van de Wereldvoetbalbond FIFA (2007) blijkt dat er in 2006 wereldwijd 265 miljoen mensen voetbal spelen en dat er daarnaast nog 5 miljoen mensen actief zijn om voetbal te faciliteren (scheidsrechters en andere officials). Ten opzichte van een soortgelijke inventarisatie van de FIFA in 2000, is het totaal aantal voetballers in de tussenliggende periode met 10% gestegen.

### 1.1 Blessure-incidentie

Naast dat een zeer groot aantal mensen voetbal speelt, kent voetbal ook een zeer hoge blessure-incidentie. Zo heeft Ekstrand (2008) in een studie onder verschillende professionele voetbalclubs uit Europa gevonden dat er gemiddeld zes tot negen blessures optreden per 1000 voetbal-uren. Dit vertaalt zich naar 40 tot 50 blessures per seizoen binnen een team van 25 spelers. Ook andere onderzoeken tonen vergelijkbare aantallen (Hawkins and Fuller 1999; Peterson, Junge et al. 2000; Le Gall, Carling et al. 2008).

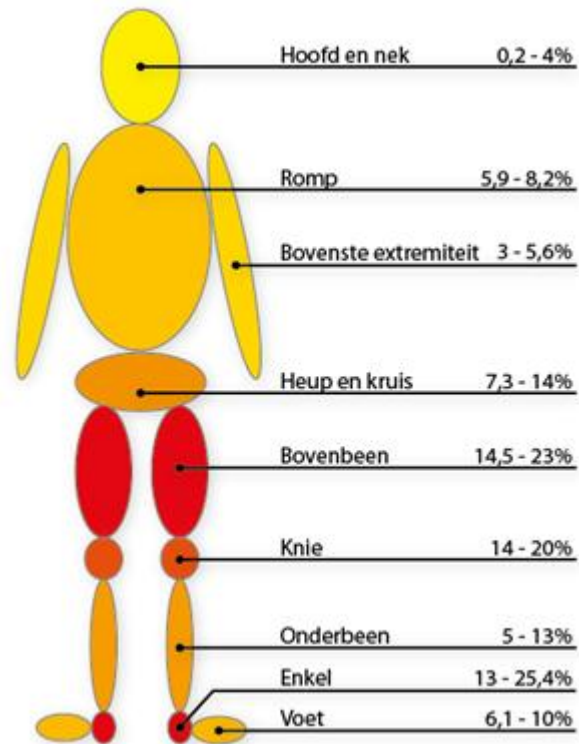
Hawkins en Fuller (1999) hebben daarnaast de blessure-incidentie bij professioneel voetbal vergeleken met de blessure-incidentie bij industriële beroepen die doorgaans geassocieerd worden met een hoog risico (bijvoorbeeld de mijnbouw). Hieruit is naar voren gekomen dat de blessure-incidentie bij professioneel voetbal 1000 keer hoger ligt dan bij de 'gevaarlijke' industriële beroepen.

Van alle blessures wordt 40% tot 66% (afhankelijk van welke studie gelezen wordt) veroorzaakt door een contactsituatie, zoals een botsing met een andere speler (Hawkins and Fuller 1999; Peterson, Junge et al. 2000; Rumpf and Cronin 2012). In figuur 1 is te zien waar op het lichaam de verschillende blessures (contact en non-contact) zich voordoen.

Volgens Dvorak en Junge (2000) zorgen het grote aantal voetballers wereldwijd en de hoge blessure-incidentie voor grote socio-economische en financiële consequenties. Volgens Dvorak et al. zijn er dan ook preventieve maatregelen nodig.

### 1.2 Scheenbeschermers

Een van de middelen om het aantal blessures terug te brengen is de scheenbeschermer. Scheenbeschermers hebben als doel om de schenen, en in sommige gevallen ook de enkels, van een speler te beschermen in contactsituaties. Hierbij biedt de scheenbeschermer hoofdzakelijk bescherming aan de huid, onderliggend weefsel en bot. (Lees and Nolan 1998)



Figuur 1 - Locaties waar blessures zich voordoen met percentages van de blessure-incidentie op dat lichaamsdeel. Percentages afkomstig uit (Hawkins and Fuller 1999; Peterson, Junge et al. 2000; Ekstrand 2008; Le Gall, Carling et al. 2008).

Sinds 1990 geldt er vanuit de FIFA de verplichting om scheenbeschermers te dragen tijdens voetbalwedstrijden (Bayly 2011). Deze verplichting geldt zowel voor internationale wedstrijden als voor wedstrijden die vallen onder een de FIFA aangesloten voetbalbond (FIFA 2012). Op dit moment zijn er 209 voetbalbonden aangesloten bij de FIFA, waarvan de meesten een nationale voetbalbond zijn (FIFA 2013).

Scheenbeschermers komen voor in verschillende vormen en maten. Over het algemeen bestaan de hedendaagse scheenbeschermers uit twee onderdelen: een harde plaat met daaronder een laag schuim. De buitenplaat wordt meestal gemaakt van een kunststof, aluminium of een composiet (zoals glasvezelversterkt kunststof) terwijl de binnenlaag meestal bestaat uit EVA (ethyleenvinylacetaat). (Lees and Nolan 1998; Haarman 2012)

In eerder onderzoek is aangetoond dat het dragen van scheenbeschermers zorgt voor een vermindering van de piekkracht wanneer een object (zoals een voet) de scheenbeschermer raakt (Francisco, Nightingale et al. 2000; Ankrah and Mills 2003). Hierbij merkt Ankrah (2003) op dat er veel verschillen bestaan tussen de testopstellingen en –methoden van de verschillende onderzoeken. Mogelijk is dit een verklaring voor de variatie in de gemeten piekkrachtvermindering tussen verschillende onderzoeken: het ene onderzoek vindt een krachtvermindering van 11% tot 17% bij verschillende scheenbeschermers, terwijl twee andere onderzoeken een krachtvermindering vinden van 40% tot 70% en 28% tot 53% (Ankrah and Mills 2003).

Er bestaan standaarden waar scheenbeschermers aan moeten voldoen, maar deze standaarden zijn hoofdzakelijk gericht op veiligheid en in veel mindere mate op comfort. Dit leidt er toe dat sommige sporters hun beschermingsmiddelen aanpassen om meer comfort te krijgen, ook al kan dit de veiligheid beïnvloeden. (Velani, Wilson et al. 2012). Ook blijkt uit het werk van Haarman (2012) dat voetballers een scheenbeschermer kiezen die voldoende comfort biedt, zonder rekening te houden met de geboden veiligheid. Dit was voor Haarman (2012) dan ook een van de redenen om een nieuw concept scheenbeschermer te ontwikkelen: een scheenbeschermer die veilig én comfortabel is.

### **1.2.1 Nieuwe scheenbeschermers voor profvoetballers**

De door Haarman (2012) ontwikkelde scheenbeschermers onderscheiden zich van de bestaande scheenbeschermers doordat ze niet bestaan uit een harde buitenplaat en een zachte binnenlaag. De nieuwe scheenbeschermers bestaan uit *shear thickening fluid* in een flexibele verpakking. De werking van het concept berust op de eigenschap van *shear thickening fluids* dat deze vloeibaar zijn bij lage afschuifsnelheden, maar hard worden bij grotere afschuifsnelheden. Door deze eigenschap zou de scheenbeschermer flexibel moeten zijn en comfort moeten bieden tijdens de normale handelingen van een voetballer, zoals lopen, en bescherming moeten bieden zodra er een inslag plaatsvindt, zoals een trap van een andere speler.

Hoewel eerste testen met betrekking tot piekkrachtvermindering (door middel van slagproeven) en comfort (door middel van een gebruikstest) goede resultaten hebben opgeleverd, moet de nieuwe scheenbeschermer nog verder uitgewerkt worden alvorens deze daadwerkelijk geproduceerd kan worden. Een van de belangrijkste verbeterpunten is de materiaalkeuze en produceerbaarheid. (Haarman 2012)

### 1.3 Doelstelling

Binnen deze studie wordt het concept voor nieuwe scheenbeschermers verder uitgewerkt tot een produceerbaar ontwerp. Ook wordt het eindontwerp gevalideerd door met behulp van een prototype testen uit te voeren.

In de rest van dit verslag worden de volgende hoofd- en deelvragen beantwoord ter ondersteuning van de doelstelling:

1. Hoe kan de nieuwe scheenbeschermer bescherming bieden?
  - a. Op welke wijze dient de scheen beschermd te worden?
  - b. Op welke wijze dient de enkel beschermd te worden?
2. Wat zijn de kenmerken van het concept en wat zijn de mogelijke verbeterpunten?
  - a. Hoe werkt het concept?
  - b. Welke verbeterpunten volgen er uit het afstudeerverslag?
  - c. Welke verbeterpunten zijn er volgens de betrokkenen?
3. Waar moet de nieuwe scheenbeschermer aan voldoen?
  - a. Welke functies, eisen en wensen volgen er uit het afstudeerverslag?
  - b. Welke functies, eisen en wensen zijn er volgens de betrokkenen?
4. Wat is een mogelijke oplossing, in het bijzonder vanuit het oogpunt van produceerbaarheid?
  - a. Welke materialen zijn geschikt voor de scheenbeschermer?
  - b. Welke productieprocessen zijn geschikt voor de scheenbeschermer?
5. Voldoet de mogelijke oplossing aan de gestelde eisen?

Bij het beantwoorden van alle hoofd- en deelvragen staat de produceerbaarheid van het nieuwe scheenbeschermerconcept centraal. Hierbij ligt het principe van het concept vast en zullen hier hooguit enkele kleine wijzigingen in toegepast worden.

De eerste drie hoofdvragen van deze studie worden in hoofdstuk 2 behandeld. Hierbij wordt gekeken naar hoe scheenbeschermers bescherming kunnen bieden, hoe het nieuwe scheenbeschermerconcept werkt en welke verbeterpunten er voor het nieuwe concept zijn. Aan het eind van hoofdstuk 2 wordt de uitgangspositie van deze studie uiteengezet, waarbij ook wordt toegelicht welke van de verbeterpunten in deze studie worden meegenomen. Als afsluiting van dit hoofdstuk worden de functies, eisen en wensen voor het ontwerptraject van deze studie toegelicht.

Hoofdstuk 3 omschrijft het ontwerptraject van deze studie. Hiervoor wordt eerst gekeken naar welke materialen toegepast kunnen worden en welke verwerkingsmogelijkheden er met deze materialen mogelijk zijn. Vervolgens worden er verschillende concepten toegelicht en wordt er een van deze concepten gekozen. Na de conceptkeuze wordt het gekozen concept uitgewerkt tot een eindontwerp. Aan het eind van het hoofdstuk wordt er aandacht besteed aan hoe de volledige scheenbeschermer in elkaar zit en wat de kosten van de productie zijn. Tot slot wordt er teruggeblikt op het programma van eisen en wordt er gekeken in hoeverre het ontwerp hier aan voldoet.

In hoofdstuk 4 wordt de validatie van het ontwerp toegelicht. Hiertoe wordt er eerst ingegaan op de totstandkoming van de onderzochte prototypes, waarna het experiment zelf wordt toegelicht. Aan het eind van dit hoofdstuk worden er conclusies getrokken naar aanleiding van het experiment.

Als afsluiting wordt er in hoofdstuk 5 teruggeblikt op de gehele studie en worden er aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.



## 2 Analyse

In (Haarman 2012) wordt de totstandkoming van een nieuw concept scheenbeschermers toegelicht. Tijdens het ontwerpproces heeft Haarman verschillende concepten gegenereerd en enkele daarvan onderworpen aan slagproeven om te bepalen of ze in staat waren bescherming te bieden. Aan de hand van de resultaten van deze proeven is er een eindconcept gegenereerd en is er een prototype gemaakt. Dit prototype is vervolgens gebruikt om het comfort van de scheenbeschermers te valideren.

Vanwege de veelbelovende resultaten die behaald zijn met het nieuwe scheenbeschermerconcept, is er vanuit Roessingh Research and Development besloten om verder te gaan met dit concept. Binnen deze studie zal het concept zoals omschreven door Haarman dan ook als uitgangspunt dienen. In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar wat de mogelijke onderbeen- en enkelblessures zijn en hoe die voorkomen kunnen worden. Daarnaast zullen de verschillende eigenschappen van het concept worden toegelicht, inclusief aandachts- en verbeterpunten. Aan de hand van het de verbeterpunten wordt vervolgens de uitgangspunt van deze studie toegelicht. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met het omschrijven van de functies, eisen en wensen waar het eindontwerp aan moet voldoen.

### 2.1 Doelgroep

De doelgroep van het concept van Haarman (2012) bestaat uit profvoetballers. Door profvoetballers als doelgroep te kiezen, is het mogelijk om de scheenbeschermers op maat te laten maken. De verwachting namelijk is dat op maat gemaakte scheenbeschermers beter kunnen beschermen en meer comfort kunnen bieden dan wanneer ze slechts beschikbaar zijn in confectiematen. Daarnaast wordt verwacht dat op maat gemaakte scheenbeschermers meer kosten dan confectiescheenbeschermers en dat profvoetballers meer (kunnen) besteden aan scheenbeschermers.

### 2.2 Bescherming van het onderbeen

Alvorens de nieuwe scheenbeschermer verder toegelicht wordt, dient er gekeken te worden naar hoe het onderbeen beschermd kan worden. Zo is het zinvol om vooraf te weten wat de zwakke plekken van het onderbeen zijn en hoe deze het beste beschermd kunnen worden.

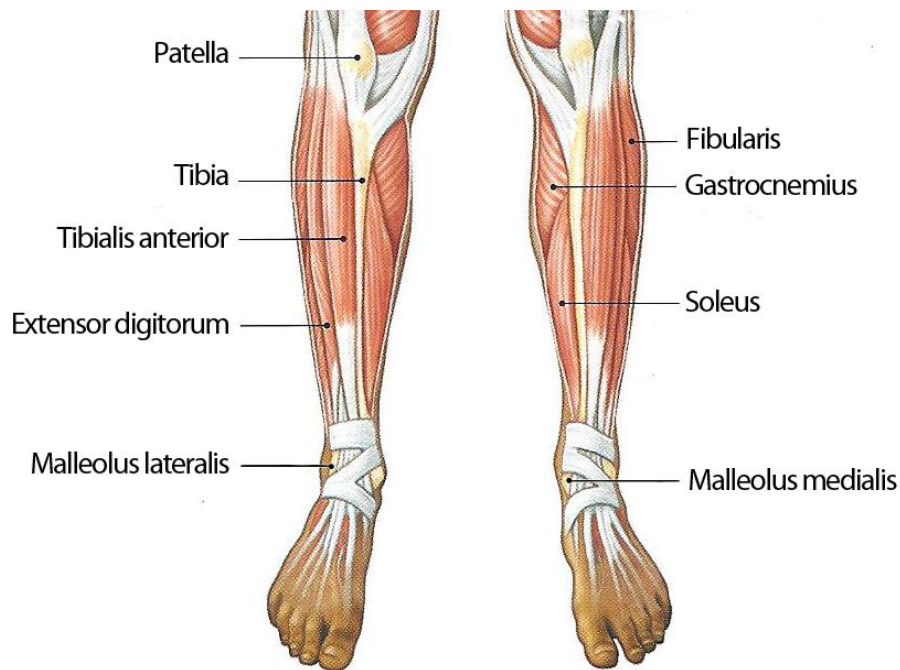
#### 2.2.1 Blessures aan het onderbeen

De aandoeningen die een voetballer op kan lopen door een botsing met zijn onderbeen of enkel zijn fracturen, kneuzingen en beschadigingen (scheuren, snijden, schuren en perforeren) van de huid (Brukner and Khan 2009).

Uit onderzoek is gebleken dat 2% tot 6% van alle blessures een fractuur is en 15% tot 20% een kneuzing (Hawkins and Fuller 1999; Ekstrand 2008; Le Gall, Carling et al. 2008; Rumpf and Cronin 2012). Een kanttekening bij deze percentages is dat er in ieder geval tot 2006 grote verschillen zaten in de definitie van blessures en de meetmethode van verschillende onderzoeken (Ekstrand 2008). Hoewel deze onderzoeken dus niet direct vergeleken kunnen worden, geven ze een indicatie van de incidentie van verschillende blessures. Ten slotte worden in geen enkele studie beschadigingen aan de huid expliciet vermeld.

#### 2.2.2 Bescherming van een scheenbeschermer

De plekken waar een scheenbeschermer de meeste bescherming kan bieden, is op die plekken waar bot het meest oppervlakkig ligt. Dit wordt door Velani et al. (2012) toegelicht met de redenering dat het been op deze locaties minder zacht weefsel bevat dat energie kan absorberen. In het onderbeen dient een scheenbeschermer dan ook de meeste bescherming te bieden aan de voorzijde van de tibia (scheen) en bij de mediale en laterale malleoli (uitsteeksels aan de binnen- en buitenzijde van de enkel) (Velani, Wilson et al. 2012). Zie figuur 2 voor een afbeelding van de anatomie van het onderbeen.



Figuur 2 - De anatomie van het onderbeen. Op de afbeelding is te zien dat de tibia en de mediale en laterale malleoli nauwelijks bedekt worden door spieren. Afbeelding gebaseerd op (Martini and Bartholomew 2013).

Lees en Nolan (1998) en Haarman (2012) noemen dat een scheenbeschermer zijn gebruiker beschermt door enerzijds energie te absorberen en anderzijds de belasting te verspreiden. Het verspreiden van de belasting kan zowel over een oppervlak als door de tijd. Wanneer de contacttijd verlengd wordt, wordt de energie van de botsing over een langere tijd overgebracht, waardoor de piekkracht daalt (Boden, Lohnes et al. 1999; Francisco, Nightingale et al. 2000). Het verspreiden van de belasting over een groter oppervlak zorgt voor een vermindering in de lokale druk, waardoor de kans op kneuzingen of schade aan de huid afneemt (Lees and Nolan 1998; Francisco, Nightingale et al. 2000).

Verscheidene studies stippen aan dat scheenbeschermers niet geschikt zijn voor het voorkomen van tibiafracturen, omdat de energieën die daarbij komen kijken te hoog zijn (Cattermole 1996; Lees and Nolan 1998; Ankrah and Mills 2003). Omdat scheenbeschermers als doel hebben om botsingen te dempen, zouden ze wel net het verschil kunnen maken tussen wel of geen fractuur. Dit vermoeden wordt ook ondersteund door Chang et al. (2007), in wiens onderzoek een afname in het aantal tibiafracturen wordt waargenomen sinds het verplicht stellen van scheenbeschermers door de FIFA.

### 2.3 Uitgangspositie van het concept

Om de functies, eisen en wensen van de scheenbeschermer in kaart te brengen heeft Haarman (2012) een stakeholderanalyse uitgevoerd en een enquête verspreid onder spelers van de voetbalclubs FC Twente en Heracles Almelo. De belangrijkste resultaten van de enquête zijn dat comfort, het niet afzakken van de scheenbeschermer tijdens gebruik en gemak bij het aantrekken als belangrijk worden ervaren. Het gewicht van een scheenbeschermer speelt een beperkte rol in de ervaring van de gebruiker. Ook is uit de enquête naar voren gekomen dat huidirritatie (dermatitis) door toedoen van de scheenbeschermers een veelvoorkomend probleem is. De stakeholderanalyse van Haarman is te zien in Bijlage A.

Op basis van de door haar uitgevoerde stakeholderanalyse en enquête heeft Haarman (2012) functies, eisen en wensen voor het nieuwe scheenbeschermerconcept opgesteld. De hoofd- en subfuncties van

de gehele scheenbeschermer worden hieronder weergegeven en het programma van eisen en wensen is te zien in Bijlage B.

Hoofdfunctie: *Been beschermen*

Subfunctie 1: *Energie absorberen*

Subfunctie 2: *Energie verdelen*

Subfunctie 3: *Bevestigen aan been*

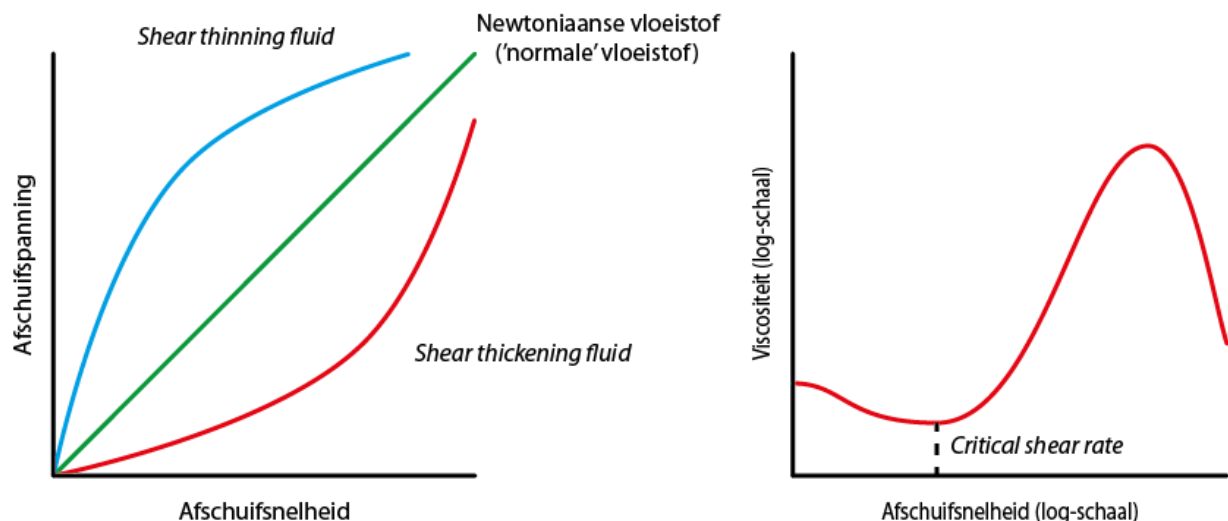
## 2.4 Concept

Het scheenbeschermerconcept zelf bestaat uit drie hoofdonderdelen: *shear thickening fluid* om het been te beschermen, een verpakking om de *shear thickening fluid* bijeen te houden en een nauw aansluitende kous om de bescherming aan het been te kunnen bevestigen.

### 2.4.1 Shear thickening fluid

De werkzame component van het concept is *shear thickening fluid*. *Shear thickening fluid* is een vloeistof waarvan de viscositeit toeneemt wanneer er afschuiving plaatsvindt (Barnes 1989). Door deze eigenschap is de vloeistof vloeibaar zolang er kleine en relatief rustige bewegingen plaatsvinden, zoals het lopen van de voetballer. Wanneer er echter een grotere afschuifsnelheid in de vloeistof optreedt, neemt de viscositeit van de vloeistof toe waardoor de kracht beter geabsorbeerd en verdeeld wordt.

In figuur 3 wordt de werking van *shear thickening fluids* schematisch weergegeven. Bij *shear thickening fluids* bestaat er een *critical shear rate*: de afschuifsnelheid waarna het *shear thickening*-effect zijn intrede doet. Wanneer de afschuifsnelheid binnen de vloeistof dus boven de *critical shear rate* komt, zal de viscositeit van de vloeistof toenemen. (Barnes 1989; Haarman 2012)



Figuur 3 - Schematische grafieken over het gedrag van *shear thickening fluids*. Links neemt afschuifspanning in de vloeistof niet-lineair toe bij toenemende afschuifsnelheid. Rechts varieert de viscositeit bij verschillende afschuifsnelheden. Afbeeldingen gebaseerd op (Barnes 1989; Sojoudi and Saha 2012).

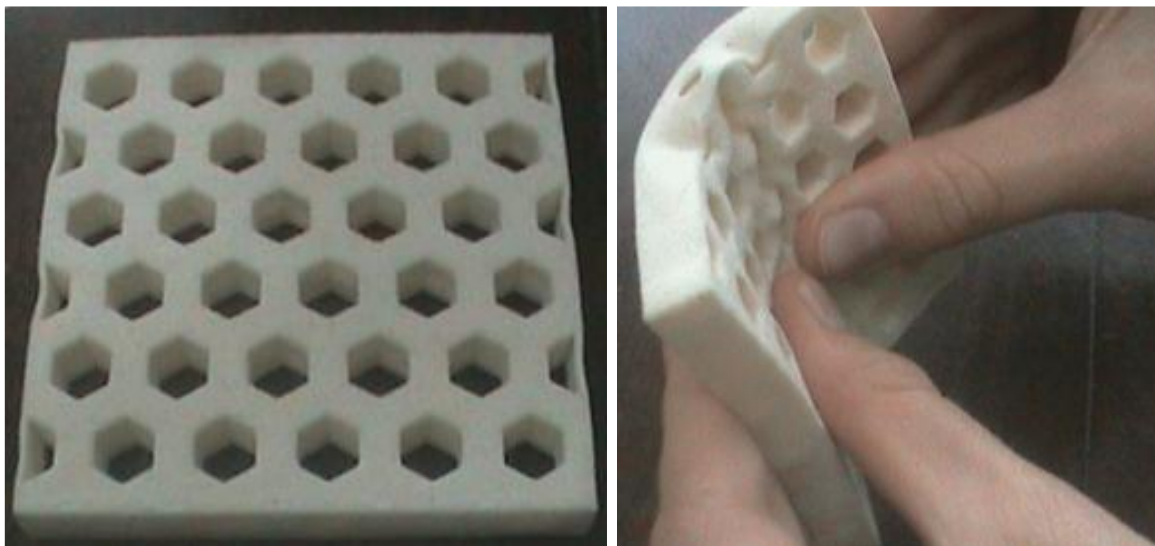
De door Haarman (2012) gebruikte *shear thickening fluid* is een mengsel van water, maïzena en cesiumchloride (CsCl). De maïzena en het water zorgen voor het *shear thickening*-gedrag en het toevoegen van CsCl zorgt ervoor dat de maïzena niet in de loop der tijd bezinkt. De exacte

verhoudingen van de *shear thickening fluid* zijn 40wt% maïzena, 33wt% cesiumchloride en 27wt% demiwater, waarin wt% een percentage van het totale gewicht aanduidt. (Haarman 2012)

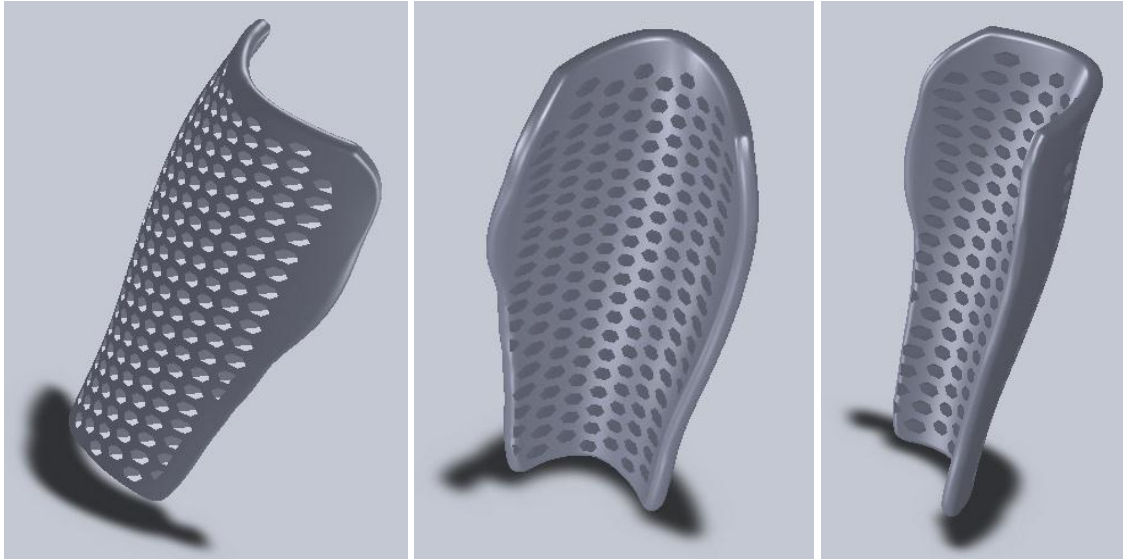
#### 2.4.2 Verpakking van shear thickening fluid

Om een *shear thickening fluid* te kunnen gebruiken in een scheenbeschermer, is er een vorm van verpakking nodig. Deze verpakking dient enerzijds flexibel te zijn, zodat de *shear thickening fluid* zijn functie kan blijven vervullen en opdat de scheenbeschermer zich naar het been kan vormen. Anderzijds moet de verpakking bestand zijn tegen de omgevingsfactoren die horen bij scheenbeschermers, zoals zweet en externe krachten (bijvoorbeeld een trap van een medespeler). (Haarman 2012)

Uit testen van Haarman (2012) is gebleken dat een dikte van de *shear thickening fluid* van acht millimeter geschikt is voor gebruik in een scheenbeschermer. Wegens de dichtheid van de vloeistof zou dit echter zorgen voor een grote massa van de gehele scheenbeschermer. Om de massa van de scheenbeschermer te beperken is er door Haarman voor gekozen om de *shear thickening fluid* te verpakken in een honingraatstructuur. Hierbij bevindt de vloeistof zich in de (holle) wanden van de honingraatstructuur en blijven de gaten van de honingraatstructuur leeg (zie figuur 4 en 5). Tests met een dergelijke structuur hebben uitgewezen dat gemiddelde piekkracht en contacttijd weinig verschillen ten opzichte van een concept bestaande uit massief *shear thickening fluid*. (Haarman 2012)



Figuur 4 – Twee foto's van de honingraatverpakking. Rechts is aan de bovenzijde een opening te zien die gebruikt kan worden om de verpakking te vullen. Afbeeldingen overgenomen uit (Haarman 2012).



Figuur 5 – SolidWorks-renders van een model van het nieuwe scheenbeschermerconcept. Afbeeldingen overgenomen uit (Haarman 2012).

Samen met de *shear thickening fluid* vormt de verpakking het beschermende deel van het nieuwe scheenbeschermerconcept. Dit beschermende dient flexibel te zijn bij rustige bewegingen zoals het lopen van een voetballer, maar moet hard worden bij een snellere vervorming, zoals een trap van een andere speler. Het uitharden van de *shear thickening fluid* moet er bij een inslag voor zorgen dat de energie van de klap verdeeld wordt over een groter oppervlak. Dit sluit aan bij de eerste subfunctie van het concept.

#### 2.4.3 Bevestiging van scheenbeschermer

Om de met *shear thickening fluid* gevulde honingraatstructuur te bevestigen aan de schenen van een voetballer, is ervoor gekozen om gebruik te maken van een nauw aansluitende kous. Deze kous is te vergelijken met een compressiekous, maar dan minder strak. Wanneer er ruimtes op de kous gemaakt worden waar de honingraatstructuur in past, kan de honingraatstructuur er eenvoudig uit gehaald worden opdat de kous gewassen kan worden. Daarnaast kan er door de kous op maat te maken voor gezorgd worden dat de bescherming van de honingraatstructuur zich op de juiste plekken bevindt. (Haarman 2012).

Het gebruik van een nauw aansluitende kous heeft ten slotte het voordeel dat deze niet afzakt, geen bandjes bevat die structuren in de kuit af kunnen knellen en dat hij zich goed vormt naar de vorm van het onderbeen.

#### 2.5 Validatie van het concept

De met *shear thickening fluid* gevulde honingraatstructuur is door Haarman (2012) getest op in welke mate het de piekkracht bij een inslag kan verminderen. Bij dit experiment is de honingraatstructuur vergeleken met massief *shear thickening fluid* en een bestaande scheenbeschermer. Uit de test is naar voren gekomen dat beide *shear thickening fluid*-oplossingen zorgen voor een piekkrachtvermindering van circa 70% ten opzichte van de bestaande scheenbeschermer.

Tijdens een ander experiment is naar voren gekomen dat het energieverbruik van een voetballer niet significant verandert wanneer hij rent met het prototype om zijn benen, ook al is deze 50 gram zwaarder dan zijn eigen scheenbeschermer. Tevens werd het prototype door de voetballer hoger beoordeeld op comfort dan een bestaande scheenbeschermer. (Haarman 2012)

## 2.6 Verbeterpunten concept

Hoewel de testresultaten van het prototype veelbelovend zijn, kent het concept nog enkele verbeterpunten. Deze verbeterpunten worden hieronder toegelicht, waarna in de volgende paragraaf (2.7) ingegaan zal worden op welke verbeterpunten worden verwerkt in deze studie.

### 2.6.1 Materiaal en productie

Een eerste aanbeveling die in (Haarman 2012) aangedragen wordt, is dat er uitgebreider gekeken moet worden naar de materialen en productieprocessen voor het vervaardigen van de honingraatstructuur. Bij het eindconcept van de nieuwe scheenbeschermer worden er namelijk wel enkele mogelijke materialen en productiemethoden aangestipt, maar worden deze opties niet verder toegelicht.

De keuze voor een honingraatstructuur is daarnaast hoofdzakelijk gemaakt om het gewicht van de scheenbeschermer te reduceren (persoonlijke communicatie Juliet Haarman MSc, Roessingh Research and Development). Daarnaast zijn de afmetingen van de honingraat aangepast aan de mogelijkheden van de beschikbare 3d-print-apparatuur (persoonlijke communicatie met dr. Jasper Reenalda, Roessingh Research and Development). Dit heeft als gevolg dat andere verpakingsstructuren en afmetingen mogelijk ook geschikt zijn voor de nieuwe scheenbeschermer.

### 2.6.2 Validatie

De tweede aanbeveling die omschreven wordt in (Haarman 2012) is het verbeteren van de validatie van het ontwerp. Bij het valideren van het concept zijn er door Haarman namelijk enkele aannames en vereenvoudigingen toegepast, waardoor de resultaten mogelijk minder representatief zijn.

De verbeterpunten die Haarman (2012) aandraagt met betrekking tot de slagproeven om de piekkrachtvermindering te bepalen, hebben betrekking op de vorm van de slagpen, de locatie waar de kracht gemeten wordt en de grootte van de scheenbeschermer. Zo is er bijvoorbeeld gebruik gemaakt van een slagpen waarvan het raakoppervlak weinig overeenkomst had met de vorm of het formaat van de neus of een nop van een voetbalschoen. Ook is bij deze testen de inslagkracht gemeten aan de kant van de slagpen in plaats van onder de scheenbeschermer, terwijl de krachten onder de scheenbeschermer relevant zijn voor het al dan niet ontwikkelen van blessures. Ten slotte is er tijdens de testen maar een gedeelte van de scheenbeschermers onderzocht, in plaats van een compleet product. Hierdoor is het op dit moment onduidelijk wat de effecten zijn van een groter oppervlak van de scheenbeschermers.

Haarman (2012) noemt daarnaast dat de scheenbeschermer in een later stadium door voetballers getest moet worden op comfort, ook wanneer ze gedurende een langere periode gebruikt worden.

Een verbeterpunt dat niet door Haarman (2012) wordt genoemd is de vorm van de ondergrond tijdens het testen. In de testen van Haarman liggen de (delen van) scheenbeschermers namelijk op een vlakke ondergrond. Er wordt echter verwacht dat deze situatie niet representatief is voor de werking van de nieuwe scheenbeschermer wanneer deze om een been gedragen wordt. Dit komt omdat de *shear thickening fluid* naar verwachting maar op een klein oppervlak uithardt wanneer deze getroffen wordt op een gekromd oppervlak en de kracht in die situatie maar in geringe mate verdeeld wordt over een groter oppervlak.

Een tweede verbeterpunt dat niet door Haarman (2012) wordt genoemd is het opnemen van het materiaal D3O in de tests. D3O is een *shear thickening*-materiaal dat sinds 2006 in verschillende kledingstukken, zoals motorkleding en kniebeschermers, wordt toegepast. Hoewel dit materiaal nog niet wordt toegepast voor scheenbeschermers, is het materiaal flexibel, heeft het een lage dichtheid en

belooft de producent zeer goede bescherming. (D3O 2013). Door deze eigenschappen lijkt D3O een mogelijke concurrent voor het concept van (Haarman 2012), waardoor het goed zou zijn om dit materiaal ook mee te nemen tijdens testen.

### 2.6.3 Europese normen

Om in de Europese Unie verkocht te mogen worden, dient een scheenbeschermer te voldoen aan de Europese Richtlijn 89/686/EEC en voorzien te zijn van een CE-markering (EEC 1989). Hiertoe dient de scheenbeschermer te voldoen aan de Europese normen EN 13061:2009 en EN 340:2003 (EC 2013). De norm EN 13061:2009 omschrijft onder andere hoe een scheenbeschermer getest dient te worden door middel van slagproeven (Ankrah and Mills 2003; Satra technology 2012). In EN 340:2003 worden daarnaast algemene eisen aan beschermende kleding gesteld. Dit zijn bijvoorbeeld eisen met betrekking tot ergonomie, onschadelijkheid voor de gezondheid, veroudering en maatvoering (Satra technology 2012).

Er wordt door Haarman (2012) wel aandacht besteed aan EN 13061:2009, maar EN 340:2003 wordt nergens genoemd. Daarnaast stipt Haarman aan dat de slagproeven die uitgevoerd zijn met het nieuwe concept scheenbeschermer afwijken van EN 13061:2009, waardoor het onduidelijk is of het concept voldoet aan deze norm.

Alvorens de scheenbeschermer op de markt gebracht wordt, moet er gecontroleerd en getest worden of de scheenbeschermer voldoet aan de Europese wetgeving.

### 2.6.4 Effect van temperatuur

Een andere kwestie die onderbelicht is gebleven in het werk van Haarman (2012) is de invloed van temperatuur op de werking van *shear thickening fluid*. Doordat voetbal een buitensport is, zal de scheenbeschermer bloot worden gesteld aan een groot bereik aan temperaturen. Door de FIFA (2012) worden er echter geen restricties opgelegd over bij welke temperaturen er al dan niet gespeeld mag worden. Hierdoor is het lastiger om aan te geven binnen welk temperatuurbereik de scheenbeschermer zijn functie moet kunnen vervullen.

De laagst gerapporteerde temperaturen gemeten tijdens een voetbalwedstrijd bevinden zich rond de -15°C (Answers.com ; Ashdown and Lutz 2010). Hierbij moet opgemerkt worden dat de scheenbeschermer op het lichaam gedragen wordt, waardoor de temperatuur van de scheenbeschermer naar verwachting hoger is dan de omgevingstemperatuur. Daarnaast wordt voor het wereldkampioenschap voetbal van 2022 in Qatar verwacht dat de temperaturen op kunnen lopen tot 40°C à 50°C (Mail Online 2011; Daily News 2013). Bij deze waarden kan de kanttekening gemaakt worden dat het de bedoeling is om de stadions tijdens het wereldkampioenschap in Qatar te koelen tot 26°C (Daily News 2013).

Hoewel er zowel bij de minimum- als maximumtemperaturen kanttekeningen geplaatst kunnen worden, geven ze een indicatie van het temperatuurbereik waarbinnen de scheenbeschermer moet functioneren. Het grote temperatuurbereik waarin scheenbeschermers gebruikt worden heeft verschillende gevolgen voor het ontwerp. Zo moet de verpakking van de *shear thickening fluid* bij al deze temperaturen de juiste eigenschappen behouden en moet de werking van de *shear thickening fluid* zelf bij voorkeur constant blijven.

Vooraf dit laatste is een heikel punt. De huidige samenstelling van de *shear thickening fluid* bevat een grote hoeveelheid water (Haarman 2012). Door de aanwezigheid van maïzena en CsCl in de vloeistof, wordt het vriespunt van de vloeistof naar verwachting wel wat verlaagd, maar het is onbekend

hoeveel. Daarnaast is het onbekend of de scheenbeschermer in het geval dat de *shear thickening fluid* bevriest zijn functie nog correct uit kan voeren.

Hoewel ze geen gebruik maken van dezelfde *shear thickening fluid* als het nieuwe scheenbeschermerconcept, tonen Carriere en Loffredo (1998), Matia-Merino, Goh en Singh (2012), Wang et al. (2011) en Zhao en Chen (2007) aan dat het gedrag van bepaalde *shear thickening fluids* afhankelijk is van de temperatuur. In alle vier de studies daalt de viscositeit en stijgt de *critical shear rate* bij toenemende temperatuur. Daarnaast verdwijnt bij de studies van Matia-Merino et al. en Zhao et al. het *shear thickening*-gedrag in zijn geheel bij temperaturen hoger dan respectievelijk 50°C en 25°C.

Het concurrerende *shear thickening*-materiaal D3O blijft daarnaast tussen temperaturen van -10°C en +40°C zijn functie vervullen volgens de producent. Ook wordt er geclaimd dat de stijfheid van het materiaal wel toeneemt bij lagere temperaturen, maar dat dit geen problemen veroorzaakt voor de bescherming die het materiaal biedt. (D3O 2013)

### **2.6.5 Cesiumchloride**

In tegenstelling tot wat er in (Haarman 2012) wordt gesteld, is cesiumchloride (CsCl) volgens zijn *Material Safety Data Sheet* niet volledig onschadelijk voor de mens. Zo kan CsCl zorgen voor irritatie bij contact met de huid en de ogen of bij inname. Daarnaast is CsCl giftig voor slijmvliezen en kan herhaalde of langdurige blootstelling schade veroorzaken. (Sigma-Aldrich 2012; ScienceLab.com 2013)

In de *Material Safety Data Sheets* ontbreekt informatie over vanaf welke hoeveelheden CsCl schadelijk is voor de mens. Hierdoor is het onbekend of dit voor problemen kan zorgen wanneer het wordt gebruikt in de scheenbeschermer.

## **2.7 Uitgangspositie ontwerp en validatie**

Zoals ook in de doelstelling van deze studie wordt genoemd (paragraaf 1.3), ligt bij deze studie de focus op de produceerbaarheid van het nieuwe scheenbeschermerconcept. Er is voor gekozen om binnen deze studie alleen te richten op de verpakking van de *shear thickening fluid*, omdat hierover de meeste onduidelijkheid bestaat en dit wordt gezien als het grootste knelpunt van (Haarman 2012).

Doordat er al een volledig ontwerp ligt en dit ontwerp ook grotendeels aangehouden wordt, heeft het ontwerptraject van deze studie een andere opbouw dan een regulier ontwerptraject. Waar er bij een normaal ontwerptraject tijdens het ontwerpen al gekeken wordt naar geschikte materialen en productiemethoden, ligt er in dit geval al een ontwerp, maar is het nog onduidelijk hoe en van welk materiaal het geproduceerd gaat worden.

In plaats van dat er binnen deze studie een stap terug gedaan wordt en dat er nieuwe concepten gegenereerd worden waarbij wél rekening gehouden wordt met de opties op het gebied van materialen en productieprocessen, wordt er in deze studie gekeken naar hoe (en of) het bestaande ontwerp geproduceerd kan worden. Hiertoe dienen eerst aan de hand van het bestaande ontwerp de materiaaleisen in kaart gebracht te worden. Aan de hand hiervan is het mogelijk om geschikte materialen te selecteren en te bepalen welke verwerkingsmethoden hiermee mogelijk zijn. Vervolgens kan er op basis van de mogelijke verwerkingsmethoden een ontwerptraject worden doorlopen om te bepalen hoe (en of) de verpakking geproduceerd kan worden.

Samenvattend wordt er, wat betreft het ontwerp van de verpakking van de *shear thickening fluid*, aandacht besteed aan het materiaal waar de verpakking van vervaardigd wordt en de processen die toegepast worden. Hierbij wordt er rekening gehouden met bescherming voor zowel de schenen

(tibia) als de enkels (malleoli). De vorm en afmetingen van de verpakking, de samenstelling van de *shear thickening fluid* en de doelgroep worden ongewijzigd overgenomen van (Haarman 2012).

De validatie binnen deze studie kent drie onderzoeksdoelen: of het ontwerp maakbaar is, of het prototype bestand is tegen krachten die komen kijken bij een voetbaltrap en in welke mate het prototype bescherming biedt ten opzichte van andere scheenbeschermers. Het eerste punt wordt onderzocht door het maken van het prototype en de laatste twee punten worden onderzocht door middel van slagproeven met het prototype.

Ten opzichte van het werk van Haarman (2012) worden er verschillende verbeterpunten meegenomen. Zo worden tijdens de validatie ook het materiaal D3O en een bestaande scheenbeschermer geanalyseerd. Daarnaast wordt er gebruik gemaakt van monsters ter grootte van een volledige scheenbeschermer, in plaats van maar een klein gedeelte. Ten slotte wordt er tijdens de validatie aandacht besteed aan de drukverdeling onder een scheenbeschermer en het effect van een kromme (ten opzichte van een platte) ondergrond.

Om tot de hierboven uitgangspositie te komen is er een selectie gemaakt van verbeterpunten die voor deze studie het meest interessant en waardevol worden geacht. Dit betekent echter niet dat de overige punten die in paragraaf 2.6 genoemd worden niet belangrijk zijn. Het verdient dan ook aanbeveling om de overige verbeterpunten in vervolgonderzoek mee te nemen.

## **2.8 Functies, eisen en wensen**

Aan de hand van de voorgaande analyse en de uitgangspositie voor deze studie zijn er functies, eisen en wensen voor de verpakking van de *shear thickening fluid* opgesteld. Deze functies, eisen en wensen worden in deze paragraaf toegelicht.

### **2.8.1 Functies**

De *shear thickening fluid* is de werkzame component van de scheenbeschermer en de verpakking dient er alleen toe om de *shear thickening fluid* op zijn plek te houden. De functies van de verpakking beperken zich tot het bij elkaar houden van de *shear thickening fluid* en ervoor zorgen dat de *shear thickening fluid* zijn functie uit kan voeren. Hierdoor zijn de functies van de verpakking als volgt:

Functie 1: *Shear thickening fluid* bevatten

Functie 2: *Werking van shear thickening fluid* toestaan

### **2.8.2 Eisen en wensen**

Het programma van eisen is opgesteld aan de hand van de functies van de verpakking, het programma van eisen van Haarman (zie Bijlage B) en de uitgangspositie van deze studie (zie paragraaf 2.7). Dit programma van eisen wordt weergegeven in tabel 1. Daarnaast worden de wensen behorende bij deze studie weergegeven in tabel 2. Alle met grijs gemarkeerde eisen en wensen worden onder de tabellen toegelicht.

Tabel 1 - Programma van eisen voor de scheenbeschermer. Alle gemarkeerde eisen worden verderop in deze paragraaf voorzien van een toelichting.

Categorie	#	Eis
Algemeen	1	Het ontwerp moet geschikt zijn voor een productie van 40.000 sets
	2	Het ontwerp moet zowel scheen- als enkelbescherming bevatten
	3	De verpakking moet de werking van <i>shear thickening fluid</i> toestaan
	4	De verpakking moet het mogelijk maken dat de scheenbeschermer zich naar het been vormt
	5	De verpakking moet waterdicht zijn
	6	De verpakking moet luchtdicht zijn
	7	De verpakking moet bestand zijn tegen krachten en energieën die komen kijken bij een voetbaltrap
	8	De verpakking moet met water en zeep te reinigen zijn
	9	De verpakking mag niet schadelijk zijn voor de huid
Omgeving	10	De verpakking moet functioneren tussen een temperatuur van -15°C en +50°C
	11	De verpakking moet bestand zijn tegen gras
	12	De verpakking moet bestand zijn tegen zonlicht
	13	De verpakking moet bestand zijn tegen zweet
Fysieke eigenschappen	14	De vorm en afmetingen van de verpakking moeten overeenkomen met het ontwerp van (Haarman 2012)
	15	De verpakking (inclusief <i>shear thickening fluid</i> ) mag niet meer dan 200 gram wegen
Regels en richtlijnen	16	De scheenbeschermer moet voldoen aan FIFA Laws of the Game

Tabel 2 - Wensen voor de scheenbeschermer.

Categorie	#	Wens
Algemeen	1	De scheenbeschermer is op maat produceerbaar
Regels en richtlijnen	2	De scheenbeschermer voldoet aan EN 340:2003
	3	De scheenbeschermer voldoet aan EN 13061:2009

### Eis 1 – Het ontwerp moet geschikt zijn voor een productie van 40.000 sets

Uiteindelijk zal de scheenbeschermer moeten voldoen aan de Europese normen EN 340:2003 en EN 13061:2009. Hiermee mag de scheenbeschermer voorzien worden van de CE-markering en verkocht worden binnen de Europese Unie (EEC 1989; EC 2013). Uit (FIFA 2007) blijkt dat er in de landen van de Europese Unie circa 40.000 profvoetballers zijn, waardoor dit ook het initiële productieaantal zal zijn.

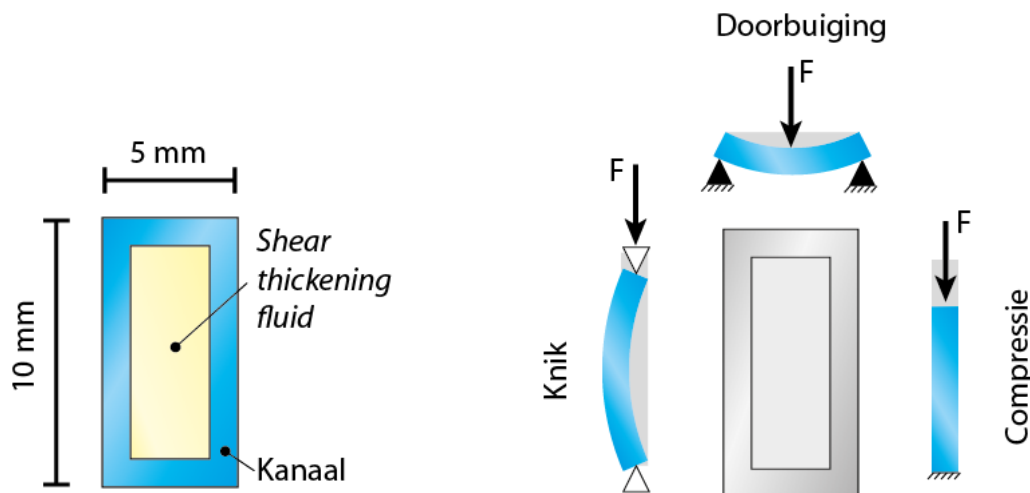
Om 40.000 voetballers te voorzien van bescherming, moeten er 80.000 verpakkingen voor de schenen (één per been) en 160.000 verpakkingen voor de enkels (twee per been) vervaardigd worden.

### Eis 3 – De verpakking moet de werking van *shear thickening fluid* toestaan

Doordat de viscositeit *shear thickening fluid* pas toeneemt wanneer er afschuiving in de vloeistof optreedt, is het noodzakelijk dat de verpakking vervormt wanneer er een kracht op gezet wordt. In figuur 6 (links) wordt de doorsnede van een van de kanalen van de honingraatstructuur weergegeven. Het is mogelijk om door enkele onderdelen van de verpakking te isoleren een benadering te krijgen

van de vervorming van het kanaal door toedoen van een kracht. Enkele mogelijke veranderingen in de verpakking worden weergegeven in figuur 6 (rechts).

De enige variabele binnen alle formules voor de vervormingen uit figuur 6 (rechts) die iets te maken heeft met een materiaaleigenschap is de elasticiteitsmodulus. Daarnaast geldt ook voor elke situatie dat wanneer de elasticiteitsmodulus kleiner wordt, de vervorming van het kanaal onder eenzelfde kracht toeneemt. Ten behoeve van de flexibiliteit is dus een zo laag mogelijke elasticiteitsmodulus gewenst. (Ashby, Shercliff et al. 2010)



Figuur 6 - Een dwarsdoorsnede van een kanaal (links) en verschillende soorten vervorming die op kunnen treden in een kanaal (rechts).

#### Eis 4 – De verpakking moet het mogelijk maken dat de scheenbeschermer zich naar het been vormt

Wanneer de scheenbeschermer zich naar het been van de gebruiker vormt, wordt een goede pasvorm gegarandeerd. Daarnaast hoeft er op deze manier alleen rekening gehouden te worden met het formaat van de scheenbeschermer en niet met de vorm. Hierdoor zou het in een later stadium mogelijk moeten worden om ook goed passende confectiematen van de scheenbeschermer uit te brengen. (Haarman 2012)

Om de verpakking zich naar het been te laten vormen, dient het materiaal flexibel te zijn. Zoals ook bij eis 3 wordt toegelicht, hoort hier een zo laag mogelijke elasticiteitsmodulus bij.

#### Eis 5 en 6 – Permeabiliteit

In een ideale situatie laat de verpakking van de *shear thickening fluid* géén water of zuurstof door. Zo blijft de samenstelling van de *shear thickening fluid* constant en kan er ook geen schimmel ontstaan door de aanwezigheid van zuurstof (Environmental Information Association 2013). Wanneer de overige materiaaleisen in acht genomen worden, lijken polymeren (kunststoffen en elastomeren) geschikt voor de verpakking van de *shear thickening fluid*. Hieronder zal dan ook alleen aandacht besteed worden aan de permeabiliteit van polymeren.

Prof. dr. J.W.M. Noordermeer (Elastomer Technology and Engineering, Universiteit Twente) heeft in persoonlijke communicatie aangegeven dat vrijwel alle kunststoffen en elastomeren waterdicht zijn, maar dat ze allemaal in enige mate water absorberen en waterdamp en zuurstof doorlaten. De mate waarin polymeren water absorberen of gassen doorlaten verschilt echter per materiaal.

Het computerprogramma *Cambridge Engineering Selector 2012* (Granta Design Ltd. 2012), ook wel bekend als *CES*, bevat gegevens van 3798 verschillende materialen. Onder deze gegevens bevinden zich ook waarden van in welke mate polymeren water absorberen of waterdamp en zuurstof doorlaten. Enkele polymeren binnen *CES* hebben geen waarde voor een van deze drie eigenschappen. Verwacht wordt dat in deze gevallen de gegevens niet voorhanden zijn en dat het materiaal in enige mate water absorbeert of waterdamp of zuurstof doorlaat.

Doordat alle potentieel geschikte materialen enige vorm van absorptie of doorlating vertonen, lijkt dit een onvermijdbaar nadeel. Uiteindelijk kan dergelijk gedrag tot gevolg hebben dat de scheenbeschermer een beperkte houdbaarheid krijgt, omdat na een bepaalde tijd de samenstelling van de *shear thickening fluid* te veel is veranderd of dat er dermate veel zuurstof bij de *shear thickening fluid* is gekomen dat er schimmel heeft kunnen ontstaan. Een soortgelijke situatie met een houdbaarheidsdatum is ook al het geval bij hardloopschoenen, welke na ongeveer een jaar gebruik niet meer voldoende demping bieden terwijl de schoen nog niet versleten is (van Gheluwe 2003).

Verwacht wordt dat zowel de absorptie als de permeabiliteit van de meeste polymeren voldoende laag is om het materiaal te kunnen gebruiken voor de verpakking (persoonlijke communicatie prof. dr. J.W.M. Noordermeer). Bij de materiaalkeuze wordt er gestreefd naar een zo laag mogelijke permeabiliteit en absorptie. Het verdient aanbeveling om de houdbaarheid van het eindproduct in een vervolgonderzoek nader te bepalen.

#### **Eis 7 – De verpakking moet bestand zijn tegen krachten die komen kijken bij een voetbaltrap**

Om te voorkomen dat de verpakking van de *shear thickening fluid* scheurt, plastisch (blijvend) vervormt of op een andere manier stuk gaat, dient de verpakking bestand te zijn tegen de krachten en energieën die horen bij een voetbaltrap. Ankrah en Mills (2003) noemen dat een voetbaltrap gesimuleerd kan worden in een testopstelling met een gefixeerd been en een slagpen die het been raakt met een kinetische energie van circa 11 Joule. De kracht die hierbij uitgeoefend wordt is daarnaast afhankelijk van de contacttijd tussen de slagpen en het been: als de slagpen heel geleidelijk afgeremd wordt (lange contacttijd), wordt de energie ook over een langere tijd overgebracht waardoor de piekkracht lager is.

De sterkte van de verpakking is uit te drukken in verschillende materiaaleigenschappen. Zo geeft de rekgrens aan vanaf welke belasting een materiaal plastisch vervormt en geeft de breuktaaiheid de weerstand tegen het groeien van een scheur aan. Wanneer een materiaal een hoge breuktaaiheid en lage rekgrens heeft, zal het materiaal plastisch vervormen voordat een scheur groeit. In het geval dat een materiaal een hoge rekgrens en lage breuktaaiheid heeft, zal het materiaal doorscheuren voordat het plastisch kan vervormen. (Ashby, Shercliff et al. 2010)

Om een schatting te kunnen maken van de benodigde rekgrens van het verpakkingsmateriaal is er gekeken naar de krachten die optreden bij een voetbaltrap. Ankrah en Mills (2003) noemen dat fractures optreden vanaf krachten van 2,9 kN en in paragraaf 2.2 is al toegelicht dat de scheenbeschermer er niet toe dient om fractures te voorkomen. Een kracht van 2,9 kN wordt hierdoor aangehouden als minimale kracht waarbij de verpakking in ieder geval heel moet blijven.

Wanneer vervolgens het contactoppervlak van een voetbalschoen bij een trap geschat wordt op 9 cm<sup>2</sup> en aangenomen wordt dat de druk uniform verdeeld is, komt dat neer op een druk van 3,2 MPa. In het bepalen van deze maximale spanning in de verpakking van de *shear thickening fluid* zijn veel aannames gedaan, waardoor de waarde mogelijk niet accuraat is. Wel geeft deze waarde aan met welke orde grootte krachten en druk de verpakking te maken zal krijgen.

De breuktaaiheid is een maat voor de weerstand van een materiaal tegen het groeien van een scheur wanneer het materiaal op trek belast wordt (Ashby, Shercliff et al. 2010). De scheenbeschermer zal vrijwel alleen maar op druk belast worden, waardoor breuktaaiheid in deze situatie al minder van belang is. Daarnaast is de verpakking zodra er een kleine scheur is ontstaan al lek, waardoor de verdere groei van diezelfde scheur minder relevant is.

#### **Eis 8 – De verpakking moet met water en zeep te reinigen zijn**

Er wordt verwacht dat de kous die de verpakkingen met *shear thickening fluid* op hun plek houden, niet in staat zijn om al het vuil buiten te houden. Hierdoor dient de verpakking reinigbaar te zijn. Onder reinigbaar zijn wordt in dit geval verstaan dat de verpakking bestand is tegen water en zeep

#### **Eis 9 – De verpakking mag niet schadelijk zijn voor de huid**

De verpakking van de *shear thickening fluid* kan schade aanbrengen aan de huid doordat het materiaal schadelijk is voor de huid, of doordat er huidirritatie optreedt door zweet en wrijving. Dit eerste probleem kan voorkomen worden door een materiaal te kiezen dat onschadelijk is voor de huid. Daarnaast kan huidirritatie tegengegaan worden door te zorgen voor ventilatiegaten om de huid te laten ademen.

#### **Eis 15 – De scheenbeschermer mag niet meer dan 200 gram wegen**

Het eerste prototype van het scheenbeschermerconcept van Haarman (2012) heeft een gewicht van circa 200 gram, waardoor deze zwaarder is dan bestaande scheenbeschermers (tot circa 150 gram). Uit (Haarman 2012) is echter naar voren gekomen dat dit hogere gewicht geen aantoonbare invloed had op het energieverbruik van een voetballer. Daarnaast noemt Haarman dat het extra gewicht door een voetballer ook niet als storend ervaren werd.

Verwacht wordt dat de *shear thickening fluid* samen met de verpakking veel meer weegt dan de kous. Hierom is het maximumgewicht voor de verpakking inclusief *shear thickening fluid* gesteld op 200 gram. Dit gewicht geldt als maximum per been en bevat zowel de scheen- als de enkelbescherming.

#### **Eis 16 – De scheenbeschermer moet voldoen aan FIFA Laws of the Game**

Hoewel het wel verplicht is om scheenbeschermers te dragen, zijn er vanuit de FIFA weinig eisen aan het soort scheenbeschermers dat gedragen wordt, namelijk:

*“Shinguards*

- *are covered entirely by the stockings*
- *are made of rubber, plastic or a similar suitable material*
- *provide a reasonable degree of protection”* (FIFA 2012)

Naast deze specifieke regels mag een speler niets dragen waarmee hij zichzelf of een andere speler schade aan kan brengen. De beoordeling van wat een geschikt materiaal is, wat een redelijke mate van bescherming is en of een bepaald kledingstuk een ander schade aan kan brengen, is de verantwoordelijkheid van de scheidsrechter. (FIFA 2012)

#### **Wens 1 – De scheenbeschermer is op maat produceerbaar**

De scheenbeschermer dient aanpasbaar te zijn aan de anatomie van een specifieke speler, zodat de geleverde bescherming aangepast is aan die specifieke situatie. Voor het op maat produceren van de scheenbeschermer zou zowel de kous als de verpakking aangepast kunnen worden aan de anatomie van een speler. Om de mogelijkheden voor het op maat produceren van de verpakking mee te nemen tijdens het ontwerptraject, is dit meegenomen als wens voor de verpakking.



### 3 Ontwerp

In dit hoofdstuk wordt het ontwerptraject van deze studie toegelicht. Hierin worden eerst enkele geschikte materialen en hun mogelijke verwerkingsmethode omschreven. Vervolgens worden er aan de hand van deze informatie enkele concepten toegelicht en wordt hier een keuze uit gemaakt. Hierna wordt het gekozen concept uitgewerkt tot eindontwerp en wordt nog wat later dit eindontwerp samengevoegd met de rest van de scheenbeschermer tot het totaalproduct. Bij het totaalproduct wordt daarnaast aandacht besteed aan de productiekosten van de gehele scheenbeschermer. Als afsluiting van dit hoofdstuk wordt het eindontwerp gecontroleerd aan de hand van het programma van eisen.

#### 3.1 Materiaalselectie

Aan de hand van de gestelde eisen is in *CES* (Granta Design Ltd. 2012), een voorselectie gemaakt van geschikte materialen. Al deze materialen zijn volgens *CES* zeer goed bestand tegen zoet en zout water en zwakke zuren en basen. Ook kennen alle materialen volgens *CES* toepassingen als voedselverpakkingen, medische toepassingen en/of speelgoed. Op basis van deze gegevens is er aangenomen dat de materialen onschadelijk zijn voor de huid. Al deze materialen zijn samen met hun mechanische eigenschappen te zien in Bijlage C.

Een punt waar alle materialen slecht op scoren is volgens *CES* (Granta Design Ltd. 2012) hun UV-bestendigheid. Hier plaatst *CES* de kanttekening bij dat de UV-bestendigheid van een materiaal op verschillende manieren verbeterd kan worden. Denk hierbij aan toevoegingen aan polymeren of het aanbrengen van UV-werende *coatings*.

Uit de voorselectie aan geschikte materialen is vervolgens een selectie gemaakt. Deze materialen zijn IIR, Ionomeer, PE, POE en PVC. Hieronder wordt per materiaal toegelicht wat de sterke en zwakke punten van elk materiaal zijn.

##### **Materiaal 1: IIR – Butylrubber (30-50% carbon)**

Dit materiaal wordt onder andere toegepast in banden, kauwgom en afsluiting van farmaceutica. Hoewel de dichtheid van dit elastomeer iets hoger is dan van de overige geschikte materialen, maken de overige eigenschappen dit materiaal zeer geschikt voor de verpakking van de *shear thickening fluid*. IIR is daarnaast het enige materiaal met een redelijke UV-bestendigheid. Een potentieel nadeel is dat dit materiaal een thermoharder is. Hierdoor worden de verwerkingsmogelijkheden en geschikte productiemethoden zeer beperkt. (Granta Design Ltd. 2012)

##### **Materiaal 2: Ionomeer (natrium)**

Ionomeer, zoals Surlyn® van DuPont™, wordt onder andere toegepast in voedselverpakkingen (DuPont 2012). De waterdamp permeabiliteit en de elasticiteitsmodulus van dit materiaal zijn hoger dan bij IIR en het materiaal is ook slechter bestand tegen UV-straling. Daar staat tegenover dat dit materiaal een thermoplast is, waardoor het eenvoudiger te verwerken is. (Granta Design Ltd. 2012)

##### **Materiaal 3: PE – Polyetheen (hoge dichtheid)**

PE is een thermoplastisch kunststof met zeer goede eigenschappen met betrekking tot permeabiliteit. Nadelen aan PE zijn de hoge elasticiteitsmodulus (ten opzichte van de overige materialen) en matige UV-bestendigheid van het materiaal. Toepassingen van PE zijn te vinden in voedselverpakkingen en speelgoed. (Granta Design Ltd. 2012)

##### **Materiaal 4: POE – Thermoplastisch Polyolefine Elastomeer/Plastomeer**

Ook POE is een thermoplastisch elastomeer dat wordt toegepast voor voedselverpakkingen. Ten opzichte van de overige materialen scoort dit materiaal op alle eigenschappen gemiddeld tot goed,

behalve op het gebied van zuurstofpermeabiliteit. Het materiaal laat meer zuurstof door dan de meeste overige geselecteerde materialen. Net als veel van de andere geschikte materialen kan POE slecht tegen UV-straling. (Granta Design Ltd. 2012)

**Materiaal 5: PVC – Polyvinylchloride-elastomeer**

Het laatste geschikte materiaal is PVC-elastomeer. Dit thermoplastische elastomeer kent toepassingen in speelgoed en medische componenten. Hoewel de mechanische eigenschappen van het materiaal goed zijn, zijn de absorptie- en permeabiliteits-eigenschappen van het materiaal het slechtst van alle geselecteerde materialen. Zoals de meeste geschikte materialen kan ook PVC-elastomeer niet goed tegen UV-straling. (Granta Design Ltd. 2012)

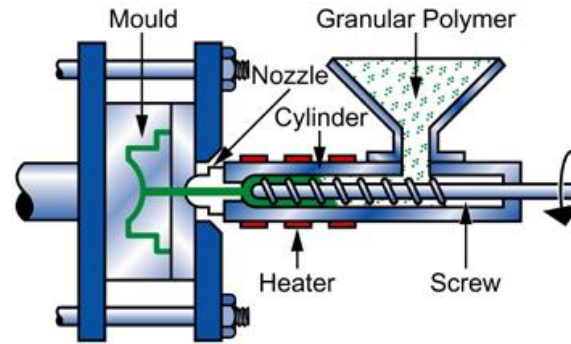
**3.2 Verwerking van geselecteerde materialen**

De geselecteerde materialen hebben vrij uiteenlopende verwerkingsmogelijkheden. Hieronder zullen verschillende verwerkingsmogelijkheden van alle materialen worden aangestipt. Daarnaast is in Bijlage D een tabel te zien met alle mogelijkheden volgens CES.

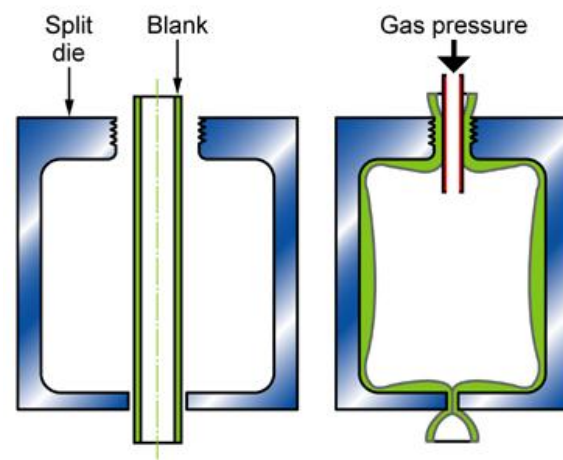
**3.2.1 Vormen**

De aanwezigheid van zowel thermoharders als thermoplasten in de materiaalselectie, zorgt voor grote verschillen in de mogelijke vormingstechnieken. Dit komt omdat thermoharders nadat ze uitgehard zijn niet nogmaals plastisch (zacht) gemaakt kunnen worden onder invloed van temperatuur en dus ook niet nogmaals (plastisch) vervormd kunnen worden. (Granta Design Ltd. 2012)

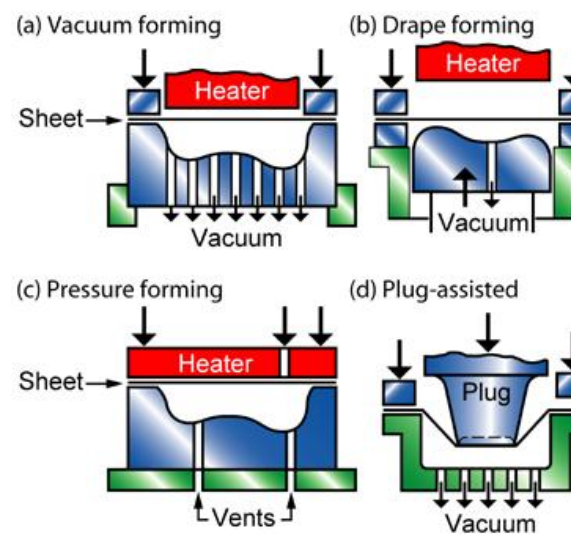
Met alle materialen is het mogelijk om ze op verschillende manieren te gieten, zoals compressie- en spuitgieten (zie figuur 7). Daarnaast kan er voor alle thermoplasten gebruik gemaakt worden van extrusie, blaasvormen (zie figuur 8) en thermovormen (zie figuur 9). Bij blaasvormen wordt een hol onderdeel verhit en opgeblazen binnen een mal en bij thermovormen wordt een plaatmateriaal verhit en naar een mal gevormd. (Granta Design Ltd. 2012)



Figuur 7 - Schematische weergave van spuitgieten. Afbeelding overgenomen uit CES (Granta Design Ltd. 2012).



Figuur 8 - Schematische weergave van blaasvormen. Afbeelding overgenomen uit CES (Granta Design Ltd. 2012).



Figuur 9 - Schematische weergave van thermovormen. Afbeelding overgenomen uit CES (Granta Design Ltd. 2012).

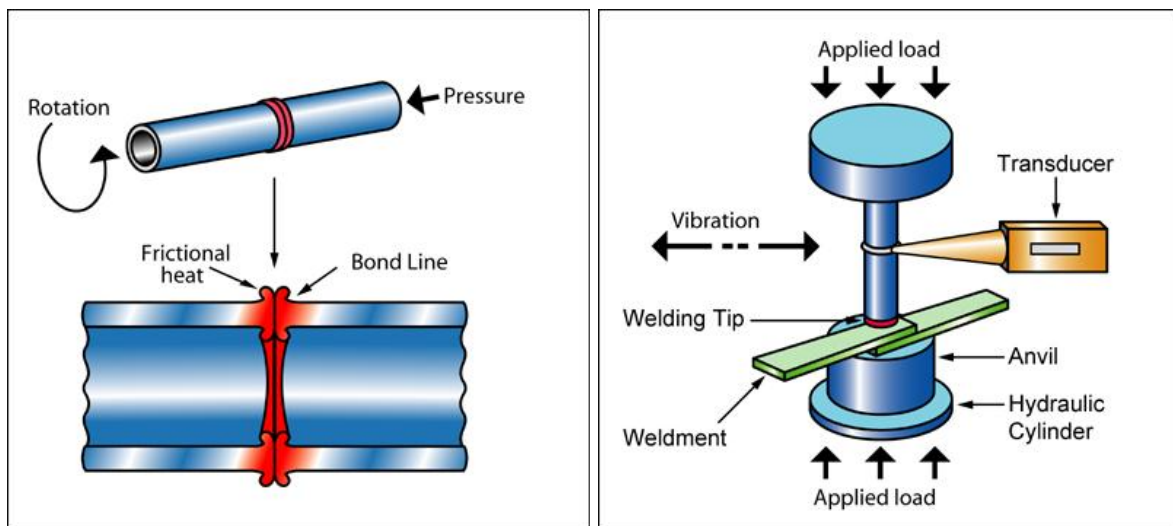
Verspanen (zoals zagen en draaien) is alleen mogelijk met ionomeer en PE. Daarnaast kunnen IIR, ionomeer en PE gesneden worden door middel van een waterstraal, een hete draad of een laser. (Granta Design Ltd. 2012)

Ten slotte zijn de materialen IIR, ionomeer en PE geschikt om te 3D-printen. (Granta Design Ltd. 2012)

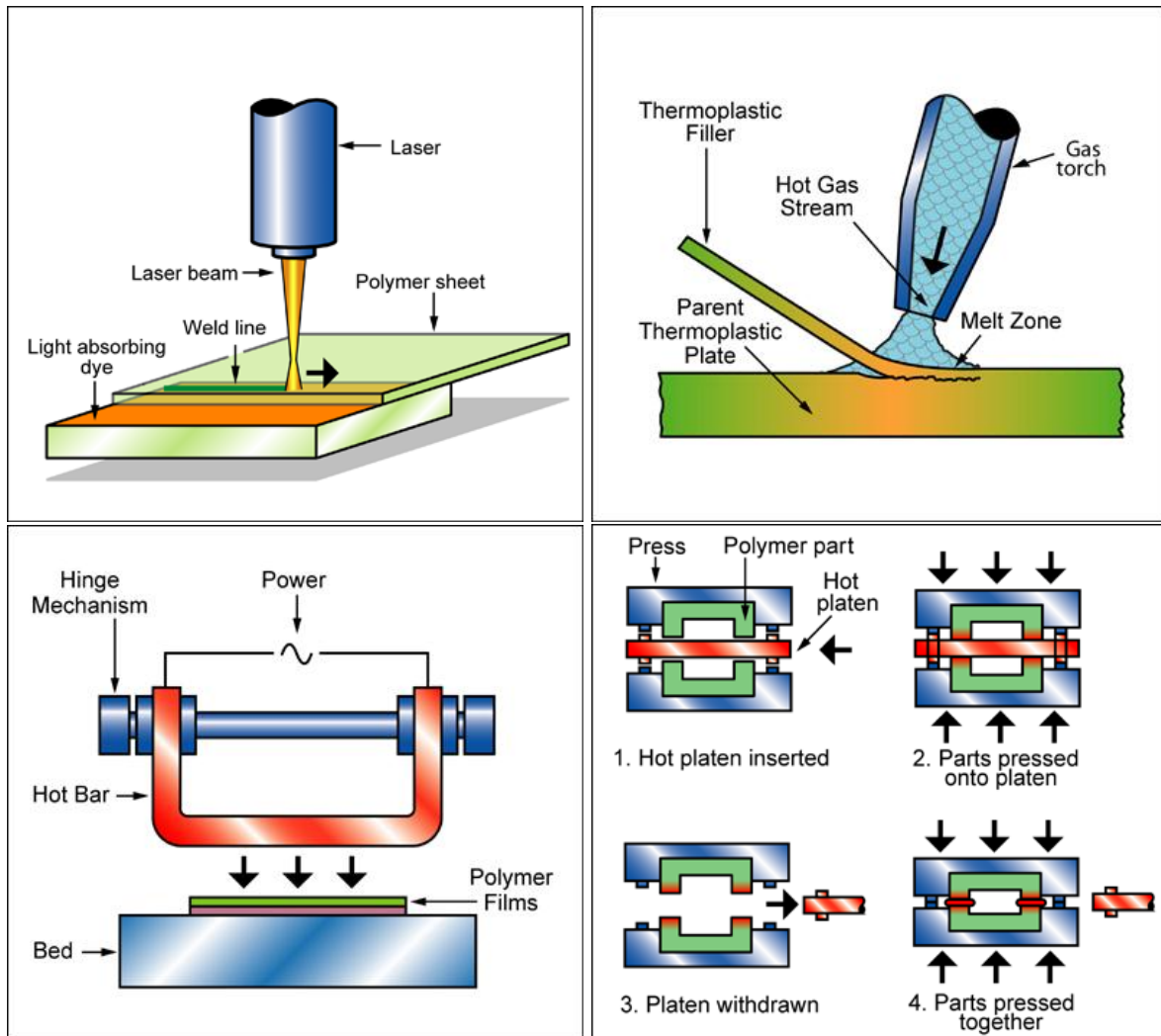
### 3.2.2 Verbinden

Alle geselecteerde materialen kunnen goed gelijmd worden. Daarnaast kunnen alle materialen met een hogere elasticiteitsmodulus (zoals ionomeer en PE) goed verbonden worden door middel van bevestigingsmaterialen zoals bouten en moeren of nietjes. (Granta Design Ltd. 2012)

Het is daarnaast mogelijk om thermoplasten te verbinden door ze te lassen. Dit kan zowel mechanisch als thermisch. Mechanisch lassen (zie figuur 10) gebeurt door middel van wrijving (twee delen tegen elkaar bewegen) of ultrasoon (hitte opwekken door een trilling). Thermisch lassen (zie figuur 11) gebeurt door de materialen plastisch te maken door ze te verhitten met een externe warmtebron, zoals heet gas, een hete plaat of een laser. (Granta Design Ltd. 2012)



Figuur 10 - Afbeeldingen van mechanisch lassen van thermoplasten. Links wordt frictielassen weergegeven en rechts ultrasoonlassen. Bij ultrasoonlassen zorgt het trillen van de *Welding Tip* ervoor dat het materiaal opwarmt. Afbeeldingen overgenomen uit CES (Granta Design Ltd. 2012).



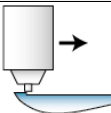
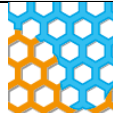
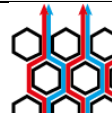
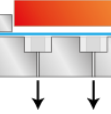
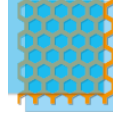

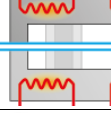

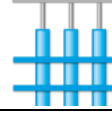
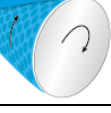
Figuur 11- Verschillende vormen van thermisch lassen: met een laser (linksboven), heet gas (rechtsboven) een hete staaf (linksonder) en een hete plaat (rechtsonder). Lassen door middel van een hete plaat (rechtsonder) wordt ook spiegellassen genoemd. Afbeeldingen overgenomen uit CES (Granta Design Ltd. 2012).

Wegens de grote flexibiliteit van elastomeren (POE en PVC) is het lastig (maar niet onmogelijk) om deze materialen te lassen. Bij ultrasoonlassen dooft de trilling bijvoorbeeld vaak uit voordat deze het contactoppervlak tussen de twee te lassen materialen bereikt. Welke lasmethode wel bruikbaar is verschilt per materiaal en geometrie van de te lassen componenten, waardoor dit niet op voorhand te voorspellen valt. Een lasmethode die in veel gevallen wel toegepast kan worden voor thermoplastische elastomeren zoals POE en PVC is spiegellassen (zie figuur 11). (Persoonlijke communicatie met prof. dr. J.W.M. Noordermeer, Elastomer Technology and Engineering, Universiteit Twente).

### 3.3 Concepten

Aan de hand van het ontwerp van Haarman (2012), de geschikte materialen en bijbehorende verwerkingsmogelijkheden zijn er verschillende concepten gegenereerd. In totaal zijn er tien concepten gegenereerd waarvan in tabel 3 een overzicht wordt gegeven. In de rest van deze paragraaf worden alle concepten verder toegelicht.

Tabel 3 - Overzicht van alle concepten.

#	Concept	Afbeelding	#	Concept	Afbeelding	#	Concept	Afbeelding
1	3d-printen		5	Poreuze kern coaten		8	Dubbele slangen	
2	Vacuümvormen		6	Poreuze kern sealen		9	Verloren kern	
3	Blaasvormen		7	Parallele slangen		10	Raster	
4	Noppenfolie							

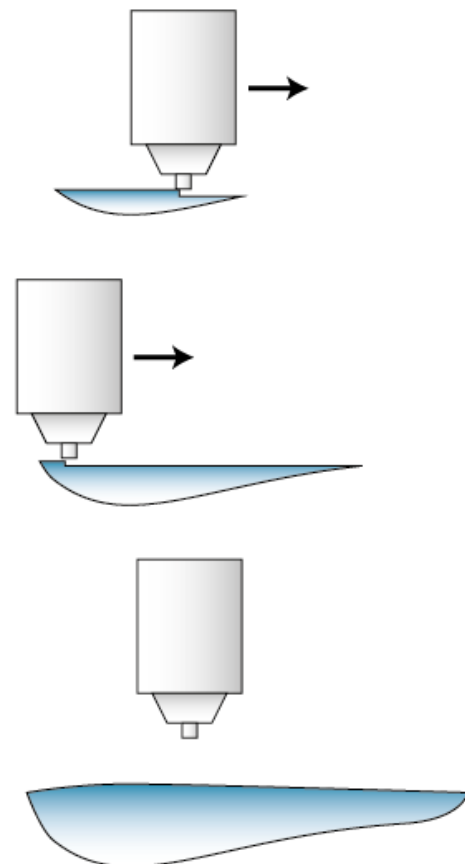
#### 3.3.1 Concept 1 - 3d-printen

Het is mogelijk om door middel van 3d-printen (zie figuur 12) de verpakking in één keer op te bouwen. Hierbij kan de verpakking zelfs gekromd en volledig op maat gemaakt worden. 3d-printen zorgt er daarnaast voor dat de honingraatstructuur zeer nauwkeurig nageemaakt kan worden, waardoor er weinig van het originele concept afgeweken wordt.

Een nadeel van 3d-printen is dat de kosten ervan op dit moment nog hoog zijn, dat het geen snel proces is en dat er alleen materialen geprint kunnen worden die snel uitharden. Hierdoor beperkt dit concept zich tot IIR, ionomeer en PE. (Granta Design Ltd. 2012)

In het geval dat de verpakking volledig op maat gemaakt zou worden, zou het proces er als volgt uit zien:

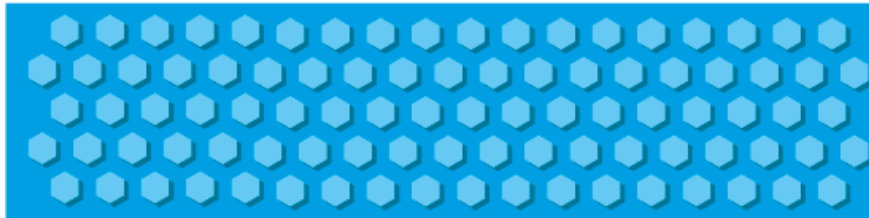
1. *Been scannen*
2. *CAD-model van scheenbeschermer maken aan de hand van de scan*
3. *Scheenbeschermer printen met 3d-printer aan de hand van het CAD-model*



Figuur 12 - Het 3d-printproces.

### 3.3.2 Concept 2, 3 en 4 - Folie

Bij de vacuümvorm-, blaasvorm- en noppenfolieconcepten bestaat de verpakking van de *shear thickening fluid* uit twee aan elkaar verbonden folies. Bij al deze concepten wordt eerst de juiste vorm (zie figuur 13) aan de folies gegeven, waarna de twee folies aan elkaar verbonden worden om zo een afgesloten verpakking te verkrijgen. De drie concepten met folies verschillen ten opzichte van elkaar in hun productiemethode. Deze verschillende productiemethoden zullen hieronder afzonderlijk worden toegelicht.



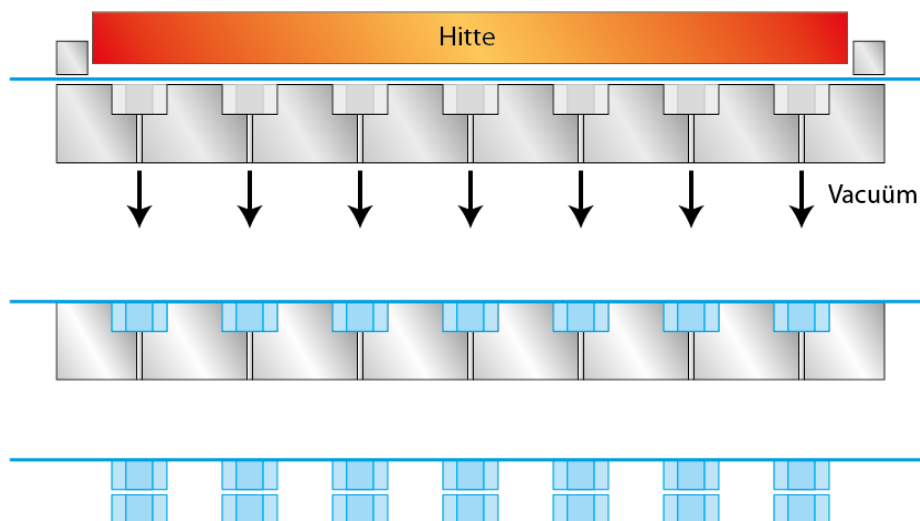
Figuur 13 - Schematische weergave van een honingraatstructuur in een folie. De zeshoeken van de honingraatstructuur worden gevormd als zeshoekige noppen die uitsteken uit de folie.

Alle drie de hieronder omschreven concepten kunnen alleen met thermoplasten gemaakt worden, omdat bij elk concept de folies plastisch vervormd worden onder invloed van temperatuur. Deze concepten zijn dus mogelijk met alle materialen behalve IIR.

Ten slotte kan bij alle folieconcepten huidirritatie tegengegaan worden door de noppen van de honingraatstructuur te perforeren. Zo wordt de huid van het onderbeen namelijk geventileerd.

#### 3.3.2.1 Concept 2 - Vacuümvormen

In het vacuümvormconcept wordt de verpakking geproduceerd door beide folies te vacuümvormen in een mal met de zeshoekige noppen van de honingraatstructuur. Vervolgens worden beide folies aan elkaar verbonden om zo de verpakking sluitend te maken. Deze stappen worden weergegeven in figuur 14.



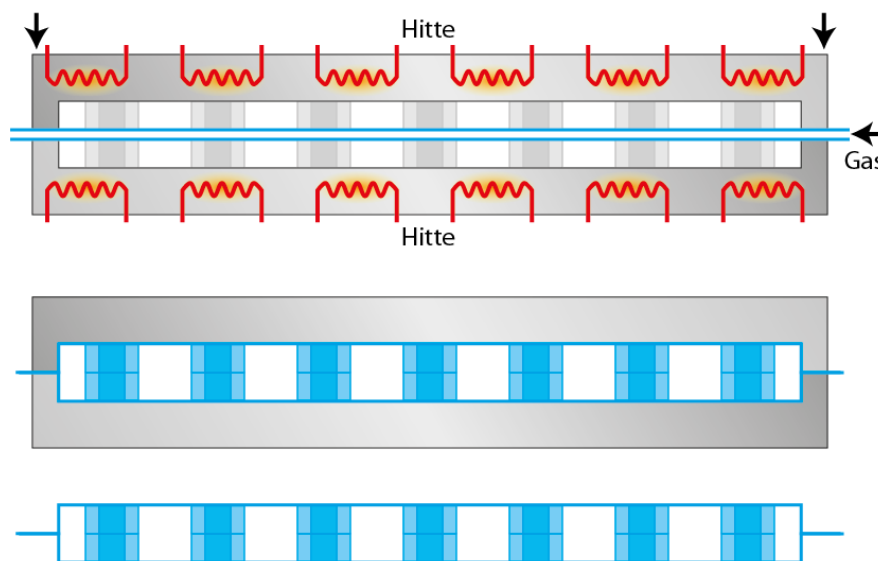
Figuur 14 - Drie stappen in het vacuümvormproces. Door de folie (blauw) te verhitten en een vacuüm te creëren tussen de folie en de mal (boven) vormt de folie zich naar de mal (midden). Wanneer twee folies op een dergelijke wijze gevormd worden en op elkaar worden bevestigd is een verpakking met honingraatstructuur te verkrijgen (onder).

De twee losse voorgevormde folies kunnen aan elkaar verbonden worden door ze te lassen. Zoals omschreven in paragraaf 3.2.2 (Verbinden) verschillen de mogelijke lasmethoden per materiaal en materiaaldikte.

### 3.3.2.2 Concept 3 - Blaasvormen

Bij het blaasvormen van folies wordt de verpakking op een soortgelijke manier als bij het vacuümvormen gemaakt. Het blaasvormconcept verschilt van het vacuümvormconcept op het punt dat er bij het blaasvormconcept in één stap de folies gevormd en aan elkaar verbonden worden.

Bij het blaasvormen worden er twee folies in de mal gelegd. Vervolgens sluit de mal, worden de folies verhit en wordt er gas tussen de folies geblazen zodat de folies zich vormen naar de mal. Door de hitte vormen de folies zich naar de mal en worden de mal op de randen en in de noppen van de honinggraat gelast. Een schematische weergave van dit concept is te zien in figuur 15.

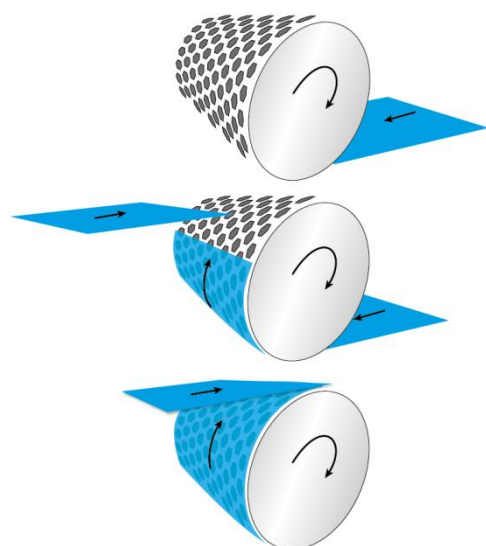


Figuur 15 - Schematische weergave van het blaasvormconcept. Van boven naar beneden wordt weergegeven hoe twee folies (blauw) in de mal geklemd worden, waarna door middel van gas en hitte de folies naar de mal gevormd worden.

### 3.3.2.3 Concept 4 - Noppenfolie

Het noppenfolieconcept is gebaseerd op de manier waarop noppenfolie geproduceerd wordt (zie figuur 16). Bij de productie van noppenfolie wordt er één folie op een draaiende trommel naar de gevormd. Hierbij wordt het materiaal plastisch gemaakt door middel van temperatuur en wordt de ruimte tussen de trommel en de folie vacuüm gezogen, waardoor de folie zich vormt naar het oppervlak van de trommel. Vervolgens wordt een andere folie vast gelast aan de folie die al aanwezig is op de trommel.

Met concept is het mogelijk om de productie van verpakkingsmateriaal volcontinu te maken. Hierbij dient de verpakking enkel op de juiste plekken op maat gesneden te worden.



Figuur 16 - Productie van de verpakking volgens het noppenfolieconcept.

### 3.3.3 Concept 5 en 6 - Poreuze kern

Een andere manier om een holle verpakking te verkrijgen is door gebruik te maken van een poreuze kern (zoals spons). Bij deze concepten wordt er rond een poreuze kern een verpakking opgebouwd.

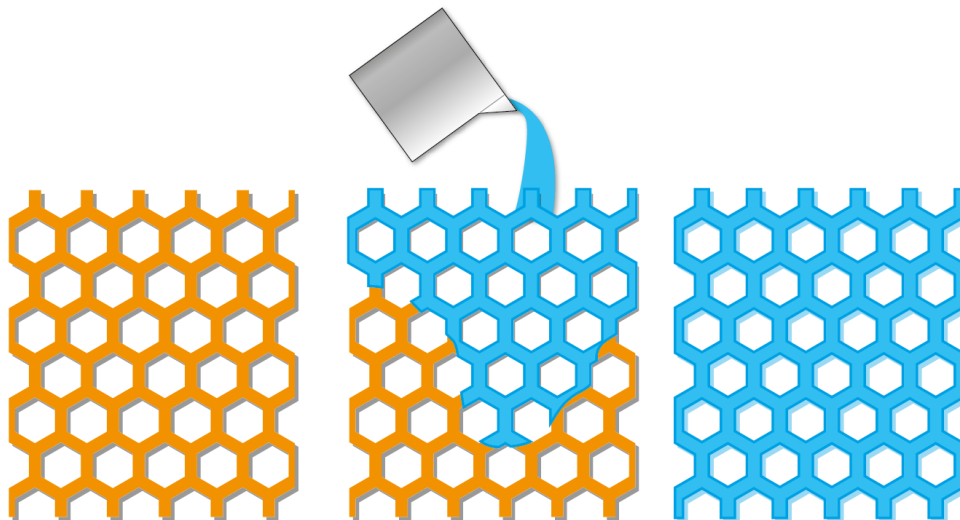
De poreuze kern kan vervaardigd worden door de zeshoeken van de honingraat uit poreus materiaal te ponsen of te lasersnijden.

#### 3.3.3.1 Concept 5 - Coaten

Een van de manieren om een verpakking rond de poreuze kern op te bouwen, is door de kern te *coaten* met vloeibaar kunststof (zie figuur 17). Wanneer deze kunststof uithardt, is de kern ingesloten. Bij dit proces is het echter lastig om de kwaliteit en dikte van de verpakking te sturen.

Deze productiemethode zou mogelijk moeten zijn met elk gietbaar materiaal. Van de voor deze studie geselecteerde materialen zijn dat alle materialen (Granta Design Ltd. 2012).

Een mogelijk knelpunt bij deze methode is dat de vloeibare kunststof in de openingen van de poreuze kern loopt. Hierdoor kunnen de openingen verstopt raken, waardoor de kern niet meer poreus is en er geen *shear thickening fluid* meer in de kern past.



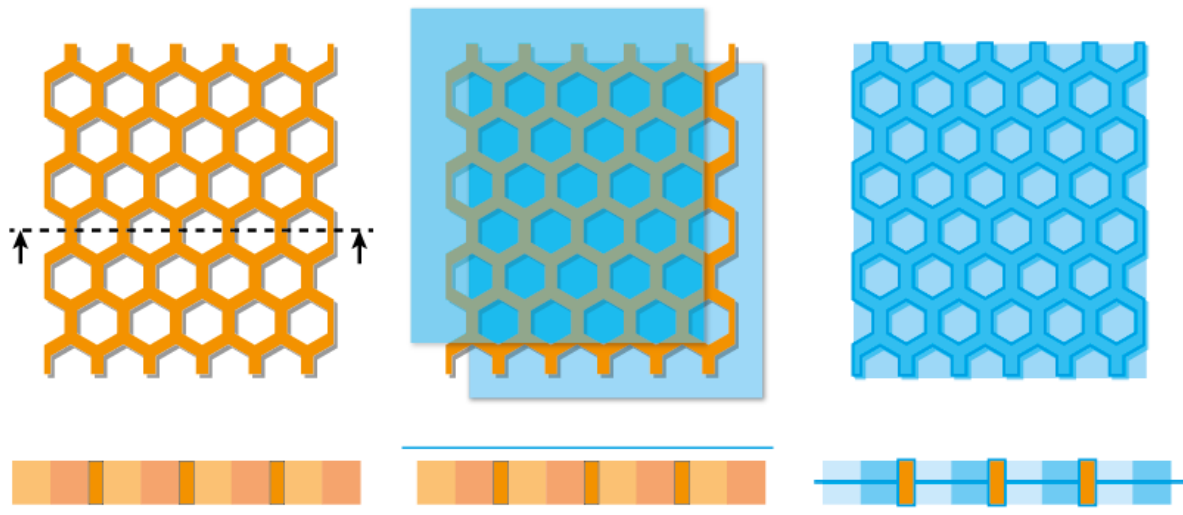
Figuur 17 - Een poreuze kern (oranje) wordt *gecoat* met een kunststof (blauw).

#### 3.3.3.2 Concept 6 - Sealen

Een andere optie voor de het produceren van de verpakking met een poreuze kern is door de kern te *sealen* met folie. Hierbij wordt de poreuze kern opgesloten tussen twee folies. Vervolgens worden de folies in de zeshoeken van de honingraatstructuur gelast. Zie figuur 18 voor een schematische weergave van dit concept.

Wanneer de poreuze kern *gecoat* wordt, blijven de zeshoeken van de honingraat door het productieproces al vrij van materiaal. Bij de *seal*-methode is het mogelijk om, zoals bij alle concepten met folies, de lassen in de zeshoeken van de honingraat in het midden te perforeren om zo ventilatie te creëren voor de huid.

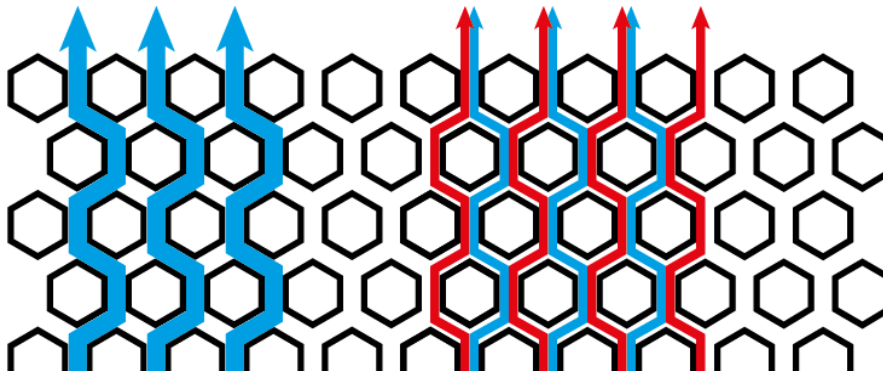
Een andere overeenkomst met de drie folie-concepten is dat bij dit concept alleen gewerkt kan worden met thermoplasten. Dit komt doordat het materiaal enerzijds vervormd moet kunnen worden onder invloed van temperatuur en anderzijds gelast moet kunnen worden.



Figuur 18 - Drie fases van het sealen van een poreuze kern. De poreuze kern (oranje) wordt ingesloten tussen twee vellen kunststof (blauw). Naast de bovenaanzichten in het bovenste deel van de afbeelding, worden onderaan de afbeelding ook doorsnedes bij elke stap weergegeven.

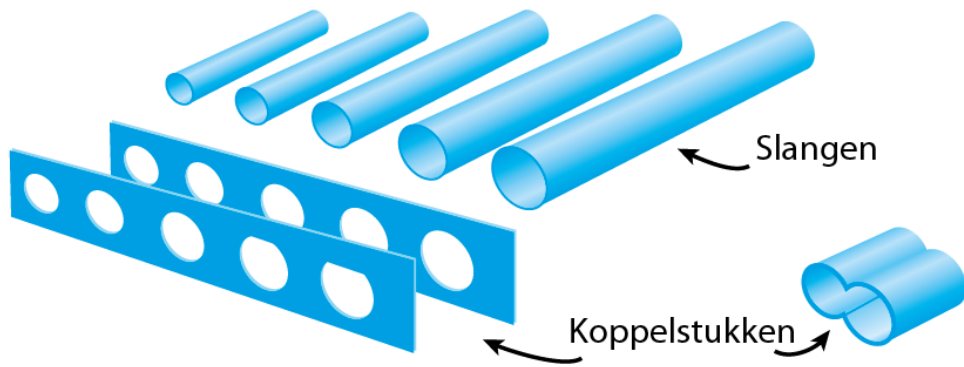
### 3.3.4 Concept 7 en 8 - Slangen

De ruimtes waar de *shear thickening fluid* zich in bevindt zijn te beschouwen als aan elkaar verbonden kanalen (zie figuur 19). Het is mogelijk om door flexibele slangen op een bepaalde manier aan elkaar te verbinden een honingraatstructuur te benaderen.



Figuur 19 - Schematische weergave van hoe kanalen door een honingraatstructuur kunnen lopen.

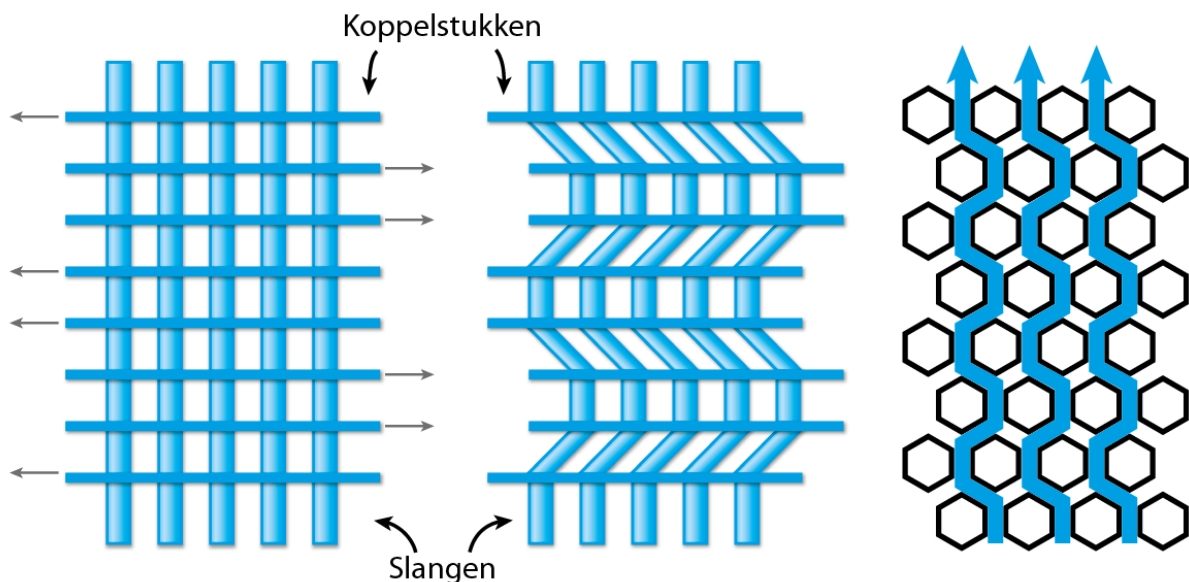
Zoals ook in figuur 19 te zien is, zijn twee mogelijke manieren om de honingraatstructuur te benaderen door slangen met een parallelle (figuur 19, links) of dubbele (figuur 19, rechts) configuratie aan elkaar te verbinden. In deze twee concepten kan er gebruik gemaakt worden van bestaande flexibele slangen. Daarnaast kan het deel dat de slangen verbindt (de koppelstukken) of in één keer gesputgiet worden of kan het uit plaat of folie geponst worden. In figuur 20 worden de verschillende componenten voor de twee slangenconcepten weergegeven.



Figuur 20 - Componenten van de twee slangenconcepten.

### 3.3.4.1 Concept 7 - Parallel

Bij de parallelle configuratie van de slangen, lopen alle slangen parallel aan elkaar. Daarnaast zorgt een verschuiving van de koppelstukken ervoor dat de slangen de honingraatstructuur benaderen. In figuur 21 is te zien hoe de slangen volgens dit concept met elkaar verbonden zijn.



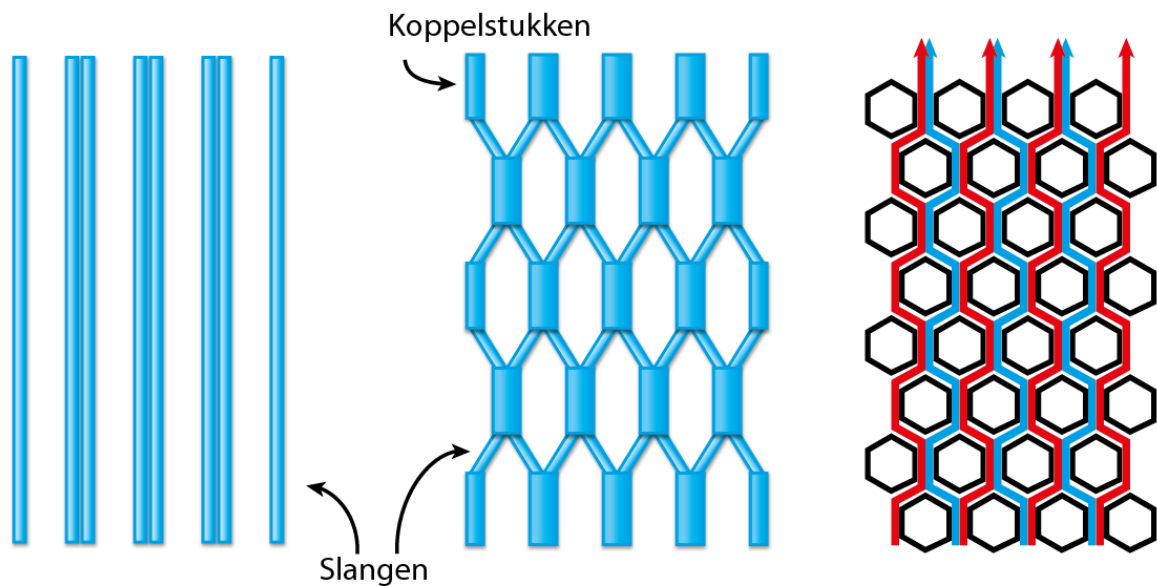
Figuur 21 - Schematische weergave van het parallelle slangen-concept. Wanneer de koppelstukken ten opzichte van elkaar in tegengestelde richting worden verplaatst, wordt een honingraatstructuur benaderd.

Met deze configuratie van de slangen, vormen de slangen geen volledige honingraatstructuur, maar missen er enkele tussenstukjes. Hierdoor wordt er minder oppervlak van de scheenbeschermer bedekt met *shear thickening fluid*.

### 3.3.4.2 Concept 8 – Dubbel

Bij de tweede mogelijke configuratie van de slangen worden de slangen om en om aan elkaar verbonden, waardoor bij elk koppelstuk steeds twee slangen samen komen (zie figuur 22).

Een voordeel van deze configuratie ten opzichte van parallelle slangen is dat op deze manier wel de volledige honingraatstructuur is voorzien van *shear thickening fluid*. Doordat er op sommige plekken twee slangen direct naast elkaar liggen, is de resulterende structuur geen zuivere honingraatstructuur met gelijke wanddikte. Er bestaan bij dit concept namelijk delen die één slang dik zijn, maar ook plaatsen waar de dikte gelijk is aan twee slangen.



Figuur 22 – Schematische weergave van het dubbele slangen-concept. Doordat de slangen om en om met elkaar verbonden worden ontstaat er een honingraatstructuur.

### 3.3.5 Concept 9 en 10 - Spuitgieten

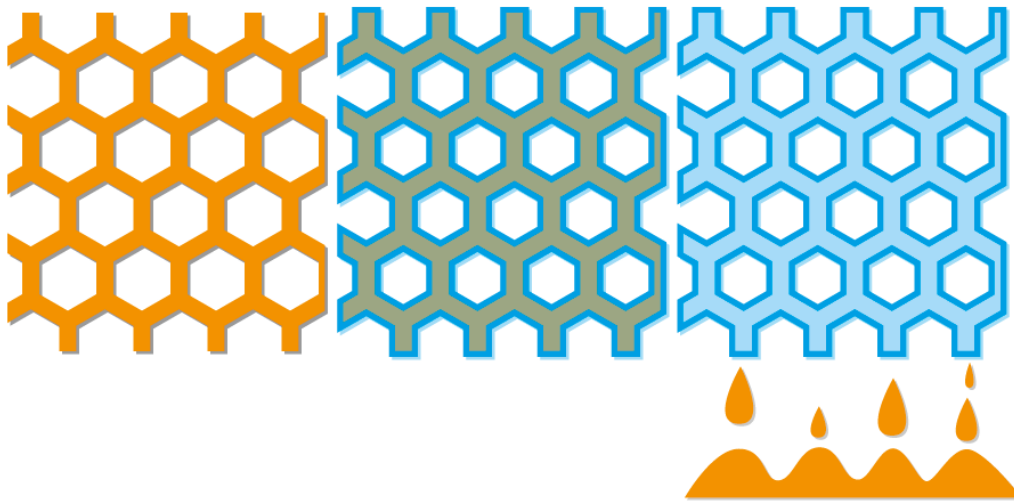
Het laatste tweetal concepten worden vervaardigd door middel van spuitgieten. De uitdaging in het spuitgieten van de honingraatstructuur zit hem in dat de structuur hol dient te zijn. Hierdoor is het nodig om tijdens het spuitgieten gebruik te maken van een uitneembare kern, welke de binnenzijde van de honingraatstructuur open houdt.

#### 3.3.5.1 Concept 9 - Verloren kern

Wegens de vorm van de binnenzijde van de honingraatstructuur is het niet mogelijk gebruik te maken van een starre, herbruikbare kern in de vorm van een honingraat. Een starre kern is in dit geval namelijk niet lossend, waardoor de kern dus niet na het spuitgieten uit het eindproduct gehaald kan worden.

Wanneer de kern na afloop van het spuitgieten echter opgelost of verbrijzeld kan worden, is de kern wel te verwijderen. Op deze manier is de vorm van de honingraatstructuur zeer nauwkeurig na te maken. In figuur 23 worden enkele fases uit het productieproces van dit concept weergegeven.

Bij dit concept is het mogelijk dat er delen van de kern in de honingraatstructuur achterblijven, wat de beschermende werking van de scheenbeschermer zou kunnen schaden. Daarnaast is het voor dit concept nodig dat er voor elke geproduceerde verpakking een aparte kern gemaakt wordt.

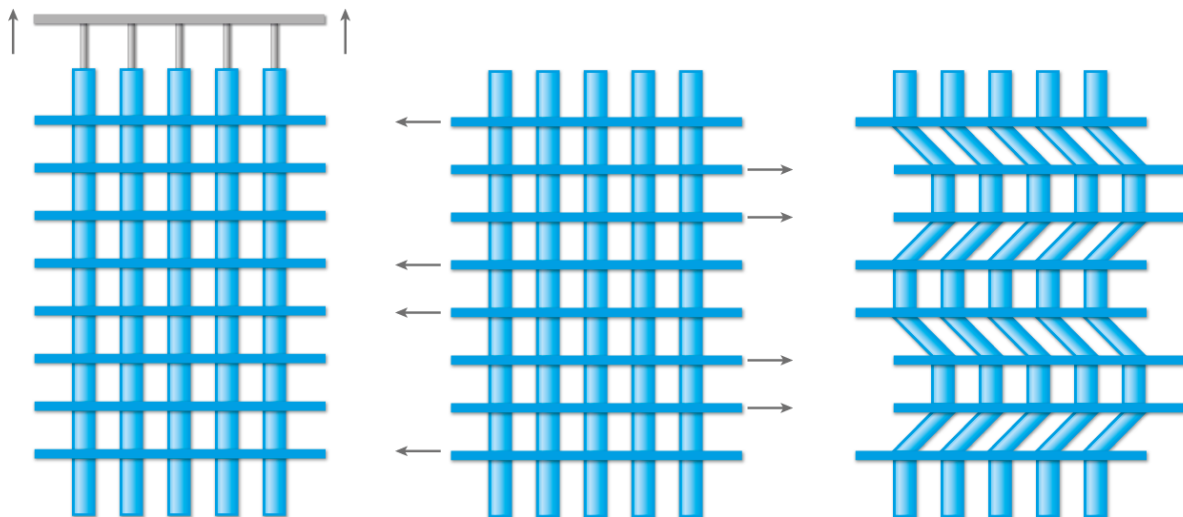


Figuur 23 - Drie fases in het verloren kern-proces. Links wordt de kern weergegeven, in het midden de kern met daar omheen de gesputgiete kunststof en rechts de verpakking waar de kern uit verwijderd is.

### 3.3.5.2 Concept 10 – Raster

Met deze methode is een soortgelijk resultaat te verkrijgen als met het concept met parallelle slangen (zie paragraaf 3.3.4.1). Het belangrijkste verschil tussen het rasterconcept en het parallelle slangenconcept is dat in dit concept de gehele verpakking in één keer wordt gesputgiet, waarbij het bij het parallelle slangenconcept opgebouwd wordt uit verschillende losse componenten.

Bij dit concept wordt er een raster gesputgiet met in één richting een rechte, starre kern (zie figuur 24, links). Nadat de kern verwijderd is ontstaat er een product met rechte, parallelle kanalen die aan elkaar verbonden zijn. Wanneer er een verplaatsing loodrecht op de kanalen plaatsvindt, vormen de kanalen een benadering van een honingraatstructuur (zie figuur 24, midden en rechts).



Figuur 24 - Drie fases in de productie van de verpakking volgens het rasterconcept. Links wordt het spuitgietproduct inclusief kern (boven) weergegeven. In het midden en rechts wordt weergegeven hoe het product tot een honingraatstructuur gevormd kan worden.

### 3.4 Conceptkeuze

Om tot een conceptkeuze te komen, dienen alle concepten met elkaar vergeleken te worden om zo een overzicht te verkrijgen van hoe de concepten zich tot elkaar verhouden. In deze paragraaf worden achtereenvolgens deze vergelijking en de conceptkeuze toegelicht.

#### 3.4.1 Vergelijking van de concepten

Om tot een onderbouwde conceptkeuze te komen, worden de concepten in tabel 4 op verschillende punten met elkaar vergeleken. De totstandkoming van deze tabel wordt onder de tabel toegelicht en in de volgende paragraaf wordt deze tabel gebruikt voor het maken van een conceptkeuze.

De gegevens in tabel 4 dienen niet als absolute maat voor de kwaliteit van een concept, maar als een maat voor hoe de concepten zich onderling verhouden. Hierdoor geldt niet per definitie dat het concept met de meeste plusjes ook direct het meest geschikte concept is.

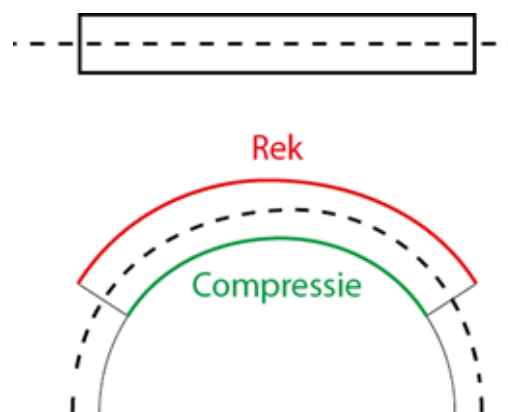
Tabel 4 – Een overzicht van de vergelijking van de verschillende concepten.

#	Naam	Gekromd	Kosten	Aanpasbaarheid	Vorm	Productieaantal	Materiaal				
							IIR	Ionomeer	PE	POE	PVC
1	3d-printen	++	--	++	++	--	Ja	Ja	Ja		
2	Vacuümvormen	++	++	-	+	++		Ja	Ja	Ja	Ja
3	Blaasvormen	++	++	-	+	++		Ja	Ja	Ja	Ja
4	Noppenfolie	-	+	-	+	++		Ja	Ja	Ja	Ja
5	Poreuze kern <i>coaten</i>	-	+	-	+	++	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
6	Poreuze kern <i>sealen</i>	-	+	-	+	++		Ja	Ja	Ja	Ja
7	Parallele slangen	-	++	+	--	++	Ja	Ja	?	Ja	Ja
8	Dubbele slangen	-	++	+	-	++	Ja	Ja	?	Ja	Ja
9	Verloren kern	++	-	-	++	++	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
10	Raster	++	-	-	--	++	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

##### 3.4.1.1 Gekromde verpakking

Wanneer een rechte scheenbeschermer om een been gebogen wordt, treedt er rek op in het oppervlak van de scheenbeschermer (zie figuur 25). Om de hoeveelheid rek in het oppervlak van de verpakking te beperken, kan de verpakking tijdens productie een kromming meekrijgen.

Bij 3d-printen, vacuümvormen, blaasvormen en spuitgieten is de kromming te verkrijgen door dit in te bouwen in de mal of in het CAD-model. Bij de poreuze kern-concepten is het ook mogelijk om de verpakking voor te vormen, maar dan moet de kern een kromming meekrijgen tijdens het *coaten* of *sealen* ervan. Hiervoor



Figuur 25 – Wanneer een rechte scheenbeschermer (boven) om een krom oppervlak wordt gebogen (onder), treedt er in het buitenoppervlak rek op.

dient de kern of uit zichzelf gekromd te zijn, of dient hij gebogen te worden op het moment van *sealen* of *coaten*.

Bij de slangenconcepten kan de verpakking een kromming meekrijgen door gekromde slangen of gekromde koppelstukken te gebruiken.

#### **3.4.1.2 Kosten**

De kosten voor de verpakking van de scheenbeschermer worden enerzijds bepaald door de materiaalprijs en anderzijds door de verwerkingskosten.

Het prijsbereik van de verschillende materialen is van €1,16 tot €3,80 per kilogram (Granta Design Ltd. 2012). Aangezien er per scheenbeschermer maar enkele tientallen grammen verpakking nodig zijn, zullen de materiaalkosten van de verpakking niet van grote invloed zijn op de totaalprijs van de scheenbeschermer.

Aangezien het detailontwerp nog onbekend is, is het lastig om een nauwkeurige kostenschattting van de proceskosten te maken. Op basis van gegevens uit *CES* (Granta Design Ltd. 2012) is het wel mogelijk om een rangschikking te maken van de kosten per concept. Uit *CES* blijkt dat 3d printen het duurste proces is. Dit proces wordt opgevolgd door spuitgieten, omdat daarvoor dure machines vereist zijn. Alle overige concepten kunnen met relatief goedkope processen vervaardigd worden.

#### **3.4.1.3 Aanpasbaarheid**

Een van de eisen van de scheenbeschermer is dat de scheenbeschermer op maat te produceren is. Hierbij is niet gespecificeerd of deze aanpasbaarheid zich moet uiten in de verpakking van de *shear thickening fluid* of in een ander deel van de scheenbeschermer. Wanneer de verpakking echter eenvoudig aanpasbaar is, kan deze afgestemd worden op de anatomie van een speler om zo optimale bescherming te bieden.

De aanpasbaarheid van de verpakking is het hoogst bij het 3d-printconcept. Hierbij is het mogelijk om een scan te maken van het been van een voetballer en aan de hand van deze scan een CAD-model te maken welke naar de printer verstuurd kan worden.

Bij het de twee slangenconcepten is het mogelijk om het formaat van de verpakking te variëren door meer of minder slangen toe te voegen. Hierdoor is de vorm van de verpakking echter minder goed aanpasbaar aan de anatomie van een voetballer dan bij het 3d-printconcept.

Alle overige concepten zijn slecht aanpasbaar. Dit wordt vooral veroorzaakt doordat de mallen aangepast dienen te worden wanneer er andere vormen of afmeting gewenst zijn.

#### **3.4.1.4 Vorm**

Het verschilt per concept in hoeverre de originele honingraatstructuur zoals omschreven in (Haarman 2012) wordt nagebootst. In deze studie wordt gekeken naar hoe het concept met de honingraatstructuur geproduceerd kan worden, waardoor de originele vorm zo veel mogelijk behouden dient te blijven.

Zowel met 3d-printen als met spuitgieten is het mogelijk om de juiste vorm met grote nauwkeurigheid na te maken. Bij de folie- en poreuze-kern-concepten wordt de originele vorm wel benaderd, maar niet exact behaald. Het spuitgieten van een raster en de concepten met slangen resulteren alle drie in een verpakking die veel afwijkt van de originele vorm van de honingraatstructuur.

#### **3.4.1.5 Productieaantal**

In het programma van eisen wordt genoemd dat de oplage van de nieuwe scheenbeschermer 40.000 sets is. Verwacht wordt dat dit bij geen enkel concept problemen oplevert, behalve met 3d-printen. 3d-printen is minder geschikt voor grote oplages, omdat er met deze techniek veel tijd nodig is om één onderdeel te maken (Granta Design Ltd. 2012).

#### **3.4.1.6 Materiaal**

Van welke materialen elk concept geproduceerd kan worden, verschilt per concept. Hoewel er enkele concepten zijn die met alle geselecteerde materialen gemaakt kunnen worden, zijn er ook concepten bij waarbij de keuze minder uitgebreid is.

De thermoharder IIR is ongeschikt voor alle concepten waarbij gelast of ge-thermovormd wordt. Met dit materiaal is het namelijk niet mogelijk om het materiaal plastisch te vervormen onder invloed van temperatuur.

Volgens CES (Granta Design Ltd. 2012) zijn daarnaast de materialen POE en PVC niet geschikt voor 3d-printen. Bij 3d-printen is het nodig dat het materiaal snel uithardt, wat bij POE en PVC niet het geval is.

Ook noemt CES (Granta Design Ltd. 2012) dat alle materialen geschikt zijn om te gieten. Hierdoor kunnen alle materialen gebruikt worden het *coat*-concept met een poreuze kern. Hierbij is het echter de vraag of dit concept überhaupt werkt, aangezien het mogelijk is dat de vloeibare kunststof in de poreuze kern komt. Op dat moment is de kern niet meer poreus en kan deze dus ook niet meer gevuld worden met *shear thickening fluid*.

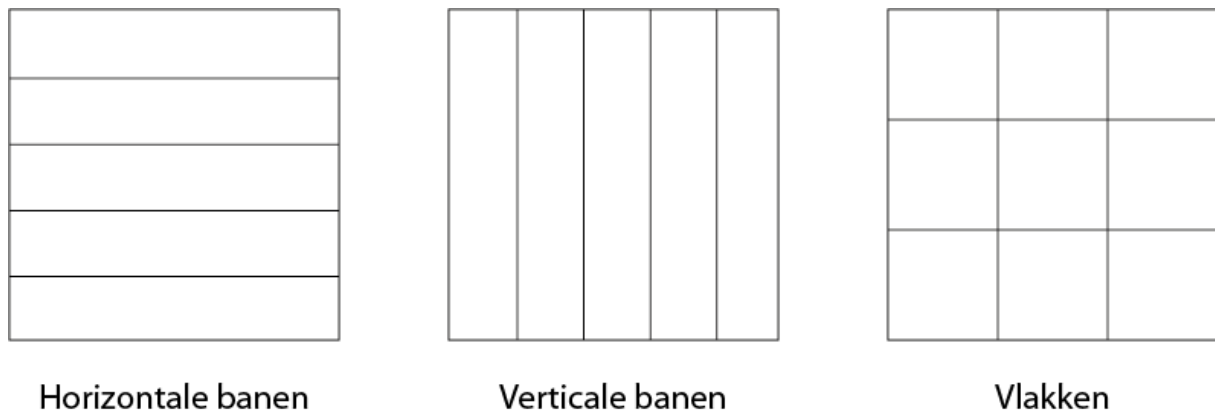
Het is ten slotte onduidelijk of het materiaal PE geschikt is voor de twee slangen-concepten. Deze concepten vergen namelijk een grote flexibiliteit zodat de slangen in de juiste configuratie gebogen kunnen worden. Aangezien PE een relatief hoge elasticiteitsmodulus heeft, is het de vraag of het mogelijk is om deze concepten uit te werken met PE.

#### **3.4.1.7 Vullen en compartimenten**

Wanneer de verpakking uit één groot compartiment bestaat, bestaat het risico dat de *shear thickening fluid* onder invloed van de zwaartekracht naar beneden zakt. Dit heeft als gevolg dat er in de loop der tijd geen *shear thickening fluid* meer in het bovenste deel van de verpakking zit en de scheenbeschermer daar dus ook geen goede bescherming meer kan bieden.

Dit probleem is op te lossen door de verpakking op te delen in verschillende van elkaar afgesloten compartimenten. Op deze manier kan de *shear thickening fluid* nog steeds naar beneden zakken, maar kan het nooit zijn eigen compartiment verlaten. Door de compartimenten op de juiste manier in te delen, zal elk deel van de scheenbeschermer te allen tijde *shear thickening fluid* bevatten.

De compartimenten in de verpakking kunnen van rand tot rand lopen (horizontale of verticale banen) of kunnen de scheenbeschermer verdelen in een raster, zoals wordt weergegeven in figuur 26.



Figuur 26 - Mogelijke compartimenten in de scheenbeschermer.

Bij alle concepten wordt de verpakking na productie van de verpakking pas gevuld. Dit heeft enerzijds als gevolg dat alle compartimenten gevuld moeten kunnen worden en anderzijds dat elk compartiment afgesloten moet kunnen worden na het vullen.

Bij de thermoplastische materialen is het mogelijk om de vulopening na het vullen dicht te lassen. Bij IIR (een thermoharder) is dit niet mogelijk, waardoor de openingen in dit geval afgesloten dienen te worden met behulp van een apart sluitingsmechanisme zoals een stop of lijm.

Het vullen en in compartimenten verdelen van de verpakking is geen conceptgebonden selectie criterium, maar is wel van invloed op de materiaalkeuze. Hierdoor komt dit punt dan ook niet voor in tabel 4, maar wordt het wel meegenomen worden in de keuze voor een materiaal.

### 3.4.2 Conceptkeuze

Met behulp van het overzicht in tabel 4 is de uiteindelijke keuze gevallen op het blaasvormconcept in combinatie met het materiaal POE. Het blaasvormconcept is gekozen omdat daarmee de vorm van het originele concept van (Haarman 2012) vrij goed te benaderen is. Daarnaast is het een betaalbare productiemethode

Een nadeel van het blaasvormconcept is dat het niet goed mogelijk is om de vorm van de verpakking aan te passen aan de anatomie van een individu. Hoewel dit voor profvoetballers toegevoegde waarde zou kunnen hebben, zou dit in het geval van confectiematen voor alle overige voetballers naar verwachting toch niet nodig zijn. Daarnaast is het nog steeds mogelijk om door middel van verschillende mallen enige variatie te verkrijgen in de afmetingen en vorm van de verpakking.

Met het blaasvormconcept is het mogelijk om alle thermoplastische materialen te verwerken. De keuze is op POE gevallen omdat dit materiaal met vrijwel al zijn eigenschappen goed scoort ten opzichte van de overige thermoplasten. Zowel de elasticiteitsmodulus als de zuurstofpermeabiliteit van POE zijn ten opzichte van de overige materialen gemiddeld. Hiervan wordt echter niet verwacht dat dit een probleem is.

### 3.5 Eindontwerp

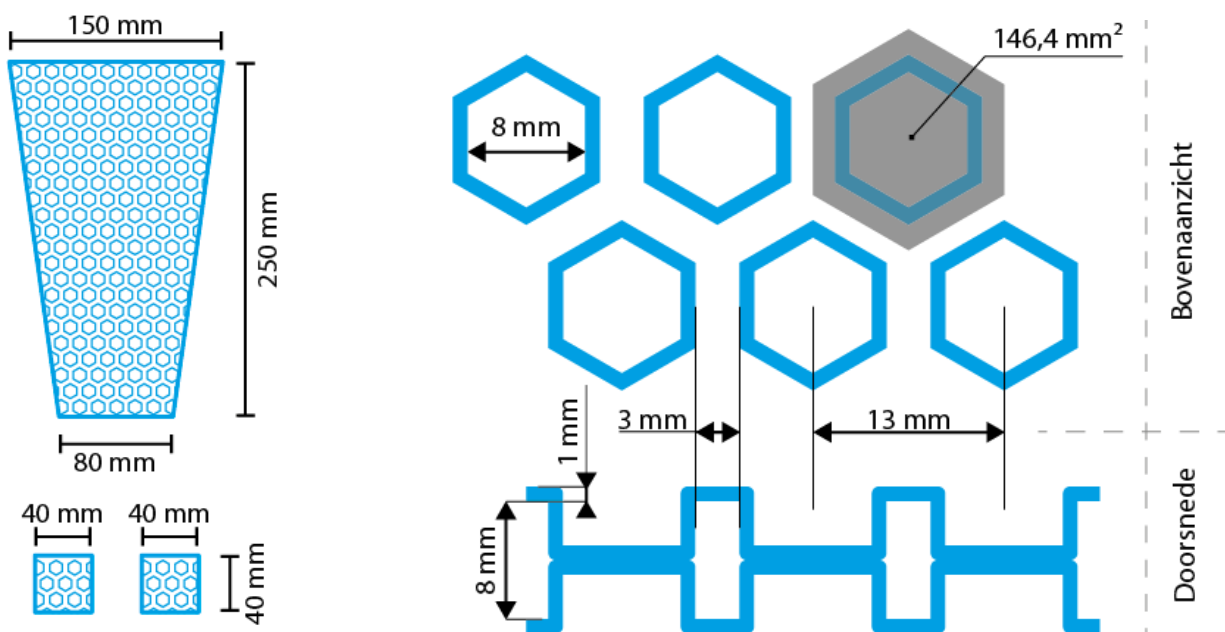
Nu duidelijk is wat het meest geschikte concept is en van welk materiaal dit concept gemaakt moet worden, is het mogelijk om dit ontwerp verder uit te werken tot een eindontwerp voor de productie van de verpakking van de *shear thickening fluid*. De totstandkoming van dit eindontwerp wordt in deze paragraaf toegelicht. Het eindontwerp bevat de details over de verpakking, waaronder de productiestappen voor het vervaardigen van de verpakking en het vullen ervan.

#### 3.5.1 Afmetingen

De afmetingen voor de gehele verpakking van de *shear thickening fluid* worden in figuur 27 weergegeven. In deze figuur worden zowel de afmetingen voor de scheenbeschermer als voor de enkelbeschermer (voor op de malleoli) gegeven. De afmetingen zijn gebaseerd op de afmetingen van twee naar schatting gemiddelde scheenbeschermers van de merken Diadora (type onbekend) en Lotto (Stadio Azione maat M).

De exacte vorm en afmetingen van de verpakking moeten alvorens de scheenbeschermer in productie gaat verder gespecificeerd worden. Binnen deze studie is hier een schatting van gemaakt, om een uitgangspunt te hebben om zo de kosten en de massa van de scheenbeschermer te kunnen bepalen.

De afmetingen van de honingraatstructuur zelf (zoals wanddikte, lengte en breedte) zijn overgenomen uit (Haarman 2012). Deze afmetingen zijn te zien in figuur 28. Een kanttekening bij deze afbeelding is dat de wanddikte in de noppen (op de plek waar de twee folies elkaar raken) dunner zal zijn dan de aangegeven één millimeter. Dit komt doordat het materiaal bij blaasvormen in de noppen uitgerekt wordt.



Figuur 27 - Afmetingen van de verpakking van de *shear thickening fluid*.

Figuur 28 - Afmetingen van de honingraatstructuur met een bovenaanzicht en een doorsnede.

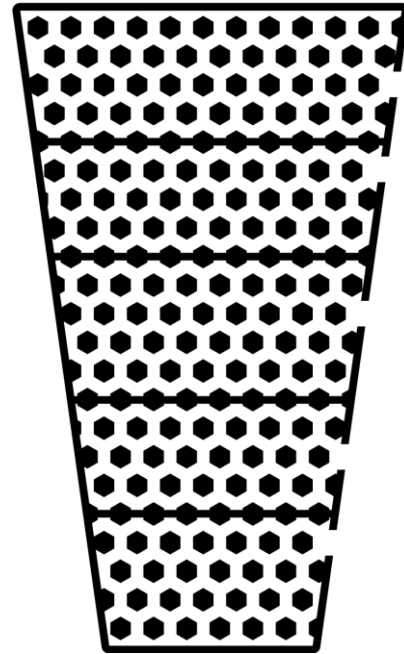
### 3.5.2 Compartimenten, vulopeningen en mallen

Zoals ook aangekaart in paragraaf 3.4.1.7 (Vullen en compartimenten) kan het verdelen van de scheenbeschermer in compartimenten voorkomen dat de *shear thickening fluid* ergens in de scheenbeschermer ophoopt. Een dergelijke ophoping van *shear thickening fluid* kan zowel door zwaartekracht als door bewegingen van het been veroorzaakt worden.

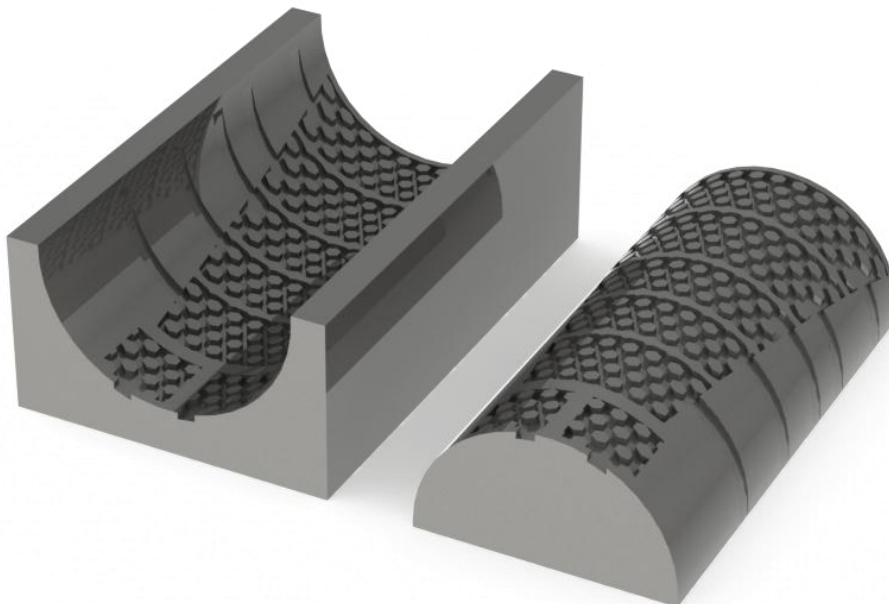
Verwacht wordt dat van alle bewegingen die het been maakt, het zwaaien van het been, tijdens het rennen en het trappen van de bal, de grootste invloed heeft in het ophopen van *shear thickening fluid*. In beide gevallen wordt de *shear thickening fluid* voornamelijk naar beneden (richting de voet) verplaatst. Hierdoor kan de verpakking het beste in horizontale banen verdeeld worden om zo de ophoping van *shear thickening fluid* aan de onderkant tegen te gaan (zie figuur 29).

Om enerzijds alle compartimenten te kunnen vullen met *shear thickening fluid* en om anderzijds een opening te hebben voor gas tijdens het blaasvormen, zijn daarnaast in het eindontwerp alle compartimenten voorzien van een vulopening (zie figuur 29).

Ten slotte kunnen in de mal eenvoudig kleine stukjes verpakking voor bescherming van de enkels meegeproduceerd worden. De complete mal inclusief enkelbescherming, vulopeningen en compartimenten is te zien in figuur 30.



Figuur 29 – Schematische afbeelding van de scheenbeschermer met compartimenten en vulopeningen.



Figuur 30 - De mal voor de verpakking van de *shear thickening fluid*. Links wordt de bovenzijde van de mal (op zijn kop) weergegeven.

### 3.5.3 Gewicht

Het gewicht van de verpakking van de *shear thickening fluid* komt uit op 50,6 gram voor de scheenbescherming en 5,6 gram voor de twee enkelbeschermers. Hierbij is uitgegaan van de afmetingen van figuur 27 en een dichtheid van het materiaal POE van 905 kg/m<sup>3</sup> (Granta Design Ltd. 2012). Ook is hierbij rekening gehouden met dat er in elke zeshoek van de honingraatstructuur een gat van 4 mm<sup>2</sup> geperforeerd wordt om huidirritatie tegen te gaan.

Het gewicht van de *shear thickening fluid* zelf is 149,3 gram voor de scheenbescherming en 16,6 gram voor de twee enkelbeschermers. Deze waarden zijn op basis van de afmetingen in figuur 27 en figuur 28 en een dichtheid van 1.590 kg/m<sup>3</sup> (Haarman 2012).

Wanneer het gewicht van zowel de verpakking als de *shear thickening fluid* bij elkaar opgeteld worden, komt het gewicht van de scheenbescherming uit op 199,9 gram en het gewicht van de enkelbeschermers op 22,3 gram.

### 3.5.4 Productiestappen verpakking

De productie van de verpakking kan op verschillende manieren geschieden. Hoe dit precies gebeurt, is onder andere afhankelijk van de beschikbare faciliteiten van de producerende partij. Om inzicht te verstrekken in welke stappen nodig zijn, zal hieronder een mogelijke productiewijze worden toegelicht. Hoewel deze toelichting wel alle handelingen bevat die nodig zijn om tot een verpakking te komen, is het mogelijk dat wanneer de scheenbeschermers daadwerkelijk in productie gaat enkele stappen worden samengevoegd, opgesplitst of omgewisseld.

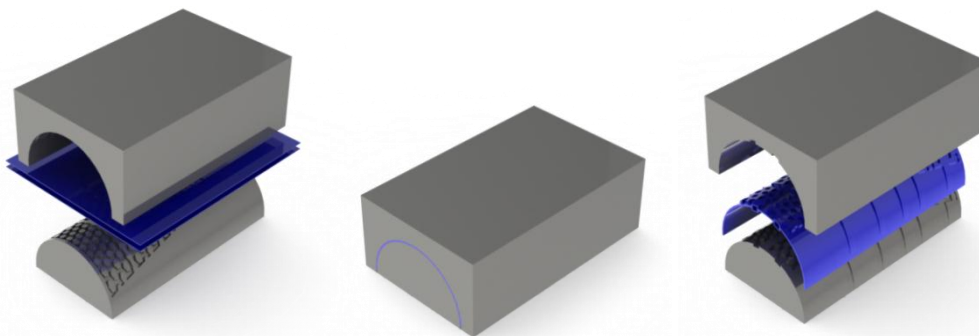
De productie van de verpakking van de *shear thickening fluid* kan op de volgende wijze geschieden:

1. Folie verhitten en opblazen in blaasvormer (vormen en lassen)
2. Gaten in honingraatstructuur perforeren
3. Op maat snijden (overbodig materiaal weghalen en enkelbescherming lossnijden)
4. Verpakkingen (scheen en enkels) vullen en dichtlassen

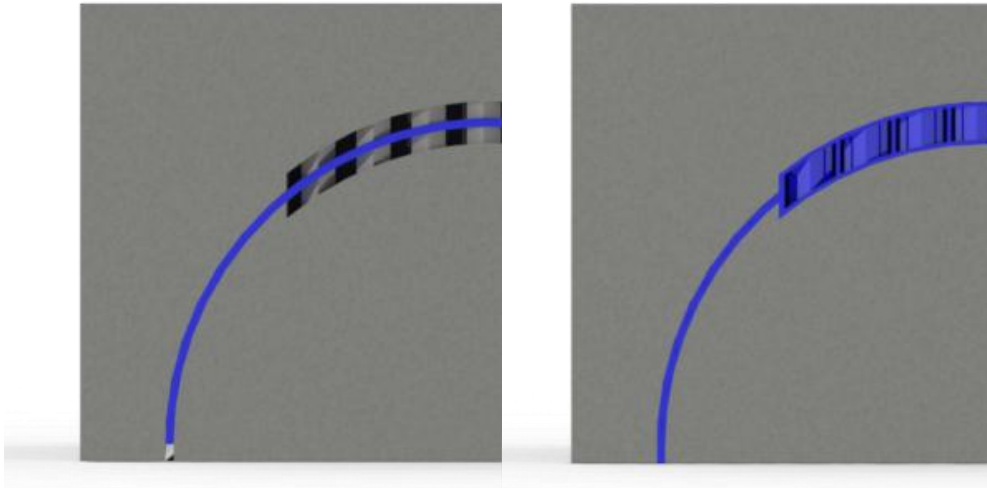
Ten behoeve van de overzichtelijkheid, zijn in dit stappenplan het opspannen en verwijderen van het materiaal voor elke bewerking weggelaten. Dit zijn uiteraard wel handelingen die tijdens de uiteindelijke productie uitgevoerd dienen te worden.

#### Stap 1: Folie verhitten en opblazen in blaasvormer (vormen en lassen)

Bij deze eerste stap krijgt het materiaal zijn uiteindelijke vorm (zie figuur 31 en figuur 32). Zo worden de folies gevormd tot een honingraatstructuur en worden de folies in de noppen van de honingraatstructuur en langs alle randen aan elkaar gelast.



Figuur 31 – Het blaasvormen van vellen POE. Links wordt ongevormd POE in de mal gestopt, in het midden wordt het materiaal gevormd en rechts wordt het gevormde materiaal uit de mal gehaald.



Figuur 32 - Twee doorsnedes van de mal waarop het blaasvormproces wordt weergegeven. Links zijn de vellen POE nog plat, terwijl ze op de rechterafbeelding de vorm van mal hebben aangenomen onder invloed van temperatuur en gasdruk.

**Stap 2: Gaten in honingraatstructuur perforeren**

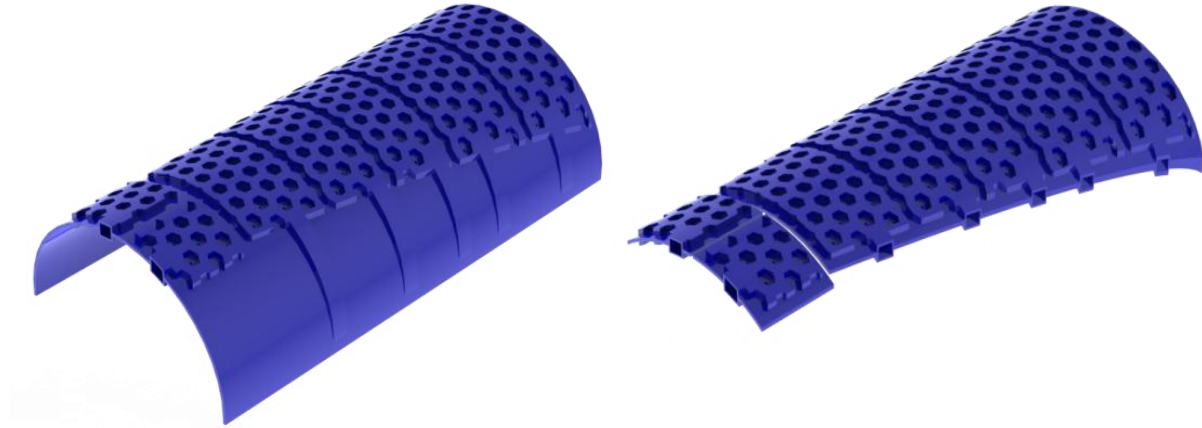
Nadat de folies hun vorm hebben gekregen worden alle zeshoeken van de honingraatstructuur in het midden van de las geperforeerd om zo de verpakking luchtdoorlatend te maken voor de huid ónder de scheenbeschermer (zie Figuur 33). Het perforeren gebeurt in een aparte machine waarin in één keer alle gaten in de verpakking geponst worden.



Figuur 33 - Een afbeelding van de verpakking zonder (links) en met (rechts) gaten in de zeshoeken.

### Stap 3: Op maat snijden (overbodig materiaal weghalen en enkelbescherming lossnijden)

Tijdens het blaasvormen worden zowel de scheenbescherming als de enkelbescherming uit één stuk gevormd. Daarnaast bevat de verpakking na het blaasvormen rond de randen nog overbodig materiaal. Bij deze stap worden de enkelbescherming en de scheenbescherming van elkaar gescheiden en wordt al het overbodige materiaal weggesneden (zie figuur 34).



Figuur 34 – Een afbeelding van de verpakking voor (links) en na (rechts) het bijsnijden.

### Stap 4: Verpakkingen (scheen en enkels) vullen en dichtlassen

Aan het eind van het productieproces wordt de verpakking gevuld. Dit gebeurt pas op het einde, omdat er op die manier geen handelingen meer uitgevoerd hoeven te worden, waardoor de verpakking lek kan raken.

Het is mogelijk om voorafgaand aan het vullen de kwaliteit van de verpakking en de lasnaden te testen door de verpakking tot een bepaalde druk met lucht te vullen. Zolang de verpakking bij die druk geen lucht lekt, kan aangenomen worden dat de verpakking goed afgesloten is en de lasnaden ook de druk die komt kijken bij een inslag (zoals bij een trap van een tegenstander) aan kunnen.

Om er zeker van te zijn dat er enerzijds geen lucht in de verpakking achterblijft en dat anderzijds de verpakking volledig gevuld wordt, moet bij het vullen de verpakking eerst vacuüm gezogen worden. Wanneer zodra alle lucht er uit is er *shear thickening fluid* in gegoten wordt, is het eenvoudiger de volledige verpakking te vullen.

Aan het eind van deze stap is de productie van de verpakkingen van de *shear thickening fluid* voltooid (zie figuur 35).



Figuur 35 – De verpakkingen van de *shear thickening fluid*.

### **3.5.4.1 Knelpunten**

De lasmethode die wordt toegepast in stap 1 van de productie van de verpakking berust er op dat de warmte van de mal door het materiaal richting het raakvlak van de twee folies wordt geleid. Hierdoor is de toepasbaarheid van deze techniek afhankelijk van het te lassen materiaal en de te lassen geometrie (in het bijzonder de dikte van het materiaal). Wanneer de twee te lassen delen bijvoorbeeld een te grote dikte hebben, zal de benodigde warmte nooit bij het contactoppervlak aankomen.

Of deze techniek in deze situatie toepasbaar is, is alleen te bepalen door middel van praktijktests. Het verdient aanbeveling dergelijke tests uit te voeren alvorens de scheenbeschermer in productie gaat.

Indien later blijkt dat deze techniek niet toepasbaar is voor de productie van de verpakking, zal er een alternatief toegepast moeten worden. Een mogelijk alternatief is spiegellassen. Bij spiegellassen wordt er een hete plaat tussen de twee te lassen delen geschoven, zodat ze op de locatie van de te vormen las verhit worden. Vervolgens wordt de hete plaat verwijderd en worden de te lassen delen op elkaar gedrukt om zo te las te vormen. (Granta Design Ltd. 2012)

## **3.6 Totaalproduct**

In de voorgaande paragraaf is de verpakking en de productie van de verpakking toegelicht. In deze paragraaf worden enkele punten met betrekking tot het totaalproduct (scheenbescherming, enkelbescherming en kous) toegelicht. Hierbij komen maatproductie, de productiestappen en een kostenschatting van het totaalproduct aan bod.

### **3.6.1 Maatproductie**

Een van de eisen voor de scheenbeschermer stelt dat de scheenbeschermer op maat te produceren moet zijn. Doordat de verpakking van de *shear thickening fluid* geblaasvormd wordt, is het lastig om de verpakking aan te passen aan de anatomie van een individuele speler. In dat geval zou er namelijk per speler een aparte mal gemaakt moeten worden.

Het is wel mogelijk om de kous die dient ter bevestiging van de honingraatstructuren aan te passen aan een speler. Aan de kous worden namelijk vakjes genaaid waar de honingraatstructuren in geschoven kunnen worden. Deze vakjes kunnen per speler zó gepositioneerd worden dat deze goed aansluiten op de anatomie van elke speler. Daarnaast kan de pasvorm ook zo gemaakt worden dat de kous niet (snel) afzakt en de kous op de juiste plekken druk geeft en niets afknelt.

Om daarnaast de grootste verschillen in de lengte van het onderbeen van een speler op te vangen, moeten er daarnaast nog wel verschillende formaten van de verpakking voor de *shear thickening fluid* gemaakt worden. Wanneer er bijvoorbeeld drie verschillende maten geproduceerd worden, kan een grote variatie in onderbeenlengtes worden bediend.

Hoewel met deze opzet de scheenbeschermers op maat te produceren zijn voor individuele spelers, kan ook eenvoudig een stap gemaakt worden naar confectiematen. Omdat de honingraatstructuren met *shear thickening fluid* flexibel zijn, vormen ze zich in zekere mate naar het been. Zoals er volgens het huidige ontwerp drie verschillende maten honingraatstructuren geproduceerd worden, kunnen er ook drie vaste maten geproduceerd worden van de kous.

### 3.6.2 Productie totaalproduct

In het geval van een op maat geproduceerde kous zijn de productiestappen van het totaalproduct als volgt:

1. Opmeten benen speler
2. Kous en honingraatstructuren in fabriek produceren
3. Kous en honingraatstructuren assembleren

In het geval van confectiematen hoeft de speler niet opgemeten te worden en kunnen zowel de honingraatstructuren als de kousen in serie geproduceerd worden in de fabriek.

#### Stap 1: Opmeten benen speler

Bij het opmeten van de benen van de speler wordt bepaald hoe de kous precies gevormd moet worden om een speler optimaal te beschermen.

#### Stap 2: Kous en honingraatstructuren in fabriek produceren

Gedurende de tweede stap wordt de kous op maat geproduceerd in de fabriek volgens de metingen van stap 1. Daarnaast worden ook de honingraatstructuren geproduceerd zoals omschreven in paragraaf 3.5.4 (Productiestappen verpakking).

#### Stap 3: Kous en honingraatstructuren assembleren

Zodra alle onderdelen geproduceerd zijn, hoeven ze slechts geassembleerd te worden. In dit geval komt dat er op neer dat de honingraatstructuren in de kous gestopt dienen te worden.

### 3.6.3 Kosten

Er is een kostenschatting gemaakt voor de volledige productie van de scheenbeschermer. Hierbij is er rekening gehouden met de kosten voor materiaal, machines en de uurkosten van personeel. Binnen de kostenschatting valt alles van het opmeten van de benen van een speler tot het assembleren van de op maat gemaakte kous en de honingraatstructuren. In Bijlage E is een overzicht van de kostenschatting te zien en in tabel 5 worden de kosten van de productie van de scheenbeschermer verkort weergegeven.

Tabel 5 - Overzicht van kosten voor de maatproductie van 40.000 scheenbeschermers. De totstandkoming van deze bedragen is te zien in Bijlage E.

<b>Wat</b>	<b>Kosten</b>
Materiaalkosten	€ 328.341,31
Machinekosten	€ 128.000,00
Uurkosten	€ 1.411.111,11
<b>Totaal</b>	<b>€ 1.867.452,42</b>
<b>Per speler</b>	<b>€ 46,69</b>

Wat opvalt in de kostenschatting zijn de zeer hoge uurkosten. Deze hoge kosten worden vooral veroorzaakt door het opmeten van de benen van spelers (€ 500.000,-) en het op maat maken van de kousen (€ 666.666,67). In het geval dat er gewerkt wordt met confectiematen vervallen alle kosten voor het opmeten van een speler en kunnen de kosten voor het produceren van de kousen teruggebracht worden tot € 66.666,67 bij een productie van één standaardkous per minuut. Een dergelijke aanpassing zou zorgen voor een productieprijis van € 19,19 per speler in plaats van €46,69 wanneer het wel op maat geproduceerd wordt.

Een belangrijke kanttekening bij de gemaakte kostenschattting is dat er alleen rekening is gehouden met de productie van de scheenbeschermer. Wanneer de scheenbeschermer daadwerkelijk op de markt gebracht gaat worden, zullen er echter nog meer kosten bij komen. Zo zullen er nog ontwikkelkosten gemaakt worden om tot een eindontwerp voor de productie van de gehele scheenbeschermer te komen, zal er een locatie voor productie gekocht of gehuurd moeten worden en moeten na productie alle producten nog naar de klant getransporteerd worden. Ook moet er geld gestoken worden in het opleiden van mensen voor het aanmeten van de op maat te maken scheenbeschermer en zal er geld in marketing gestoken moeten worden. Ten slotte zal de producerende partij ook nog geld kwijt zijn aan overhead.

Hoewel de uiteindelijke prijs nog in grote mate afhankelijk is van de producerende partij, is het wel mogelijk om een idee te krijgen van hoe het nieuwe ontwerp zich qua prijs verhoudt tot bestaande scheenbeschermers. In twee willekeurige webwinkels bevinden de prijzen van scheenbeschermers zich tussen de €2,99 en €67,95 (Aktiesport 2013; VoetbalDirect 2013). Circa 95% van deze scheenbeschermers kost echter tussen de € 10,- en €30,- (Aktiesport 2013; VoetbalDirect 2013).

De productieprij van het nieuwe ontwerp ligt, wanneer de scheenbeschermers op maat gemaakt worden, ver boven de gemiddelde prijs van bestaande scheenbeschermers. In het geval van maatproductie is de doelgroep van de scheenbeschermer profvoetballers, waardoor de hogere prijs naar verwachting een minder groot probleem is. Wanneer er slechts in confectiematen geproduceerd wordt, is de productieprij van de nieuwe scheenbeschermer ongeveer gelijk aan de winkelprijs van bestaande scheenbeschermers. Verwacht wordt dat de uiteindelijke winkelprijs van de nieuwe scheenbeschermer iets hoger zal komen te liggen dan de prijs van bestaande scheenbeschermers.

### 3.7 Controleren van eisen

Nu duidelijk is hoe de scheenbeschermer er uit ziet en hoe hij geproduceerd wordt, is het ook mogelijk om te bepalen of de scheenbeschermer voldoet aan het programma van eisen. In Bijlage F is een overzicht van alle eisen te zien met daarbij een toelichting of het ontwerp voldoet aan die eis of niet. Hieronder zullen slechts enkele opvallende of afwijkende uitkomsten worden toegelicht.

De massa van de honingraatstructuren van scheenbeschermer ligt met 222,2 gram ongeveer 11% hoger dan de maximaal toegestane 200 gram. Ook moet hier voor de uiteindelijke scheenbeschermer de massa van de kous nog bij opgeteld worden. Door (Haarman 2012) is tijdens een experiment met één proefpersoon aangetoond dat er geen significante toename is in zuurstofverbruik tijdens het rennen met een scheenbeschermer van 150 of 200 gram. Verwacht wordt dat de extra toename van 11% van het huidige ontwerp ook geen significant verschil zal maken, hoewel dit nog wel onderzocht dient te worden.

Daarnaast is POE, het materiaal waarvan de verpakking van de *shear thickening fluid* gemaakt wordt, matig bestand tegen UV-straling. Het is echter wel mogelijk om door middel van UV-werende *coatings* de UV-bestendigheid van de verpakking te verbeteren. (Granta Design Ltd. 2012). De haalbaarheid en kosten van het toepassen van een dergelijke *coating* dienen nog onderzocht te worden.

Doordat de scheidsrechter bepaalt of een scheenbeschermer voldoet aan FIFA Laws of the Game (eis 16), is het niet mogelijk om op dit moment aan te geven of het ontwerp daar aan voldoet.

Tot slot is het niet gelukt om de wensen toe te passen. Wat betreft het gebrek aan maatproductie van de verpakking wordt verwacht dat dit geen probleem is, omdat de kous op maat geproduceerd kan worden.

## 4 Validatie

Zoals in paragraaf 2.7 wordt toegelicht, kent de validatie van deze studie drie doelen:

1. bepalen of het ontwerp maakbaar is;
2. bepalen of het prototype bestand is tegen krachten die komen kijken bij een voetbaltrap;
3. bepalen in welke mate het prototype bescherming biedt ten opzichte van andere scheenbeschermers.

Het eerste doel is onderzocht door het maken van meerdere prototypes. Dit proces wordt in de eerstvolgende paragraaf omschreven.

Na de productie van de prototypes zijn er slagproeven uitgevoerd om een antwoord te verkrijgen op de laatste twee doelen. Deze slagproeven worden omschreven in paragraaf 4.2.

### 4.1 Prototypes

Om het in dit verslag omschreven ontwerp te valideren, zijn er drie prototypes gebouwd. De prototypes bestaan uit een flexibele PVC honingraatstructuur gevuld met *shear thickening fluid*.

Het doel van de prototypebouw was enerzijds om te bepalen of het ontwerp gemaakt kan worden en anderzijds om prototypes voort te brengen die gebruikt konden worden tijdens de slagproeven. Daar het ontwerp alleen bestaat uit de verpakking van de *shear thickening fluid*, zijn de prototypes ook beperkt tot een met *shear thickening fluid* gevulde honingraatstructuur.

#### 4.1.1 Prototypebouw

De kunststof waar de prototypes van gemaakt zijn is transparant, zacht PVC (PVC met weekmakers, zoals in strokengordijnen, tafelkleden en vloerzeilen) van één millimeter dik. Dit materiaal is enerzijds goed te thermovormen en anderzijds goed te verlijmen.

De prototypes zijn gemaakt door twee ge-thermovormde stukken PVC met de zeshoekige noppen van de honingraatstructuur op elkaar te lijmen. De vellen PVC zijn ge-thermovormd over een honingraatstructuur welke uit een dunne MDF-plaat is lasergesneden. In figuur 36 zijn twee vellen ge-thermovormd PVC te zien en in Bijlage G wordt een fotoverslag van de prototypebouw getoond.

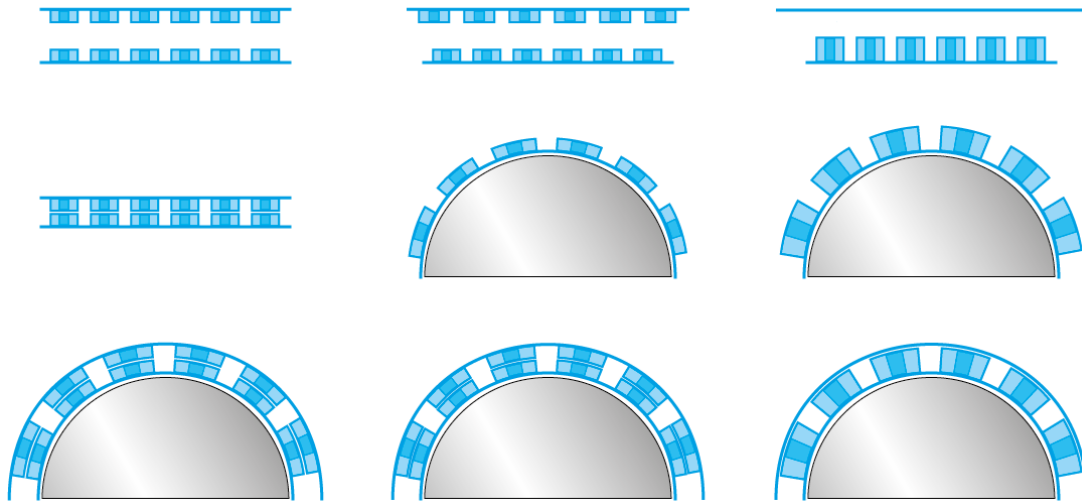


Figuur 36 - Twee vellen ge-thermovormd PVC welke al deels op elkaar gelijmd zijn.

#### 4.1.2 Kromming

Voorafgaand aan de prototypebouw was het onduidelijk hoe de slagproeven exact uitgevoerd zouden gaan worden. Zo was het nog onbekend of het prototype op een plat of gekromd oppervlak getest zou worden, waardoor het ook onbekend was of er een vlak of gekromd prototype nodig was.

Wegens de grote flexibiliteit van het gebruikte materiaal bestond het vermoeden dat een plat prototype rond een kromming gebogen zou moeten kunnen worden (zie figuur 37, links). Omdat dit niet zeker was, zijn er tegelijkertijd met het platte prototype ook twee mogelijkheden bedacht om het prototype van zichzelf een kromming mee te geven.



Figuur 37 - De drie verschillende opties voor het produceren van een prototype. Het prototype kan zowel plat (links) als gekromd (midden en rechts) geproduceerd worden. Het produceren van een krom prototype kan enerzijds door de afstand tussen de noppen van de twee vellen PVC te variëren (midden) of anderzijds door één vel noppen van acht millimeter te geven en hier vervolgens een egaal vel PVC op te bevestigen.

Het eerste gekromde prototype krijgt zijn kromming doordat de twee aan elkaar bevestigde vellen PVC andere afmetingen hebben. Omdat het buitenste vel (verder van het been verwijderd) een grotere afstand tussen de noppen van de honingraatstructuur heeft dan het binnenste vel, wordt het prototype uit zichzelf krom (zie figuur 37, midden)

Bij het tweede gekromde prototype bevat maar één van de twee vellen PVC zeshoekige noppen, welke in dit geval acht millimeter hoog zijn. Wanneer dit vel met noppen op een kromming gelegd wordt en er vervolgens een egaal vel op de noppen bevestigd wordt, zal ook dit prototype zijn kromming behouden (zie figuur 37, rechts).

#### 4.1.3 Resultaten prototypebouw

Uiteindelijk zijn er drie prototypes gemaakt: twee platte en één kromme (volgens het tweede principe van figuur 37). Het kromme prototype is samen met een van de platte prototypes gevuld met *shear thickening fluid*, terwijl het andere platte prototype gevuld is met demiwater, om zo de invloed van de *shear thickening fluid* te kunnen bepalen. In figuur 38 wordt een foto van de drie prototypes weergegeven.

Het is ten slotte niet gelukt om een prototype volgens het derde principe van figuur 37 te vervaardigen. Hierbij bleek na het thermovormen van het vel met noppen van acht millimeter dat de noppen bij de uiteinden erg dun waren geworden. Hierdoor was het niet goed mogelijk om deze noppen nog te verlijmen, omdat dan het materiaal stuk zou gaan.



Figuur 38 - Foto van de drie prototypes.

#### 4.1.4 Discussie en conclusie prototypebouw

Gedurende de prototypebouw bleek het lastig om de verpakkingen met de hand te vullen met *shear thickening fluid* en deze vervolgens zonder ingesloten lucht te sluiten. Hierdoor bevatten alle prototypes lucht, wat er op termijn voor zou kunnen zorgen dat er schimmel ontstaat in de prototypes.

Een andere kanttekening bij de prototypebouw is dat er door een rekenfout te weinig CsCl beschikbaar was voor het kromme prototype. Dit heeft als gevolg dat de maïzena in dit prototype bezinkt. Doordat het prototype wel enige CsCl bevat, duurt het bezinken wel langer dan bij een volledige afwezigheid van CsCl. Gedurende de slagproeven dient dit prototype voor elke meting geschud te worden.

Ook geldt dat de prototypes op enkele vlakken afwijken van het ontwerp. Ze verschillen op het gebied van hun materiaal, de afmetingen van de verpakking en de verbindingmethode. Zo bestaat de verpakking volgens het ontwerp uit POE, terwijl er in de prototypes gebruik is gemaakt van PVC. Daarnaast zijn de afmetingen van de platte en kromme prototypes respectievelijk 134 bij 227 en 147 bij 227 millimeter, waar het ontwerp een gelijkbenig trapezium is van 80 tot 150 bij 250 millimeter. Ten slotte zijn in de prototypes de vellen PVC aan elkaar gelijmd, terwijl deze in het ontwerp aan elkaar gelast worden.

Er wordt verwacht dat de verschillen tussen het ontwerp en het prototype geen problemen op moeten leveren tijdens de productie van het ontwerp. Hierdoor wordt aangenomen dat er met de productie van het prototype de maakbaarheid van het ontwerp is aangetoond.

Daarnaast wordt er verwacht dat de kanttekeningen bij de totstandkoming van de prototypes geen problemen op moeten leveren bij de slagproeven. Hierdoor kunnen de prototypes tijdens de slagproeven toegepast worden om het ontwerp te valideren.

## 4.2 Slagproeven

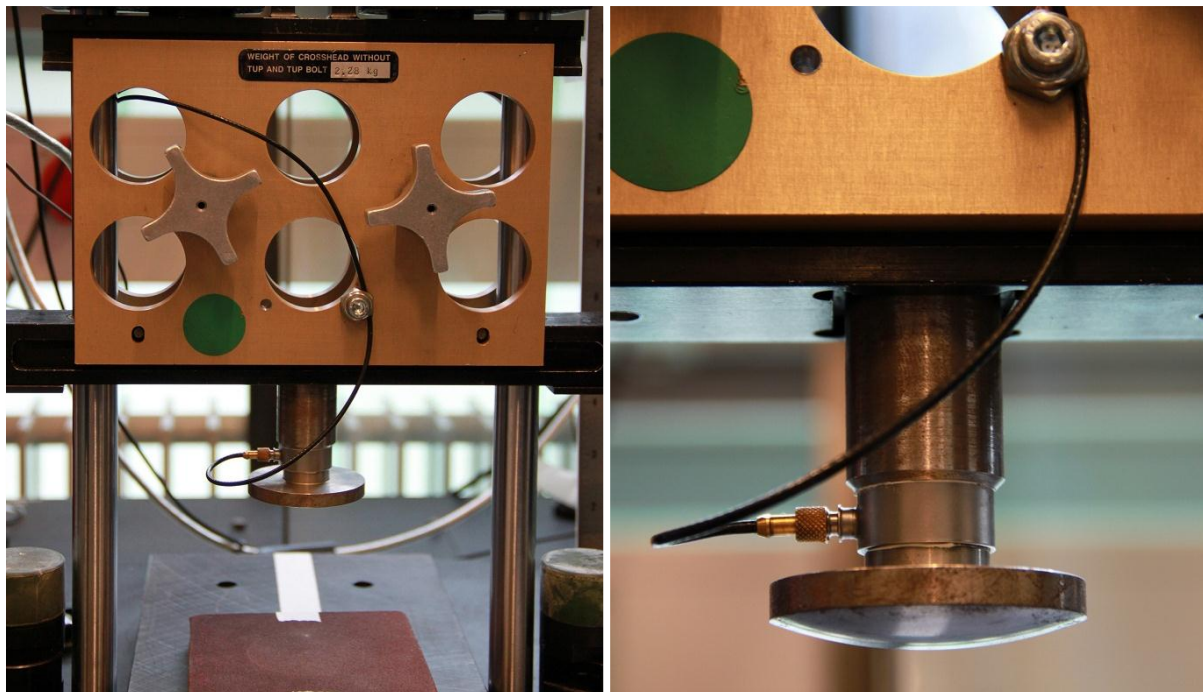
Als afsluiting van deze studie zijn er slagproeven uitgevoerd met de prototypes en enkele andere scheenbeschermers. Een eerste doel van deze slagproeven was om te bepalen of de prototypes bestand waren tegen de klappen zoals die van een voetbaltrap (zie eis 7, pagina 26). Daarnaast is door middel van de slagproeven de geboden bescherming van verschillende scheenbeschermers onderling vergeleken.

### 4.2.1 Materiaal & Methode

Bij de uitgevoerde slagproeven zijn de verbeterpunten voor de validatie van (Haarman 2012) zo veel mogelijk meegenomen. Daarnaast is er naar gestreefd om de overige condities gelijk houden aan de condities bij de metingen van (Haarman 2012) om zo de metingen met elkaar te kunnen vergelijken. Hieronder wordt omschreven hoe de metingen zijn uitgevoerd.

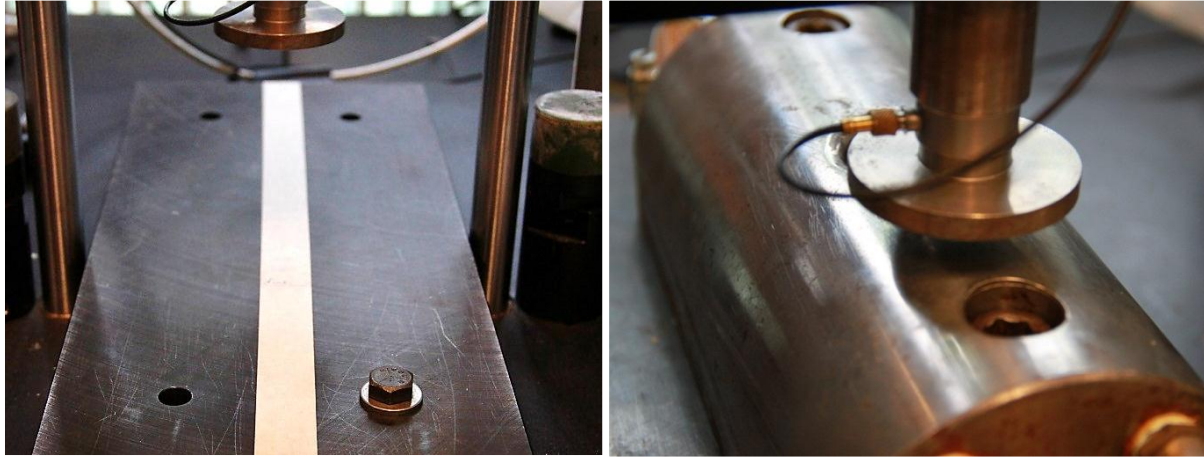
#### 4.2.1.1 Opstelling

De slagproeven zijn uitgevoerd met de *Instron Dynatup 8250 Drop Weight Impact Tester*. Dit is een machine met twee verticale staven waar een massa aan bevestigd is (zie figuur 39, links). Deze massa kan vrij in verticale richting bewegen, waardoor deze massa recht naar beneden kan vallen. Aan de vallende massa van de *impact tester* zijn een krachtcel (*Kistler 9021A*) en een slagpen bevestigd (zie figuur 39, rechts). De krachtcel is via een versterker (*Kistler 5011*) verbonden met een computer waar in het computerprogramma *LabView* de data verwerkt wordt. Deze opstelling is hetzelfde als de opstelling van (Haarman 2012).



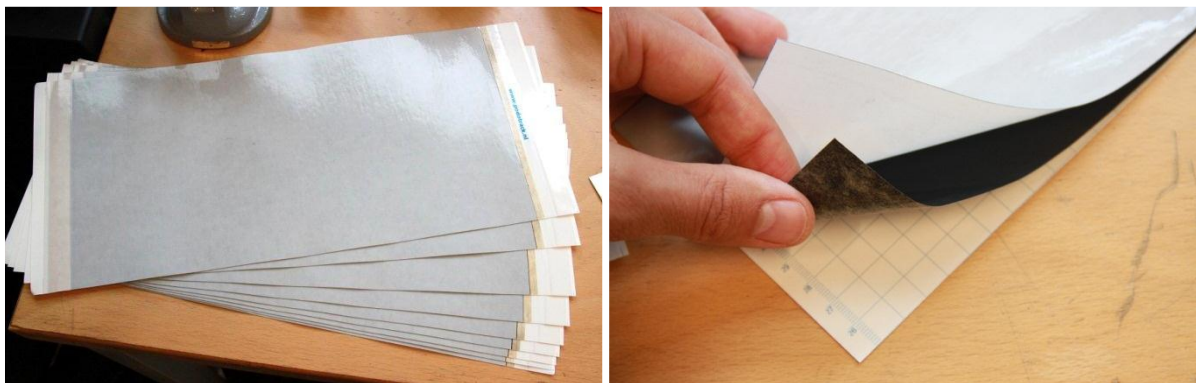
Figuur 39 - Links wordt een foto van de vallende massa met aan weerszijden de verticale staven waarlangs de massa naar beneden valt weergegeven. Rechts worden de krachtcel en de slagpen weergegeven. De slagpen heeft een diameter van circa vijf centimeter.

De metingen zijn zowel op een plat als op een gekromd oppervlak uitgevoerd (zie figuur 40). De platte ondergrond bestond uit een massieve stalen plaat en de kromme ondergrond was een massieve stalen halve cilinder. Doordat beide ondergronden van massief staal waren, dempten ze de inslag van de *impact tester* naar verwachting maar in geringe mate. Hierdoor is de demping hoofdzakelijk veroorzaakt door de monsters die onderzocht zijn.



Figuur 40 - Afbeeldingen van de platte (links) en gekromde (rechts) ondergrond. De gekromde ondergrond heeft een diameter van 100 millimeter.

Ten slotte is er bij gebrek aan geschikte kracht- of druksensoren voor ónder de monsters, gebruik gemaakt van carbonpapier om een afdruk te krijgen van de drukverdeling onder elk monster. Op deze manier kan inzicht verkregen worden in hoe een monster de druk ten gevolge van de inslag verdeelt over de ondergrond. Dit is een verbeterpunt ten opzichte van de validatie van Haarman (2012). Het gebruikte carbonpapier is Podotrack™ van Lijnco. Dit papier wordt ook door onder andere podotherapeuten gebruikt om voetblauwdrukken te maken (zie figuur 41).



Figuur 41 - Twee afbeeldingen van het carbonpapier Podotrack™ waarbij links een stapel vellen carbon papier wordt weergegeven en rechts de verschillende lagen van het carbonpapier te zien zijn.

#### 4.2.1.2 Energieën

De het gewicht van de vallende massa is 2,28 kilogram en het gewicht van de krachtcel en de slagpen samen is 0,3 kilogram. Het volledig vallende gewicht is dus 2,58 kilogram. Wanneer aangenomen wordt dat het vallen van het gewicht wrijvingsloos gebeurt, kan de kinetische energie op het moment van inslag berekend worden door middel van de potentiële energie van het vallend gewicht. Bij een wrijvingsloze val wordt namelijk alle potentiële energie omgezet in kinetische energie.

Bij de metingen van (Haarman 2012) is er met vier verschillende inslagenergieën gemeten. Om de resultaten van de metingen van deze studie vergelijkbaar te houden met die van Haarman, zijn dezelfde energieën aangehouden. Gedurende haar metingen heeft Haarman de valhoogte voor een bepaalde energie berekend en deze hoogte voor alle energieën opgemeten en ingesteld. Om soortgelijke inslagenergieën te kunnen behalen, zijn bij de metingen van deze studie dezelfde valhoogtes aangehouden. Deze valhoogtes zijn gemeten van de onderzijde van de slagpen tot de ondergrond waar de monsters op zijn neergelegd. De nominale energieën en de bijbehorende valhoogtes zijn te zien in tabel 6.

Tabel 6 - Nominale energieën en de bijbehorende valhoogtes. De werkelijke inslagenergie kan afwijken van de nominale energie onder invloed van bijvoorbeeld wrijving gedurende de val.

Nominale energie (Joule)	Valhoogte (meter)
2,0	0,08
6,8	0,28
12,8	0,52
14,5	0,59

#### 4.2.1.3 Monsters

Alle onderzochte monsters worden weergegeven in tabel 7 en in figuur 42 worden afbeeldingen van alle monsters getoond.

Tabel 7 - De monsters die gebruikt zijn tijdens de metingen.

#	Naam	Wat	Plat of gekromd	Dikte (mm)	Afmetingen (L x B in mm)
1	D3O	D3O Viper Stealth S rugbeschermer	Plat	11	242 x 366
2	Lotto plat	Lotto Stadio Azione M scheenbeschermer (slip in)	Plat	13	132 x 208
3	Lotto krom	Lotto Stadio Azione M scheenbeschermer (slip in)	Krom	13	132 x 208
4	Prototype plat	Prototype met <i>shear thickening fluid</i>	Plat	10	134 x 227
5	Prototype krom	Prototype met <i>shear thickening fluid</i>	Krom	10	147 x 227
6	Prototype water	Prototype met demiwater	Plat	10	134 x 227



Figuur 42 - Foto's van alle monsters. Van links naar rechts, van boven naar beneden: D3O, Lotto plat, Lotto krom, Prototype plat, Prototype krom en Prototype water.

Met de samenstelling van de onderzochte monsters zijn er enkele wijzigingen en verbeterpunten ten opzichte van (Haarman 2012) doorgevoerd. Zo is er ook een D3O rugbeschermer onderzocht en is er met bestaande scheenbeschermers gemeten in plaats van een scheenbeschermer na te maken door middel van een stuk schuim en een stuk hard kunststof.

Ook zijn alle metingen met een gehele scheenbeschermer uitgevoerd, in plaats van met kleinere monsters en delen van een scheenbeschermer. Op deze manier is het mogelijk dat stijvere monsters de druk over hun hele oppervlak verdelen, waardoor ze mogelijk beter presteren dan wanneer er met een klein monster getest wordt.

Ten slotte is er van het prototype ook een versie met alleen demiwater (zonder maïzena en CsCl) onderzocht. Dit maakt het mogelijk om te bepalen wat de rol van de *shear thickening fluid* is bij het prototype.

#### 4.2.1.4 Metingen

Per monster zijn er per energie zes metingen achter elkaar uitgevoerd met tussenpozen van twintig seconden. Op deze manier zijn er in twee minuten per monster zes metingen uitgevoerd. Deze aanpak kan daarnaast voor inzicht zorgen in het herstellend gedrag van de monsters. Zo kan het aantonen dat een van de monsters bijvoorbeeld slechter beschermt bij opeenvolgende klappen, omdat het materiaal meer tijd nodig heeft om volledig te herstellen.

Naast deze zes metingen per monster per energie is er ook per monster een aparte slagproef uitgevoerd met carbonpapier onder de scheenbeschermer. Deze inslag is gebruikt om een afdruk te krijgen van de drukverdeling onder de scheenbeschermer.

Al deze metingen zijn zowel op een platte als op een kromme ondergrond uitgevoerd. Bij de metingen met een platte ondergrond zijn de monsters D3O, Lotto plat, Prototype plat en Prototype water onderzocht. Op de kromme ondergrond is gebruik gemaakt van de monsters D3O, Lotto krom, Prototype plat en Prototype krom. Het platte prototype met *shear thickening fluid* (Prototype plat) is

ook onderzocht op de kromme ondergrond om het verschil tussen een plat en een krom prototype op een kromme ondergrond te analyseren.

#### 4.2.1.5 Dataverwerking

In paragraaf 2.2.2 (Bescherming van een scheenbeschermer) wordt genoemd dat bij een inslag op een scheenbeschermer de inslagenergie idealiter over een zo groot mogelijk oppervlak verdeeld wordt, de contacttijd zo lang mogelijk is en er zo veel mogelijk energie geabsorbeerd wordt door de scheenbeschermer zelf.

De uit de opstelling verkregen data is in de vorm van tekstbestanden met waarden voor de tijd, kracht gemeten door de krachtcel, verplaatsing van het contactoppervlak van het monster en de snelheid van het vallend gewicht. De tijd tussen twee opeenvolgende metingen bedraagt 0,01 milliseconden (100 kHz). Daarnaast zorgt het carbonpapier voor afdrukken van de drukverdeling onder een monster.

De piekkracht van één inslag is vastgesteld door de maximum gemeten kracht te bepalen. De contacttijd is berekend als de duur dat de kracht zich boven 25 Newton bevond. Deze ondergrens is gekozen om de ruis voor en na de inslag buiten beschouwing te laten.

Een derde waarde die uit de data is afgeleid is de geabsorbeerde energie. Deze energie geeft aan hoeveel energie gedurende de inslag door het monster en de rest van de testopstelling is geabsorbeerd. Indien een scheenbeschermer zelf veel energie absorbeert, wordt deze energie niet meer doorgegeven aan het been van de gebruiker van de scheenbeschermer.

De geabsorbeerde energie is per inslag bepaald door de verrichte arbeid als volgt uit te rekenen:

$$\sum \frac{F_n + F_{n-1}}{2} * (d_n - d_{n-1})$$

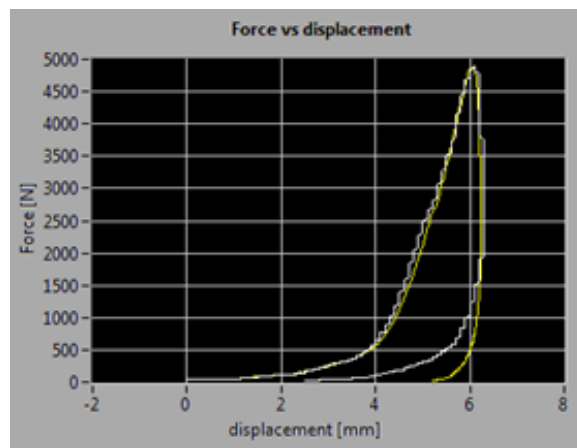
Hierin is F de kracht en d de verplaatsing van het oppervlak van elk monster.

De berekende geabsorbeerde energie is gelijk aan het oppervlak aan de binnenzijde van hetkracht-verplaatsingsdiagram (zie figuur 43).

Een laatste resultaat is uit de slagproeven te verkrijgen door de afdrukken op het carbonpapier te analyseren. De analyse van deze afdrukken is op subjectieve wijze gedaan door de grootte en kleur van elke afdruk met de hand met elkaar te vergelijken.

#### 4.2.2 Resultaten

In totaal zijn er 212 metingen uitgevoerd. Van deze metingen zijn er 112 uitgevoerd op een platte ondergrond en 100 op een gekromde ondergrond. Onderdeel van deze metingen zijn 16 metingen met carbonpapier op een platte ondergrond en 4 metingen met carbonpapier op een gekromde ondergrond. De resultaten van deze metingen worden hieronder besproken. Ter vergelijking zijn de verwerkte resultaten van (Haarman 2012) te zien in Bijlage H.

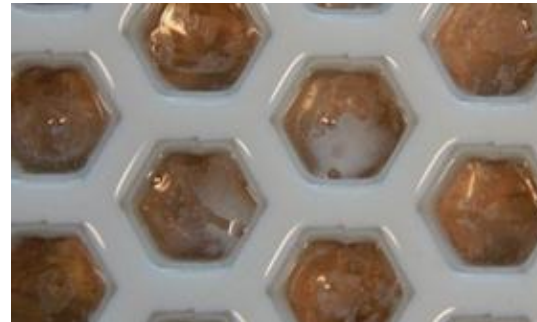


Figuur 43 - Een kracht-verplaatsingsdiagram van een meting. Het oppervlak in de lus is de geabsorbeerde energie.

Hieronder wordt hoofdzakelijk aandacht besteed aan de metingen op een platte ondergrond. In de data van de metingen op een krom oppervlak is een zeer groot aantal afwijkingen gevonden, waardoor het niet goed mogelijk was om de juiste gegevens hier uit te halen. Het enige resultaat dat wel gebruikt kan worden binnen deze studie is de carbonafdruk van het kromme prototype (Prototype krom) op de kromme ondergrond. Mogelijke oorzaken voor de afwijkingen in de data van de kromme metingen wordt besproken in de discussie.

#### 4.2.2.1 Stevigheid prototype

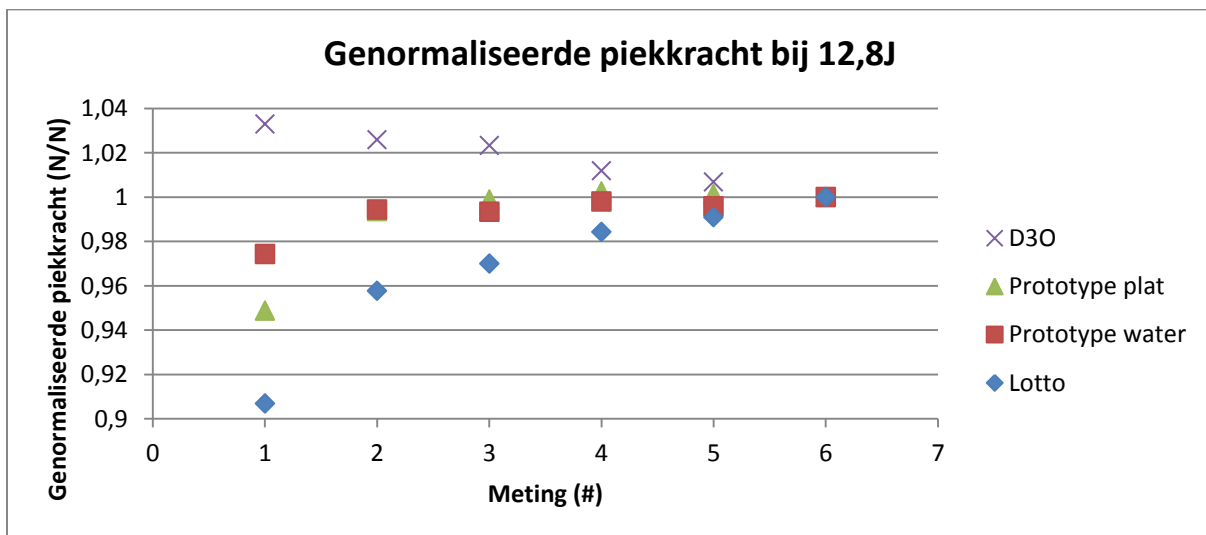
Gedurende de slagproeven is geen enkel prototype lek geraakt. Op een gegeven moment viel het echter wel op dat er tussen twee gelijmde noppen van het monster 'Prototype plat' *shear thickening fluid* terecht was gekomen (zie Figuur 44)



Figuur 44 - *Shear thickening fluid* tussen de verbinding van twee noppen.

#### 4.2.2.2 Verloop bij opeenvolgende metingen

Bij alle monsters is bij alle energieën een trend zichtbaar tussen opeenvolgende metingen. Een voorbeeld van dergelijke trends wordt weergegeven in figuur 45. In deze figuur is te zien hoe de piekkracht bij opeenvolgende inslagen op D3O daalt, terwijl de piekkracht bij de andere monsters toeneemt. Daarnaast geldt voor elke meetserie met de prototypes dat bij de eerste meting een lagere piekkracht wordt gemeten dan de er op volgende metingen.

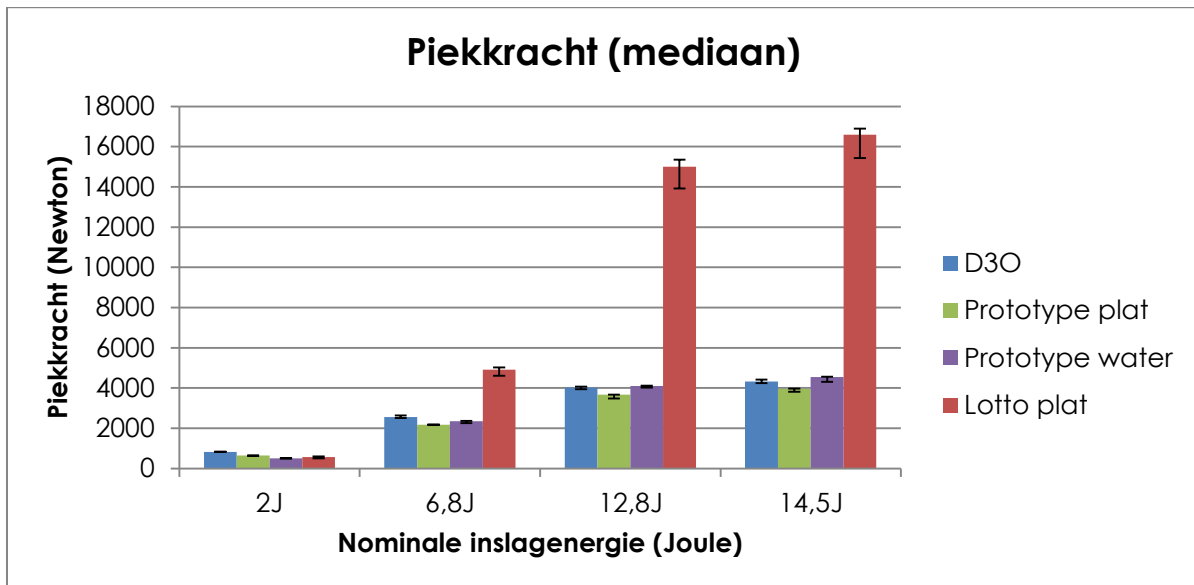


Figuur 45 - Genormaliseerde piekkracht per monster bij een nominale inslagenergie van 12,8 Joule. De waarden zijn genormaliseerd door elke waarde van één monster door de laatste meetwaarde van datzelfde monster te delen. Dit is gedaan om alle metingen binnen één grafiek weer te kunnen geven.

#### 4.2.2.3 Vergelijking tussen monsters

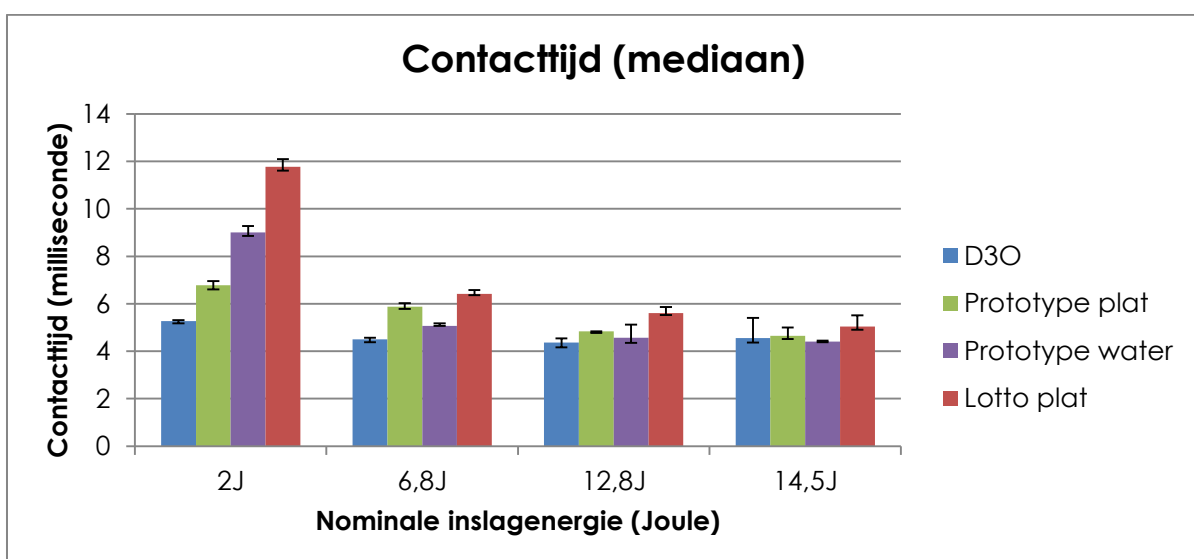
In figuur 46, 47 en 48 worden de piekkracht, contacttijd en geabsorbeerde energie van de verschillende monsters op een platte ondergrond weergegeven. De weergegeven waarde is de mediaan van de zes opeenvolgende metingen per monster per energie. Daarnaast worden in deze grafieken ook de minimale en maximale meetwaarde per monster aangegeven.

Net als bij (Haarman 2012) valt de piekkracht (zie figuur 46) van de bestaande scheenbeschermer (Lotto plat) zeer hoog uit ten opzichte van de overige monsters. Een uitzondering hierop is de piekkracht die gemeten is met een nominale inslagenergie van 2 Joule: hierbij is de piekkracht van de bestaande scheenbeschermer bij deze studie vrijwel gelijk aan de overige monsters, terwijl hier bij Haarman een groot verschil zichtbaar is. Daarnaast vallen de absolute waarden van de metingen van Haarman hoger uit dan bij de metingen van deze studie.



Figuur 46 - De mediaan van de zes opeenvolgende gemeten piekkrachten per monster per nominale inslagenergie inclusief bereik van de meetwaarden.

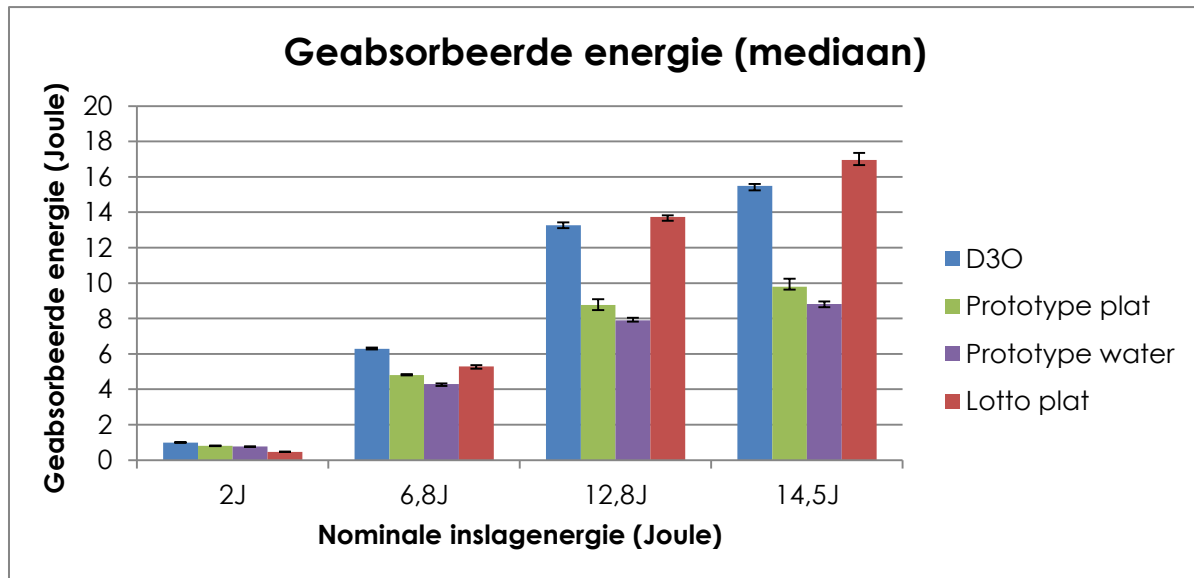
In figuur 47 is te zien dat, behalve bij een nominale inslagenergie van 2 Joule, alle contacttijden dicht bij elkaar liggen. In vergelijking met de resultaten van Haarman (2012), liggen de contacttijden van de bestaande scheenbeschermer (Lotto plat) bij deze studie veel hoger. Daar waar de contacttijden bij Haarman reiken van 1 tot 3 milliseconden, bevinden de waarden zich bij deze studie tussen de 5 en 12 milliseconden.



Figuur 47 - De mediaan van de zes opeenvolgende contacttijden per monster per nominale inslagenergie inclusief bereik van de meetwaarden.

Figuur 48 toont de geabsorbeerde energie die per monster per energie berekend is aan de hand van de gemeten kracht en verplaatsing. Wat opvalt is dat bij nominale inslagenergieën van 12,8 en 14,5 Joule de geabsorbeerde energie bij D3O en Lotto (plat) hoger is dan de inslagenergie.

Daarnaast komt uit deze grafiek naar voren dat de bestaande scheenbeschermer (Lotto plat) een zeer groot deel van de energie absorbeert bij een inslag ten opzichte van de prototypes. Tijdens de metingen is echter waargenomen dat de slagpen bij inslag op D3O en de prototypes direct stil lag, terwijl de slagpen bij de bestaande scheenbeschermer enkele malen stuiterde voor hij tot stilstand kwam.



Figuur 48 – De mediaan van de zes opeenvolgende geabsorbeerde energieën per monster per nominale inslagenergie inclusief bereik van de meetwaarden.

Wanneer alle grafieken beschouwd worden, valt op dat zowel het prototype met *shear thickening fluid* (Prototype plat) als het prototype met demiwater (Prototype water) bij bijna alle tests soortgelijk scores. Over het algemeen geldt wel dat het prototype met *shear thickening fluid* zorgt voor een lagere piekkracht, langere contacttijd en een hogere geabsorbeerde energie.

Ten slotte is te zien dat D3O op het gebied van piekkrachtvermindering en contacttijd vrijwel gelijk presteert ten opzichte van de prototypes.

#### 4.2.2.4 Carbonpapier

Alle afdrucken van de verschillende metingen worden weergegeven in Bijlage I.

De meest opvallende resultaten onder de afdrucken op het carbonpapier zijn dat de afdruk bij Lotto (plat) groot is ten opzichte van de overige monster en dat er daarnaast alleen geleidelijke overgangen zichtbaar zijn in de afdruk. Bij de prototypes en het materiaal D3O is de structuur van het monster duidelijk zichtbaar op de afdruk en beperkt de afdruk zich bij alle afdrucken tot ongeveer het formaat van de slagpen.

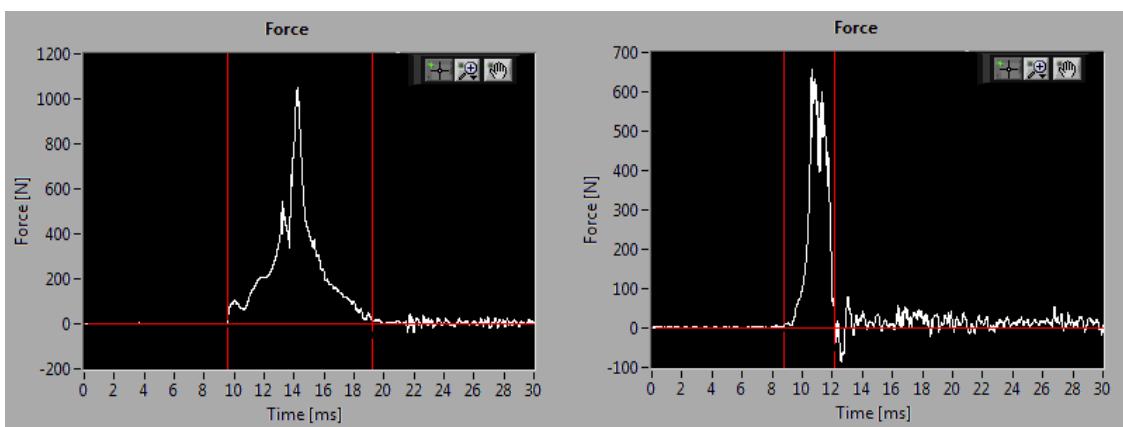
Daarnaast is bij de afdrucken van het prototype met *shear thickening fluid* (Prototype plat) te zien dat de wanddikte en het formaat van de afdruk groter is dan bij het prototype met demiwater (Prototype water). Ook is er een verschil te zien tussen de afdrucken van het prototype op een kromme en een platte ondergrond: bij de kromme ondergrond is de afdruk kleiner dan op de platte ondergrond.

### 4.2.3 Discussie van de slagproeven

Hoewel de resultaten in grote lijnen overeenkomen met de resultaten van Haarman, zijn er wel enkele kanttekeningen bij zowel de uitvoer als bij de resultaten zelf te plaatsen. Deze kanttekeningen zullen hieronder worden toegelicht.

#### 4.2.3.1 Metingen op een krom oppervlak

Zoals bij de resultaten genoemd wordt, bevatten de meetresultaten op een krom oppervlak onverwachte afwijkingen. In figuur 49 worden twee voorbeelden van twee van de metingen op een krom oppervlak getoond. In deze grafiek is te zien dat de maximale krachten bij beide metingen veel lager uitvallen dan metingen met soortgelijke monsters (respectievelijk Prototype plat en Lotto plat) op een platte ondergrond. Daarnaast wordt er, onder andere naar aanleiding van de metingen op een plat oppervlak, een geleidelijk stijgende en vervolgens dalende lijn verwacht, in plaats van de grote variatie die in deze grafieken te zien is.



Figuur 49 - Kracht-tijddiagrammen van het de monsters Lotto krom (links) en Prototype krom (rechts) bij een nominale inslagenergie van 14,5 Joule.

Er bestaat geen zekerheid over de oorzaak van deze afwijkingen. Een mogelijkheid is dat de kromme ondergrond, doordat hij niet vastgezet kon worden, niet goed gecentreerd was. Hierdoor raakt de slagpen het oppervlak onder een hoek. Aangezien de krachtcel alleen een kracht kan meten in dezelfde richting als de valrichting, kunnen de momenten en krachten die optreden bij een inslag onder een hoek de meting verstoord hebben.

Een andere mogelijke oorzaak zijn de twee stoppers die ervoor moeten zorgen dat het vallend gewicht van de *impact tester* niet door kan slaan op de ondergrond (zie figuur 50). Het is mogelijk dat door de beperkte dikte van de monsters, het vallend gewicht afgeremd is door de stoppers voordat de monsters volledig waren ingedrukt.

Een laatste mogelijke oorzaak is dat de monsters lastig op de kromme ondergrond te bevestigen waren. Hierdoor kwam het regelmatig voor dat een van de monsters verschoof op het moment van inslag.



Figuur 50 - Een afbeelding van de stopper (links) naast een van de verticale staven van de impact tester (midden). Rechts is een stuk van een van de scheenbeschermers te zien.

#### 4.2.3.2 Stevigheid prototype

Het is onbekend of de aanwezigheid van de *shear thickening fluid* tussen de lijmverbinding van de twee noppen veroorzaakt is doordat de lijmverbinding in eerste instantie niet volledig was of dat deze stuk is gegaan door de slagproeven. Aangezien er in het eindontwerp niet gelijmd, maar gelast wordt, zou dit bij het uiteindelijke product geen probleem op moeten leveren.

#### 4.2.3.3 Verloop bij opeenvolgende metingen

Bij alle zes opeenvolgende metingen is er een bepaalde vorm van verloop in de gemeten piekkracht geconstateerd. Er is geen duidelijke oorzaak voor dit gedrag aan te wijzen, maar er zijn wel enkele mogelijke oorzaken die samen of afzonderlijk dit verloop kunnen laten plaatsvinden.

Een mogelijke verklaring voor het verloop is dat de monsters tijd nodig hebben om zich te herstellen na een inslag. Een andere optie is dat de monsters opwarmen door het absorberen van de inslagenergie. Deze stijging in temperatuur zou vervolgens kunnen zorgen voor een verandering in de eigenschappen van het materiaal.

Daarnaast kan een verklaring voor het gedrag van de prototypes, dat de gemeten piekkracht na de eerste inslag een sprong maakt, mogelijk verklaard worden met een verandering van de positionering van het monster door de eerste inslag. Zo zou bij de eerste meting de lucht die zich bevindt tussen de noppen van de honingraatstructuur en de ondergrond hier tussenuit geperst kunnen worden. Als deze lucht niet terugkeert in de er op volgende twintig seconden, kan dit zorgen voor een vermindering van de geboden demping.

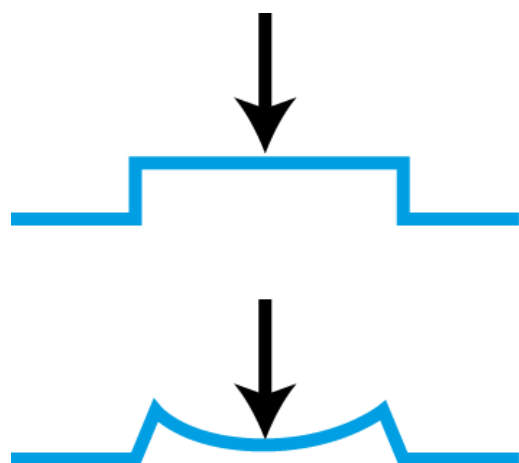
Ongeacht wat de oorzaak is, zorgt het effect ervoor dat er bij elke opeenvolgende meting iets anders gemeten wordt. Zo wordt er bij de tweede inslag op rij niet alleen het effect van de inslag gemeten, maar ook het resterende effect van de inslag ervoor. Hierdoor is het ook niet toegestaan om over een dergelijke serie van zes metingen een gemiddelde of standaarddeviatie te berekenen.

Doordat de precieze oorzaak van dit effect onbekend is, is het ook onbekend of dit effect ook op zou treden wanneer de monsters toegepast worden tijdens een voetbalwedstrijd. Wanneer het bijvoorbeeld veroorzaakt wordt door de positionering van de scheenbeschermer, kan de verplaatsing weer teniet gedaan worden door de bewegingen die de voetballer maakt.

#### 4.2.3.4 Contacttijd en piekkracht

Het gebruik van een bestaande scheenbeschermer (in plaats van een benadering met schuim en een plaat kunststof) tijdens de metingen is naar verwachting de oorzaak voor de lager uitgevallen piekkracht en de hoger uitgevallen contacttijd voor het monster Lotto plat. Dit komt doordat de scheenbeschermer bij deze studie niet volledig plat is en hierdoor in kan deuken voordat de scheenbeschermer volledig de ondergrond raakt (zie figuur 51). Het indeuken van de scheenbeschermer draagt bij aan het dempend effect van de scheenbeschermer en veroorzaakt ook een langere contacttijd.

Het niet plat zijn van de scheenbeschermer komt enerzijds doordat de scheenbeschermer van zichzelf



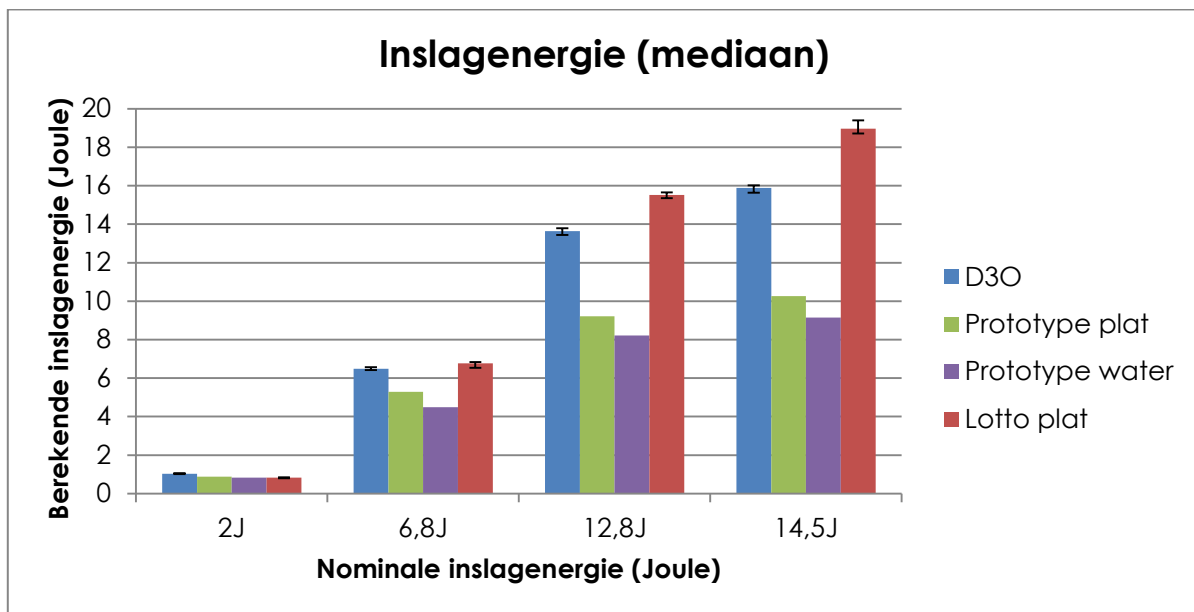
Figuur 51 - Een schematische weergave van het indeuken van de Lotto scheenbeschermer

een hol profiel heeft. Hierdoor is het indeuken een effect dat altijd bij dit type scheenbeschermer op zal treden. Anderzijds is er voor deze studie een bestaande scheenbeschermer plat gebogen. Het is echter lastig gebleken om een kromme scheenbeschermer volledig plat te maken, waardoor ook de platte scheenbeschermer nog een kleine kromming heeft. Wanneer de scheenbeschermer op een platte ondergrond ligt, komt het midden twee millimeter van de ondergrond.

#### 4.2.3.5 Geabsorbeerde energie

De geabsorbeerde energieën bij de nominale inslagenergieën van de monsters D3O en Lotto plat liggen volgens de meetresultaten hoger dan de inslagenergie. Dit zou betekenen dat er energie is ontstaan uit het niets, wat volgens de algemeen geaccepteerde natuurkundewetten onmogelijk is. Daarnaast zou volgens waarnemingen tijdens de metingen de absorptie van D3O en de prototypes veel hoger moeten zijn dan die van de bestaande scheenbeschermer (Lotto plat). Bij D3O en de prototypes lag de slagpen namelijk direct na inslag stil, terwijl deze bij de Lotto plat nog enkele keren stuitte.

In figuur 52 wordt in een grafiek de berekende inslagenergie uitgezet tegen de nominale inslagenergie. De berekende inslagenergie is berekend door alle verrichte arbeid te sommeren tot aan het moment dat de snelheid gelijk is aan nul. Zodra de snelheid nul is, staat de slagpen stil en is alle kinetische energie van het vallend gewicht overgedragen.



Figuur 52 – De inslagenergie, berekend aan de hand van de verrichte arbeid, uitgezet tegen de nominale (en verwachte) inslagenergie.

Wat opvalt uit de grafiek is dat niet alle berekende inslagenergieën van één nominale inslagenergie gelijk zijn. Zo is de inslagenergie van Lotto plat ongeveer twee keer zo hoog als de berekende inslagenergie van Prototype water bij een nominale inslagenergie van 14,5 Joule. Deze berekende inslagenergieën zouden echter gelijk moeten zijn, aangezien er gebruik is gemaakt van dezelfde vallende massa en dezelfde valhoogte.

Dat deze inslagenergieën niet overeenkomen geeft aan dat er een fout zit in de kracht, verplaatsing of snelheid. Daar de snelheid berekend wordt aan de hand van de verplaatsing, beperkt de mogelijke oorzaak zich tot de gemeten kracht en de gemeten verplaatsing.

In het geval dat de gemeten kracht niet overeenkomt met de werkelijkheid heeft dat gevolgen voor de betrouwbaarheid van de berekende piekkracht en contacttijd. Doordat de piekkracht bij elke zes opeenvolgende metingen, op een verloop van enkele procenten na, constant blijft, wordt verwacht dat een eventuele fout in de gemeten kracht een systematische fout is. Hoewel hierdoor de absolute waarde voor de piekkracht en contacttijd beïnvloed wordt, is het niet van belang bij het onderling vergelijken van de meetresultaten (wat in deze studie gedaan wordt).

Wanneer de fout ten slotte veroorzaakt wordt door de gemeten verplaatsing, is dat naast de geabsorbeerde energie niet van verdere invloed op de resultaten van deze studie. Dit komt omdat de gemeten verplaatsing slechts gebruikt wordt voor het berekenen van de geabsorbeerde energie.

#### **4.2.3.6 Carbonpapier**

Doordat het carbonpapier bij het plaatsen van het papier onder een monster in sommige gevallen al gedeeltelijk grijs uitsloeg, is het niet goed mogelijk om aan de hand van de grijswaarde op het papier de hoogte van de druk te bepalen. Hierdoor zijn de afdrukken alleen op subjectieve wijze te analyseren. Wel wordt er verwacht dat de afdrukken die verkregen zijn een goede indicatie geven van hoe de verschillende monsters druk verdelen.

Daarnaast lijkt naar aanleiding van de afdrukken van Prototype krom op een kromme ondergrond dat het prototype op een kromme ondergrond de druk slechter verdeelt dan op een platte ondergrond.

#### **4.2.4 Conclusie van de slagproeven**

De doelen voor de slagproeven waren om te bepalen of het prototype bestand was tegen krachten die komen kijken bij voetbal en in welke mate het prototype bescherming biedt in vergelijking met andere scheenbeschermers.

Aangezien de energie van een voetbaltrap na te bootsen is met een inslag van 11 Joule (zie de toelichting van eis 7 in paragraaf 2.8.2) en het prototype intact is gebleven bij energieën tot circa 14,5 Joule, kan gesteld worden dat het prototype bestand is tegen krachten en energieën die komen kijken bij een voetbaltrap.

Wat betreft de door de prototypes geboden bescherming zijn de resultaten wisselend. Zo tonen de afdrukken in het carbonpapier dat de prototypes, net als D3O, de druk nauwelijks verdelen over een groter oppervlak, terwijl de Lotto-scheenbeschermer dit wel doet. Daar staat tegenover dat de prototypes en D3O zorgen voor een lagere piekkracht. Ook is uit waarnemingen gebleken dat de prototypes en D3O de inslagen ten opzichte van de Lotto-scheenbeschermer zeer goed absorberen.

Daarnaast is er tijdens alle metingen op een platte ondergrond een verloop in geboden bescherming geconstateerd bij opeenvolgende inslagen. De oorzaak van dit verloop is onduidelijk, waardoor het ook niet duidelijk is of dit effect ook op zal treden wanneer de scheenbeschermers gebruikt worden tijdens een voetbalwedstrijd.

Ten slotte tonen de afdrukken op het carbonpapier aan dat het prototype de kracht op een gekromd oppervlak over een kleiner oppervlak verdeelt dan bij een plat vlak.



## 5 Discussie, conclusie en aanbevelingen

In deze studie is het concept van (Haarman 2012) doorontwikkeld met een focus op produceerbaarheid van de verpakking van de *shear thickening fluid*. Gedurende de analysefase zijn de eerste drie hoofdvragen van deze studie beantwoord door het concept en relevante literatuur te analyseren. Vervolgens is er gedurende de ontwerpfase een concept gegenereerd, gekozen en uitgewerkt tot een ontwerp voor de productie van de verpakking van de *shear thickening fluid*. Tot slot is er van dit ontwerp een prototype gemaakt en door middel van slagproeven gevalideerd. Met het ontwerp en de validatie zijn respectievelijk de vierde en vijfde hoofdvraag beantwoord.

### 5.1 Discussie en conclusie

Een van de resultaten van deze studie is een ontwerp voor de verpakking van de *shear thickening fluid*. Gedurende het ontwerptraject is er vastgehouden aan het ontwerp van Haarman (2012). Hierbij zijn er enkele verbeterpunten ten opzichte van het werk van Haarman doorgevoerd, maar is er niet gekeken naar of het ontwerp van Haarman het meest geschikte ontwerp voor een scheenbeschermer is.

Doordat er alleen is gekeken naar hoe het concept van Haarman (2012) produceerbaar gemaakt kon worden, zijn er op voorhand al veel opties met betrekking tot de productie en het eindproduct uitgesloten. Deze restrictie maakt het ontwerp van deze studie een produceerbaar ontwerp, maar niet per definitie het beste ontwerp voor een nieuwe scheenbeschermer met *shear thickening fluid*.

Een tweede resultaat van deze studie zijn de resultaten uit de validatie. Hierbij zijn er prototypes gemaakt en zijn daar slagproeven mee uitgevoerd. Door middel van de prototypebouw is er aangetoond dat het ontwerp daadwerkelijk maakbaar is. Daarnaast is uit de slagproeven gebleken dat het prototype ook bestand is tegen krachten en energieën die komen kijken bij een voetbaltrap.

Het doel van de nieuwe scheenbeschermer is dat deze flexibel is tijdens normale bezigheden zoals het lopen van een voetballer en uithardt zodra er een inslag op de scheenbeschermer plaatsvindt, zoals van een trap van een andere speler. Daarnaast kan een scheenbeschermer bescherming bieden door de druk van de inslag te verdelen over een groter oppervlak of door de energie te absorberen.

De slagproeven van deze studie hebben aangetoond dat het prototype van het nieuwe scheenbeschermerconcept niet goed in staat is om de druk van een inslag over een groter oppervlak te verdelen. Daarnaast is uit waarnemingen naar voren gekomen dat het prototype de inslagenergie beter absorbeert dan een bestaande scheenbeschermer, maar ontbreekt het aan meetgegevens om deze waarneming te ondersteunen.

Doordat de nieuwe scheenbeschermer de druk van een inslag slecht verdeelt, kan hij alleen goede bescherming bieden door de energie van een inslag zeer goed te absorberen. Daarnaast geldt dat het materiaal D3O bij de slagproeven soortgelijk heeft gepresteerd als de prototypes en dat D3O een lagere dichtheid en gewicht heeft dan de prototypes. Hierdoor wordt, mits de absorptie van de *shear thickening*-materialen voldoende is om te compenseren voor de slechte drukverdeling, D3O geschikter geacht voor een toepassing als scheenbeschermer.

### 5.2 Aanbevelingen

In een eventueel vervolgonderzoek is het eerste dat uitgezocht dient te worden in of flexibele *shear thickening*-producten geschikt zijn om toe te passen in producten als scheenbeschermers. In deze studie bleken namelijk het prototype en het materiaal D3O wel in staat om piekkrachten aan de zijde van de slagen te verminderen, maar werd de druk onder de monsters maar over een beperkt oppervlak verdeeld.

Het niet over een groot oppervlak verdelen van de druk is niet per definitie een probleem voor een scheenbeschermer. Indien het materiaal in staat is om veel van de energie van de inslag te absorberen, is de te verdelen energie zeer beperkt. In vervolgonderzoek zou er dan ook eerst gekeken moeten worden naar wat het beschermende effect is van een *shear thickening*-materiaal, zoals het prototype van deze studie of D3O, door de overgedragen druk te meten aan de zijde van het been. Hierbij verdient het ook aanbeveling om deze metingen uit te voeren terwijl de monsters bevestigd zijn op een gekromd oppervlak om zo een been beter te benaderen. Wanneer dit gedaan wordt, is het ook mogelijk om inzicht te krijgen in de beschermende werking van het materiaal, in plaats van wat het materiaal doet met de krachten in de slagpen.

Indien er aangetoond is dat een flexibele scheenbeschermer met een *shear thickening*-materiaal in staat is voldoende bescherming te bieden, kan de scheenbeschermer zelf uitgewerkt worden. Hierbij moet er enerzijds een geschikt *shear thickening*-materiaal gekozen worden. Dit materiaal dient onschadelijk te zijn voor de mens en moet bestand zijn tegen de invloeden waar het aan blootgesteld wordt (zoals krachten, temperatuur en UV-straling). Aan de hand van de resultaten van deze studie lijkt D3O een geschikt materiaal, maar mogelijk zijn er meer en betere alternatieven beschikbaar.

In het geval dat er bij de voorgaande stap een vloeibaar *shear thickening*-materiaal wordt gekozen, kan de in deze studie ontworpen verpakking toegepast worden om de *shear thickening fluid* bijeen te houden. Hierbij dient nog wel aandacht besteed te worden aan de houdbaarheid van de scheenbeschermer. In het geval van een flexibele verpakking met een *shear thickening fluid*, zal deze in enige mate zuurstof en waterdamp doorlaten. Hier dient onderzocht te worden in welke mate dit van invloed is op de werking van de scheenbeschermer en of er hierdoor al dan niet een houdbaarheidsdatum aan de scheenbeschermer verbonden dient te worden.

Ook zou er in het geval van een vloeibare *shear thickening fluid* aandacht besteed moeten worden aan de precieze vorm en afmetingen van de scheenbeschermer. Binnen deze studie is de honingraatstructuur van Haarman (2012) overgenomen en door Haarman is er voor deze vorm gekozen om gewicht te besparen. Daarnaast is er tijdens de slagproeven van deze studie aangetoond dat de honingraatstructuur zorgt voor een concentratie van de druk onder de wanden. Mogelijk is een honingraatstructuur dus niet de meest geschikte vorm voor de verpakking. Naast de vorm van de verpakking dient er daarnaast ook aandacht besteed te worden aan op welke locaties van het been er precies bescherming gewenst is.

Het is daarnaast ook aan te raden om in een vroeg stadium te onderzoeken of flexibel *shear thickening*-materiaal daadwerkelijk het comfort voor een voetballer verhoogt. Door Haarman (2012) is dat namelijk maar bij één voetballer nagegaan en in deze studie is het comfort in zijn geheel niet aan bod gekomen. Indien naar buiten komt dat er met een flexibele scheenbeschermer geen winst te behalen is op het gebied van comfort, neemt de meerwaarde van een dergelijk concept flink af.

Ten slotte dient er indien er een nieuwe scheenbeschermer geproduceerd gaat worden op gelet te worden dat hij voldoet aan alle Europese normen.

## 6 Referenties

- Aktiesport. (2013). "Scheenbeschermers." Retrieved 11-6-2013, from <http://www.aktiesport.nl/accessoires/voetbal/scheenbeschermers#pagenr=1>.
- Ankrah, S. and N. J. Mills (2003). "Performance of football shin guards for direct stud impacts." Sports Engineering 6(4): 207-219.
- Answers.com. "When was the coldest soccer game ever played?" Retrieved 12-4-2013, from [http://wiki.answers.com/Q/When\\_was\\_the\\_coldest\\_soccer\\_game\\_ever\\_played](http://wiki.answers.com/Q/When_was_the_coldest_soccer_game_ever_played).
- Ashby, M., H. Shercliff, et al. (2010). Materials, Elsevier Ltd.
- Ashdown, J. and T. Lutz. (2010). "What is the coldest ever football match?" Retrieved 12-4-2013, from <http://www.guardian.co.uk/football/2010/dec/15/the-knowledge-cold-football-matches>.
- Barnes, H. A. (1989). "Shear-thickening ('dilatancy') in suspensions of nonaggregating solid particles dispersed in Newtonian liquids." Journal of Rheology 33(2): 329-366.
- Bayly, F. (2011). "History of Soccer Shin Guards." Retrieved 17-4-2013, from <http://www.livestrong.com/article/340703-history-of-soccer-shin-guards/>.
- Boden, B. P., J. H. Lohnes, et al. (1999). "Tibia and fibula fractures in soccer players." Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy 7(4): 262-266.
- Brukner, P. and K. Khan (2009). Clinical Sports Medicine, McGraw-Hill Australia Pty Ltd.
- Carriere, C. J. and A. R. Loffredo (1998). "The effect of temperature on the observed flow-induced structure in semidilute solutions of gently solubilized starches." Polymer Engineering and Science 38(9): 1523-1528.
- Cattermole, H. R. (1996). "The footballer's fracture." British Journal of Sports Medicine 30(2): 171-175.
- Chang, W. R., Z. Kapasi, et al. (2007). "Tibial shaft fractures in football players." Journal of Orthopaedic Surgery and Research 2(1).
- D3O. (2013). "D3O Impact Protection." Retrieved 14-5-2013, from <http://www.d3o.com>.
- D3O. (2013). "How temperature stable is D3O?", from <http://www.d3o.com/about/faqs/>.
- Daily News. (2013). "FIFA's medical boss adds his voice against holding the 2022 World Cup in Qatar during the summer months." Retrieved 12-4-2013, from <http://www.nydailynews.com/sports/more-sports/fifa-medical-boss-opposes-playing-qatar-world-cup-summer-article-1.1289902>.
- DuPont. (2012). "DuPont™ Surlyn®." Retrieved 14-5-2013, from [http://www2.dupont.com/Surlyn/en\\_US/index.html](http://www2.dupont.com/Surlyn/en_US/index.html).
- Dvorak, J. and A. Junge (2000). "Football injuries and physical symptoms. A review of the literature." American Journal of Sports Medicine 28(5 SUPPL.): S3-S9.
- EC (2013). "Commission communication in the framework of the implementation of the Council Directive 89/686/EEC of 21 December 1989 on the approximation of the laws of the Member States relating to personal protective equipment." Official Journal of the European Union 56(C 74).
- EEC (1989). 89/686/EEC. OJ L 399, 30.12.1989, p. 18.
- Ekstrand, J. (2008). "Epidemiology of football injuries." Science and Sports 23(2): 73-77.
- Environmental Information Association. (2013). "Mold Fact Sheets." Retrieved 6-5-2013, from <http://www.eia-usa.org/fact-sheets/mold-fact-sheets/>.
- FIFA (2007). FIFA Big Count 2006: 12.
- FIFA (2007). FIFA Big Count 2006 Statistical Summary Report by Association: 10.
- FIFA (2012). Laws of the Game 2012/2013. FIFA. Zurich, Fédération Internationale de Football Association.
- FIFA. (2013). "FIFA Associations." Retrieved 28-6-2013, from <http://www.fifa.com/aboutfifa/organisation/associations.html>.
- Francisco, A. C., R. W. Nightingale, et al. (2000). "Comparison of soccer shin guards in preventing tibia fracture." American Journal of Sports Medicine 28(2): 227-233.
- Granta Design Ltd. (2012). CES EduPack 2012. Cambridge.

- Haarman, J. (2012). Design and validation of custom made shin guards for professional soccer players. Faculty of Engineering Technology. Enschede, University of Twente. **MSc**: 120.
- Hawkins, R. D. and C. W. Fuller (1999). "A prospective epidemiological study of injuries in four English professional football clubs." British Journal of Sports Medicine **33**(3): 196-203.
- Le Gall, F., C. Carling, et al. (2008). "Injuries in young elite female soccer players: An 8-season prospective study." American Journal of Sports Medicine **36**(2): 276-284.
- Lees, A. and L. Nolan (1998). "The biomechanics of soccer: A review." Journal of Sports Sciences **16**(3): 211-234.
- Mail Online. (2011). "Heat rises as Qatar dismisses plans for air-conditioned stadia at 2022 football World Cup." Retrieved 12-4-2013, from <http://www.dailymail.co.uk/travel/article-2059873/Qatar-World-Cup-Plan-air-conditioned-stadiums-dismissed.html>.
- Martini, F. and E. Bartholomew (2013). Essentials of Anatomy & Physiology. United States of America, Pearson Education, Inc.
- Matia-Merino, L., K. K. T. Goh, et al. (2012). "A natural shear-thickening water-soluble polymer from the fronds of the black tree fern, *Cyathea medullaris*: Influence of salt, pH and temperature." Carbohydrate Polymers **87**(1): 131-138.
- Peterson, L., A. Junge, et al. (2000). "Incidence of football injuries and complaints in different age groups and skill-level groups." American Journal of Sports Medicine **28**(5 SUPPL.): S51-S57.
- Rumpf, M. C. and J. Cronin (2012). "Injury incidence, body site, and severity in soccer players aged 6-18 years: Implications for injury prevention." Strength and Conditioning Journal **34**(1): 20-31.
- Satra technology. (2012). "EN 340:2003." Retrieved 26-4-2013, from <http://www.satrappeguide.com/EN340.php>.
- Satra technology. (2012). "EN 13061:2009." Retrieved 19-4-2013, from <http://www.satrappeguide.com/EN13061.php>.
- ScienceLab.com (2013). "Cesium Chloride MSDS." Material Safety Data Sheet.
- Sigma-Aldrich (2012). Cesium chloride. Material Safety Data Sheet.
- Sojoudi, A. and S. C. Saha (2012). "Shear Thinning and Shear Thickening Non-Newtonian Confined Fluid Flow over Rotating Cylinder." American Journal of Fluid Dynamics **2**(6): 5.
- van Gheluwe, B. (2003). "Hoe kies ik de juiste hardloopschoen?" Retrieved 11-5-2013, from <http://www.dehardloopkrant.com/fysiek.php?page=69>.
- Velani, N., O. Wilson, et al. (2012). "Measuring the risk of sustaining injury in sport a novel approach to aid the re-design of personal protective equipment." Applied Ergonomics **43**(5): 883-890.
- VoetbalDirect. (2013). "Scheenbeschermers." Retrieved 11-6-2013, from <http://www.voetbaldirect.nl/accessoires/scheenbeschermers>.
- Wang, B., L. J. Wang, et al. (2011). "Shear-thickening properties of waxy maize starch dispersions." Journal of Food Engineering **107**(3-4): 415-423.
- Zhao, G. Q. and S. B. Chen (2007). "Nonlinear rheology of aqueous solutions of hydrophobically modified hydroxyethyl cellulose with nonionic surfactant." Journal of Colloid and Interface Science **316**(2): 858-866.

## Bijlage A Stakeholder-analyse van Haarman

In tabel 8 wordt de stakeholder-analyse van (Haarman 2012) weergegeven. In deze tabel worden de karakteristieken, verwachtingen, kansen, gevaren en de gevolgen op het ontwerptraject weergegeven.

Tabel 8 - De stakeholder-analyse zoals weergegeven in (Haarman 2012)

Stakeholder	Characteristics	Expectations	Potentials and deficiencies	Implications and conclusions for the project
<b>Soccer player</b>	Shin guards not protective enough, uncomfortable, slip off the shins, etc.	Less injuries and more comfort; Custom made shin guards.	Could 'make or break' the product.	Essential for acceptance of the product.
<b>Soccer team (FC Twente)</b>	Invest in a strong, winning team and innovative products (good market position)	Lower health care costs. No players being absent due to injuries. Maximize profit.	Could 'make or break' the product.	Essential for acceptance of the product. Need to be involved in the process.
<b>Soccer organizations (FIFA/KNVB/etc)</b>	Define the rules and are official soccer organizations in the world/ the Netherlands/ etc.	Safer game and fair play. No players being absent due to injuries.	Strict guidelines concerning shin guards. Could exclude the product from being used.	Take their rules into account in order to make a product that is accepted.
<b>Soccer fans</b>	Want to see the soccer team play, without players having injuries.	No players being absent due to injuries.	Pay money to see the players on the field. Critical in case of failure.	Could turn the product into a success when they accept it.
<b>Medical staff (physiotherapist/ medical doctor)</b>	Strives for the best treatment for his patient. Focused on long lasting solution.	Optimal and quick results. Less players being out of the running due to injuries on the lower leg.	Expert in injuries and the deficiencies of shin guards.	Knowledge of potential. Could make the product a big success.
<b>Insurance</b>	Provides optimal care at low costs.	Lower costs of treatment.	Only interested when they can profit from it (costs).	Interested in the product when it leads to less injuries (less health care costs)
<b>Industry</b>	Interested in innovative products, low development costs.	Maximize profit.	Lack of technological and medical knowledge. Commercializing the product.	Knowledge of market potentials and manufacturing methods.

## Bijlage B Programma van Eisen van Haarman

In tabel 9 en tabel 10 worden respectievelijk de eisen en wensen van (Haarman 2012) weergegeven. Deze eisen en wensen zijn gebaseerd op de stakeholder-analyse, welke ook te zien is in Bijlage A.

Tabel 9 - Programma van Eisen zoals weergegeven in (Haarman 2012).

Requirement category	The product should:
<b>Safety</b>	Not contain sharp edges. Not irritate the leg. Not contain loose parts that can break off of the product.
<b>User</b>	Be wearable with normal soccer shoes. Be able to put on in less than 60 seconds. Be available for professional soccer players.
<b>Ergonomics</b>	Be comfortable to wear. Follow the anatomical shapes of the lower leg. Not restrict the moving pattern. Not slip off the shins during walking/running. Prevent bruises and scrapes to the lower leg.
<b>Dimension</b>	Be covered entirely by the stockings. Cover the tibia. Cover the ankle bones. Be custom made. Not restrict the calf muscle. Have a thickness of maximal 1.5 cm.
<b>Force and weight</b>	Not weigh more than 150 grams. Not break at impact forces lower than 16 Joule. Meet the requirements of the European Standard for Shin Guard Testing.
<b>Material</b>	Not contain toxic or irritating materials. Be shock absorbing. Function in a salty (sweaty) environment. Function in an outside temperature between -30 and 45 degrees. Function between a humidity of zero and one hundred percent.
<b>Maintenance</b>	Be washable with water and soap.
<b>Lifetime</b>	Have a lifetime of at least 1 year.

Tabel 10 - Wensen zoals weergegeven in (Haarman 2012).

The product should:
Cover the Achilles tendon.
Cover the calf muscles.
Have moisture control.
Not weigh more than 50 grams.
Be available for commercial aspects.
Be available in convection sizes.
Have a lifetime of 5 years.
Have a thickness of maximal 1 cm.
Attenuate impact forces below the level of tibia fracture.

## Bijlage C Geschikte materialen

Tabel 11 – Een overzicht met gegevens van alle geschikte materialen voor de verpakking van de *shear thickening fluid*. Alle waarden in de tabel zijn afkomstig uit CES (Granta Design Ltd. 2012).

	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<b>Permeabiliteit (O2)</b> $\frac{g * mm}{m^2 * dag}$	4,38	16,6	137	166	49,8	69,4	459	612	61,2	144	2470	3310	865	1160	12900	30100	502	670	469	542		
	0,002	0,004	0,514	0,717	0,0283	0,0425	0,173	0,231	0,224	0,308	3	3,5	51,9	69,3	1,53	3,51	0,303	0,404	0,451	0,521		
<b>Water-absorptie (sat) (%)</b>	?	?	?	?	?	?	0,111	0,135	?	?	1,79	2,08	0,306	0,366	?	?	0,194	0,236	0,269	0,327		
<b>Water-absorptie (24h) (%)</b>	0,01	0,02	?	?	0,005	0,01	0,018	0,022	0,02	0,021	0,3	0,35	0,05	0,06	0,1	0,15	0,032	0,039	0,044	0,054		
<b>Min gebruikstemp. (°C)</b>	-51	-25	-117	-107	-82	-72	-78	-68	-26	-11	-49	-39	-41	-21	-60	-50	-66	-56	-66	-56		
<b>Max gebruikstemp. (°C)</b>	97	120	141	167	110	130	77	97	60	76	100	110	90	125	200	250	85	142	130	140		
<b>Compressiesterkte (MPa)</b>	5,04	20,8	18	22,8	23,2	32,3	25,2	32,9	23,8	25	19,6	22,8	9,06	12,7	8,4	13,8	5,73	8,68	4,57	5,04		
<b>Rekgrens (MPa)</b>	4,2	17,3	15	19	19,3	26,9	21	27,4	19	21,8	16,3	19	0,76	10,6	7	11,5	4,78	7,23	3,9	4,1		
<b>Elasticiteitsmodulus (GPa)</b>	0,0021	0,015	0,1	0,38	0,915	0,961	0,071	0,0825	0,824	1,02	0,00872	0,0117	0,00445	0,00695	0,005	0,05	0,0157	0,0249	0,0158	0,0162		
<b>Prijs (€/kg)</b>	€ 3,18	€ 3,80	€ 2,37	€ 3,10	€ 1,32	€ 1,45	€ 1,81	€ 1,99	€ 2,33	€ 2,57	€ 1,16	€ 1,27	€ 3,19	€ 3,51	€ 8,62	€ 10,70	€ 2,22	€ 2,57	€ 2,87	€ 4,20		
<b>Dichtheid (kg/m³)</b>	1090	1230	934	950	947	955	900	909	896	905	1210	1260	882	984	1020	1220	865	893	939	981		
<b>Thermo-</b>	-harder		-plast		-plast		-plast		-plast		-plast		-plast		-harder		-plast		-plast			
<b>IIR</b>			<b>Ionomeer</b>		<b>PE</b>		<b>POE</b>		<b>PP</b>		<b>PVC</b>		<b>SEBS</b>		<b>Siliconen</b>		<b>TPO</b>		<b>TPV</b>			

\* WVTR: Water vapor transmission rate

## Bijlage D Verwerkingsmogelijkheden geselecteerde materialen

Tabel 12 – Mogelijke verwerkingsmogelijkheden van de geselecteerde materialen IIR, ionomeer, PE, POE en PVC. Alle gegevens zijn afkomstig uit CES (Granta Design Ltd. 2012).

			IIR	Ionomeer	PE	POE	PVC	
Joining	Adhesive	Flexible	x		x	x	x	
		Rigid		x	x			
		Solvent bonding			x			
	Fasteners		x	x	x			
				x	x			
	Mechanical welding	Friction welding		x	x			
		Ultrasonic welding		x	x			
	Thermal welding	Hot bar and impulse welding		x	x			
		Hot gas welding		x	x			
		Hot plate welding		x	x			
		Infrared welding		x	x			
		Laser welding of thermoplastics		x	x			
Polymer induction welding			x	x				
	Resistive implant welding		x	x				
Shaping	Machining	Abrasive	Grinding		x	x		
			Water jet cutting	x	x	x		
		Machining	Band saw		x	x		
			Circular saw		x	x		
			Milling		x	x		
			Turning, boring and parting		x	x		
		Thermal	Hot wire cutting	x	x	x		
			Laser cutting		x	x		
	Laser machining		x	x	x			
	Molding	Blow	Extrusion		x	x	x	x
			Injection		x	x	x	x
		Calandring		x	x			
		Compression	x	x	x	x	x	
		Injection	Thermosets	x				
			Thermoplastics		x	x	x	x
Polymer extrusion			x	x	x	x		
Polymer forging			x	x				
Rotational	x	x	x					
Thermoforming		x	x	x	x			
Transfer molding	x							
Rapid prototyping	Deposition methods	3D printing	x	x	x			
		Ballistic particle		x	x			
		Fused deposition		x	x			
	Laser methods	Laminated object manufacture			x			

## Bijlage E Kostenschatting maatproductie

Tabel 13 – Kostenschatting voor de maatproductie van de nieuwe scheenbeschermers. In tabel 14 worden enkele punten uit deze tabel toegelicht.

Productie algemeen	
Productieaantal <sup>1</sup>	40000 sets 80000 benen
Uurprijs <sup>2,3</sup>	€ 50,00 €/uur

Productiekosten honingraatstructuur	
<b>Blaasvormen:</b>	
Blaasvormmachine <sup>4</sup>	€ 40.000,00
Mallen <sup>4</sup>	€ 20.000,00
Aantal mallen	3 mallen
Productiesnelheid <sup>4</sup>	60 benen/uur
<b>Gaten maken &amp; snijden</b>	
Machine <sup>4</sup>	€ 10.000,00
Productiesnelheid <sup>3</sup>	360 benen/uur
<b>Vullen en lassen</b>	
Machine <sup>9</sup>	€ 15.000,00
Productiesnelheid <sup>3</sup>	30 benen/uur
<b>Totalen:</b>	
Machines	€ 125.000,00
Uren	€ 211.111,11

Totalen	
Materiaalkosten	€ 328.341,31
Machinekosten	€ 128.000,00
Uurkosten	€ 1.411.111,11

Materiaalkosten (per been)	
POE-folie <sup>4,5</sup>	€ 0,17 per been
Shear thickening fluid <sup>6</sup>	€ 2,24 per been
Kous <sup>7,8</sup>	€ 1,70 per been

Productiekosten kous	
<b>Kous</b>	
Machines <sup>10</sup>	€ 1.000,00
Aantal <sup>3</sup>	3 machines
Per uur	6 benen/uur
<b>Totalen:</b>	
Machines	€ 3.000,00
Uren	€ 666.666,67

Overige uurkosten	
<b>Assemblage</b>	
Per uur <sup>3</sup>	120 benen/uur
<b>Totaalprijs uren</b>	€ 33.333,33
<b>Opmeten</b>	
Per uur <sup>3</sup>	4 voetballers
<b>Totaalprijs uren</b>	€ 500.000,00

Totaalprijs per speler	
Materiaal	€ 8,21
Machines	€ 3,20
Uurkosten	€ 35,28
	€ 46,69 € per speler

Tabel 14 – Toelichting bij de kostenschatting.

Noten	
1	In de kostenschatting wordt onderscheid gemaakt tussen sets (scheenbeschermers) en benen. Om verwarring te voorkomen wordt in de gehele kostenschatting gewerkt met benen (één scheenbeschermer) tenzij expliciet vermeld.
2	Alle uurkosten zijn bepaald door te bepalen hoeveel personen of producten er per uur behandeld kunnen worden. Vervolgens zijn deze aantallen omgerekend tot een totaal aantal benodigde uren voor een productie van 40.000 sets scheenbeschermers.
3	Deze waarden zijn gebaseerd op een schatting.
4	Deze waarden zijn gebaseerd op gegevens uit het computerprogramma <i>Cambridge Engineering Selector (CES)</i> 2012 van Granta Design Ltd.
5	Per been zijn twee vellen POE van 300x160 millimeter (inclusief afval) gerekend.
6	Alibaba.com. (2013). "Native Corn Starch." Retrieved 10-6-2013, from <a href="http://www.alibaba.com/product-gs/604244649/Native_Corn_starch.html">http://www.alibaba.com/product-gs/604244649/Native_Corn_starch.html</a> . Alibaba.com. (2013). "Cesium Chloride 99.9%." Retrieved 10-6-2013, from <a href="http://www.alibaba.com/product-gs/497526215/Cesium_Chloride_99_9_.html?s=p">http://www.alibaba.com/product-gs/497526215/Cesium_Chloride_99_9_.html?s=p</a> . Kruidvat. (2013). "Kruidvat Gedemineraliseerd Water." Retrieved 10-6-2013, from <a href="https://online.kruidvat.nl/product/50156-49169/GedemineraliseerdWater.html">https://online.kruidvat.nl/product/50156-49169/GedemineraliseerdWater.html</a> .
7	Farmaline. (2013). "Tubigrip Wit F 10,00Cmx10m." Retrieved 10-6-2013, from <a href="http://www.farmaline.nl/drogisterij/bestellen/tubigrip-wit-f-1000cmx10m/?utm_medium=gmc&amp;gclid=CMHwzZr_vbcCFbMdtAod7yIA9Q">http://www.farmaline.nl/drogisterij/bestellen/tubigrip-wit-f-1000cmx10m/?utm_medium=gmc&amp;gclid=CMHwzZr_vbcCFbMdtAod7yIA9Q</a> .
8	Per been is 0,5 meter kousmateriaal gerekend.
9	Schatting op basis van verschillende vergelijkbare producten op internet.
10	Sewing Machines Ireland. (2013). "Industrial Sewing Machines." 17-6-2013, from <a href="http://www.sewingmachinesireland.com/great-deals-on/Industrial-Sewing-Machines/for-sale/13/">http://www.sewingmachinesireland.com/great-deals-on/Industrial-Sewing-Machines/for-sale/13/</a> .

## Bijlage F Controle van het Programma van Eisen en Wensen

Tabel 15 – Eisen voor het ontwerp van deze studie inclusief of er aan elke eis wordt voldaan.

Categorie	#	Eis	Voldoet het ontwerp?
Algemeen	1	Het ontwerp moet geschikt zijn voor een productie van 40.000 sets	Ja
	2	Het ontwerp moet zowel scheen- als enkelbescherming bevatten	Ja
	3	De verpakking moet de werking van <i>shear thickening fluid</i> toestaan	Ja
	4	De verpakking moet het mogelijk maken dat de scheenbeschermer zich naar het been vormt	Ja
	5	De verpakking moet waterdicht zijn	Ja
	6	De verpakking moet luchtdicht zijn	Ja, voor zover mogelijk
	7	De verpakking moet bestand zijn tegen krachten en energieën die komen kijken bij een voetbaltrap	Ja
	8	De verpakking moet met water en zeep te reinigen zijn	Ja
	9	De verpakking mag niet schadelijk zijn voor de huid	Ja
Omgeving	10	De verpakking moet functioneren tussen een temperatuur van -15°C en +50°C	Ja
	11	De verpakking moet bestand zijn tegen gras	Ja
	12	De verpakking moet bestand zijn tegen zonlicht	Ja, met UV-werende coatings of andere toevoegingen
	13	De verpakking moet bestand zijn tegen zweet	Ja
Fysieke eigenschappen	14	De vorm en afmetingen van de verpakking moeten overeenkomen met het ontwerp van (Haarman 2012)	Ja
	15	De verpakking (inclusief <i>shear thickening fluid</i> ) mag niet meer dan 200 gram wegen	Totale massa is 222,2 gram per been
Regels en richtlijnen	16	De scheenbeschermer moet voldoen aan FIFA Laws of the Game	Onbekend (oordeel van scheidsrechter)

Tabel 16 – Wensen voor het ontwerp van deze studie inclusief of er aan elke wens wordt voldaan.

Categorie	#	Wens	
Algemeen	1	De verpakking is op maat produceerbaar	Nee, alleen de kous wordt op maat geproduceerd
Regels en richtlijnen	2	De scheenbeschermer voldoet aan EN 340:2003	Onbekend
	3	De scheenbeschermer voldoet aan EN 13061:2009	Onbekend

## Bijlage G Fotoverslag prototypebouw

Figuur 53 – Verscheidene chronologische foto's van de prototypebouw.



De mallen voor het thermovormen zijn lasergesneden uit vier millimeter dik MDF.

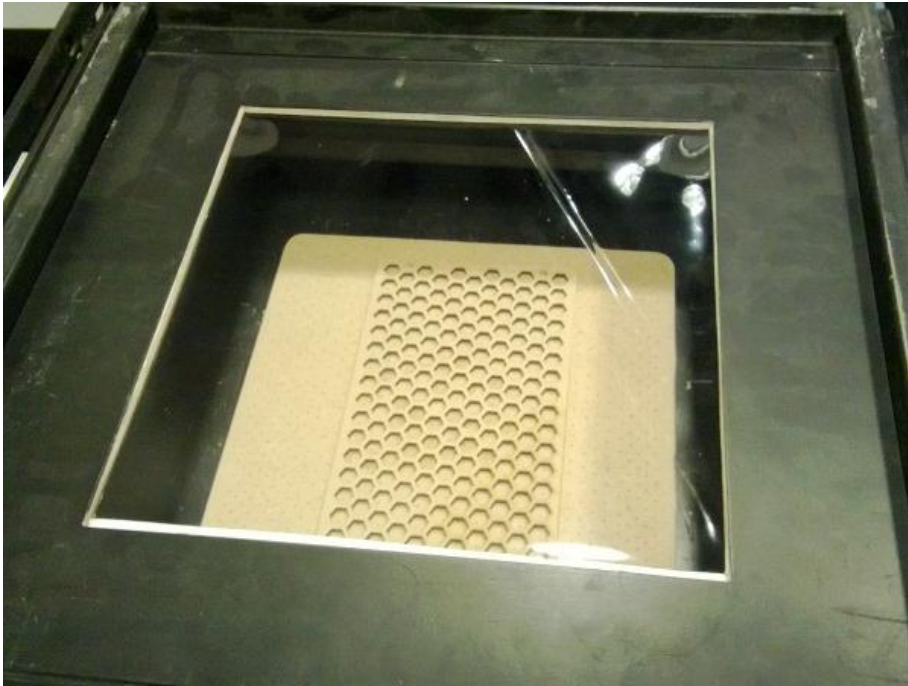


Er is gebruik gemaakt van stukjes stafmateriaal om meerdere platen MDF ten opzichte van elkaar uit te lijnen.

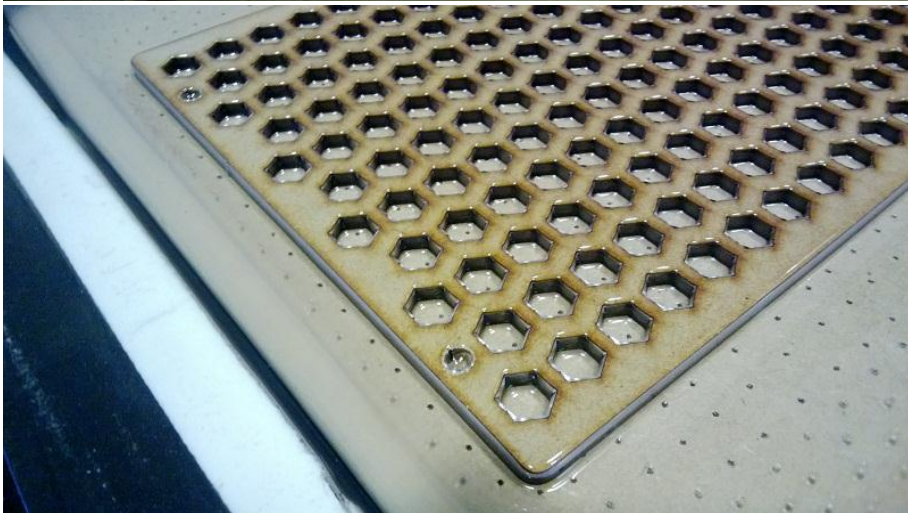


Vellen PVC voor het thermovormen.

Figuur 53 (vervolg)



De MDF mal en een vel PVC in de thermovormmachine.



De mal en het PVC na het thermovormen.



Een van de gevormde vellen PVC.

Figuur 53 (vervolg)



Er is gebruik gemaakt van latjes met een rij schroeven om druk uit te kunnen oefenen in de noppen tijdens het op elkaar lijmen van twee vellen.



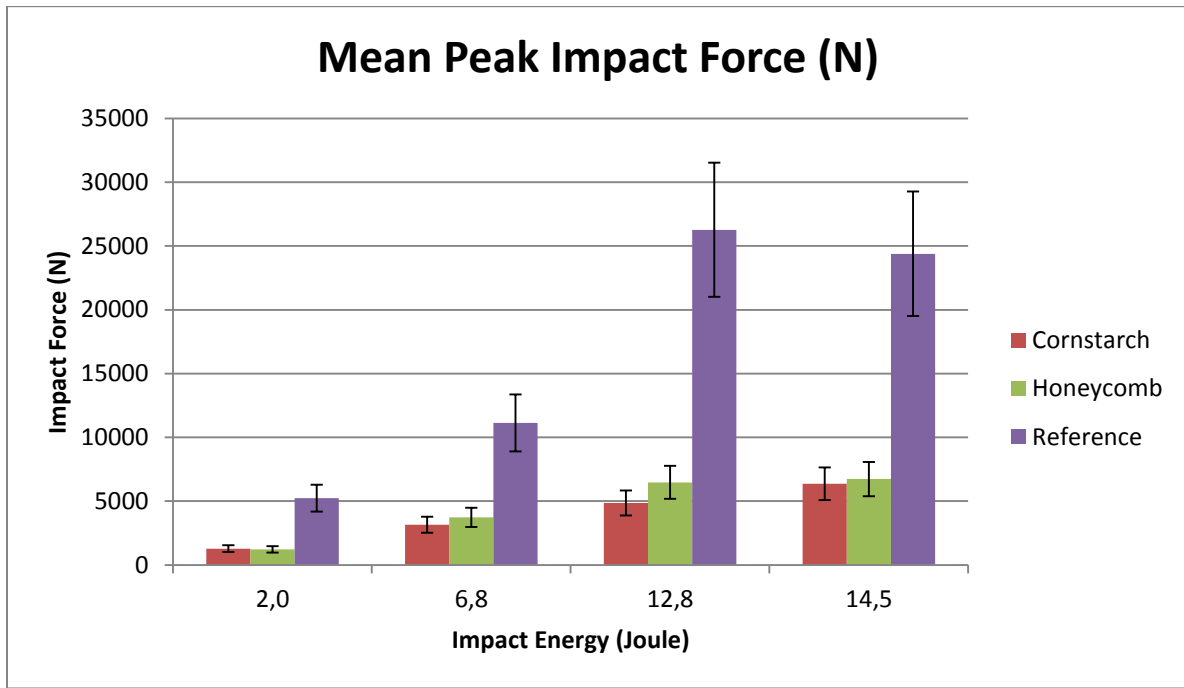
Twee vellen gevormd PVC zijn per rij noppen op elkaar gelijmd. Na het op elkaar lijmen van de noppen zijn de randen van de verpakking dichtgelijmd.



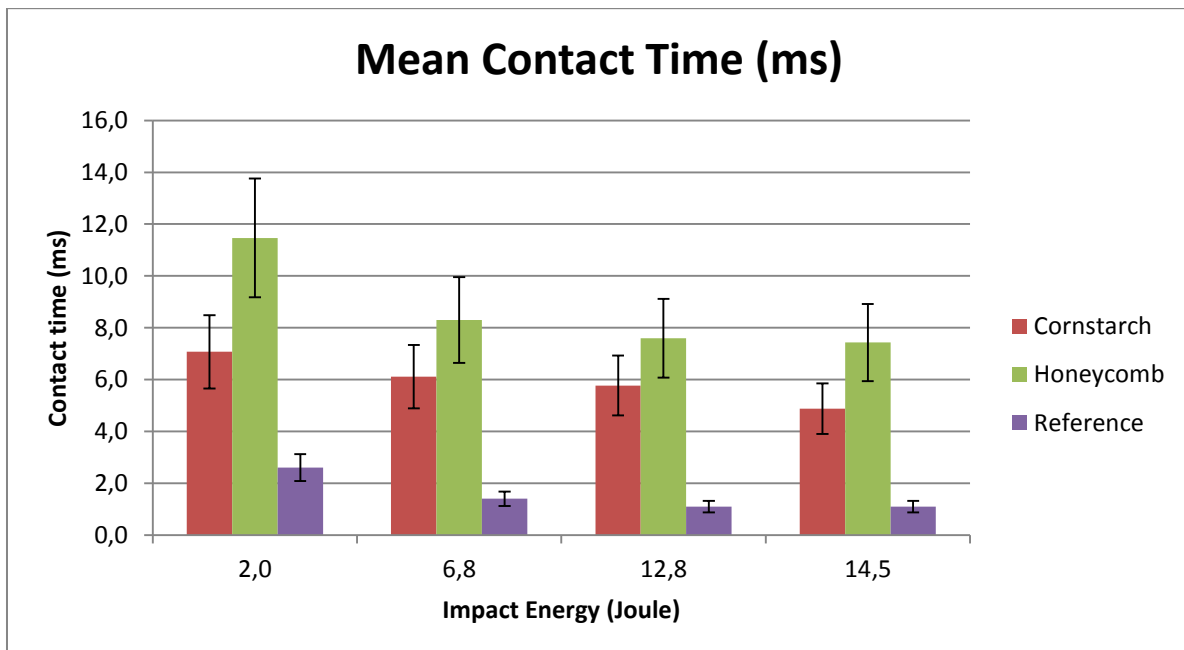
De drie prototypes na het vullen met *shear thickening fluid* of demiwater.

## Bijlage H Resultaten validatie Haarman

In figuur 54 en 55 worden de resultaten van metingen van (Haarman 2012) weergegeven. De onderzochte monsters zijn massief *shear thickening fluid* van acht millimeter (Cornstarch), *shear thickening fluid* in een ge-3d-printte honingraatstructuur (Honeycomb) en een bestaande scheenbeschermer die na was gemaakt met een stuk schuim en een stuk hard kunststof (Reference).



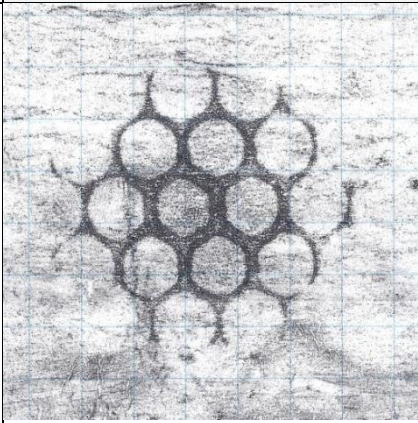
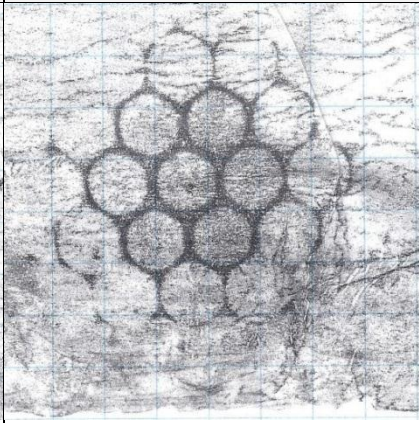
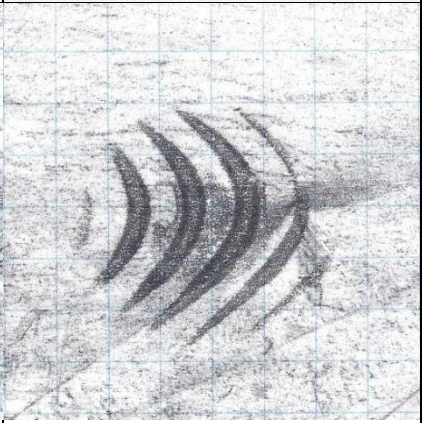
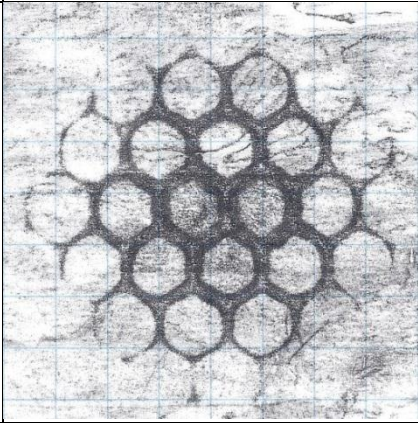
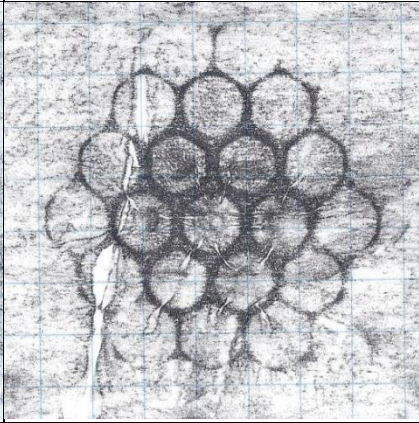
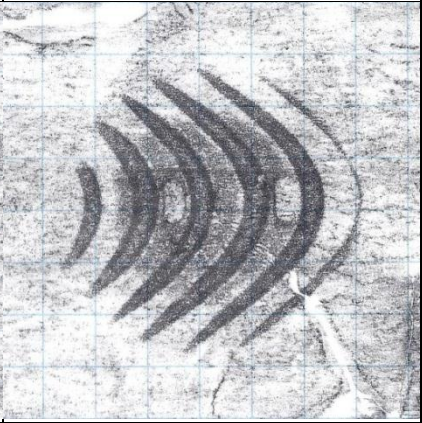
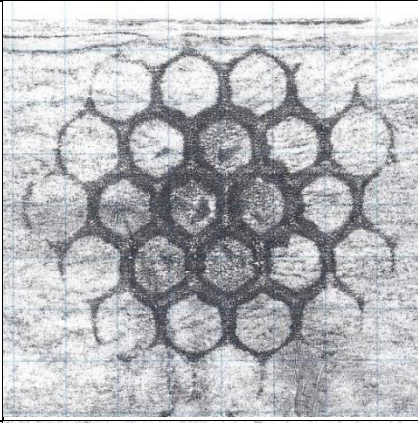
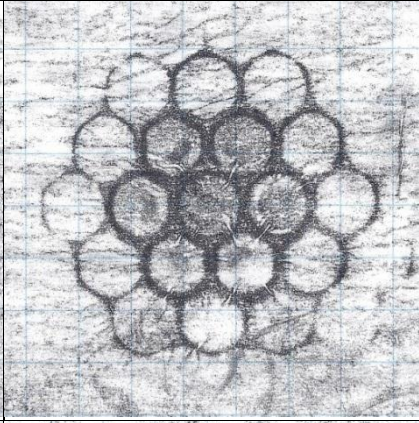
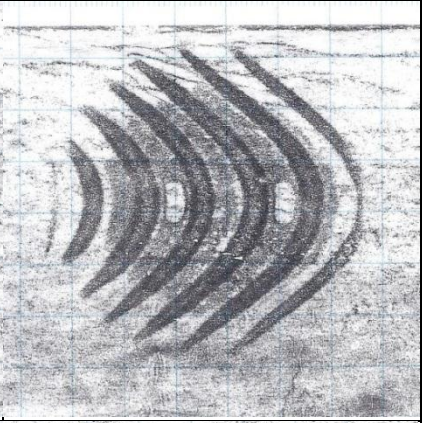
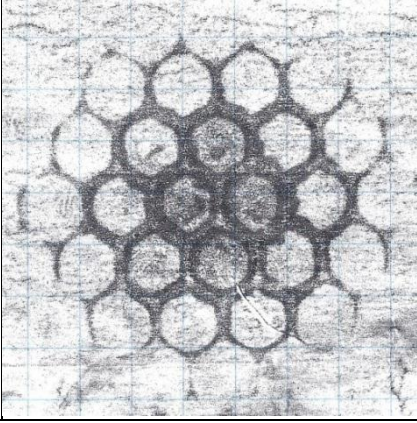
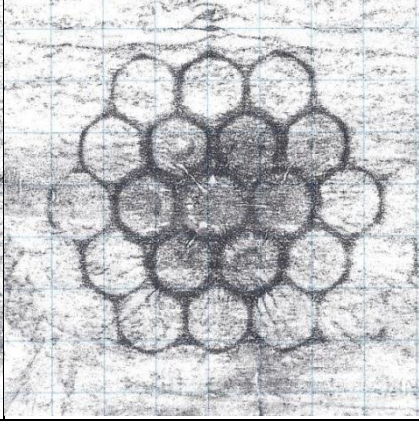
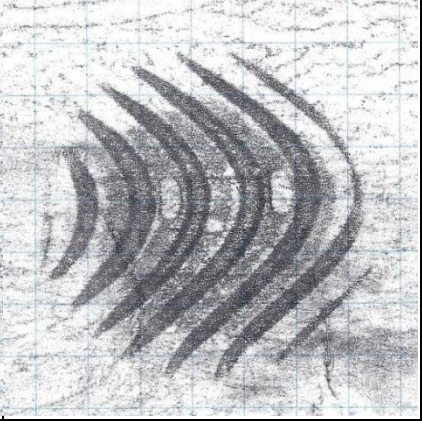
Figuur 54 - Gemiddelde piekkracht bij verschillende inslagenergieën en monsters van de metingen van Haarman. Afbeelding overgenomen uit (Haarman 2012).



Figuur 55 - Gemiddelde contacttijd bij verschillende inslagenergieën en monsters uit de metingen van Haarman. Afbeelding overgenomen uit (Haarman 2012).

# Bijlage I Carbon

Tabel 17 – Afdrukken van alle onderzochte monsters op een platte ondergrond op carbonpapier.

E	Prototype plat, platte ondergrond	Prototype water, platte ondergrond	D3O, platte ondergrond
2 Joule			
6,8 Joule			
12,8 Joule			
14,5 Joule			

Tabel 17 (vervolg)

E	Lotto plat, platte ondergrond	Prototype krom, kromme ondergrond
2 Joule		
6,8 Joule		
12,8 Joule		
14,5 Joule		