

# Prothesekokers in ontwikkelingslanden



Rijksuniversiteit Groningen  
Bachelor onderzoek Biomedische Technologie

# Inhoud

Inleiding.....	3
De synthesefase .....	4
Morfologisch overzicht.....	5
Kokermaterialen .....	6
Plantenvezels.....	6
Plantenhars.....	7
Zijde .....	7
Koolstofvezels.....	8
Kokosnoot.....	9
Bamboe .....	10
Composiet polyethyleen met grafiet.....	10
Liner.....	11
Gelkussens.....	11
Gelbolletjes.....	11
Gasveer.....	12
Water.....	12
Memory foam / geheugenschuim .....	13
Verbinding tussen stomp en prothese .....	14
Osseoïntegratie .....	14
Vastzuigen .....	15
Castingfunctie.....	16
CAD/CAM.....	16
Multi jet modelling .....	17
Memory foam.....	18
Laser engineered net shaping .....	18
Modular Socket System.....	18
Drukveren.....	19
Finite element analysis.....	19
De preconcepten .....	22
<i>Materiaal koker</i> .....	22
<i>Materiaal liner</i> .....	27
<i>De bevestiging</i> .....	27
<i>De casting</i> .....	28

De geselecteerde preconcepten .....	31
Lijst van eisen en wensen .....	31
Keuze op basis van lijst van eisen.....	32
Het eindconcept: Memory foam.....	33
Conclusie .....	35
Referenties .....	36

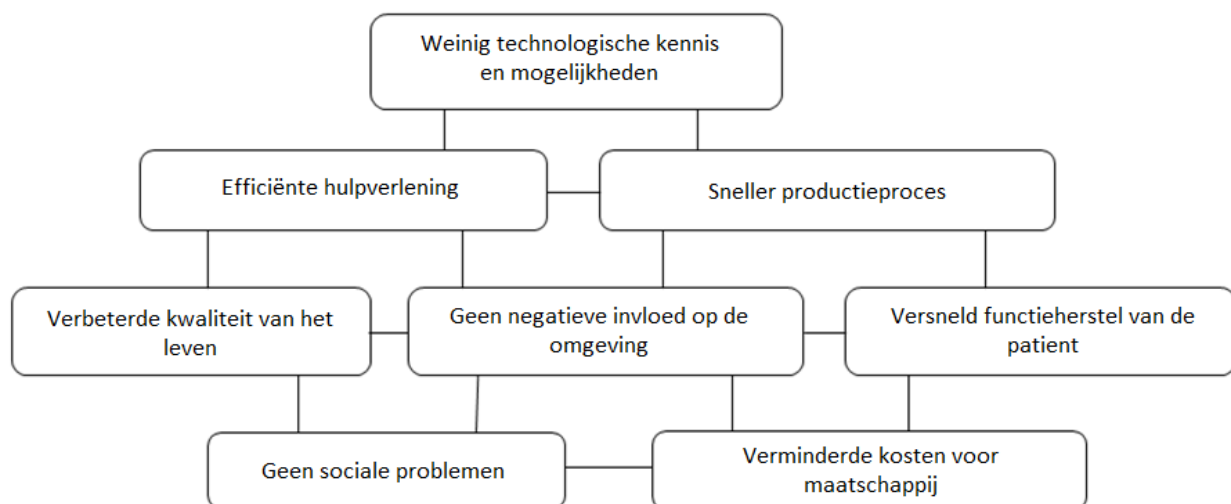
## Inleiding

Aangezien het huidige proces om een prothese aan te maken en te produceren meerdere dagen kost, is het jaarlijks behandelingsrendement laag en kan er minder hulpverlening worden gegeven.

Ondertussen vermindert de kwaliteit van het leven van de patiënten vanwege de lange wachttijd en de huidige prothesekwaliteit, wat invloed heeft op de omgeving. Door een traag herstel van de patiënten is er een hogere bijdrage vanuit de verzekering en het ziekenhuis nodig, waardoor er een economisch probleem in de maatschappij wordt veroorzaakt. In dit onderzoek wordt er gezocht naar mogelijkheden om dit proces te versnellen. Inzichten in nieuwe technieken, verbetering van de bestaande materialen of een combinatie hiervan kan hier uitkomst in bieden. Daarbij worden de volgende doelen gehanteerd:

1. Het productieproces moet voor een hogere efficiëntie in hulpverlening zorgen
2. De kwaliteit van leven moet dankzij een sneller productieproces minder sterk afnemen gedurende het proces
3. Het productieproces moet voor lagere kosten zorgen
4. De stompkoker moet zich kunnen aanpassen aan de veranderende stompvorm, zodat de nabehandeling korter is en de nabehandelingskosten lager zijn

Deze doelen werken onderling op elkaar zoals weergegeven in figuur 1.



Figuur 1. Overzicht van de doelen en hun onderlinge relatie.

Naar aanleiding van de probleemomschrijving is als ontwerp opdracht van het onderzoek het volgende gekozen:

### **Realiseer een fabricagemethode voor een stompkoker in een derde wereld land.**

Daarbij zijn er nog een aantal deelopdrachten meegenomen in het onderzoek:

1. Ontwerp een productieproces dat productie van een negatief van de stomp overbodig maakt
2. Vindt een manier om nieuwe technieken toe te passen in een rijdend revalidatiecentrum
3. Pas nieuwe materialen voor de prothese toe die direct werkzaam zijn als negatief en beschikbaar zijn in een derde wereld land
4. Pas materiaal voor de stompkoker toe dat zich gaandeweg aan de stompvorm aanpast (Aanpassingen kosten veel tijd en geld, daarnaast komt het de prothesekwaliteit niet ten goede)
5. Ontwerp een prothese die universeel toepasbaar is voor geamputeerde patiënten in een derde wereld land

Daarnaast is er een functieanalyse uitgevoerd en zijn er een aantal functionele eisen waaraan de prothese en/of het productieproces moet kunnen voldoen.

- De prothese, waaronder de koker, moet al het lichaamsgewicht kunnen dragen
- Dit gewicht moet via de koker kunnen worden overgebracht naar de grond
- De koker moet energie kunnen opslaan tijdens het loopproces vanwege energieverval tijdens afwisselingen van de loopzwaai en de staande houding

Aan de hand van eerder verricht literatuuronderzoek naar mogelijke oplossingen en nieuwe ideeën is geprobeerd een ander productieproces en/of materiaalkeuze te creëren.

## **De synthesefase**

Na een brainstormsessie kwam ik tot onderstaande ideeën. Vanuit deze ideeën heb ik drie mogelijkheden verder onderzocht om de huidige methode om een prothese aan te meten te veranderen.

Het betreft de volgende (vernieuwende) onderdelen van het (vernieuwende) ontwerpproces:

- Nieuw koker- en liner materiaal
- Nieuwe verbindingsmogelijkheden
- Nieuwe technieken die toepasbaar zijn in ontwikkelingslanden
- (Nieuwe) kokermaterialen
  1. Plantenvezels
  2. Plantenhars
  3. Gevlochten koolstofvezels die zijn geïmpregneerd met snel uithardend hars
  4. Zijde
  5. Grafiet en andere steenachtige producten
  6. Vezels kokosnoot
  7. Bamboe
- (Nieuw) materiaal liner
  1. Gelkussens
  2. Memory foam
  3. Gelbolletjes van siliconen
  4. Drukveertjes
  5. Ruimte opvullen met water
  6. Gasveer
- Verbinding been met prothese
  1. Prothese in bot schroeven, osseoïntegratie
  2. Vastzuigen
- Technieken toepasbaar in ontwikkelingslanden
  1. Modular Socket System, CAD/CAM in combinatie met vormen van Solid Freeform Fabrication; Multi Jet Modelling, SLS, LENS, MJM, in-situ transducers
  2. Materiaal sneller uitharden met behulp van een laser
  3. Koker aanmeten terwijl de stomp belast wordt

Deze ideeën zijn in een morfologische map verwerkt om het overzichtelijker te maken, dit is te vinden in onderstaande tabel 1.

## Morfologisch overzicht

Oplossing of idee	1	2	3	4	5	6	7
Funcie							
Koker-materiaal	 Plantenvezels	 Plantenhars	 Geïmpregneerde koolstofvezels	 Zijde	 Grafiet	 Kokosnoot	 Bamboe
Liner-materiaal	 Gelkussentjes	 Memory foam	 Gelbolletjes	 Water	 Gasveer		
Verbinding bovenbeen met liner	 Vast schroeven	 Vastzuigen					
Casting technieken toepasbaar in ontwikkelingslanden	 Solid Freeform Fabrication SLS - MJM – LENS In situ transducers	 Cad/Cam methode		 Modular socket system	 Drukveer		
	 In-situ transducers	 Finite element analysis		 Laseren			

Tabel 1. Een overzicht van de functies en mogelijke oplossingen of ideeën

## Kokermaterialen

De kwaliteit van het kokermateriaal speelt een grote rol bij de kwaliteit van de prothese en het voorkomen van deze klachten. De excessieve verplaatsing van de botstructuur tegen de prothesekoker in neerwaartse richting kan pijn in onderrug, gewrichtsdeformatie en scoliose teweegbrengen wanneer de prothese intensief wordt gebruikt. De materialen die huidig worden toegepast bij de vervaardiging van een prothesekoker zijn duur, worden uit niet-duurzame bronnen verkregen en stoten veel schadelijke stoffen uit bij het productieproces. Vandaar dat er in dit onderzoek veel aandacht is besteed aan (nieuwe) alternatieve kokermaterialen of composieten. In dit deel zijn de ideeën uit de brainstormsessie over mogelijke kokermaterialen beschreven en uiteindelijk geaccepteerd of verworpen in potentie.

### Plantenvezels

Plantenvezels zijn duurzaam, recyclebaar, goedkoop, ze kunnen uit voldoende bronnen worden verkregen en hebben een goede verhouding tussen kracht en massa.

Vrijwel elke plant of boom produceert cellulose, een polysacharide dat voorkomt als hoofdbestanddeel van de celwand en heeft als hoofdfunctie de plant te verstevigen.

Daarnaast is het aanwezig in dierlijk weefsel en wordt door sommige bacteriën uitgescheiden. (Köhler, 2001) (Rånby, 2001)

Cellulose bestaat uit aaneenschakelde Nano-eenheden die een web-achtige structuur vormen. Hieruit kan een sterk composiet worden gevormd doordat de fibrillen en microfibrillen onderlinge verbindingen aangaan, zogenaamde crosslinks. Deze web-achtige structuur wordt microfibrillerende cellulose genoemd, MFC. MFC is betrefte de stevigheid en mechanische kracht superieur aan andere composieten, samengestelde eindproducten. MFC wordt verkregen via een mechanische behandeling van vezels van vruchtvlees die homogeen en verfijnd gemaakt worden door er druk op uit te oefenen. Deze verfijning heet microfibrilisatie en heeft voornamelijk invloed op de sterkte van de composiet, doordat de fibrillen die hierbij ontstaan een grotere rekbaarheid hebben dan een vezel. Daarnaast voorkomt de microfibrilisatie dat er scheurinitiators ontstaan en zorgt het proces ook voor een toename in het aantal crosslinks waardoor scheurontwikkeling wordt tegengegaan. (Köhler, 2001)

Door gemaald vruchtvlees van een plant te impregneren met thermo hardend hars en deze substantie samen te persen onder een kracht van 100 MPa, ontstaat er een sterke cellulose Nanocomposiet. De mate van de maling heeft lichte invloed op de mechanische eigenschappen van het composiet, voornamelijk op de buigzaamheid. (Nakagaito, 2004)

Omdat er overal ter wereld voldoende aanbod is van plantenvezels, biedt dit toekomstperspectief als bestanddeel van een prothesekoker in ontwikkelingslanden.

## Plantenhars

Plantenhars wordt gedefinieerd als een vet oplosbaar mengsel van vluchtige en niet vluchtige terpenen en fenolen. Terpenen vallen onder de klasse organische moleculen die door planten worden geproduceerd en worden toegepast als homeopathische geneesmiddelen, zoals tijmsiroop als hoestdrank. Fenolhars is in commercieel gebruik genomen voor medicijnen en heeft potentie als nieuwe brandstofbron.

Het hars wordt zowel binnenin als aan het oppervlakte van de plant uitgescheiden om bescherming te bieden tegen schimmels en insecten, wanneer deze wordt beschadigd.

Amber, oftewel barnsteen, is een versteende vorm van hars afkomstig uit naaldbomen. Het bestaat voornamelijk uit koolwaterstoffen en is versteend doordat alle zuurstofatomen eruit zijn onttrokken. Barnsteen heeft een hardheid van 2-2,5 wat beduidend minder is dan de hardheid van koolstofstaal van 86-388.

Barnsteen of andere vormen van plantenhars kunnen worden verworpen als nieuw kokermateriaal vanwege de brandbaarheid en omdat het relatief een vrij zacht materiaal is, zouden zede kracht van een bovenlichaam niet kunnen verdragen.

## Zijde

Een matrix bestaande uit zijden microvezels die gekoppeld zijn aan eiwitten, bootst de mechanische functies van natuurlijk bot na. Hieronder valt de stijfheid van een botmatrix, de ruwheid van het oppervlakte van natuurlijk bot en als belangrijkste functie de voorkeur om zich te differentiëren naar humane mesenchymale stamcellen. Deze stamcellen ontwikkelen zich osteoblasten (botcellen voor botaanmaak), chondrocyten (kraakbeencellen) en adipocyten (vetcellen). Een scaffold (substraat) van zijde stimuleert de ingroei van deze stamcellen in vitro (in een reageerbuis) en dit resulteert in vorming van botachtige weefsels. (Mandala, 2012)

Zijde is zowel biocompatibel als vrij sterk en kan daarom mogelijk van betekenis zijn bij de verbinding tussen de beenstomp en stompkoker. Het kan gehecht worden aan stoffen die nu lichaamsreacties teweeg brengen om deze meer compatibel te maken, of tussen liner en stompkoker als botstimulator werken. Door toevoeging van zijde op plaatsen waar meer ondersteuning nodig is, kan dit de groei van osteoblasten te stimuleren zodat de pasvorm verbetert. Dit is echter niet van belang bij dit onderzoek naar mogelijkheden om de tijdsduur in te korten van de huidige protheseproductie in ontwikkelingslanden.



## Koolstofvezels

Koolstof bezit de drie belangrijkste eigenschappen om als een ideaal materiaal te fungeren die vele toepassingen kent dankzij zijn structuur. Het materiaal is erg sterk, heeft een lage dichtheid en door zijn stijfheid ontstaan er niet snel verbuigingen. Daarnaast behoudt het zijn mechanische eigenschappen bij hogere temperaturen en is het bestand tegen thermische schokken en deformaties. Voornamelijk om deze laatstgenoemde eigenschappen is het een veelgebruikt materiaal in de lucht- en ruimtevaart. (Lackey, 2001)

Het spreekt voor zich dat het dan bestand is tegen hoge krachten. Door vezels in elkaar te vlechten kan het nog meer weerstand bieden omdat het zich zal gedragen als een geheel.

Koolstofvezels kunnen dienen als een substraat waarin thermo hardende polymeren worden geïmpregneerd om zo een halffabricaat te vormen. Veelgebruikte polymeren zijn epoxy- of polyesterhars. Verdere verwerking vindt plaats door middel van een wals die de lucht eruit drijft, aangezien luchtbellens de kwaliteit van het materiaal verslechtert. Omdat halffabricaten slap en kleverig zijn, wordt er een papier met tefloncoat worden aangebracht indien het moet worden opgeslagen. Daarnaast is er een opslag met lage temperaturen vereist, aangezien hars uithardt bij een verhoging in temperatuur.

De geïmpregneerde substraten bestaan uit lagen en kunnen in alle mogelijke vormen worden uitgesneden met behulp van een oven of autoclaaf. De autoclaaf geeft in verhouding een beter eindresultaat dankzij de mogelijkheid van speling in druk. Door een hoge druk toe te passen worden de lagen strak aan elkaar geplakt. Aangezien poriën en vluchtige stoffen slecht zijn voor de sterkte van een materiaal worden deze verwijderd door te werken in een vacuüm omgeving.

Het blijkt echter een tijdrovend proces om het substraat te impregneren. Terwijl het hoofddoel van dit onderzoek was om een methode te vinden die minder tijdrovend is dan het huidige proces. Daarbij komen nog de hoge kosten en de schadelijke stoffen die bij het verwerkingsproces vrijkomen en het feit dat koolstofvezels niet uit duurzame bronnen verkregen worden. Om voorgaande redenen biedt dit materiaal minder potentie als nieuw kokermateriaal dan andere materialen.

Vanwege de goede mechanische eigenschappen is het echter geen slecht idee om onderzoek te doen naar mogelijkheden om de tijdsduur te verkorten, de kosten te verlagen en om de hoeveelheid vrijgekomen schadelijke gassen te verminderen of te zorgen dat deze geen schade aanbrengen aan de omgeving.

## Kokosnoot

De schil van de kokosnoot wordt huidig veel gebruikt om actieve kool te produceren. Actieve kool heeft een hoge absorptiecapaciteit en kan dus functioneren als zuiveringsstof. Ook kent het toepassingen in de recycling van organisch afval. De capaciteit van de actieve kool die wordt verkregen uit kokosnootschillen of andere organische materialen is echter aanzienlijk minder dan bij de productie uit steenkool. (Qiu, 2010)

De kokosnoot vezels, kokosvezels, zijn afkomstig van de schil en hebben een sterkte die vergelijkbaar is met dat van tropisch hardhout. De witte kokosvezel kent toepassingen in garen en scheepstouw, terwijl de bruine kokosvezel voornamelijk gebruikt wordt voor de productie van deurmatten. De kokosvezel staat bekend als taai en stug materiaal, dat bovendien niet gevoelig is voor vocht. Als gevolg van de vochtbestendige eigenschap kan het door binding van een grote hoeveelheid kokosvezels aan rubber, dienen als isolatiemateriaal in voertuigen. De kokosvezels zijn veel dikker en sterker dan glas- of katoenvezels omdat het een groter aandeel lignine bevat. Lignine wordt op de cellulose laag afgezet tijdens het rijpen van de holle vezels en bepaalt door de hoeveelheid verbindingen met cellulose, de sterkte van het composiet.

Een kokosnoot bestaat voor slechts 30% uit kokosvezels, het overige deel wordt gebruikt voor bodemverbetering of als groeimedium dat bekend staat als mulch.

Kokosnoten zijn voorradig in veel ontwikkelingslanden, afhankelijk van het vezeltype. De witte kokosvezels komen voornamelijk voor in India en de bruine kokosvezels zijn terug te vinden in Indonesië, Vietnam en Sri Lanka. (Wikipedia)

Natuurlijke vezels kunnen materialen vervangen die synthetische vezels versterken, zoals glas in plastic. Natuurlijke vezels hebben een lage dichtheid, lage kosten, acceptabele sterkte, goede isolerende eigenschappen, beschadigen het gereedschap minder, zijn thermisch minder gevoelig en zijn verkrijgbaar uit vernieuwbare bronnen. Het nadeel van natuurlijke materialen is dat ze door hun hydrofiliëit slecht kunnen binden aan matrices van polypropyleen. Polypropyleen is goed bestand tegen bacteriegroei en kan door verhitten in een vorm worden geperst. Door een combinatie van natuurlijke kokosvezels met polypropyleen zou er een product ontstaan met goede mechanische eigenschappen die vele mogelijke toepassingen kent. Uit onderzoek is gebleken dat de compatibiliteit van kokosvezels met polypropyleenmatrices wordt vergroot door deze te behandelen met benzeen diazonium zout. (Haque, 2009)

Ook is er een onderzoek geweest naar mogelijke behandelingen van kokosvezels om de (mechanische) eigenschappen te verbeteren. Dit kan door middel van 'merceriseren', wassen en bleken. 'Merceriseren' is een proces dat bestaat uit onderdompeling in een bad van natriumhydroxide, gevolgd door een zuurbad en wordt toegepast om stoffen te laten glanzen en versterken. Deze behandelingen zorgen voor betere thermische eigenschappen, verdwijnen van oneffenheden en dat er gunstige aanpassingen ontstaan aan het vezeloppervlak. (Rosa, 2009)

Er is nog veel onderzoek vereist naar toepassingen van kokosvezels op mechanisch gebied, maar het biedt potentie deze in de toekomst te verwerken in het kokermateriaal of te gebruiken als hoofdmateriaal van een prothesekoker. In dit onderzoek is daar echter geen mogelijkheid voor, dit zal laboratoriumonderzoek vereisen.

## Bamboe

De afgelopen jaren is bamboe interessant gebleken voor de industriële wereld van de ingenieurs en civiele techniek. Het is een eco-vriendelijk product en kent dankzij de efficiënte combinatie van kracht en stijfheid toepassingen in stellages, bruggen, composieten die versterkt zijn met vezels en bij de productie van fietsen. (Tana, 2011)

Bamboe behoort tot de zogenoemde groep van 'functionally graded materials'. (FGM). (Neubrand, 2001) Een 'functionally graded material' is een composiet die uit twee pure componenten bestaat. De belangrijkste eigenschap komt van iedere component tot uiting, zonder de eigenschap van het andere component te verdringen. Een voorbeeld is een composiet van metaal met keramiek, waarbij zowel de hardheid van een metaal als de lichtbreking van keramiek naar buiten komen.

Door de gewenste eigenschappen te combineren kunnen ideale composieten ontstaan voor speciale doeleinden waar huidig veel problemen bij ontstaan. Implantaten kunnen op deze manier bijvoorbeeld elektrisch geïsoleerd worden door de eigenschappen van keramiek en de stevigheid behouden van het metaal, waardoor ze geen ongewenste lichaamsreacties teweeg brengen en minder slijtage ondergaan. (Ruys, 2002)

Bamboe is een FGM omdat het een natuurlijke structuur heeft die optimaal is om het eigen gewicht en windkracht te dragen, zonder een buigmoment te realiseren. Het bevat uitermate sterke vezels die zijn ingebed in een matrix van normale cellen. Het is echter geen homogeen geheel, omdat het aantal sterke vezels van buiten naar binnen gezien afneemt. Ook neemt het aantal sterke vezels toe naarmate het dichterbij de grond komt. De plant is opgedeeld naar de hoeveelheid stress die ontstaat dankzij de krachten die daar werken, als gevolg van ladingsverschillen. (Neubrand, 2001) Omdat het een sterk materiaal is dat bovendien voorradig is in ontwikkelingslanden heeft dit potentie als kokermateriaal, het vereist echter onderzoek om hier meer over te kunnen concluderen.

## Composiet polyethyleen met grafiet

Polyethyleen is een door medisch ingenieur veelvuldig toegepaste thermoplast met goede biocompatibiliteit en mechanische eigenschappen. (Fouad, 2011) Een goede biocompatibiliteit is belangrijk voor de werking van het biomateriaal in het lichaam omdat het de juiste reacties teweeg moet brengen en geen hinderlijke nevenreacties mag veroorzaken. (Groot de, 1990)

Producten van polyethyleen worden toegepast als legering van gewrichtsimplantaten om wrijving te verminderen. Voornamelijk polyethyleen met hoge dichtheid (HDPE, high density polyethylene) kent vele toepassingen in de industrie en biomedische wereld vanwege de makkelijke verwerking en relatief lage kosten. Een nadeel hiervan is dat het sneller slijt dan andere producten van polyethyleen die op hun beurt duurder of lastiger te verwerken zijn. (Fouad, 2011)

Dankzij de gelaagde structuur van grafiet is het veelbelovend om als component in een composiet de snelle slijtage van polyethyleen tegen te gaan en de hardheid ervan te vergroten. Grafietdeeltjes zijn tevens werkzaam als stevig smeermiddel en hebben daarnaast goede mechanische, thermische en elektrische eigenschappen. Het is een stof die isolatie mogelijk maakt en kan daarom een andere stof thermisch en elektrisch isoleren. Uit onderzoek is gebleken dat het composiet dat ontstaat door grafieten Nanodeeltjes te binden aan HDPE geen cytotoxische werking heeft. (Fouad, 2011)

Dit composiet biedt om voorgaande redenen een goed perspectief als biomateriaal voor gewrichtsimplantaten en prothesekokers.

## Liner

De vorm en materiaal zijn bepalend voor het succes van het ontwerp. De vorm van de liner is gebaseerd op de vorm van de koker en er ontstaat een goed eindresultaat als deze juist op elkaar zijn afgestemd. Het materiaal van de liner bepaald de twee belangrijkste mechanische eigenschappen; de wrijving en stijfheid. Hoe meer wrijving hoe meer schuifspanning, hoe minder contactdruk met als gevolg een grotere wrijvingscoëfficiënt (wrijving tussen twee oppervlakken) omdat alles op één punt aankomt. Een goed comfort resulteert in een betere werking van de prothese, vandaar dat in dit onderzoek ook aandacht is besteed aan het gebied rondom comfort. Onderstaand uitwerkingen van de ideeën uit de brainstormsessie en enige discussie(punten).

### Gelkussens

Gel zorgt voor een toename in compliantie waardoor de shearstress (schuifspanning) tussen de prothesekoker en de huid vermindert. Daarnaast geeft het een verbeterde schokdemping en drukverdeling over de stomp. De prothese is de connectie tussen de grond en het been, bij elke stap worden de krachten via de prothese overgedragen. Een goede schokdemping is van belang bij de zwaabeweging wanneer het lichaamsgewicht van het ene op het andere moment op één been neerkomt. Zonder een goede schokdemping kampt de patiënt met rugklachten, pijn aan de stomp en osteoarthritis (botafbraak). Door de slechte ventilatie van siliconen gelliners ontstaat er eczeem en gaat de huid gaat zweten, dit geeft een verminderde pasvorm. Een dikkere gellaag zorgt voor een betere schokdemping maar veroorzaakt ook meer zweet en huidirritaties. (Boutwell, 2012) Een oplossing hiervoor is door bijvoorbeeld een coating van hydrogel aan te brengen op deze gelkussens. Hydrogel is een super absorberende gel dat onder andere verwerkt wordt in luiers, maandverband, contactlenzen en wondverband om het vocht te absorberen. Door gelkussens te coaten met hydrogel is er minder kans op huidirritaties en zweet omdat er enige vorm van hydratatie mogelijk is.

### Gelbolletjes

Door in plaats van gelkussentjes, gelbolletjes te gebruiken, is er meer ruimte voor ventilatie. Daarnaast kunnen de gelbolletjes afhankelijk van elkaar bewegen en verplaatsen naar waar ondersteuning nodig is. Ook zijn ze door ze klein te houden relatief minder gevoelig kapot te gaan, omdat de verhouding tussen de stevigere gelwand en gel meer gelijk is. Een nadeel daarvan is wel dat ze meer stug zijn en mogelijk voor minder demping zorgen. Daarnaast is de besproken coat van hydrogel sneller en makkelijker aan te brengen op grotere oppervlakken, waardoor gelkussens een beter idee is dan gelbolletjes.

## Gasveer

Een gasveer is een veer met een uitstekende schokdemping, de schokbreker werkt namelijk via hetzelfde principe. Een gasveer bestaat uit een zuiger en een cilinder die gevuld is met stikstof, dit wordt in het geval van de schokbreker vervangen door een hydraulische vloeistof. Als gevolg van het uitoefenen van druk op de veer wordt de vloeistof of het gas samengedrukt. Dit veroorzaakt weerstand en hierdoor worden veerbewegingen gedempt.

Aangezien een goede schokdemping een rol speelt bij het voorkomen van pijnklachten van de patiënt kan het aanbrengen van een gasveer in de liner of koker hier mogelijk uitkomst in bieden. Zie figuur 2 voor een overzicht van onderdelen en figuur 2 voor een schematisch overzicht van de werking van een gasveer.

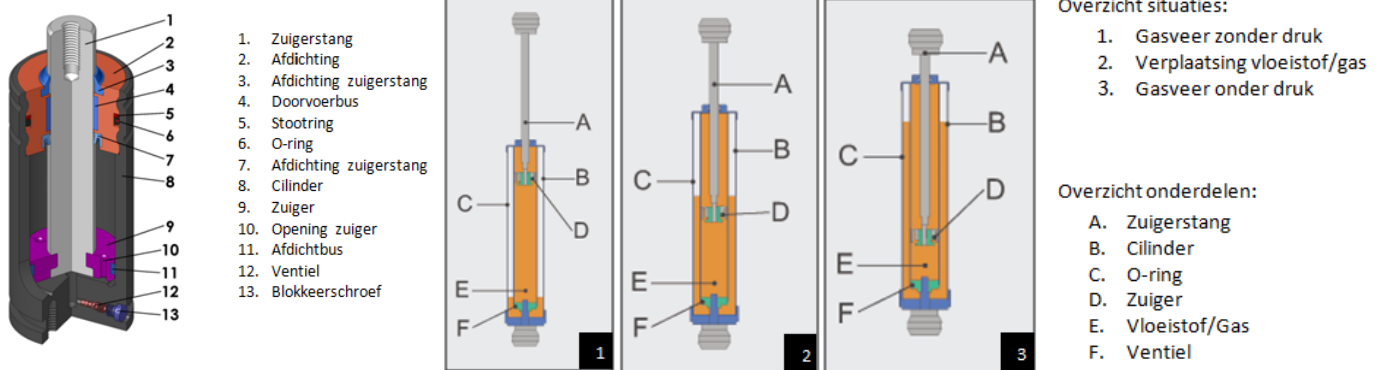


Fig 2. Doorsnede van een gasveer

Fig 2. Situatieschets werking van een gasveer

## Water

Water werkt naast een groot aantal andere functies ook als natuurlijke schokdemper in ons lichaam. Gevoelige organen en structuren als de hersenen, de ogen en het ruggenmerg zijn omringt met water en worden hierdoor beschermd tegen schokken. Ook helpt het de beweging van gewrichten te versoepelen door de wrijving te verminderen. De lage viscositeit van water zorgt echter voor minder weerstand tegen externe vervormingen wanneer het niet wordt gecombineerd met een omhulsel dat wel elastisch is. Vandaar dat water eventueel in combinatie met andere ideeën een uitkomst kan bieden, het zou bijvoorbeeld kunnen fungeren als hydraulische vloeistof in een schokbreker.

## Memory foam / geheugenschuim

Geheugenschuim is een viscoelastisch schuim op basis van een polymeer genaamd polyurethaan. Schuim met een hoge dichtheid wordt door lichaamswarmte of UV-straling zacht en vervormbaar, zodat het zich binnen een paar minuten om het object heen vormt. Schuim met een lagere dichtheid is drukgevoelig, vormt zich snel om het object heen en keert terug naar haar oorspronkelijke vorm zodra de druk wegneemt. Hiervan is de toepassing van een hoofdkussen een goed voorbeeld. (Zie afbeelding 1)

Over het algemeen geldt: Des te lager de dichtheid, des te groter is de uitzettingsratio.



Afbeelding 1

De drukverschillen die tijdens een loopbeweging optreden kunnen mogelijk worden opgevangen door geheugenschuim te verwerken in of te gebruiken als hoofdmateriaal van de liner om de pasvorm te verbeteren. In dit geval gaat het om geheugenschuim met een lage dichtheid, zoals hierboven zichtbaar in figuur 2. Dit materiaal wordt kleiner qua volume op het moment dat het gehele lichaamsgewicht op het prothesebeen steunt en keert terug naar de staat die de koker volledig opvult tijdens de zwaaibeweging.

Voor schuim met een hoge dichtheid zou gelden dat de energie die normaal in de knie wordt opgeslagen omgezet kan worden in warmte, om daarmee de liner naar oorspronkelijke vorm te laten terugkeren.

Voor beide vormen van dichtheid zijn er mogelijkheden, dit maakt het interessant voor toepassingen in de prothese industrie.

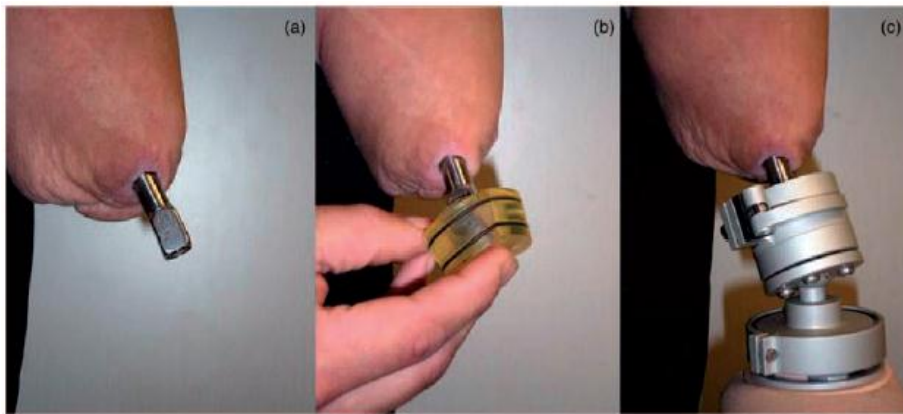
## Verbinding tussen stomp en prothese

Een goede verbinding tussen stomp en prothese betekent een goede overdracht van krachten, minder wrijving en een betere prothesefit. Huidige prothesekokers beperken de bewegingsvrijheid en voldoen niet altijd aan de eisen betreft comfort, stabiliteit en functionaliteit. Vandaar dat er in dit onderzoek ook naar oplossingen zijn gezocht om dit te verbeteren.

### Osseoïntegratie

Door de prothese direct te verbinden met de stomp via het principe van osseoïntegratie, is de koker overbodig en worden pijnlijke problemen voorkomen. Dit principe wordt huidig veel toegepast in de vorm van implantaten bij de tandheelkunde. Een implantaat van titanium wordt in het bot geschroefd en dient als fixatiepunt, waar een volgend titanium onderdeel (opbouwschroef) aan kan worden gezet die het geheel met de prothese verbindt. (Zie figuur 3)

Deze geankerde prothese past altijd, zit goed vast en wordt goed op zijn plaats gehouden door de titanium onderdelen.



Figuur 3. a) De opbouwschroef die de huid doorboort. b) De 'puck' is een apart onderdeel van het bevestigingssysteem die zorgt voor stabiliteit en betrouwbare fixatie tussen opbouwschroef en de complete bevestiging. c) voorbeeld van de bevestiging van de prothese.

Patiënten hebben zes maanden nodig om te herstellen van de ingreep en kunnen in de tussentijd gebruik maken van een aangepaste ouderwetse prothesekoker. Er mogen niet teveel krachten werken op de huid rondom het implantaat. De krachten moeten langzaam toenemen, zodat er geen osteoporose ontstaat.

Er is gebleken dat schokdemping en goede ventilatie van belang is bij het voorkomen van bepaalde klachten, zoals beschreven bij de gasveer. In dit concept van osseoïntegratie kunnen daarom een schokdemper en een temperatuur isolator worden ingebouwd. (Jönsson, 2012)

Het is echter niet ideaal om een tijdelijke prothese te moeten gebruiken, vandaar dat een andere oplossing beter kan zijn.

## Vastzuigen

Het fenomeen vacuüm kan een rol spelen bij het tegengaan van vermindering van de pasvorm.

Door de ruimte tussen de binnenste kokerwand en de liner vacuüm te zuigen met behulp van een pomp ontstaat er onderdruk. Door deze onderdruk komt de liner strak tegen de stomp aan te liggen, ontstaat een betere fit en wordt de natuurlijke vloeistofuitwisseling in het weefsel gestimuleerd. De wrijving vermindert doordat er nauwelijks ruimte tussen de liner en de stomp zit. Wrijving veroorzaakt blaren en een verminderde pasvorm. Voor het beste resultaat is een hightech vacuümpomp vereist, de reeds bestaande vacuümprothese genaamd VASS (figuur 4) maakt hier gebruik van. Zodra de patiënt in de koker stapt kan de aanwezige lucht via een ventiel naar buiten worden geleid.



Figuur 4. VASS in beeld.

In vacuüm wordt de natuurlijke vloeistofuitwisseling in de stomp gestimuleerd. Hierdoor is regulatie van de volumeschommelingen in de stomp mogelijk, vermindert de hoeveelheid stress en wordt de hechting tussen de liner en koker bevorderd. Uit een test op een loopband is gebleken dat objecten hun volume deels kunnen herwinnen wanneer deze zich constant hoog vacuüm bevinden dankzij een externe vacuümpomp.

Een ander voordeel van vacuüm is te vinden in de vorm van therapie (VAC<sup>®</sup>, vacuüm assisted closure) en wordt gebruikt om de wondgenezing te bevorderen. Het kan bij zowel volwassenen als kinderen en bij elk wond type worden toegepast, ook als deze is geïnfecteerd. Dit laatste is van belang aangezien patiënten in ontwikkelingslanden meer risico lopen om infecties te krijgen vanwege verminderde hygiëne. Daarnaast herstellen wonden via deze methode sneller en hoeven patiënten niet in het ziekenhuis te verblijven, wat compenseert met de hoge kosten van deze techniek. (Negosant, 2012)

Dankzij een combinatie van VASS en VAC ontstaat mogelijk een meer consistente pasvorm.

Daarnaast zijn er geen aanpassingen nodig naderhand en kan de patiënt kort na de operatie al gebruik maken van de prothese.

Door een betere en snellere wondgenezing is een patiënt in staat binnen korte tijd na de operatie gebruik te maken van een prothese. Het bevestigen van de stompkoker moet echter heel nauwkeurig gebeuren en vereist enige kracht. Deze methode biedt echter mogelijk een minder goed resultaat bij zwakkere of oudere patiënten omdat veel beweging het vacuüm beter behoudt, met beter wondherstel als gevolg. Vandaar dat het mogelijk minder goed werkt in ontwikkelingslanden, omdat patiënten vaak zijn verzwakt. Tot de tijd er ontwikkelingen plaatsvinden omtrent deze methode is het daarom niet de beste kandidaat voor de kwaliteitsverbetering van prothesen in ontwikkelingslanden.



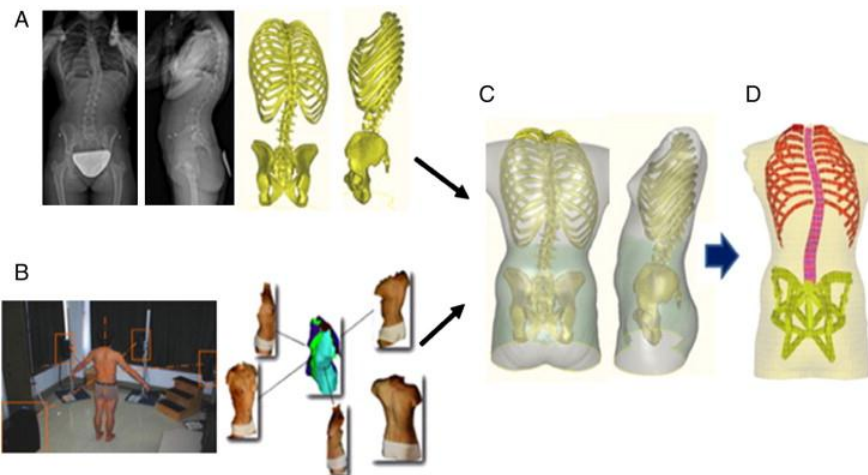
## Castingfunctie

Een goede casting is belangrijk voor de kwaliteit van de prothese. De huidige gipswindsel methode is tijdrovend omdat er bij meerdere stappen droogtijd is vereist, het aanpassen en produceren duurt gemiddeld drie dagen. Ook moeten er veel handelingen worden verricht voor de productie van één prothese. Hierdoor kunnen er minder patiënten worden geholpen. Deze methode brengt daarnaast veel pasproblemen met zich mee omdat het stompvolume verandert gedurende het gebruik. Daarom zijn hier nieuwe technieken en methoden onderzocht en besproken, die bijvoorbeeld een negatief overbodig maken, om de tijdsduur van het castingproces in te korten.

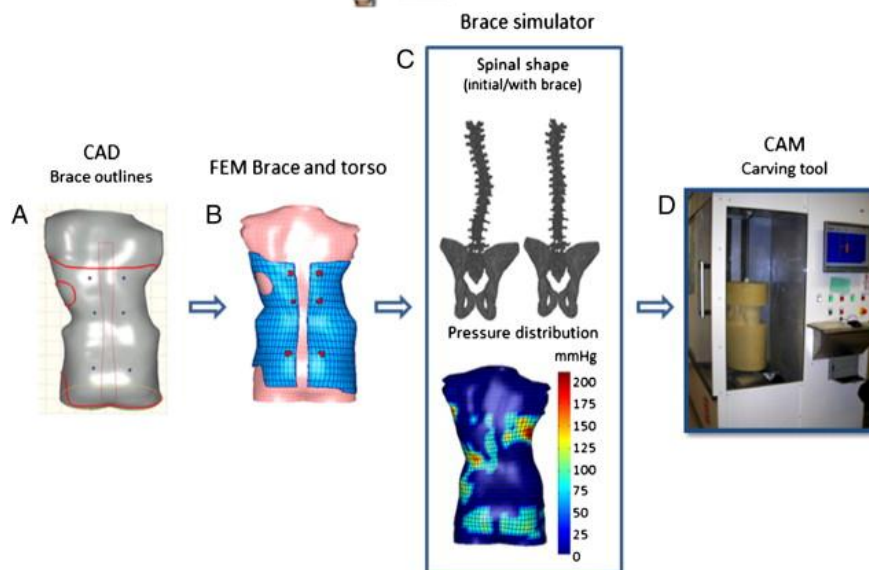
## CAD/CAM

De afkorting CAD/CAM staat voor 'Computer aided design' en 'Computer aided manufacturing'. Een proces dat met behulp van een computer ontwerpt, analyseert en fabriceert. Aan de hand van scans kan een driedimensionaal model worden verkregen en de verschillende stompvolumes worden berekend. Zo zijn er simulaties van de drukverdelingen mogelijk en kan het ontwerp hierop worden aangepast. Met behulp van een meetsysteem die kan bestaan uit een mechanische digitizer, een magnetische digitizer of een laser scanner wordt de stompvorm omgezet in computergeschikte data. De orthopedisch instrumentmaker kan aan de hand van deze data via speciaal ontworpen software een stompkoker produceren. Een computergestuurde snijmachine snijdt een kokerpatroon uit gips of schuim. Via conventionele methoden als vacuüm zuigen of een laminatie kan daaruit een eindkoker worden vervaardigd.

Door combinatie met andere technieken als FEA (finite element analysis) biedt dit een goed toekomstperspectief aan het aanmeten van protheses. In onderstaande figuren 5 en 6 is een toepassing zichtbaar van deze techniek in de vorm van een brace bij de behandeling van scoliose (scheefgroei van de ruggengraat). (Desbiens-Blaisa, 2012)



Figuur 5. Stappen om het finite element model van een romp te maken.  
 A) Werving van de interne geometrie via de radiografische reconstructietechniek, B) Werving van de externe geometrie via een oppervlakte topografisch systeem  
 C) Deze twee vormen van geometrie over elkaar plaatsen  
 D) Finite element model van de romp waarbij de ligamenten (bindweefsels) zijn weggelaten voor een meer heldere weergave.



Figuur 6. Productie van een brace.  
 A) Ontwerp van een brace via de software van CAD  
 B) Finite element model (FEM) van de brace om een FEM van een patiënt.  
 C) Simulatie van brace installatie en uitkomst (De vorm van ruggengraat en drukverdeling)  
 D) Productie via de software van CAM met behulp van een snijmachine

In het geval van de brace is echter een FE-model als invoer gebruikt, deze wordt gecreëerd uit een CT-scan. Aangezien CT-scans schadelijk zijn voor de patiënt kan een CAD met een CT-scan als invoer niet worden toegepast bij het aanmeten van een prothesekoker. Zolang een model via het CAD-systeem is ontworpen zonder gebruik te maken van een CT-scan of andere methoden die schade aan kan richten is dit een zeer interessant uitgangspunt om prothesekokers mee te vervaardigen.

### Multi jet modellering

Een techniek die lijkt op het ouderwetse inktjetprinten en hiervoor gebruikt maakt van het materiaal wax, een PCS (Phase change material). Deze materialen zijn in staat grote hoeveelheden energie uit te stoten en op te slaan door de afwisseling van de fases vloeibaar en vast. Met behulp van uv-stralen wordt de polymerisatie gestart, om zo kunststof producten waslaag voor waslaag op te bouwen en te laten uitharden. Overig materiaal kan later door middel van verhitting worden weggesmolten. Deze techniek produceert thermoplastische prototypes met een goede driedimensionale stabiliteit, het heeft geen geometrische beperkingen, hoge resolutie met veel detail, korte productietijd en ondanks de vergrote complexiteit nemen de kosten niet toe. Deze vorm van 3D-printing is onafhankelijk van onderdeelgrootte of hoeveelheid en kan opeenvolgend worden herhaald met hetzelfde resultaat. Daarnaast is het eenvoudig in gebruik en geeft het een gedetailleerde en goede kwaliteit eindproduct wat het erg geschikt maakt voor prototypes, in samenwerking met de CAD/CAM techniek.

## Memory foam

Geheugenschuim met een hoge dichtheid heeft potentie als direct castingsmateriaal aangezien dit zich meteen om de stomp heen kan vormen. Zo is er geen negatief model meer nodig en de verwachting is dat het castingproces op deze manier in kortere tijd voltooid kan worden.

Aangezien schuim vrij elastisch is ontstaat een prothesekoker met een comfortabele fit. Maar geheugenschuim heeft ook nadelen: De weerstand verandert gedurende de periode en de reactietijd is hoog, waardoor het gemakkelijk terugkeert naar de oorspronkelijke staat. (Coyle, 2010)

Memory foam is ook verkrijgbaar in een vorm die interessant lijkt te zijn in deze toepassing, 'integral memory foam' of 'structural memory foam' genoemd en bestaat uit een harde buitenkant en een zachte binnenkant. In deze vorm zou het naast casting ook kunnen functioneren als kokermateriaal. Het is discutabel of het schuim het lichaamsgewicht kan dragen, op het moment dat de weerstand vermindert, maar het blijft een interessant alternatief.

## Laser engineered net shaping

Hierbij wordt door middel van een krachtige laser metaalpoeder samengesmolten tot driedimensionale structuren, waardoor een eindproduct met hoge dichtheid ontstaat. Met de informatie van het CAD-model wordt het onderdeel laag voor laag opgebouwd. Het LENS proces vindt plaats in een hermetisch afgesloten ruimte. De techniek is goed toepasbaar bij het produceren van gereedschap en complexe prototypes die fungeren als halffabricaten. Halffabricaten hoeven nauwelijks te worden bijgeslepen wat het aantal productiestappen in het proces vermindert waardoor er minder kans is op afwijkingen en de kwaliteit van het prototype verbeterd.

Deze techniek maakt echter alleen gebruik van metaal en de massa van dit materiaal past niet bij een toepassing in een prothese(koker). Vandaar dat deze methode verworpen kan worden als alternatief voor de huidige methode.

## Modular Socket System

Modular Socket System, een spuitgietmethode die op iedere stomp toepasbaar is. Het is een verder ontwikkelde vorm van de oorspronkelijke gipswindsel techniek. Als eerst worden er twee lagen siliconen over de stomp gelegd, met een ruimte daartussen. In deze ruimte worden gevlochten glasvezels gegoten en daarna wordt er hars aan toegevoegd. Dit mengsel wordt onder druk gezet zodat het mengt en een harde kokervorm vormt. De glasvezels in dit mengsel zorgen voor de mechanische kracht en duurzaamheid van de koker. De kosten van deze methode bedragen meer dan die van de ouderwetse gipswindfels, maar de methode is sneller en er zijn naderhand minder bezoeken met daarbij komende aanpassingen vereist. Aangezien dit onderzoek voornamelijk gericht is op verminderen van de tijdsduur van het aanmeetproces lijkt dit een interessante techniek met potentie. Het bestaat echter wel uit veel stappen en een goede opleiding is vereist.

## Drukveren

Een weegschaal werkt via het principe van drukveren. De lengte waarmee de veer indrukt staat gelijk aan de kracht die door het voorwerp wordt uitgeoefend en daarmee kan worden omgezet in massa. Hoe verder de veer wordt ingedrukt, hoe groter is de tegenwerkende drukspanning. Via dit principe kan de koker aan een stomp worden aangemeten. De patiënt komt op een bed van drukveren te staan en laat zijn hele gewicht door de stomp opvangen. Deze drukmetingen kunnen via de computer worden omgezet in drukverdeling over de stomp, waarna met nieuwe technologieën als laser-printen een stompkoker kan worden gemaakt. Een belangrijk verschil met de huidige techniek van gipswindels is dat er drukverschillen meetbaar zijn over het gehele oppervlak. Daarmee kunnen voorspellingen worden gedaan over waar volumeverlies in de stomp zal gaan optreden. Door op die voorspelde locaties bijvoorbeeld extra gelkussens te plaatsen kan dit het volumeverlies compenseren en daardoor vermindering van de pasvorm worden tegengaan. Ook zal de kwaliteit van de prothese verbeteren doordat er minder sprake is van verkeerde positionering van de stomp ten opzicht van de prothese als gevolg van volumeverlies. Als laatste ontstaat er minder wrijving waardoor pijnlijke huidzweren en drukplekken worden voorkomen.

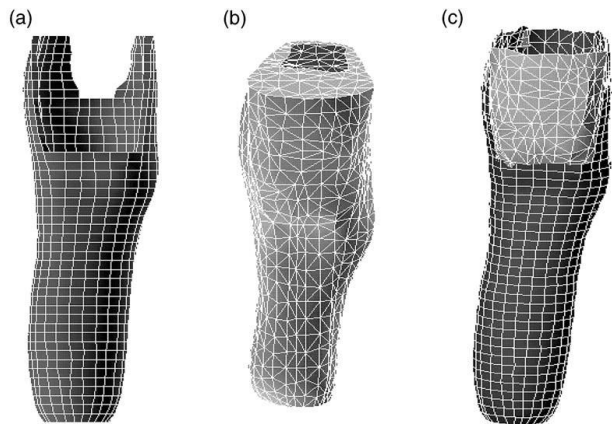
Omdat er met deze methode alleen informatie over drukverdeling aan het contactoppervlak met de drukveren wordt verkregen kan dit problemen opleveren. Aangezien een stomp niet egaal is, is het moeilijk om de drukverdeling bij de inkepingen te bepalen, omdat die geen contact hebben met de weegplaat. Vandaar dat deze techniek op zichzelf staand verworpen kan worden bij de casting van een prothesekoker aan een stomp.

## Finite element analysis

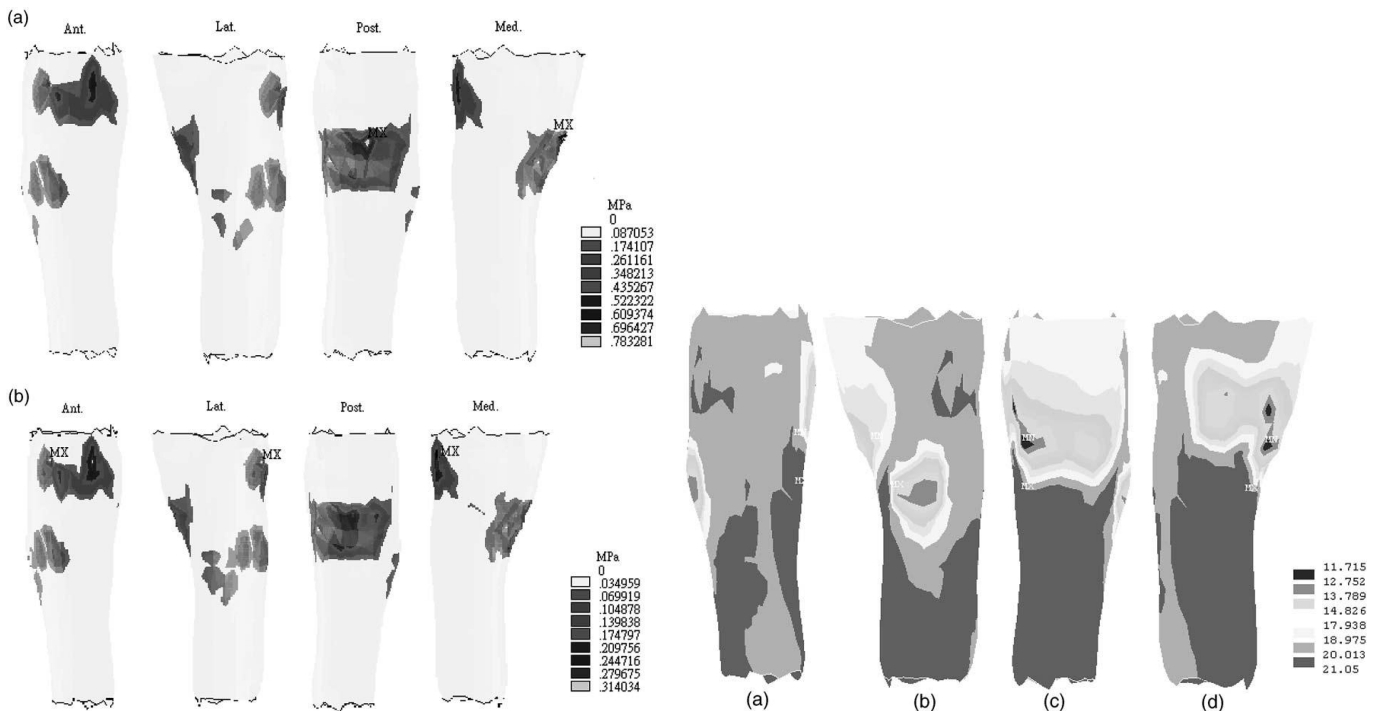
Aangezien de stressverdeling op het raakvlak tussen stomp en liner aangeeft hoe de lading wordt overgedragen van stomp naar stompkoker wordt er veel onderzoek gedaan om dit meetbaar te maken met behulp van sensoren. Daaruit is gebleken dat het haast onmogelijk is om dit te realiseren, omdat tijdens de loopbeweging parameters voor het ontwerp veranderen.

Finite Element Analysis kan hier uitkomst in bieden omdat het systeem berust op het maken van simulaties.

In eerder onderzoek ondervond men problemen die te wijten waren aan een slechte simulatie van een realistisch contactoppervlak tussen stomp en stompkoker om de wrijvingseffecten te analyseren. Ter voorkoming van fouten die hierdoor volgen kunnen CT scans worden uitgevoerd. Zo wordt er een betere simulatie gemaakt van de realiteit. Reële waarden van elastische modulus, gewicht en contouren van de koker worden via het CAD systeem omgezet in screening modellen, zichtbaar in figuur 7. In figuur 8a en 8b. (Lin, 2004)



Figuur 7. Een driedimensionale Finite element screen-model van een stomp-/kokersysteem.  
 A) Screening liner, B) Screening stomp.  
 C) Screening van contactoppervlakken

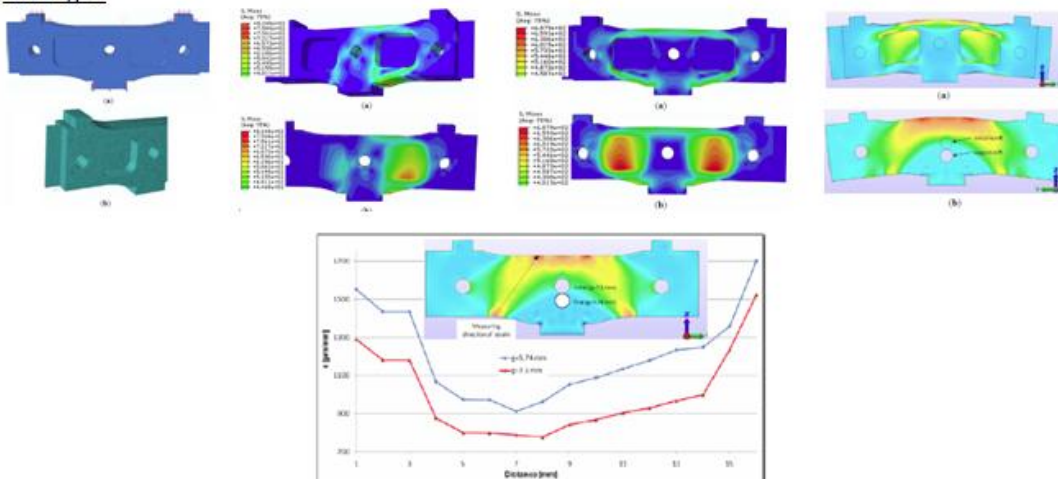


Figuur 8a.  
 Contactdruk en wrijving-/shear stressverdelingen met aanzichten;  
 (a) anterior, (b) lateraal, (c) posterior, (d) mediaal

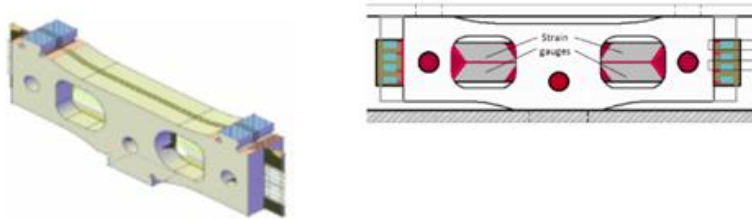
8b.  
 Stressverdeling tussen stomp en stompkoker, waar in de derde opname, het aanzicht posterior, van zowel (a) als (b) een piekdruk zichtbaar is.

Een andere toepassing van FEA is te vinden in de vorm van een wegdeksensor, de Weigh-in-motion sensor (WIM-sensor). Deze wordt ingebouwd in het wegdek en meet de ballast op het wiel, de as en het chassis van het voertuig. Dit is een detectiemethode voor voertuigen die schade aanbrengen aan wegen. Als gevolg van deze toepassing blijven de sensoren werkzaam bij een temperatuur tussen de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  en  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , een stoffige omgeving, een omgeving met tijdelijk veel water, lading tot 6000N, schokken en vibraties. Met Finite Element Analysis kan via de computer de stressverdeling worden gesimuleerd om zo het juiste ontwerp te vinden. In het geval van WIM-sensoren is in figuur 9 een voorbeeld van dit proces. (Opitz, 2012)

## Metingen



## Modellen eindontwerp



## Prototype



Figuur 9. Voorbeeld van een productie via Finite Element Analysis

Het gebruik van deze techniek in het ontwerpproces heeft meerdere voordelen ten opzichte van het huidige proces. De kosten verminderen van zowel het ontwerp als de productie, er wordt bespaard op materiaal, zwakheden kunnen op tijd worden getraceerd, de kwaliteit van het project verbeterd en vind er optimalisatie van de te bevestigen onderdelen plaats.

Een nadeel van toepassingen in prothesen is het vereiste een goede simulatie te maken met behulp van een CT-scan. Dit maakt de procedure schadelijk voor de patiënt, brengt hogere kosten met zich mee en het neemt meer tijd in beslag. Vandaar dat deze methode minder potentie heeft dan andere besproken methoden zolang er geen alternatief gevonden wordt voor de CT-scan.

## De preconcepten

Aan de hand van onderzochte materialen en technieken zijn er een aantal ideeën per protheseonderdeel die potentie hebben. Deze ideeën zijn het minst schadelijk voor de omgeving, brengen geen extreem hoge kosten met zich mee en zijn mogelijk uitvoerbaar in ontwikkelingslanden.

*Kokermaterialen:* plantenvezels, kokosvezels, bamboe, grafiet en memory foam

*Linermaterialen:* gelkussen, gasveer en memory foam

*Verbinding:* Osseoïntegratie, vastzuigen

*Casting:* memory foam, modular socket system, CAD/CAM

Om de preconcepten goed te kunnen vergelijken moeten deze compleet zijn. Daarvoor is een combinatie van een kokermateriaal, linermateriaal en verbinding vereist.

Om deze reden wordt er aan de hand van eisen per functie een afweging gemaakt om zo tot de beste preconcepten te komen.

### Materiaal koker

In onderstaande tabel (3) de afweging voor mogelijk kokermateriaal.

Eis	Waarde eis	Plantenvezel	Kokosvezel	Bamboevezel	Grafiet+ polyethyleen	Memory foam
Mechanische kracht	10	8	7	9	10	10
Beschikbaarheid	9	10	10	10	9	9
Kosten	8	8	8	8	8	8
Veiligheid productie	10	10	10	9	9	9
Makkelijk te produceren	8	9	9	9	8	8
Totaal		406	396	406	399	399

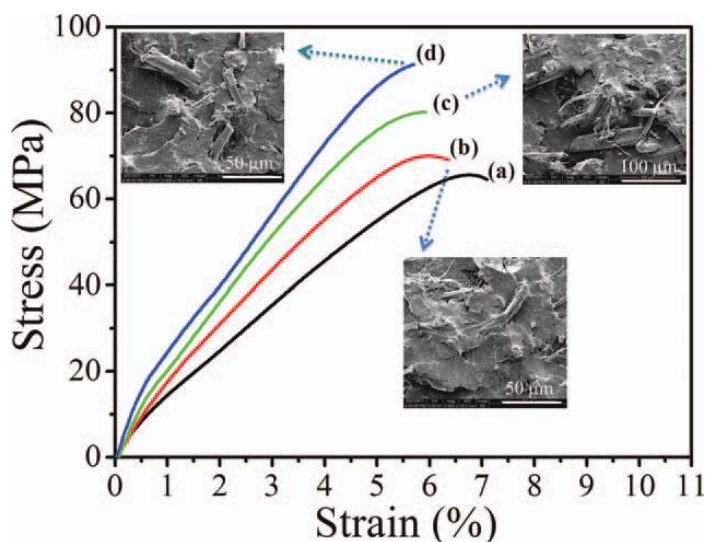
Tabel 3.

Uit deze lijst komen de plantenvezel, bamboevezel en memory foam naar voren als kandidaten voor een nieuw kokermateriaal. De keuze tussen het composiet van grafiet en polyethyleen en memory foam is gemaakt naar het feit dat memory foam mogelijk ook als liner en directe casting kan worden gebruikt. Productvervaardiging uit hetzelfde materiaal geeft vaak een betere kwaliteit doordat er geen extra bevestigingsplaatsen ontstaan die meestal zwakte geven, daarnaast is de nieuwsgierigheid naar mogelijkheden met dit materiaal groter.

## Plantenvezels – De Ramieplant

Groene biologische composieten die berusten op natuurlijke vezels en biologisch afbreekbare polymeren bieden een effectieve manier om met milieuproblemen om te gaan en duurzame ontwikkeling te creëren. Deze biologische composieten zijn compleet vernieuwbaar en afbreekbaar via composteren of enzymactiviteiten zonder daarbij toxische componenten uit te scheiden. Polymelkzuur (PLA, polylactic acid) is in grote belangstelling gekomen vanwege de goede mechanische eigenschappen (tensile strength en modulus overeenkomstig met polystyreen) in combinatie met de kostenverlaging dankzij de mogelijkheid om te produceren op grote schaal. Een grote kopzorg betreft groene biologische composieten is de onwetendheid over het effect van de natuurlijke vezels op de kristallijne vormen (morfologie) en structuur van de matrix. Deze twee hebben een grote invloed op de mechanische, thermische en biologisch afbreekbare eigenschappen. (Xu, 2012)

De biologische composieten worden gevormd door koppeling van natuurlijke vezels aan polymelkzuur via de spuitgietmethode. Het effect van composietvorming door vezels van de ramieplant in combinatie met polymelkzuur is onderzocht. De ramieplant behoort tot de brandnetelfamilie en wordt ook wel China gras genoemd. Het is sterk, heeft een gemiddeld breekpunt en een goede thermische stabiliteit in vergelijking met andere natuurlijke vezels. Dit maakt het uitstekend geschikt om als verstevigend element te dienen bij biologische composieten van polymelkzuur. Via POM (polarized optical microscopy) en X-ray diffractie kan de morfologie en ligging van de ramievezels in het composiet worden bestudeerd. Diffractie is het afbuigen van een lichtgolf wanneer deze wordt gehinderd, om zo om het obstakel heen te komen. Doordat de ramievezels hoofdzakelijk uit cellulose-kristallen bestaan, ontstaat een hoge kristalliniteit en oriëntatie van de kristallen, waardoor ze zichtbaar worden. (Xu, 2012)



Figuur 10. De stress tegen rek uitgezet van een ramievezel/PLA-composiet in verschillende samenstellingsverhoudingen (in massa%).

- A) Puur PLA
- B) PLA/Ramie = 90/10
- C) PLA/Ramie = 80/20
- D) PLA/Ramie = 70/30

Bijgevoegde zijn afbeeldingen verkregen via Scanning Electron Microscopy op de breekpunten.

In figuur 10 is een grafiek zichtbaar die aangeeft welke stress een composiet van ramie met polymelkzuur (PLA) kan verdragen zonder te breken. Des te meer ramievezel aan het composiet wordt toegevoegd, des te rekbaarder en stressbestendiger het geheel wordt. (Xu, 2012)



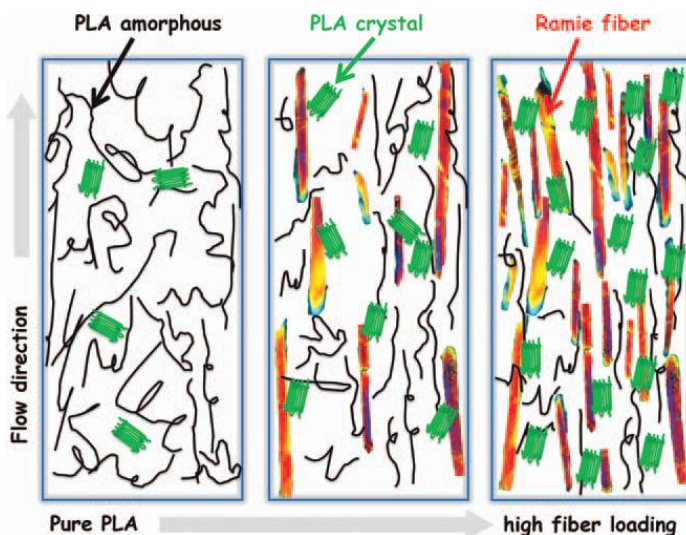
In onderstaande tabel 2 staan de mechanische eigenschappen weergegeven die van de grafiek uit figuur 8 zijn afgeleid. Hieruit blijkt dat door toename van de hoeveelheid ramievezels de rekkracht en rekmodulus verbeterd. Deze verbetering is vergelijkbaar met de versterkende werking van glasvezels. (Xu, 2012)

Table II Detailed Mechanical Properties of Injection-Molded Pure PLA and PLA/Ramie Fiber Biocomposites (All Presented Results Are Clarified as Average Value  $\pm$  Standard Deviation After Statistical Analysis, Respectively)

Fiber Loading	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation at Break (%)	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
0 wt %	65.6 $\pm$ 1.4	1468 $\pm$ 16	7.3 $\pm$ 0.5	4.3 $\pm$ 0.1
10 wt %	70.0 $\pm$ 1.9	1916 $\pm$ 29	6.4 $\pm$ 0.2	4.5 $\pm$ 0.1
20 wt %	80.2 $\pm$ 2.3	2469 $\pm$ 37	5.9 $\pm$ 0.3	3.9 $\pm$ 0.1
30 wt %	91.3 $\pm$ 2.8	2977 $\pm$ 52	5.7 $\pm$ 0.1	3.6 $\pm$ 0.2

Tabel 2. Modificatie van mechanische eigenschappen van puur PLA en composieten samengesteld uit PLA en ramievezels, met verschillende massa% van de vezels.

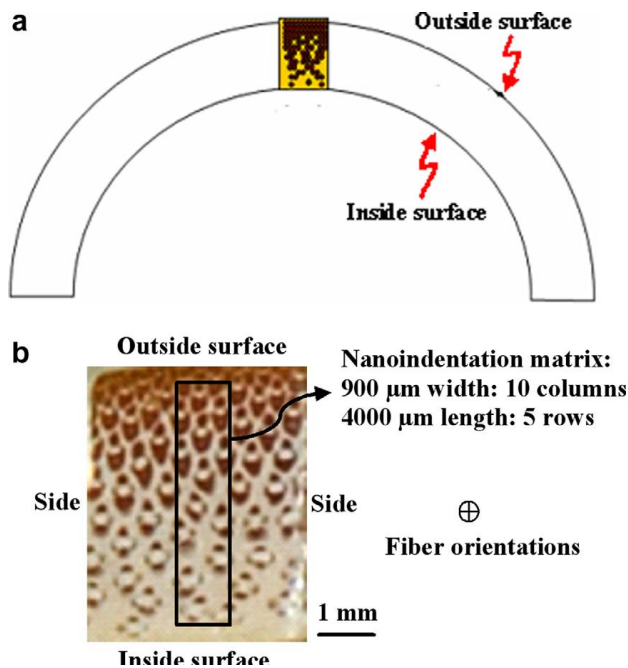
Uit dit onderzoek is gebleken dat ramievezels een sterke interactie hebben tussen vezeloppervlakte en polymelkzuurketens, zie figuur 11. De vezels hebben grote kernactiviteit wordt zorgt voor een grote kristalliniteit. De mate van kristalliniteit is van belang voor de sterkte van het materiaal, een hogere kristalliniteit zorgt voor een hogere dichtheid en dus grotere sterkte. Hierdoor verbeterd de rekkracht, elastische modulus en opslag modulus. Het onderzoek heeft dus bevestigd dat de ramievezels bijdragen aan de mechanische eigenschappen van een composiet. (Xu, 2012)



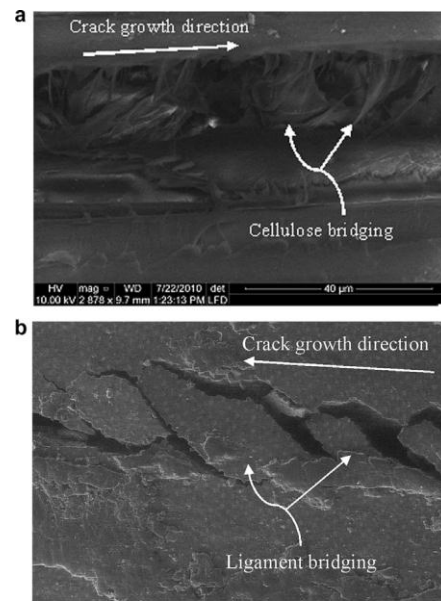
Figuur 11. Aantrekkingskracht tussen PLA en ramievezels door een toename in ramievezelconcentratie.

## Bamboe

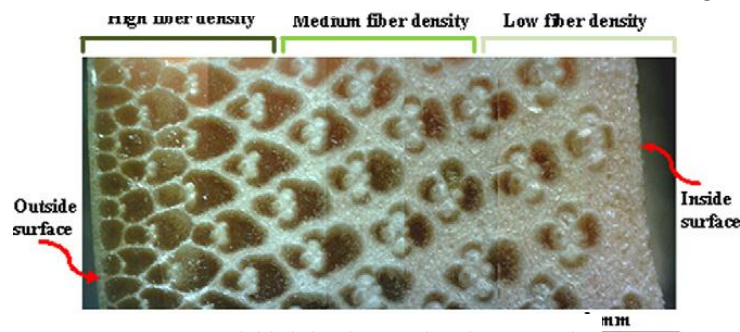
Bamboe heeft een efficiënte combinatie van sterkte, stijfheid en gewicht en heeft dankzij de holle structuur een hoge vervormfactor. Dit betekent dat het in verhouding meer gewicht en draaiing kan weerstaan dan eenzelfde vorm die niet hol is omdat er meer ruimte is voor verplaatsing van de innerlijke structuur. Er is onderzoek gedaan naar de mechanische kracht van dit materiaal. Onder de microscoop was zichtbaar dat het een gegradeerde verdeling kent van vasculaire bundels van hemicellulose en cellulose, die in een matrix van lignine liggen. Het volume van de bundels neemt toe en de dichtheid neemt af naar mate je dichter bij het binnenste van de stengel komt en hoe verder je van de wortel afgaat. Dit is goed zichtbaar in figuur 12 en figuur 13. (Tan, 2011)



Figuur 12, a) schematische weergave, b) dwarsdoorsnede



Figuur 14.  
Het ontstaan van verbindingen in bamboe om scheurgroei tegen te gaan.

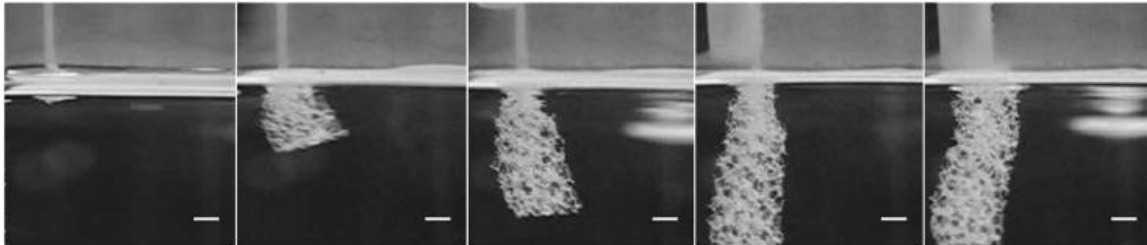


Figuur 11. Bundeldichtheid in een bamboestengel.

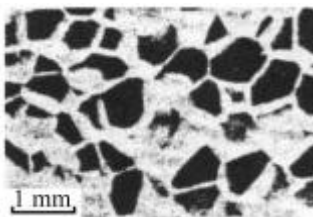
Uit het onderzoek is gebleken dat bamboe van binnen naar buiten openscheurt. Door de ruimte in een matrix met hoge vezeldichtheid te vergroten wordt het gebied zwakker van dat gebied, terwijl in een matrix met lage vezeldichtheid het gebied sterker wordt als de ruimte wordt vergroot. Dit wordt geassocieerd met intermediaire versterking vanuit de lignine-matrix of verbindingen die ontstaan tussen composieten van cellulosevezels ligamenten, omdat er ruimte voor vrijkomt. Zie figuur 14. Dit insinueert een ontwerp dat rekening houdt met de anisotrope verhouding tussen kracht en scheurvoeligheid. De buitenkant is sterker maar scheurt makkelijker, de binnenkant is minder sterk maar meer scheurbestendig. (Tan, 2011)

## Memory foam

Memory foam, ook wel geheugenschuim genoemd, behoort tot de 'slimme' materialen en kan in een secundaire staat worden omgevormd of opgeslagen. Met behulp van warmte of Uv-straling wordt het schuim geactiveerd en keert het terug naar zijn oorspronkelijke staat. (Zie figuur 15.)



Figuur 15. Activatie van geheugenschuim door te verwarmen in een waterbad van 80 °C, waardoor het volume 70 maal groter wordt.



Afbeelding 3. Een foto van polyurethaanschuim, gemaakt via een

Geheugenschuim wordt gemaakt uit een polymeer van polyurethanen. Dit polymeer wordt 'luchtig' gemaakt door het te verhitten, waarna er gasbubbel in worden geblazen of geroerd. (zie afbeelding 3 voor een weergave van de open structuur)

De beste combinatie voor medische toepassingen is een schuim met lage dichtheid, dit vertaalt zich in een dunne celwand en kleine celmassa, met een grote hoeveelheid crosslinks tussen de cellen, dit zijn de verbindingen onderling. Deze verbindingen zorgen voor stevigheid van het materiaal. De grote hoeveelheid crosslinks is daarnaast van groot belang om te voorkomen dat het schuim (deels) in de secundaire vorm aanwezig blijft en niet geheel terugkeert naar de oorspronkelijke vorm.

De grootste voordelen zijn:

- Het lichte gewicht
- Hoge elasticiteit met als gevolg een groot bereik van herstel
- lage kosten
- makkelijke verwerking
- Niet mutageen of toxisch

Daarnaast hebben polymeren het vermogen zich aan te passen en bieden op die manier de kans zich gewenste eigenschappen toe te eigenen. Er zijn meerdere chemische samenstellingen op basis van geheugenschuim gerapporteerd die een ruim bereik aan mechanische eigenschappen biedt. (Pooja Singhal, 2012)

Door een bewerking naar een meer poreuze vorm worden er eigenschappen verkregen die het beter geschikt maakt voor andere toepassingen. Voorbeelden hiervan zijn hoge isolatie op elektrisch en thermisch gebied en de mogelijkheid om grote volumeveranderingen te ondergaan. Het voordeel van deze volumeverandering is dat het schuim compact kan worden opgeslagen zonder dat er volume- of functieverlies optreedt. (Pooja Singhal, 2012)

Omdat geheugenschuim in meerdere staten werkzaam is en goed bestand is tegen volumeveranderingen, maakt dit het zeer geschikt voor een toepassing als liner in een prothesekoker. Naast de andere genoemde voordelen blijkt dit een heel interessant concept voor zowel een nieuw liner-/kokermateriaal als castingmethode.

### *Materiaal liner*

In onderstaande tabel (4) is een selectie gemaakt naar de functionele eisen waaraan het materiaal voor de liner moet voldoen.

Eis	Waarde eis	Gelkussens met hydrogel	Gasveer	Memory foam
Veerkracht & demping	10	8	8	8
Comfort	9	9	4	9
Kosten	8	9	7	8
Absorptie	9	9	3	9
Energie opslag	8	8	9	8
Totaal		378	271	370

Tabel 4.

Uit deze tabel kan worden afgeleid gelkussens met hydrogel hier het meest geschikt voor blijkt te zijn.. Gelkussens kennen een enorm scala aan toepassingen die in verband staan met schokdemping. Door dit materiaal te verwerken in schoenzolen verminderen de spier- en gewrichtsklachten. Ook zijn er toepassingen bekend in de vorm van pleisters, omdat ze een antibacteriële werking schijnen te hebben. Aangezien dit concept huidig ook wordt gebruikt maar dus problemen oplevert in de vochtabsorptie zou het in samenwerking met hydrogel nog beter werkzaam kunnen zijn. Aangezien het puntentotaal van memory foam er niet heel ver vanaf zit en het zoals eerder genoemd in 3 onderdelen van de prothese werkzaam kan zijn, neem ik dit concept ook mee als preconcept.

### *De bevestiging*

Onderstaand de afweging naar de functionele eisen voor de bevestigingsmethode. (tabel 5)

Eis	Waarde eis	Osseoïntegratie	Vacuüm zuigen
Tijdsbestek	10	7	7
Kosten	8	7	9
Invasiviteit	9	3	9
Kwaliteit	9	8	8
Totaal		225	295

Tabel 5.

Als idee voor een bevestiging met een beter resultaat dan huidig, geeft vacuüm zuigen de beste uitkomst. Dit kan echter niet bij alle preconcepten worden toegepast, alleen bij methoden waar met giethars en folie wordt gewerkt. Dit kan dus niet te worden meegenomen bij de vergelijking van de preconcepten omdat folie niet bij elk concept wordt toegepast. Dit is voornamelijk een goed idee om de kwaliteit te verbeteren van de prothesen die momenteel gebruikt worden.

### De casting

Voor de casting zijn er ook een aantal eisen waaraan het proces moet voldoen. Zie tabel 6.

Eis	Waarde eis	MJM + CAD/CAM	Modular Socket System	Memory foam
Niet meer dan vijf handelingen	7	8	7	7
Niet schadelijk	9	3	10	10
Kosten	8	7	8	8
Makkelijk aan te leren	9	7	7	7
Universeel	10	10	10	10
Kort tijdsbestek	10	10	9	9
Direct draagbaar	7	7	7	7
Totaal		405	505	505

Tabel 6.

Aangezien Modular Socket System en Memory foam dezelfde score behalen hebben deze beide potentie als castingsmethode voor een prothesekoker.

#### Modular Socket System

Omdat het in delen van de Contour Cell™ vormkamers wordt opgebouwd kunnen gebieden onafhankelijk van elkaar onder druk gezet worden. Op deze manier kan zacht weefsel worden verplaatst door op in deze kamers luchtdruk te verhogen of te verlagen. Zo ontstaat een anatomisch meer correcte kokervorm wat het comfort en de stabiliteit verhoogd.

Een ander groot voordeel van deze methode is dat de ontstane kokervorm niet meer hoeft worden aangepast, het vormt gelijk de eindkoker. Dit is te danken aan de druk die ontstaat door belasting op het drukgietinstrument tijdens het gieten. Deze drukkracht werkt door op de stomp zelf.

De koker heeft een hoge stabiliteit en goed draagcomfort. In figuur 16 is een overzicht weergegeven van vereist materiaal en gereedschap voor deze techniek en in figuur 17 een uitgebreide weergave

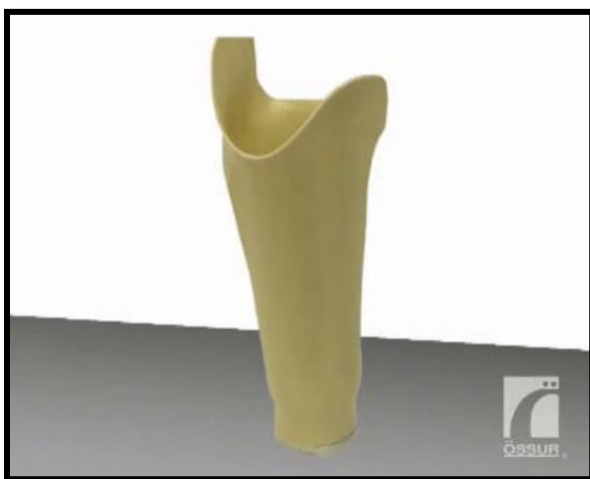


van het productieproces.

Figuur 16. Materiaal en gereedschap van MSS.



Figuur 17. Het productieproces in beeld. A) Het stabilisatiegereedschap wordt bevestigd aan de aansluitpin. B) de gegoten lagen worden gedurende tien minuten onder druk gezet bij een temperatuur tussen de 10 °C – 30 °C met behulp van een Icecast Anatomy pomp en de Icecast Anatomy blaas-unit. D) Nadat de buitenste lagen zijn verwijderd, blijven de gespoten lagen over in de vorm van een mal. Deze mal wordt op maat gezaagd via de voorafgaand getekende lijnen bij C.



Afbeelding 2. Verkregen prototype vanuit MSS

#### Het eindresultaat

De uitgesneden mal zal gedurende twee uur drogen en uitharden bij een temperatuur tussen de 10 °C – 30 °C. Na deze periode ontstaat er dankzij productie via het Modular Socket System een koker als weergegeven in afbeelding 2.

## De geselecteerde preconcepten

Uit de selectie is gekomen dat de volgende vier materialen of processen potentie hebben:

- Casting/liner/koker: Memory foam
- Casting: Modular socket system, liner/koker: materialen behorend bij deze methode
- Casting + liner: Memory foam, koker: Bamboevezels
- Casting + liner: Memory foam, koker: Plantenvezels

Door deze preconcepten samen te voegen en te vergelijken naar alle eisen waar de prothese, het materiaal en het proces aan moet voldoen leidt dit tot een meest geschikt eindconcept.

## Lijst van eisen en wensen

Aan de hand van de lijst van eisen en wensen kan een analyse worden uitgevoerd door deze in een schema te verwerken. Op deze manier kan worden geanalyseerd welk preconcept het beste aan de eisen voldoet en daarmee de beste kans lijkt te hebben een positieve verandering te brengen in prothesen in ontwikkelingslanden.

### Gebruikerseisen:

- Het productieproces dient niet meer dan 5 handelingen te bevatten
- In elke doelgroep moet iemand kunnen worden opgeleid met voldoende kennis van het proces
- De kwaliteit van de prothese moet niet van het productieproces afhankelijk zijn
- Het productieproces dient in een busje uitgevoerd te kunnen worden
- Het productieproces moet universeel zijn, zodat voor elke patiënt een koker kan worden aangemeten
- Het productieproces dient een koker te produceren die een goede pasvorm heeft, zodat deze pijnvrij gedragen kan worden
- Het productieproces moet vervolgaanpassingen overbodig maken

### Veiligheidseisen:

- Het productieproces dient geen schade aan te richten aan de omgeving
- Het productieproces dient geen schade aan te richten aan de gebruiker
- Het productieproces dient zodanig in een busje te kunnen worden vastgezet, dat hier veilig mee gereden kan worden

### Ergonomische eisen:

- Het proces dient de hoeveelheid energie te verbruiken dat in een bus te generen is
- Het proces dient een stompkoker te produceren die eenzelfde of betere kwaliteit heeft dan de huidige koker
- Het apparaat dat mogelijk gebruikt wordt voor de productie mag niet meer dan 500kg wegen

### Tijdseisen:

- Het productieproces dient een stompkoker aan te meten binnen een tijdsbestek van 40 uur
- Het proces dient een stompkoker te produceren die direct gedragen kan worden
- Het productieproces dient geen opleiding van 3 weken te vereisen



## Keuze op basis van lijst van eisen

De lijst van eisen is in tabel 3 met weegfactoren naar belangrijkheid van de eis verwerkt. Daarin worden 3 preconcepten geanalyseerd en met elkaar vergeleken. Uit de ontstane totaalscores kan een eindconcept worden geselecteerd.

Eis	Waarde Eis	Memory foam	Modular Socket System	Bamboe met gelliner	Plantenvezel met gelliner
Niet meer dan vijf handelingen	6	7	4	4	4
Makkelijke opleiding, nog geen drie weken	7	5	5	5	5
Er moet een goede pasvorm ontstaan, pijnvrij	8	8	8	9	9
Geen aanpassingen nodig	7	9	9	9	9
Weinig middelen nodig	9	7	4	5	5
Universeel proces/materiaal	9	10	10	8	8
Proces/materiaal veilig voor omgeving	7	9	9	9	9
Geen hoge kosten	8	8	7	8	8
Proces/materiaal samen niet meer dan 500 kg	7	8	8	8	8
Verbruikte energie Proces/materiaal te generen in busje	6	8	8	8	8
Aanmeten binnen 40 uur	10	10	10	6	6
Direct dragen na aanmeten	8	8	8	7	7
Kwaliteit beter dan huidig en niet afhankelijk van proces	8	7	7	7	7
Mag zijn duurzaamheid niet verliezen	7	8	8	6	7
<b>Totaal</b>		<b>864</b>	<b>811</b>	<b>756</b>	<b>763</b>

Tabel 3. Schematisch overzicht voor de analyse van de preconcepten.

## Het eindconcept: Memory foam

Uit voorgaande tabellen en voornamelijk de laatste kan worden geconcludeerd dat de rood omcirkelde eindscore van het preconcept 'memory foam' het beste alternatief is voor zowel materiaal als methode om protheses aanmeten en vervaardiging hiervan in ontwikkelingslanden.

Dit concept bereikt alle gestelde doelen:

- ✓ Het productieproces moet voor een hogere efficiëntie in hulpverlening zorgen
- ✓ De kwaliteit van leven moet dankzij een sneller productieproces minder sterk afnemen gedurende het proces
- ✓ Het productieproces moet voor lagere kosten zorgen
- ✓ De stompkoker moet zich kunnen aanpassen aan de veranderende stompvorm, zodat de nabehandeling korter is en de nabehandelingskosten lager zijn

Het zou zowel de casting als de vervaardiging van de complete prothese kunnen verzorgen. Om meer inzicht te geven in de mogelijkheden van dit materiaal, zijn er onderstaand nog enige toepassingen en eigenschappen uitgewerkt.

Memory foam kan worden gemaakt van geheugenhars en andere polymeren.

Kenmerkend voor geheugenhars is dat ze de mogelijkheid hebben vanuit een bepaalde vorm worden vervormt, hierin worden bevroren en gebruikt en weer kunnen terugkeren naar de basisvorm zonder enige geometrie te verliezen. Zo'n polymeer is in staat een grote verandering in modulus te ondergaan, wanneer de glastemperatuur wordt overschreden. Op deze temperatuur,  $T_g$  genoemd, is relatief groot herstel mogelijk en daardoor is er minder kracht nodig om het composiet te vervormen. Om het composiet terug te brengen naar de oorspronkelijke vorm moet de temperatuur opnieuw worden verhoogd. De koker zou op kamertemperatuur om de stomp gevormd kunnen worden en in deze staat worden opgeslagen als secundaire. Pas bij temperatuurverhogingen boven  $T_g$  zal de koker weer naar de primaire staat terugkeren.

Door verstevigende vezels toe te voegen aan matrices van geheugenhars kan deze eigenschap om terug te keren naar de oorspronkelijke vorm worden versterkt.

(Pleiger Kunststoff GmbH & Co, 2007) , (Radford, 2009)

Het materiaal voor de liner is voornamelijk gericht op de vorm genaamd 'structural memory foam'. Het is hoog elastisch en verkrijgbaar in een verschillende dichtheden, de dichtheid is in elk geval echter groter dan die van conventionele structural foam. De buitenkant is goed afgesloten en de kern heeft een meer open celstructuur dan de conventionele variant, waardoor het van goede dempende kwaliteit is. Structural memory foam wordt vervaardigd uit geheugenhars die wordt geschuimd met behulp van gastoevoer. Dit proces is zichtbaar in figuur 18.

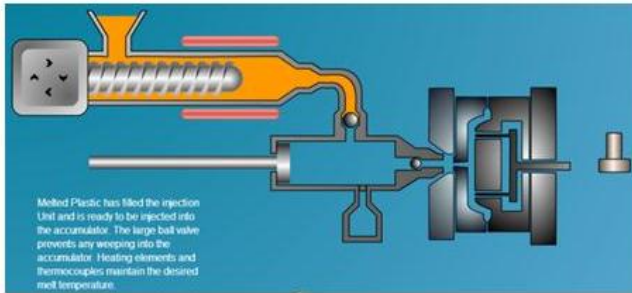
In de productie van structural foam zijn ook variaties bekend.

### - Het lage druk proces:

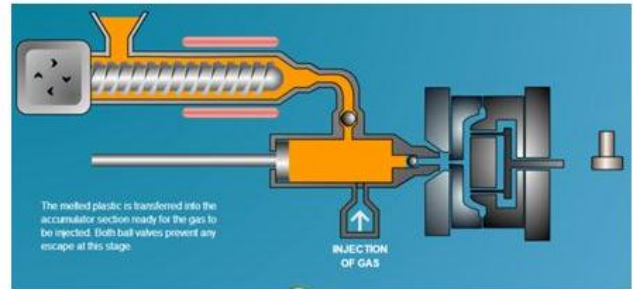
Er wordt aanbevolen bij dit proces speciaal toegewijde spuitgietmachines te gebruiken. Via deze machines wordt er gas bij het gesmolten plastic ingevoegd, wat gezamenlijk in een vorm wordt gespoten en zo het plastic schuimt. Met deze techniek kunnen bijna alle thermoplastische materialen worden geschuimd. Er kunnen grotere vormen geproduceerd worden dan met andere technieken. Het maximale gewicht van een vorm bedraagt 40kg met een omvang van een meter. Er blijft bij deze methode altijd een onregelmatige en ruwe oppervlakte over op de plaats van de spuitmond, dit kan door verven en opvullen worden opgelost.

### - Conventionele spuitgietmachines:

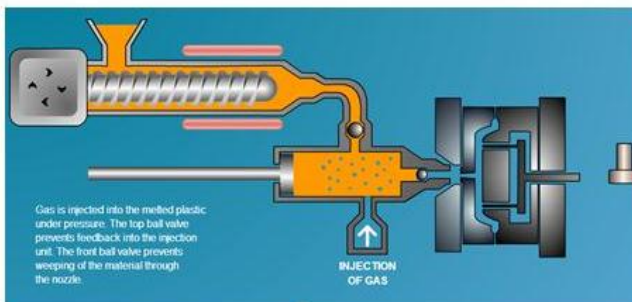
Door 'blowing agents' toe te voegen aan het materiaal kan dit met behulp van een standaard spuitgietmachine worden geschuimd. Door droge chemische 'blowing agents' te vermengen met de granulen van plastic, smelt het plastic dat wordt opgeslagen in het vat van de machine. Een gemeten lading wordt in de gietvorm geïnjecteerd. De hitte van het gesmolten plastic laat de blowing agents reageren, waardoor zich een gas vormt en op deze manier het plastic laat schuimen. (Hunt, 1933) In figuur 18 is de productie van structural foam zichtbaar.



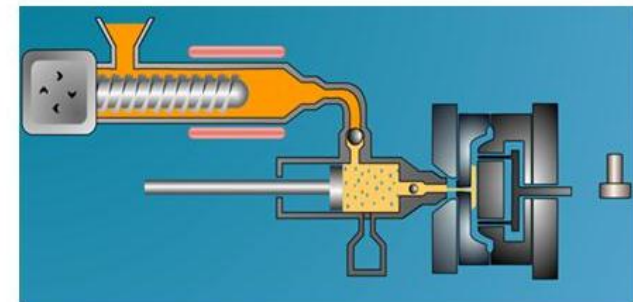
Stap 1. De gesmolten plastic staat klaar om geïnjecteerd te worden, een balletje blokkeert de uitgang. Het geheel wordt op smelttemperatuur gehouden dankzij de rode hitte elementen



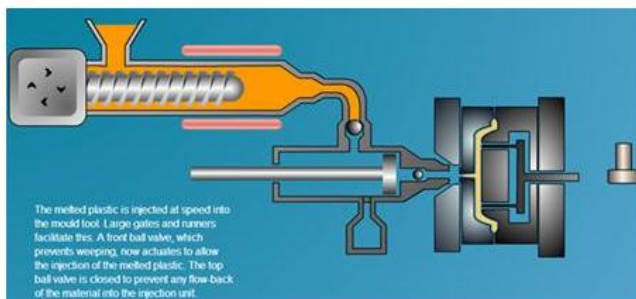
Stap 2. Het gesmolten plastic is verplaatst naar de accumulator, klaar voor de gas-injectie. Door blokkade van beide balletjes in beide uitgangen, wordt enige lekkage voorkomen



Stap 3. Het gas wordt onder druk geïnjecteerd. De balletjes voorkomen gezamenlijk dat er plastic terugstroomt of al door de spuitmond gaat.



Stap 4. De gesmolten plastic wordt op hoge snelheid in de gietvorm gespoten, dankzij de grote opening die ontstaat wanneer het balletje er ruimte voor maakt. Opnieuw voorkomt het andere balletje lekkage naar de ruimte met de hitte elementen.



Stap 5. De gasbolletjes zetten uit als gevolg van de lage atmosferische druk en vullen zo de gehele gietvorm. Zodra het materiaal hard en afgekoeld, opent de gietvorm en wordt de vorm uitgeworpen. De luchtige kern en de wanden die dikker zijn dan normaal zorgen voor een hoge stijfheid

Figuur 18. Het lage druk proces voor de productie van structural foam.

De belangrijkste voordelen van structural foam:

- Krasbestendig dankzij de hoge elasticiteit van de buitenkant
- Comfortabel en zacht dankzij de fijne poriën in de kern
- Scheurbestendig en elastisch, zelfs bij lage temperaturen
- Slijtvast
- Veelzijdig bruikbaar vanwege de verschillende dichtheden en in combinatie met andere materialen

## Conclusie

Door geheugenschuim te gebruiken als kernmateriaal, kan de prothesekoker grote deformaties ondergaan op kamertemperatuur. De buitenkant zou boven de glastemperatuur gevormd moeten worden en de binnenkant moet juist op kamertemperatuur functioneel zijn. Omdat het een materiaal is dat zich om de stomp heen kan vormen is het universeel toepasbaar, de onregelmatige oppervlakte van de stomp zal geen problemen opleveren. De zachte kern biedt een goed comfort aan de patiënt, aangezien het kan compenseren met volumeverandering van de stomp in de koker tijdens de loopbeweging. Daarnaast kan het compenseren met de volume verandering in de stomp die op zal treden, doordat het lichaam onbelaste delen afbreekt en delen zal versterken die kampen met veel belasting. Er is dan geen of minder sprake van vermindering van de pasvorm.

Dankzij het brede scala aan mogelijkheden en eigenschappen vanwege de variabele dichtheid en in combinatie met andere materialen zou zowel de liner als de koker uit dit materiaal vervaardigd kunnen worden. Door een product uit een en hetzelfde materiaal te vervaardigen hoeft het niet aan elkaar gekoppeld te worden zodat er geen zwakke plekken ontstaan, wordt het aantal handelingen vermindert, worden veel fabricagefouten voorkomen, is het product minder kwetsbaar en zullen er minder snel scheuren ontstaan. Door al het voorgaande lijkt dit een materiaal met veel potentie om de huidige methode te vervangen.

Dit concept vult als volgt de deelopdrachten in:

- ✓ Ontwerp een productieproces dat productie van een negatief van de stomp overbodig maakt
- ✓ Vindt een manier om nieuwe technieken toe te passen in een rijdend revalidatiecentrum
- ✓ Pas nieuwe materialen voor de prothese toe die direct werkzaam zijn als negatief en beschikbaar zijn in een derde wereld land
- ✓ Pas materiaal voor de stompkoker toe dat zich gaandeweg aan de stompvorm aanpast (Aanpassingen kosten veel tijd en geld, daarnaast komt het de prothesekwaliteit niet ten goede)
- ✓ Ontwerp een prothese die universeel toepasbaar is voor geamputeerde patiënten in een derde wereld land

Het geeft oplossingen voor alle deelopdrachten en realiseert daarmee een fabricagemethode voor een stompkoker in een derde wereld land. Een nadeel is wel dat dit materiaal niet voorradig is in ontwikkelingslanden en er is nog veel onderzoek vereist naar de exacte productie en sterkte van het materiaal.

Mocht het een groot probleem zijn dat memory foam niet voorradig is in ontwikkelingslanden, dan zou de methode genoemd 'Modular Socket System' een goed alternatief blijven. Een variabele in deze methode is de verstevigende vezel die samen met het giethars tussen de lagen wordt gegoten. Momenteel is dit de koolstofvezel, maar dit zou eventueel ook mogelijk zijn met de besproken planten- en bamboe-vezel. Deze twee vezels zijn voldoende voorradig in ontwikkelingslanden en hebben vermoedelijk genoeg kracht.

## Referenties

- Boutwell, E. S. (2012). Effect of prosthetic gel liner thickness on gait biomechanics and pressure. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 227-240.
- Coyle, S. D. (2010). Smart Nanotextiles: Materials and Their Application. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, 1-5.
- Desbiens-Blaisa, F. C.-E. (2012). New brace design combining CAD/CAM and biomechanical simulation for the. *Clinical Biomechanics*.
- Fouad, H. E. (2011). High density polyethylene/graphite nano-composites for total. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 1376–1383.
- Groot de, K. (1990). Kunststofimplantaten. *Nederlands Tijdschrift Voor Geneeskunde*.
- Haque, M. H. (2009). Physico-mechanical properties of chemically treated palm and coir fiber. *Bioresource Technology* 100, 4903–4906.
- Hunt, S. (1933). *The British Plastics Federation*. Opgehaald van <http://www.bpf.co.uk/>.
- Jönsson, S. C.-W. (2012). Osseointegration amputation prostheses. *Prosthetics and Orthotics International*, 190-200.
- Köhler, L. (2001). Natural Cellulose Fibers: Properties. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, 5944-5946.
- Lackey, W. (2001). Carbon-Carbon Composites. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, 952-966.
- Lendlein, A. K. (2005). Shape-memory Polymers. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, 1-9.
- Lin, C.-C. C.-H.-L.-C.-C. (2004). Effects of liner stiffness for trans-tibial prosthesis: a finite element. *Medical Engineering & Physics*, 1-9.
- Mandala, B. G. (2012). High-strength silk protein scaffolds for bone repair. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 7699–7704.
- Nakagaito, A. Y. (2004). The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites. *Applied Physics A*, 547–552.
- Negosant, i. L. (2012). VAC® therapy for wound management in patients with contraindications to surgical treatment. *Dermatologic Therapy*, 277-280.
- Neubrand, A. (2001). Functionally Graded Materials. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, 3407-3413.
- Opitz, R. G. (2012). Use of Finite Elements Analysis for a Weigh-in-Motion. *Sensors*, 6978-6994.

- Pleiger Kunststoff GmbH & Co, K. (2007, oktober 21). [http://www.pleiger-kunststoff.com/html/structural\\_foam1.html](http://www.pleiger-kunststoff.com/html/structural_foam1.html). Opgehaald van Pleiger Kunststoff GmbH & Co. KG.
- Pooja Singhal, P. R. (2012). Ultra Low Density and Highly Crosslinked Biocompatible Shape Memory. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics*, 724-737.
- Qiu, G. G. (2010). Quality of poultry litter-derived granular activated carbon. *Bioresource Technology*, 379–386.
- Radford, D. a. (2009). *Shape memory sandwich panels*. Edinburgh: International comittee on composite materials.
- Rånby, B. (2001). Natural Cellulose Fibers and Membranes: Biosynthesis. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, 5938-5943.
- Rosa, M. C. (2009). Effect of fiber treatments on tensile and thermal properties of starch/ethylene. *Bioresource Technology* 100, 5196–5202.
- Ruys, A. S. (2002, August 2). *Functionally Graded Materials (FGM) and Their Production Methods*. Opgehaald van Amazon: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1592>
- Tan, T. R. (2011). Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. *Acta Biomaterialia*, 3796–3803.
- Tana, T. R. (2011). Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. *Acta Biomaterialia*, 3796–3803.
- Williamsa, J. A. (2005). Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated. *Elsevier: Biomaterials* , 4817–4827.
- Xu, H. L.-H.-J.-M. (2012). Easy Alignment and Effective Nucleation Activity of Ramie Fibers in. *Biopolymers*.