

Rigidized Inflatable Structures

An innovative production method for structurally optimized elements

STAN VAN DIJCK & JOOST VAN DE KOPPEL



RIGIDIZED INFLATABLES

An innovative production method for structurally
optimized section active structure systems

AFSTUDEER COMMISSIE

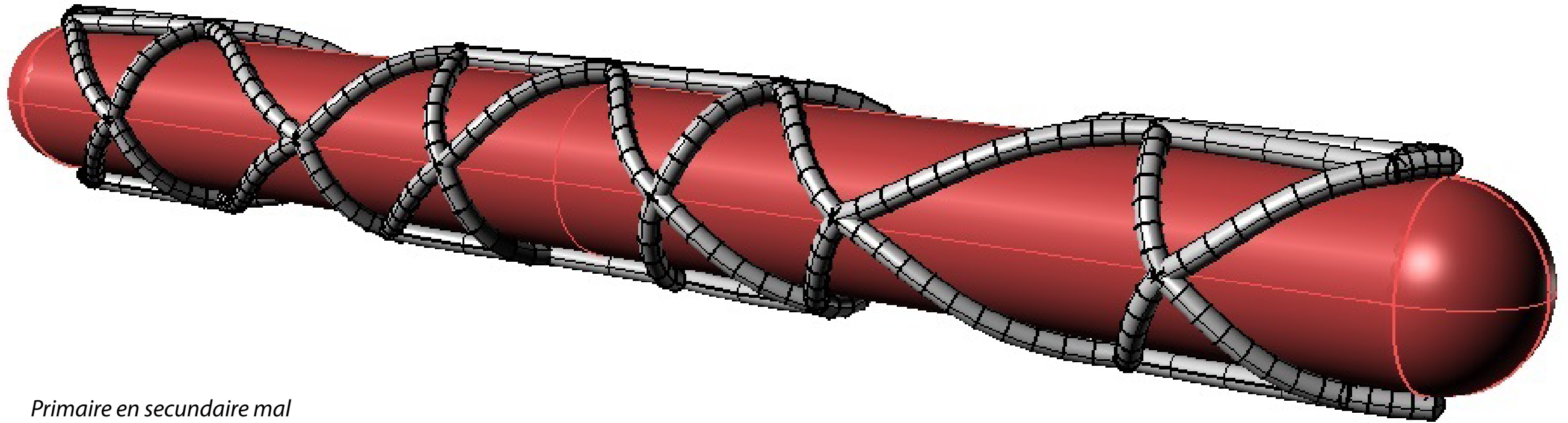
prof.dr.ir. J.J.N. Lichtenberg
ir. A.D.C. Pronk
ir. A.P.H.W. Habraken
ass. prof. P. von Buelow

Technische Universiteit Eindhoven
Technische Universiteit Eindhoven
Technische Universiteit Eindhoven
University of Michigan

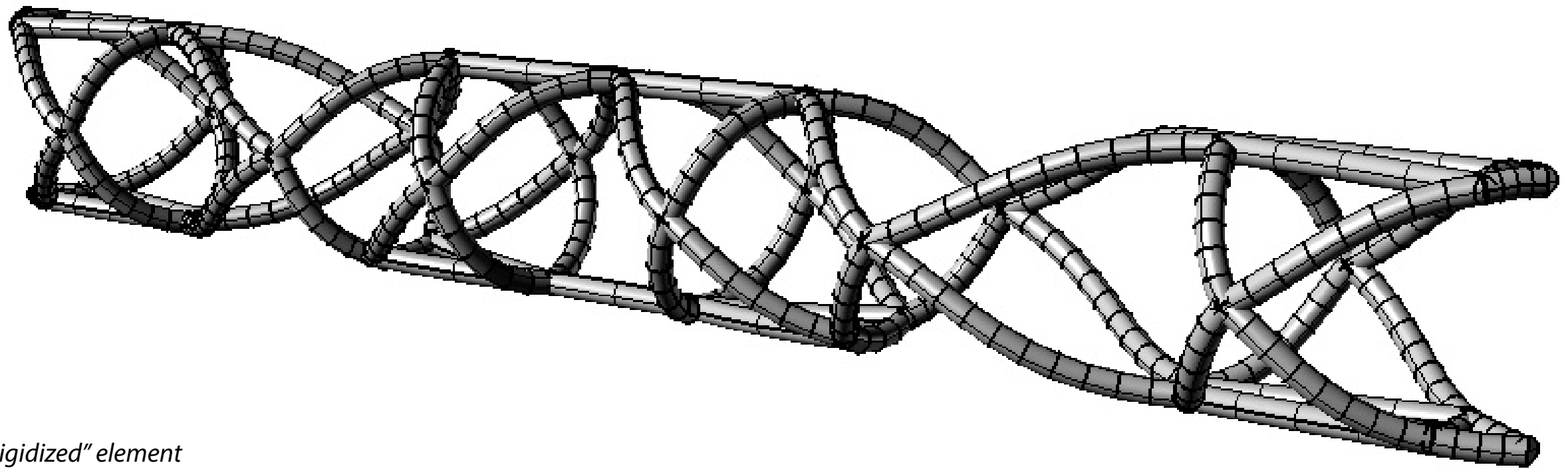




Secundaire mal



Primaire en secondaire mal



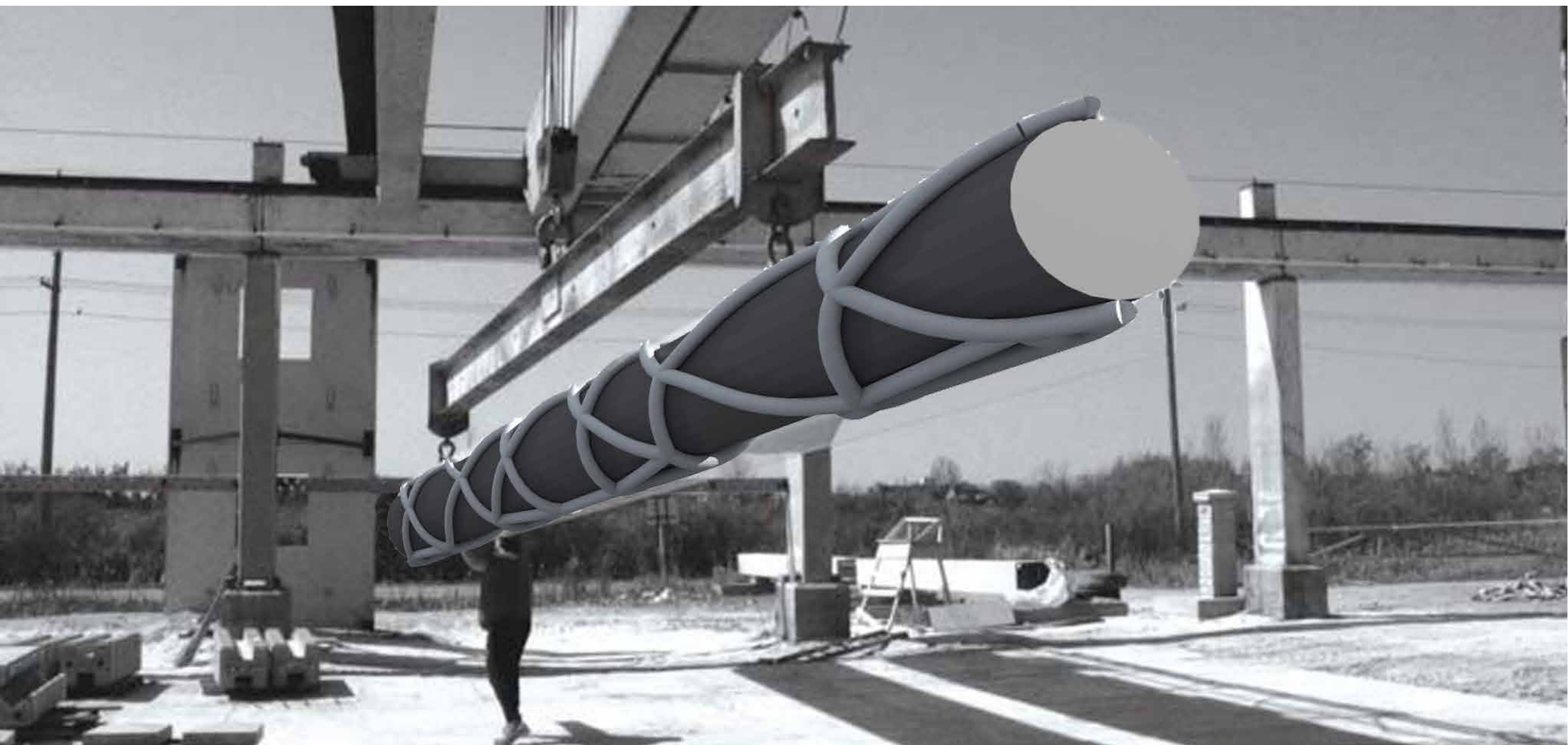
"Rigidized" element



Toepassing als shelter



Toepassing als dragend element in een brug



Toepassing als dragend element in traditionele bouw

INHOUD

fase

Probleem definitie fase

1. Onderzoeksopzet

A

Onderzoeks fase

2. Constructieve optimalisatie

3. Pneumatische constructies

4. Verharding methodes

5. Synthese

B

Ontwikkelings fase

6. Schaal modellen

7. Prototype

C

Conclusie & aanbevelingen

Vragen

ONDERZOEKS OPZET



De bouw is verantwoordelijk voor 50% van al het grondstof gebruik op aarde (*Europese commissie 2011*)

Constructieve optimalisatie

- Kan tot 40 % lichtere elementen leiden dan conventionele elementen van gelijke grote (*West 2010*)
- Besparingen in eigen gewicht verminderen de belasting op andere constructieve elementen (*West 2006*)

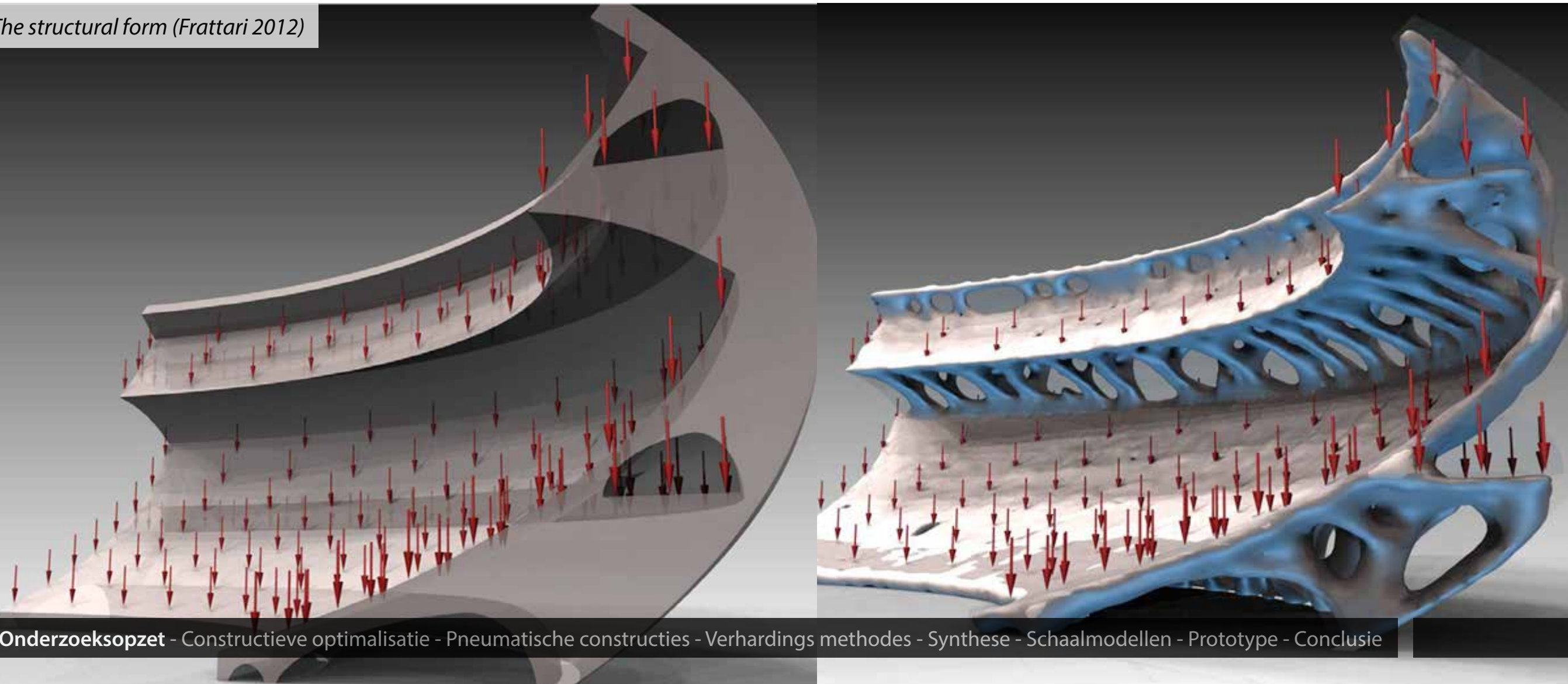
Uitputting van grondstoffen



Constructieve optimalisatie

- Het genereren van elementen met optimale constructieve eigenschappen en een zo laag mogelijk eigen gewicht (*Kumar 1993*)
- Minimaliseren van het eigen gewicht en het maximaliseren van de stijfheid (*Frattari 2012*)

The structural form (*Frattari 2012*)



Implementatie bedreigingen

- Bestaande productie methoden focussen op rechthoekige, platte en gelijkmatige doorsneden
- Niet vanwege de constructieve efficiëntie maar vanwege de productie eenvoud (*Cauberg et al. 2008*)

Morfologie van de traditionele draag constructie



Implementatie kansen

- Het gebruik van “fabric formwork”
 - 100 tot 300 keer lichter dan traditionele bekisting systemen
 - Vouwbaar
- Verminderd transport, grondstrof gebruik, embodied energy

“Fabric formwork” door Mark West



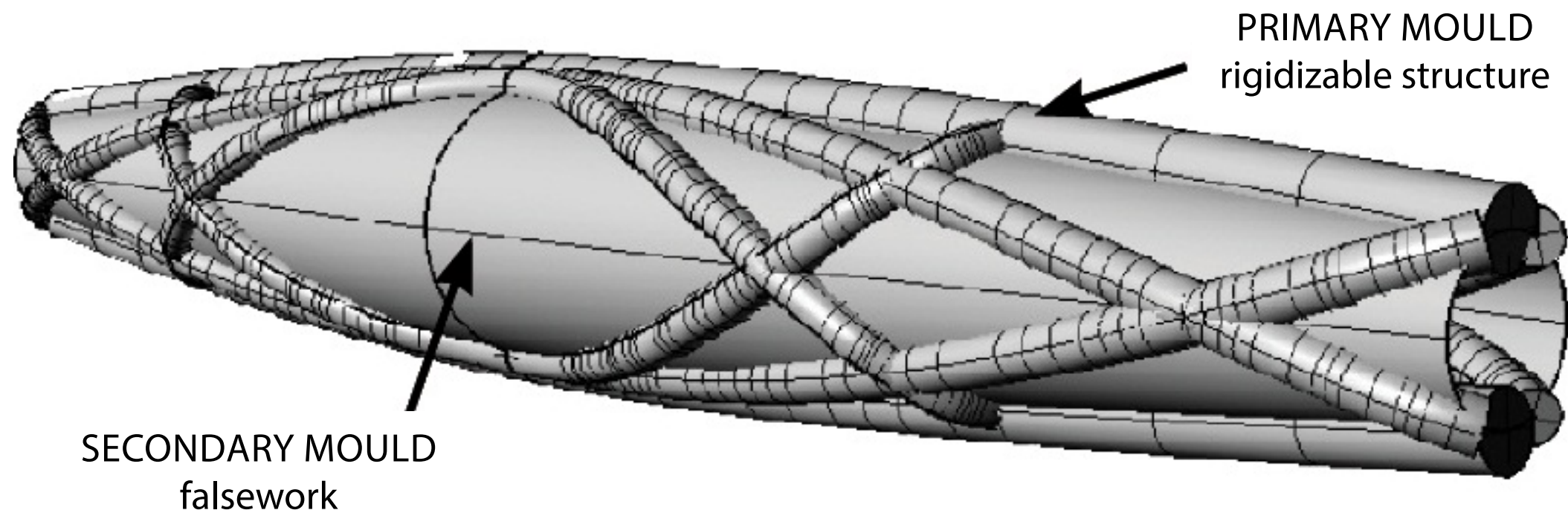
“Fabric formwork” bedreigingen

- Vaak grote hulpconstructie nodig,
- Tot nu toe alleen gebruikt voor 2D constructies



Het gebruik van een opblaasbare constructie als bekisting

- Focus ligt op 3D constructies waarbij de hulpconstructie ook opblaasbaar is
- Het gebruik van vorm actieve principes om een doorsnede actieve constructie vector actief te maken



Concept

Classificatie van constructie systemen (Engel 1997)

- Vorm actief



- Vector actief



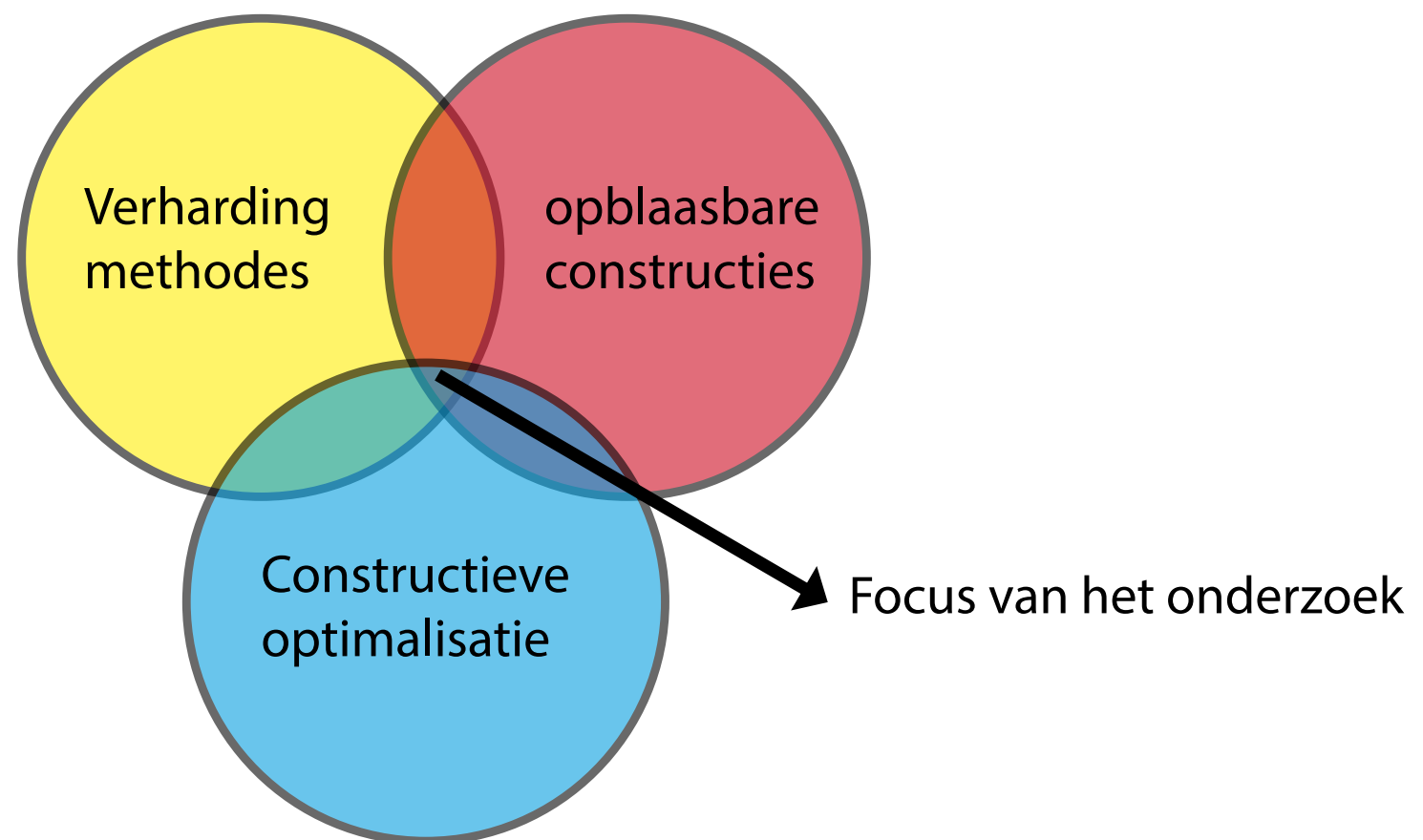
- Doorsnede actief



- Oppervlakte actief



Het doel is om een productie methode te ontwikkelen voor **constructief ge-optimaliseerde** doornsneede actieve constructie systemen door het gebruik van een **verhardbare opblaasbare constructie**



Venn diagram met daarin de focus van het onderzoek

Hoofdvraag:

Op welke wijze kan een productie methode voor constructief geoptimaliseerde doorsnede actieve constructie systemen worden gerealiseerd waarbij gebruik wordt gemaakt van een verhardbare opblaasbare constructie?

RQ1

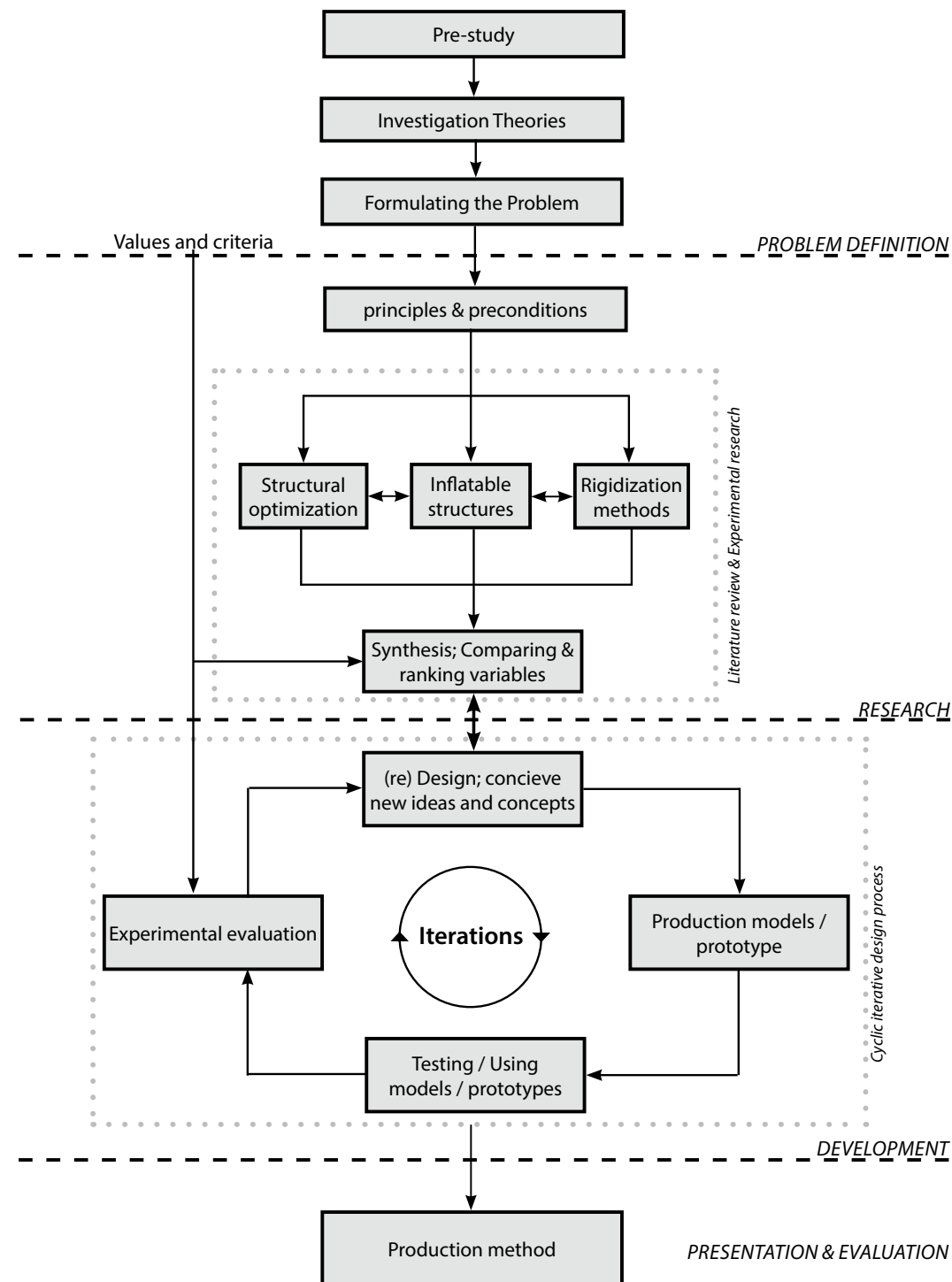
Welk constructief geoptimaliseerde doorsnede actief constructie systeem kan het beste worden gebruikt als case?

RQ2

Op welke manier kan een opblaasbare constructie worden gebruikt als hulpconstructie voor het produceren van constructief geoptimaliseerde doorsnede actieve elementen?

RQ1

Welke verhardings methode is het meest geschikt voor het produceren van de case verkregen in RQ1?



Probleem definitie fase

1. Onderzoeksopzet

Onderzoeks fase

2. Constructieve optimalisatie

3. Pneumatische constructies

4. Verharding methodes

5. Synthese

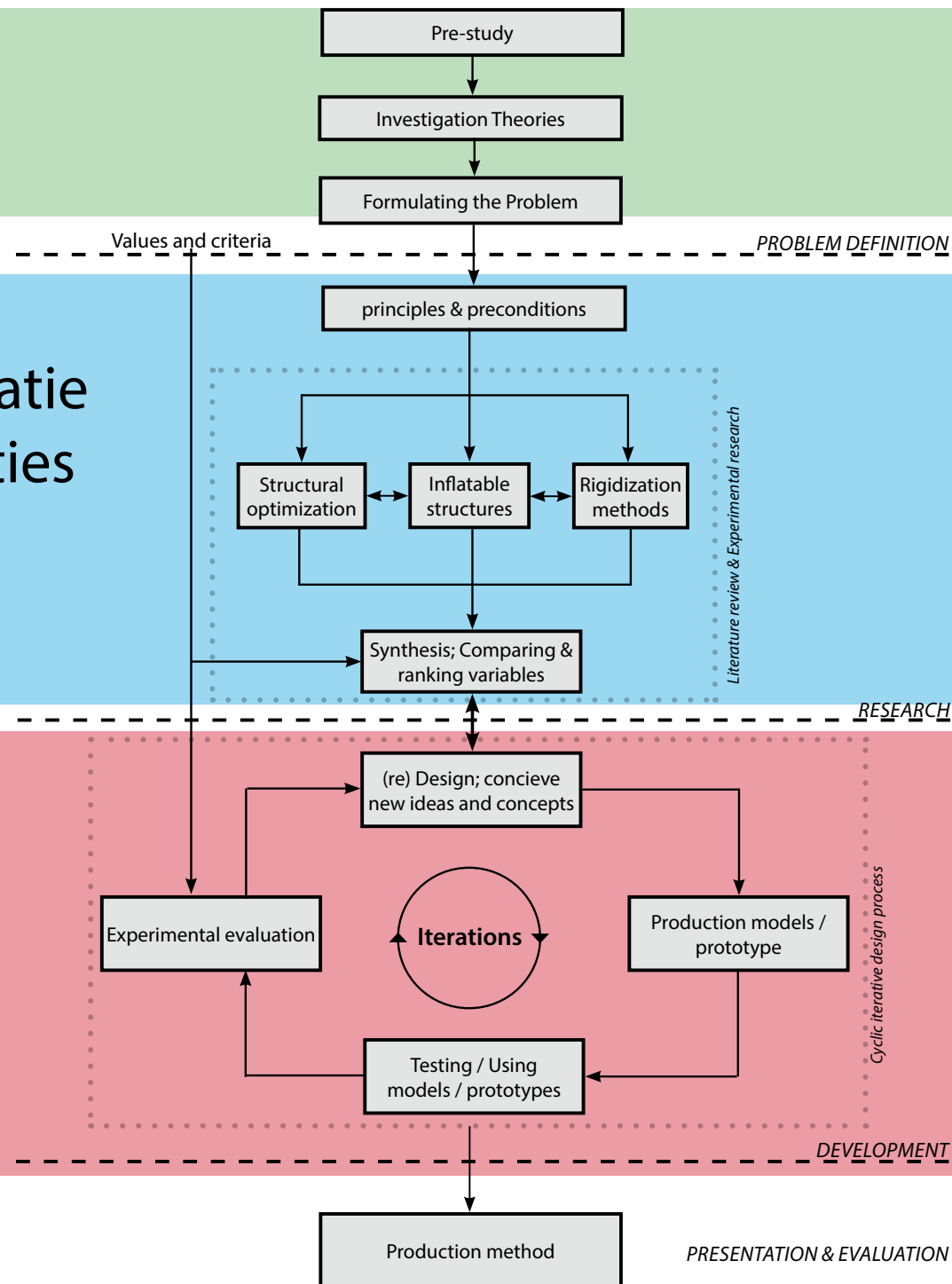
Ontwikkelings fase

6. Schaal modellen

7. Prototype

Conclusie & aanbevelingen

Vragen





B

RQ 1

Welk constructief geoptimaliseerde doorsnede actief constructie systeem kan het beste worden gebruikt als case?

SRQ 1.1

Wat zijn de grondbeginselen van constructieve optimalisatie?

SRQ 1.2

Wat zijn de morfologische eigenschappen van constructief geoptimaliseerde doorsnede actieve constructie systemen?

SRQ 1.3

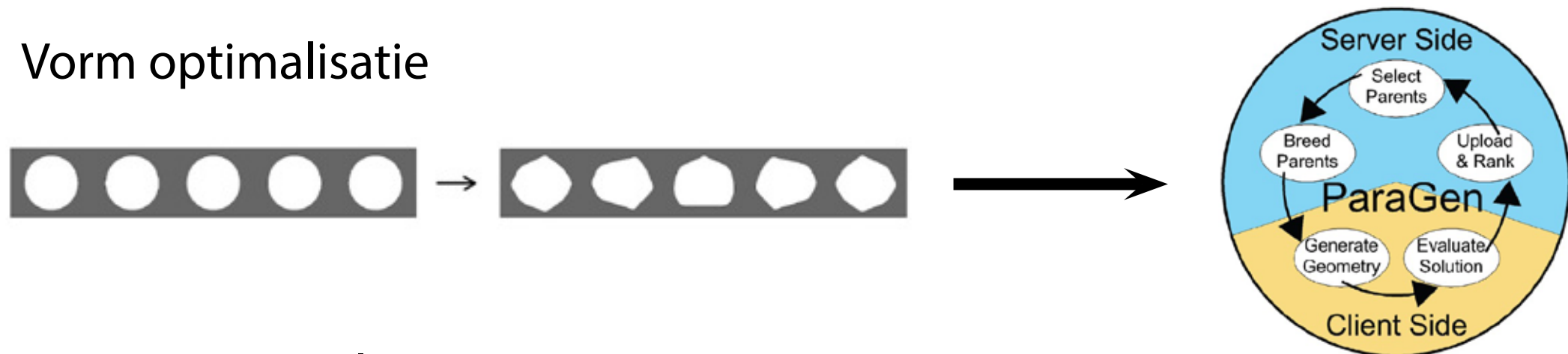
Welke van de constructief geoptimaliseerde doorsnede actieve constructie systemen geeft deze morfologische eigenschappen het best weer?

3 categoriën: (*Christensen & Klarbring 2009; Chapman 1994; Olason & Tidman 2010*):

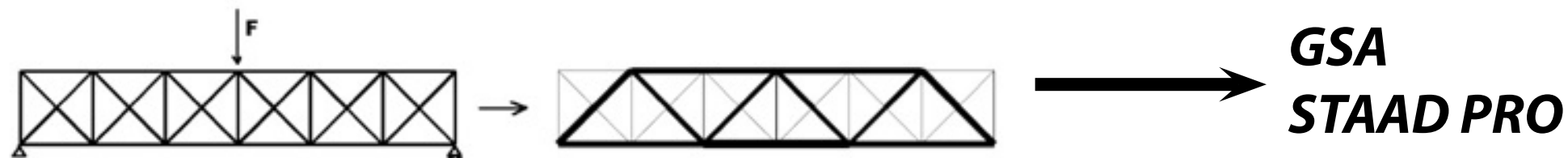
- Topologie optimalisatie



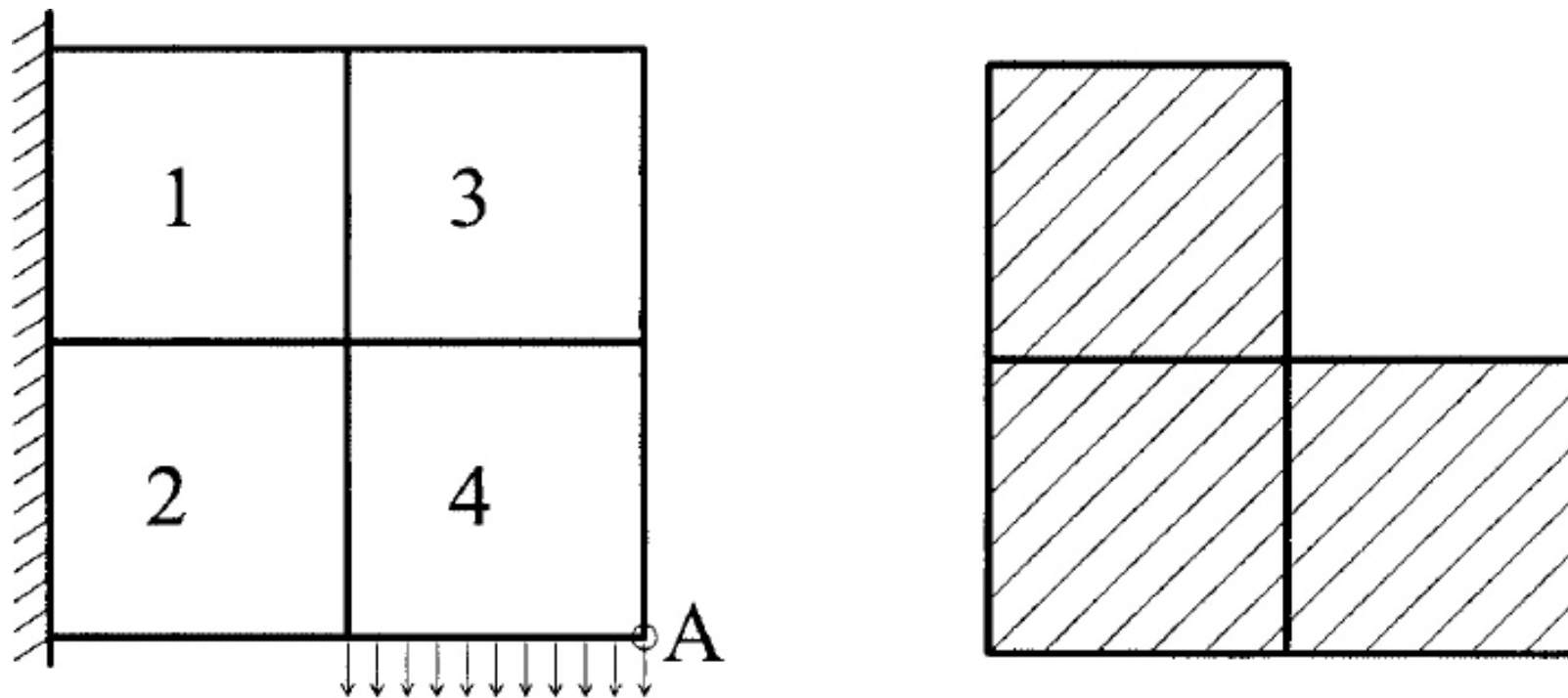
- Vorm optimalisatie



- Grootte optimalisatie



Het vinden van de optimale topologie van een ruimte onder invloed van bepaalde eisen en randvoorwaarden (*Chapman 1994*)



Simpel topologie optimalisatie probleem (Rozvany 2001)

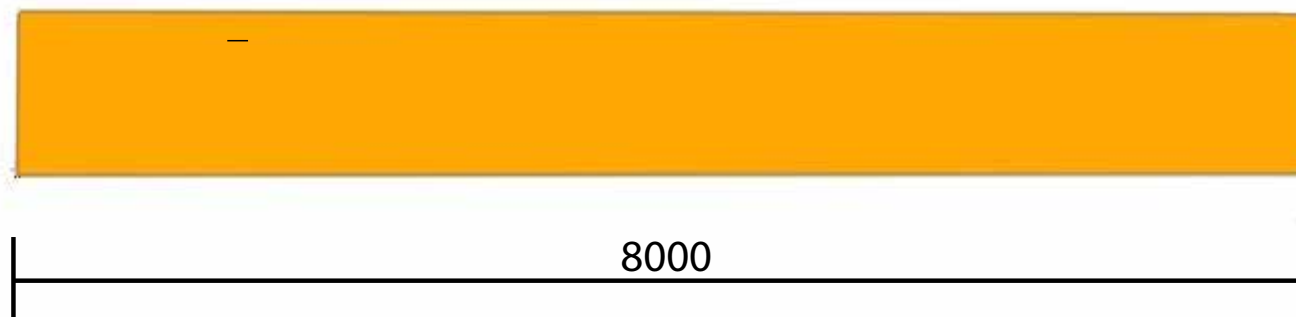
Parameter studie m.b.v. Inspire 9.0 op de 4 doorsnede actieve systemen;

- Balk constructies
- Frame constructies
- Balkrooster systemen
- Plaat constructies

	Constraint	Value			
P1	Mass target	20	40	60	
P2	Material	concrete	foam	steel	
P3	Load	point		distributed	
P4	Support type	hinged		fixed	
P5	Support place	none	plane	edge	point
P6	Symmetry	none	symmetric	cyclic	cyclic symmetric
P7	Draw direction	single draw	split draw	stamping	
P8	Frequency target	none	maximum	minimum	
P9	Thickness control	none	minimum	minimum + maximum	
P10	Gravity	on		off	

Morfologisch overzicht

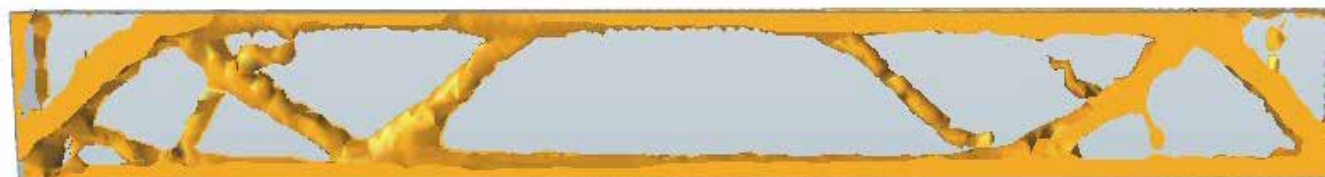
1. Bepalen ontwerp ruimte



	PARAMETER	VALUE
Mass target	P1	☒ ☐ ☐
Material	P2	☐ ☒ ☐
Load	P3	☐ ☒
Support type	P4	☒ ☐
Support place	P5	☐ ☒ ☐
Symmetry	P6	☒ ☐ ☐ ☐
Draw direction	P7	☒ ☐ ☐ ☐
Frequency target	P8	☒ ☐ ☐
Thickness ctrl	P9	☒ ☐ ☐
Gravity	P10	☒ ☐

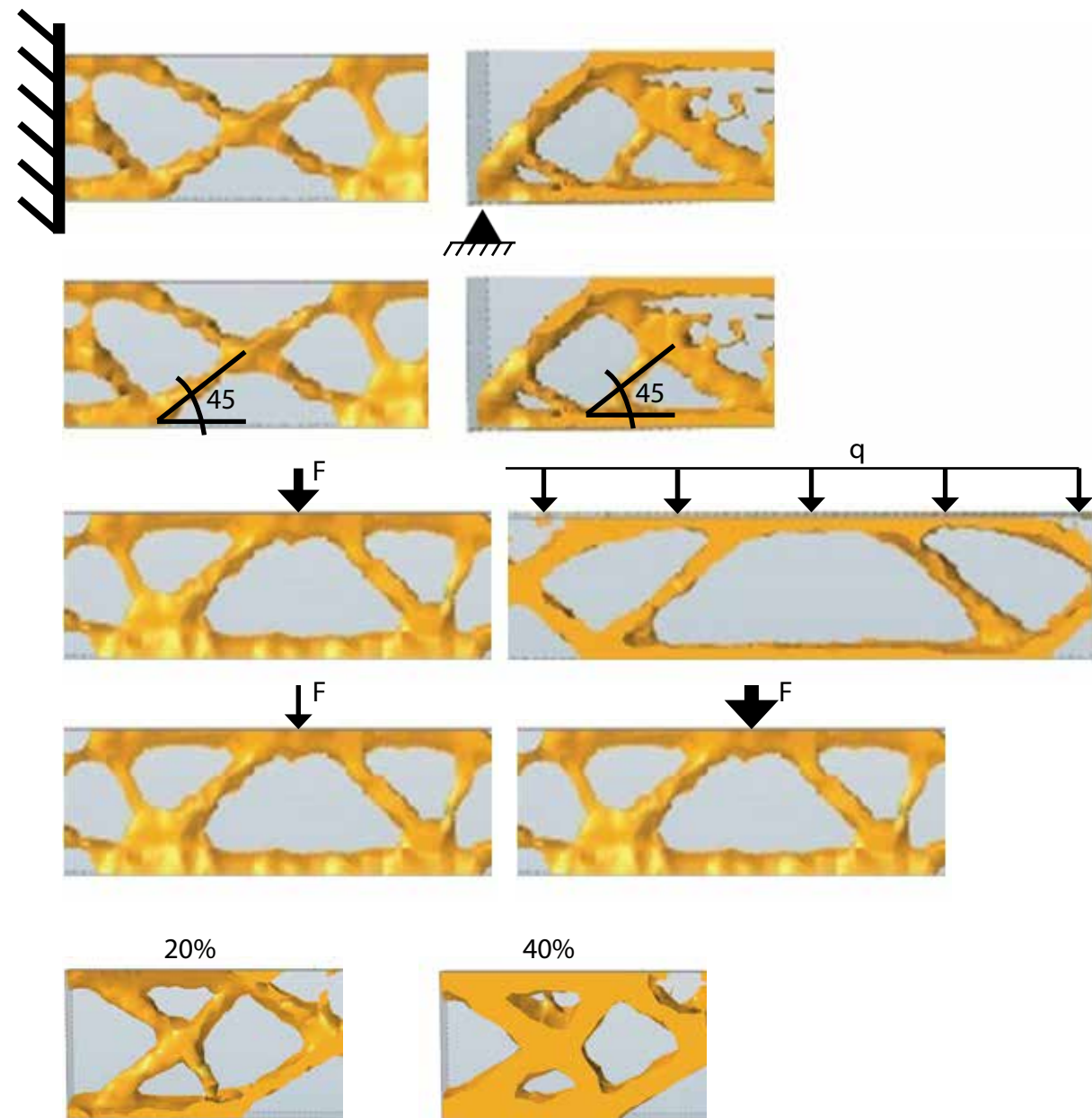
2. Bepalen eisen, beperkingen en randvoorwaarden

3. Topologie optimalisatie



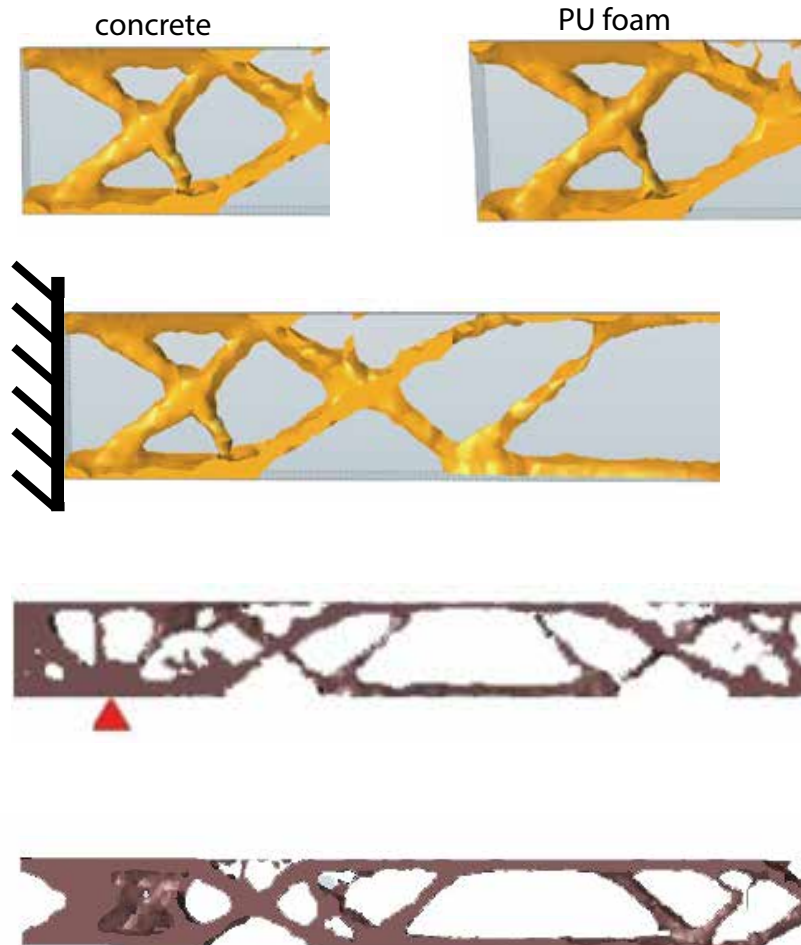
Algemene morfologische eigenschappen

- Type oplegging
- Staven sluiten aan onder een hoek van 45°
- Q-last of punt last
- Grootte van de kracht
- “Mass target”



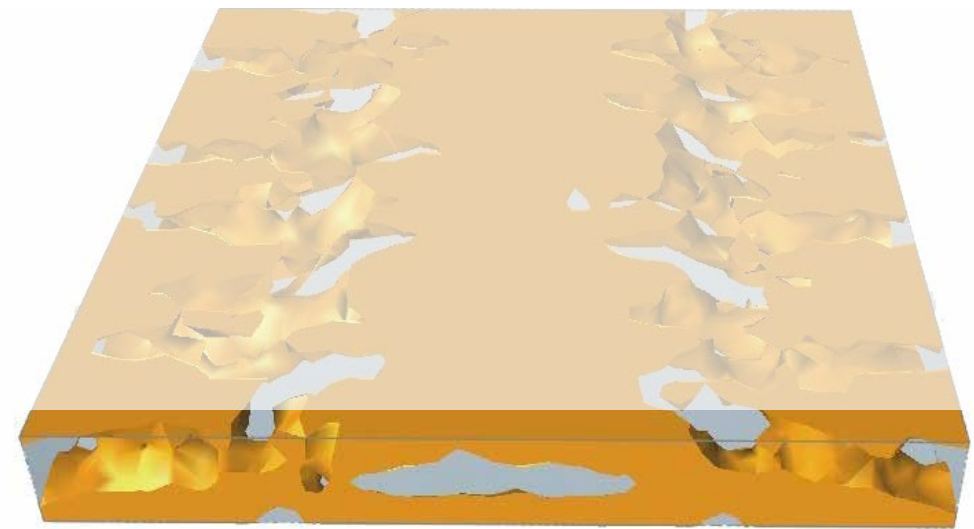
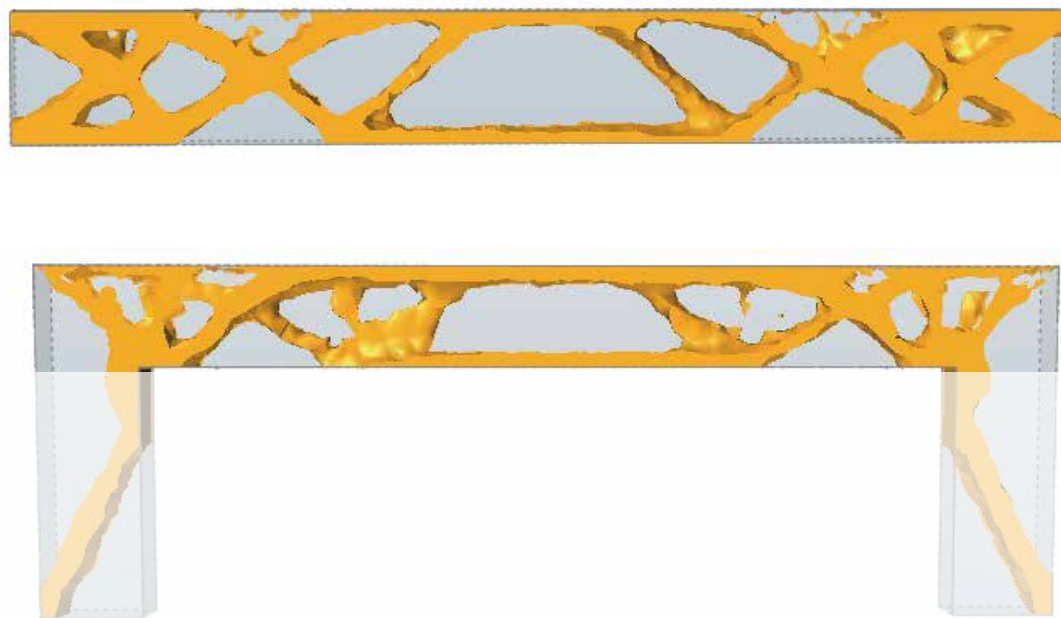
Algemene morfologische eigenschappen

- Materiaal eigenschappen
- Inklemming stabiel
- Continue constructies
- Slankheid



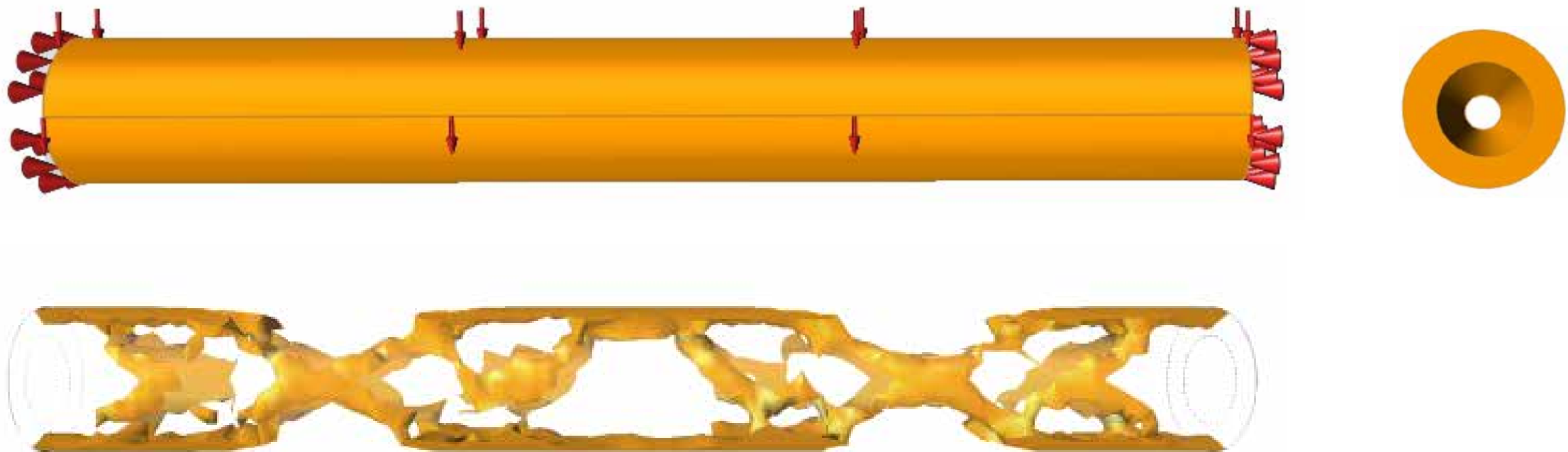
Algemene morfologische eigenschappen

- Balk constructies zijn de basis voor alle andere geoptimaliseerde doorsnede actieve systemen
- Geoptimaliseerde balk constructies bezitten de meeste van de algemene morfologische eigenschappen



Geoptimaliseerde balk, frame en plaat

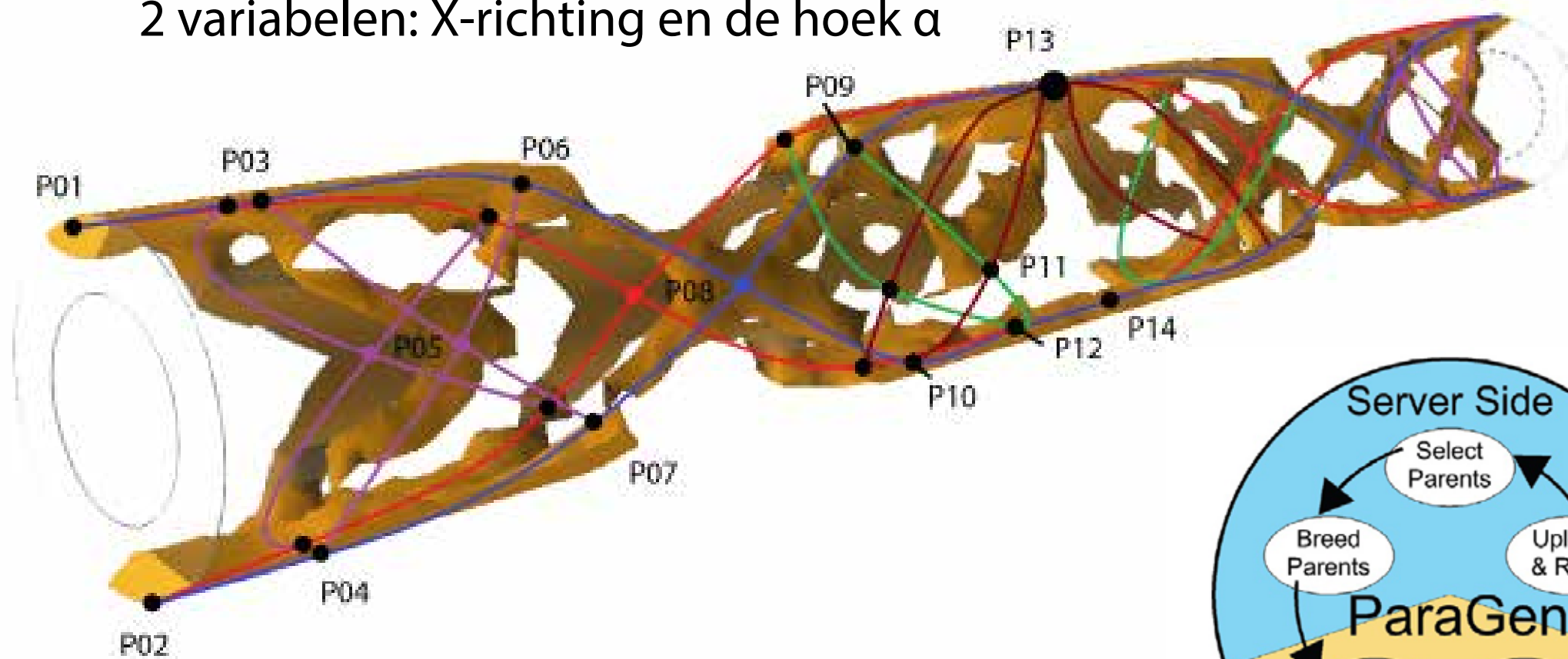
Optimalisatie van de ontwerp ruimte m.b.t. opblaasbare constructies



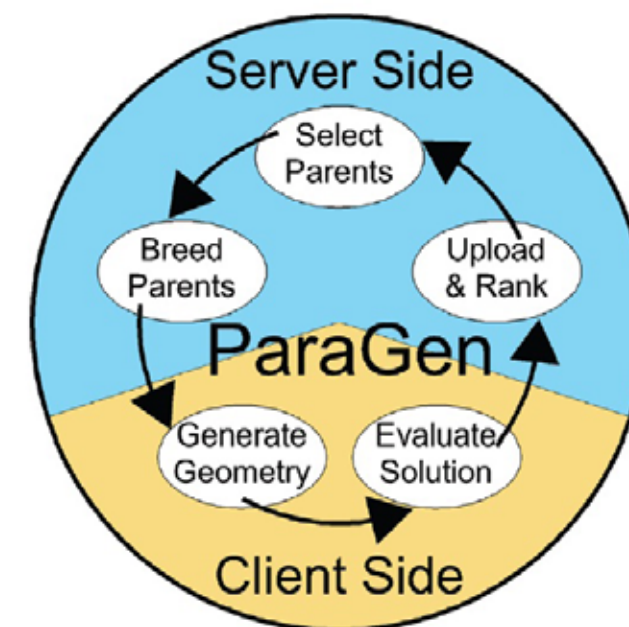
Optimalisatie m.b.t. de productie methode

ParaGen onderzoekt parametrische geometrieën op basis van bepaalde presentatie eisen

- Parametrisch model gebaseerd op Inspire model
2 variabelen: X-richting en de hoek α



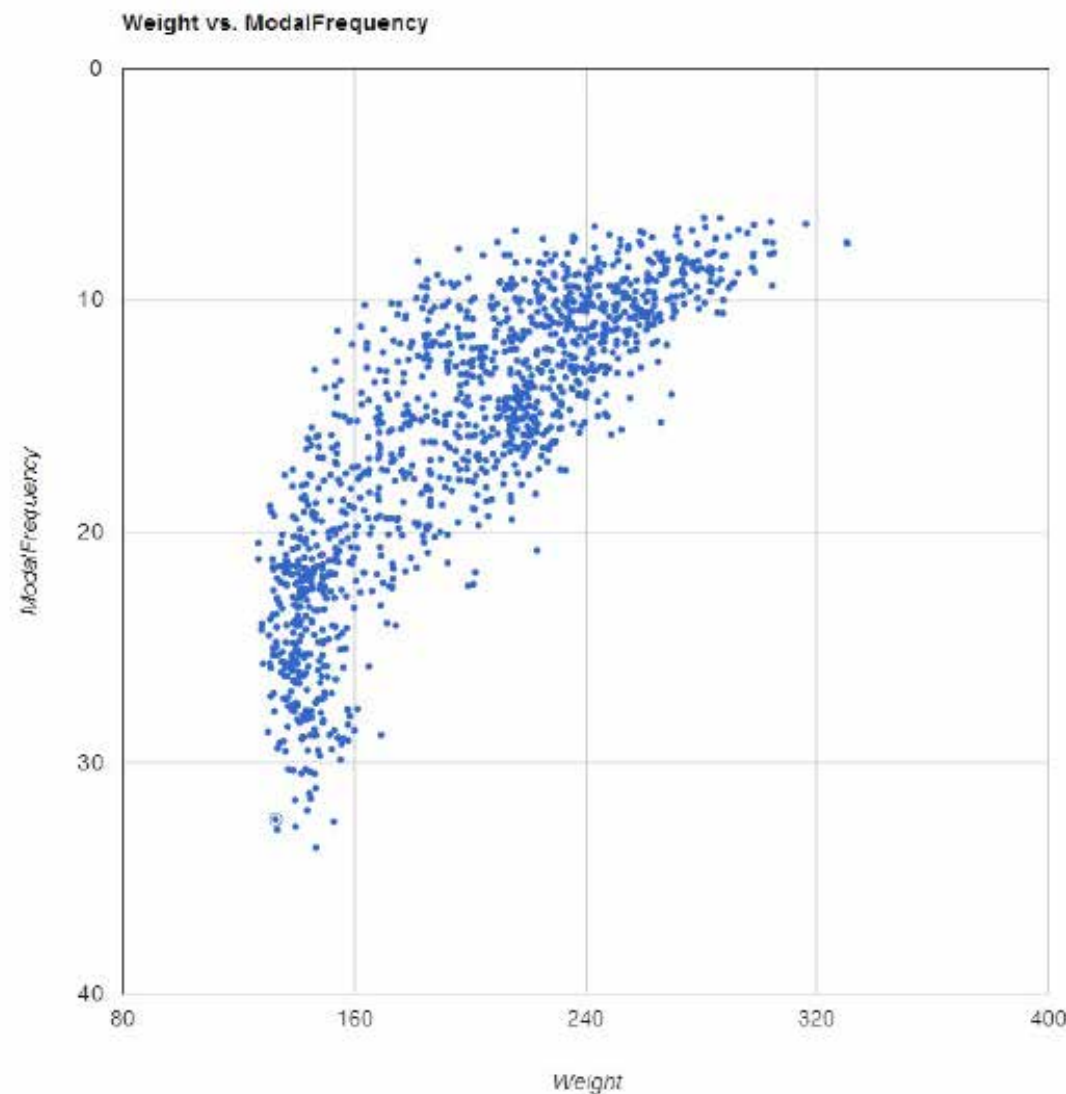
Basis van het parametrisch model



Paragen Cyclus

ParaGen creëert een populatie algoritmisch gebaseerd op een “fitness function”

→ Laagste gewicht met hoogste stijfheid: **hoogste specifieke stijfheid**

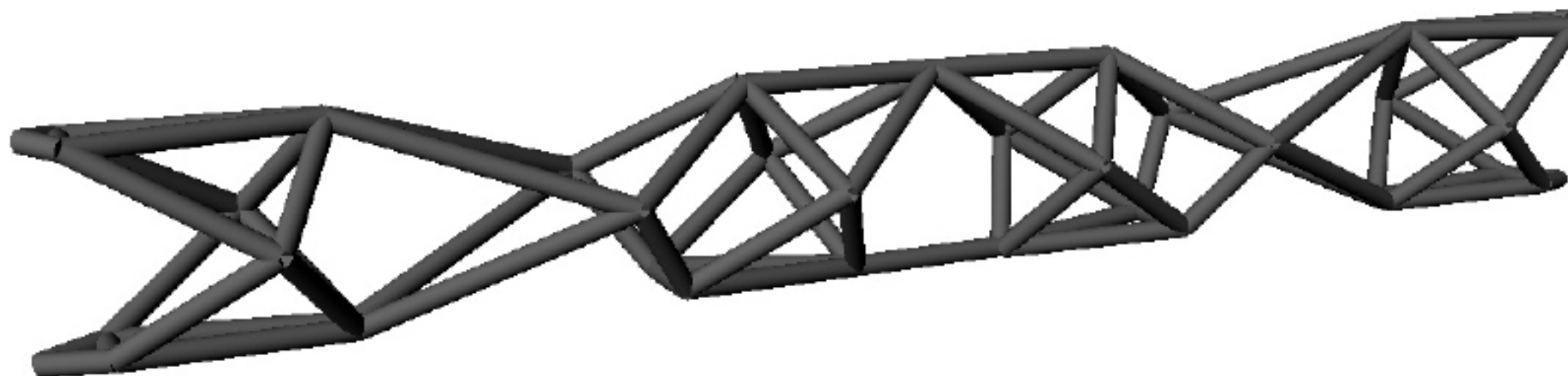


Scatter plot met gewicht vs stijfheid

Best presterende oplossing: ID_1269



Origineel lijn model met ID_1269



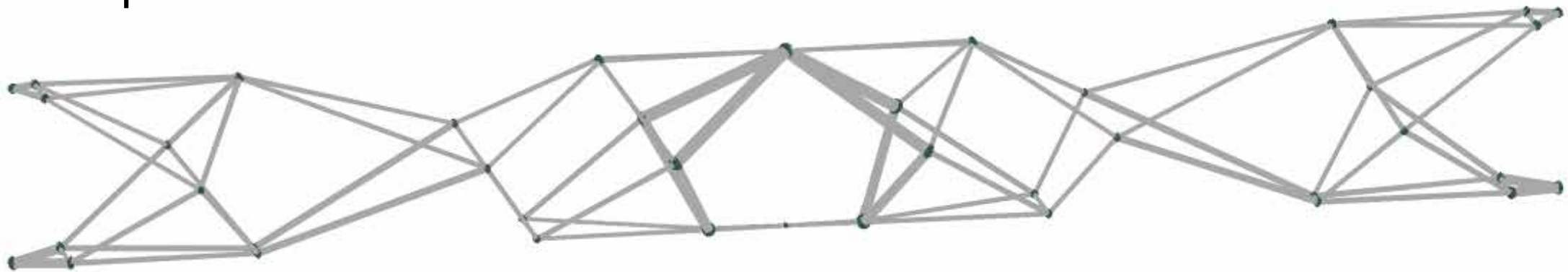
Isometrie van ID_1269

- Grootte optimalisatie bepaalt de staafdiameter en de wanddikten van de staven
- De prestaties van de oplossingen in Paragen zijn gebaseerd op lineaire staven, het uiteindelijke model zal echter uit gekromde staven bestaan.
- Constructieve analyses zijn uitgevoerd met Staad Pro en GSA, in verschillende stappen van lineaire stalen staven model naar gekromde composiet staven model.

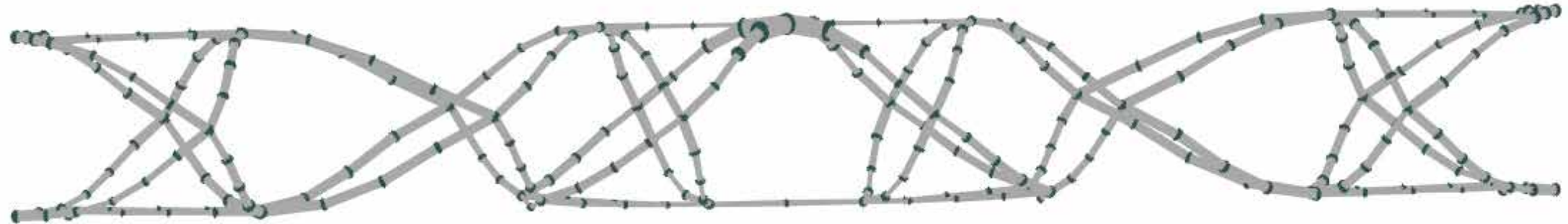
	Materiaal	Staad Pro	GSA	Schaalmodel
Lineair	Staal	✓	✓	
	Beton			
	Composiet	✓		
Gekromd	Staal	✓	✓	
	Beton	✓	✓	✓
	Composiet	✓	✓	

Tabel: Uitgevoerde constructieve analyses

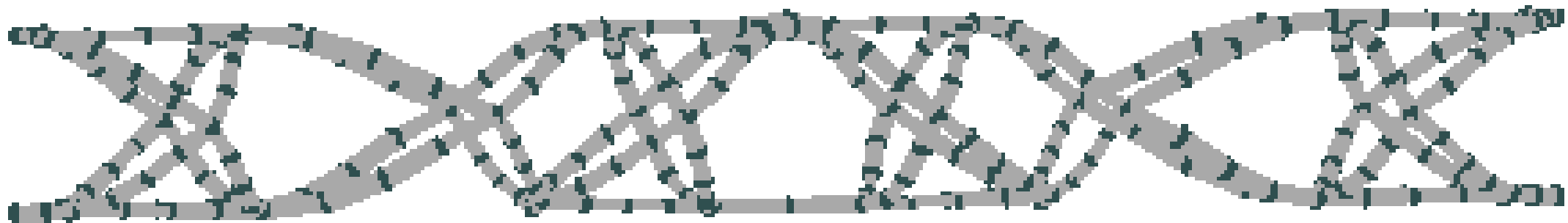
- D.m.v. een iteratief proces met een non-lineaire analyse in Staad Pro worden de staven van het model geoptimaliseerd op grootte voor het opnemen van een puntlast van 50 kN in het midden



Grootte geoptimaliseerd lineaire stalen staven model



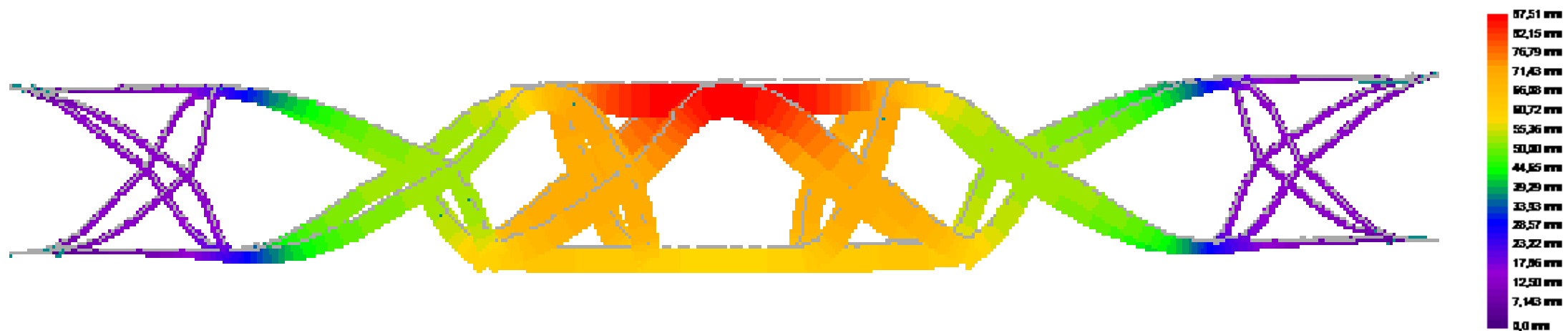
Grootte geoptimaliseerd gekromde stalen staven model



Grootte geoptimaliseerd gekromde composiet staven model

Constructieve analyse van composiet model geeft volgende prestaties:

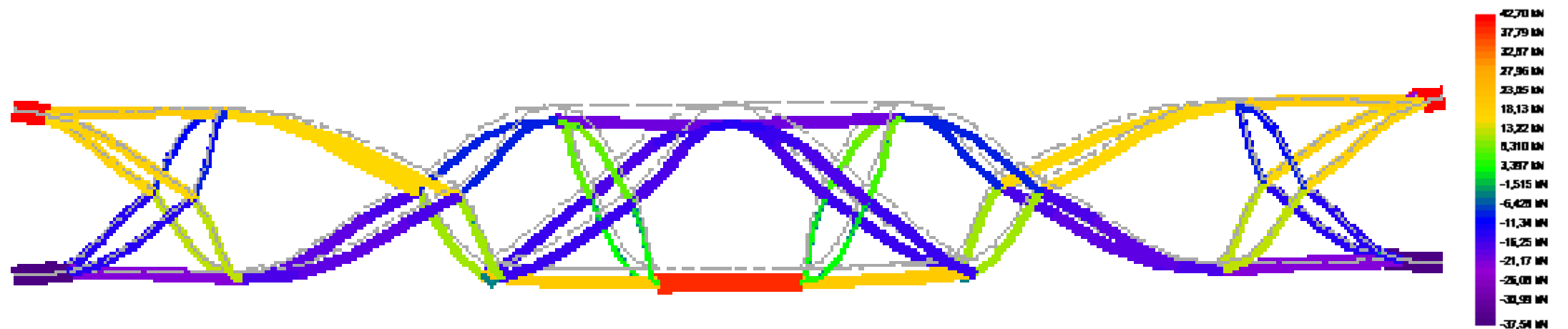
- Gewicht: 165,81 kg
- Bezwijkkraft: 50 kN
- Hoogste frequentie: 34,943 Hz
- Maximale vervorming: 87,51 mm



Vervorming van ligger

Constructieve analyse van composiet model geeft volgende prestaties:

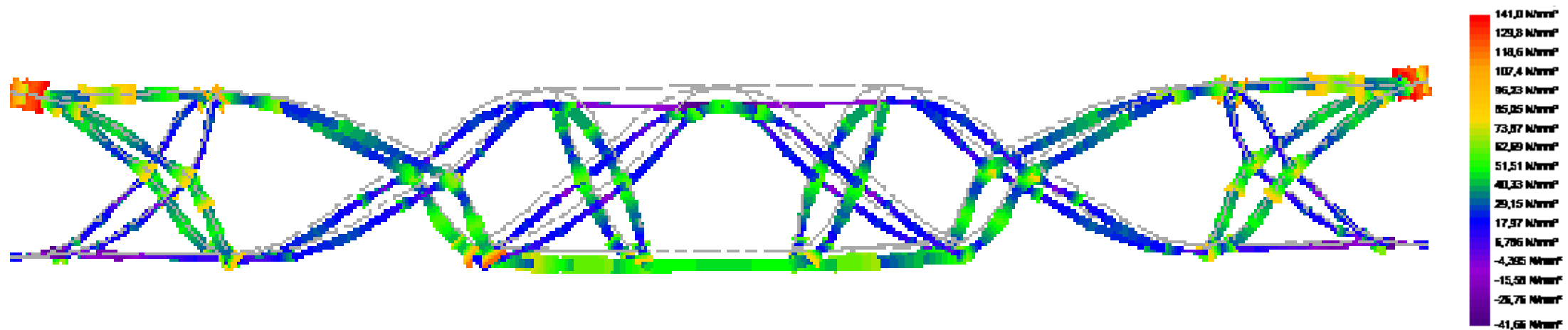
- Gewicht: 165,81 kg
- Bezwijkkraft: 50 kN
- Hoogste frequentie: 34,943 Hz
- Maximale vervorming: 87,51 mm
- Maximale axiale kracht: 42,70 kN



Axiale kracht in de ligger

Constructieve analyse van composiet model geeft volgende prestaties:

- Gewicht: 165,81 kg
- Bezwijkkraft: 50 kN
- Hoogste frequentie: 34,943 Hz
- Maximale vervorming: 87,51 mm
- Maximale axiale kracht: 42,70 kN
- Maximale gecombineerde stress: 150,4 N/mm²



Gecombineerde stress in de ligger

Constructieve analyse van composiet model geeft volgende prestaties:

- Gewicht: 165,81 kg
- Bezwijkkracht: 50 kN
- Hoogste frequentie: 34,943 Hz
- Maximale vervorming: 87,51 mm
- Maximale axiale kracht: 42,70 kN
- Maximale gecombineerde stress: 159,4 N/mm²

Conventionele gewapende betonnen ligger met gelijke overspanning:

- b x h: 300 x 800 mm
- Gewicht: 4608 kg
- Bezwijkkracht: 811 kN

Geoptimaliseerde ligger relatief 71% sterker

Conclusies:

- Verschillen in prestaties voornamelijk waarneembaar in de doorbuiging, deze neemt toe door de gekromde vorm en verschillende materiaaleigenschappen
- Door de toegepaste kracht wil de ronde balk vervormen in een ovale vorm
- Door de grootte optimalisatie zijn er nauwelijks stresspieken, en is de stress over de balk gelijkmatig verdeeld



RQ2

Op welke manier kan een opblaasbare constructie worden gebruikt als hulpconstructie voor het produceren van constructief geoptimaliseerde doorsnede actieve elementen?

SRQ 2.1

Aan welke eisen, randvoorwaarden en eigenschappen moeten opblaasbare constructies voldoen

SRQ 2.2

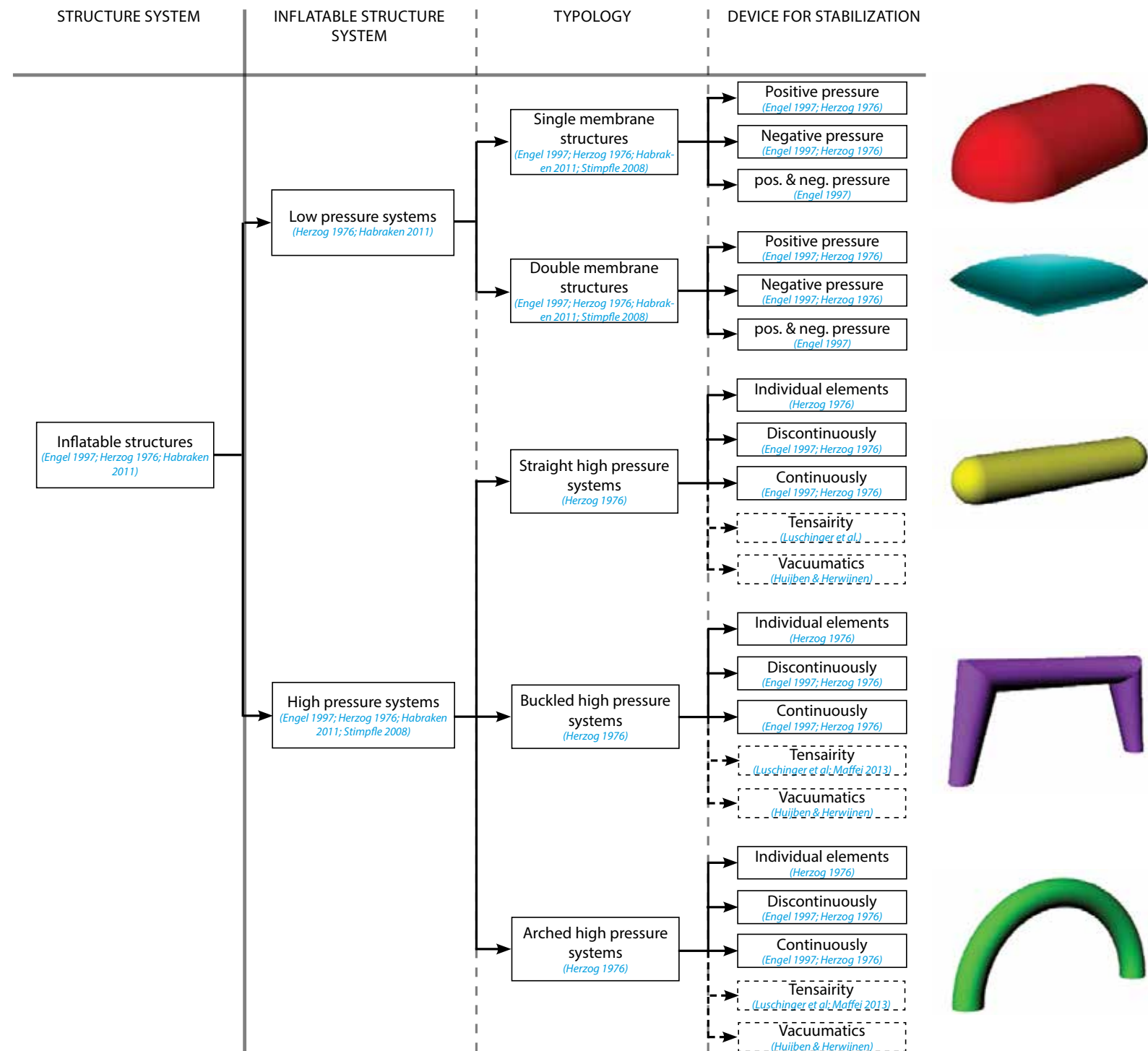
Welke typologieën van opblaasbare constructies bestaan er?

SRQ 2.3

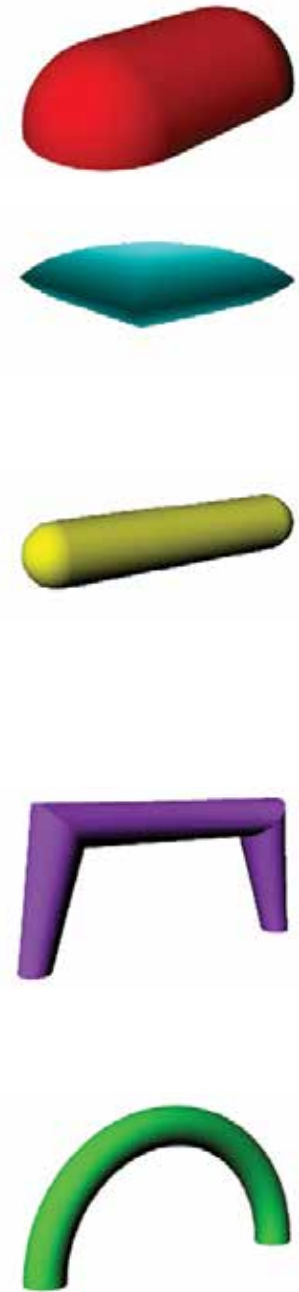
Welke materialen worden gebruikt voor opblaasbare constructies?

5 typologiën:

- Enkele membraan constructies
- Dubbele membraan constructies
- Rechte hogedruk systemen
- Geknikte hogedruk systemen
- Gekromde hogedruk systemen



Opblaasbare constructies typologiën



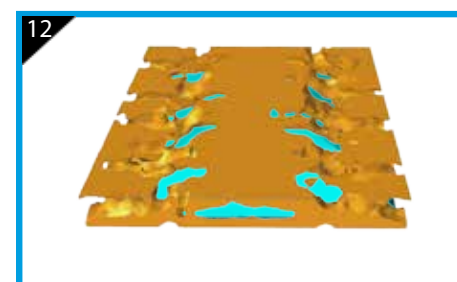
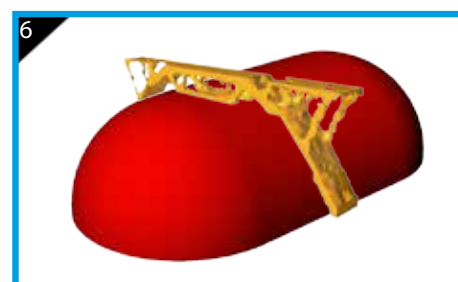
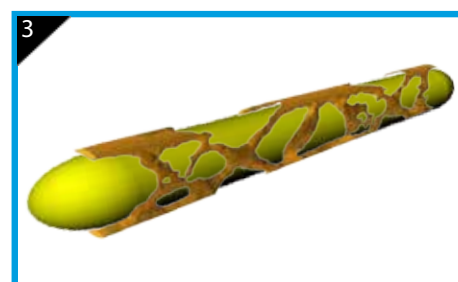
3

Typologiën

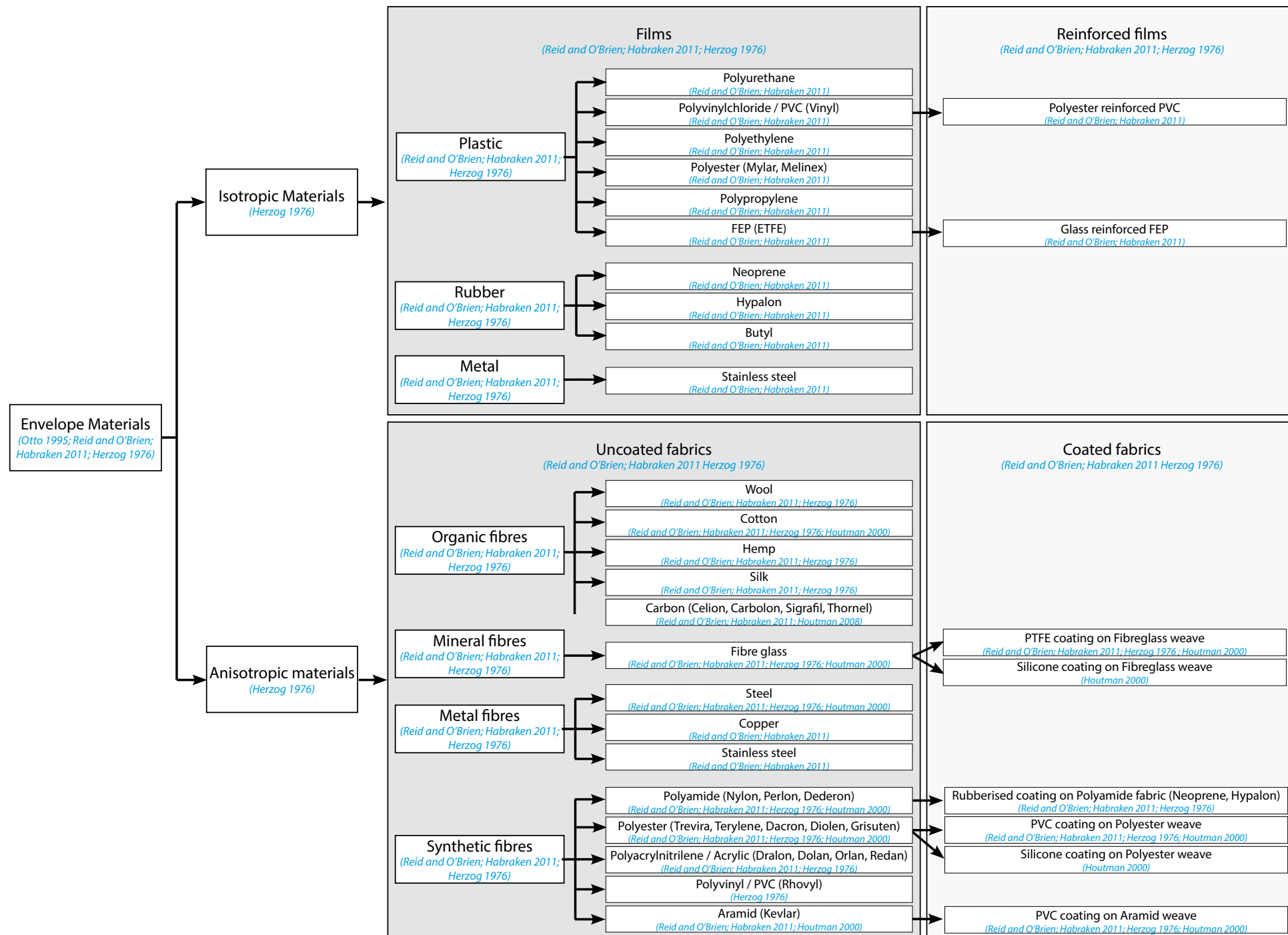
	1 M PPCUPA S C 1 ₂ M A PP 1 ₂ M S CU M S PA	2 M PPCUPA S C 2 ₁ S A PP 1 ₂ M S CU M S PA	3 M PPCUPA S C 1 ₂ M S PP 1 ₂ M S CU M S PA	4 M PPCUPA S C 1 ₂ M B PP 1 ₂ M S CU M S PA	5 M PPCUPA S C 1 ₂ M A PP 1 ₂ M S CU M S PA
	6 M PPCUPA S O 1 ₂ M A PP 1 ₂ M A CU M A PA	7 M PPCUPA S O 2 ₁ S A PP 1 ₂ M A CU M A PA	8 M PPCUPA S O 1 ₂ M S PP 1 ₂ M A CU M A PA	9 M PPCUPA S O 1 ₂ M B PP 1 ₂ M A CU M A PA	10 M PPCUPA S O 1 ₂ M A PP 1 ₂ M A CU M A PA
	11 M PPCUPA S O 1 ₂ M A PP 2 ₁ M A CU M A PA	12 M PPCUPA S O 2 ₁ S A PP 2 ₁ M A CU M A PA	13 M PPCUPA S O 1 ₂ M S PP 2 ₁ M A CU M A PA	14 M PPCUPA S O 1 ₂ M B PP 2 ₁ M A CU M A PA	15 M PPCUPA S O 1 ₂ M A PP 2 ₁ M A CU M A PA

S Structure
 M Membrane
 PP Proportion
 CU Curvature
 PA Pattern
 [O] Open / [C] Closed
 [O] Open / [C] Closed
 [1₂] 1 dominant dimension / [2₁] 2 dominant dimensions / [3] 3 dominant dimensions
 [M] Monoclastic / [S] Synclastic / [A] Anticlastic
 [S] Straight / [B] Buckled / [A] Arched

Common features



Matrix opblaasbare typologiën vs. geoptimaliseerde elementen

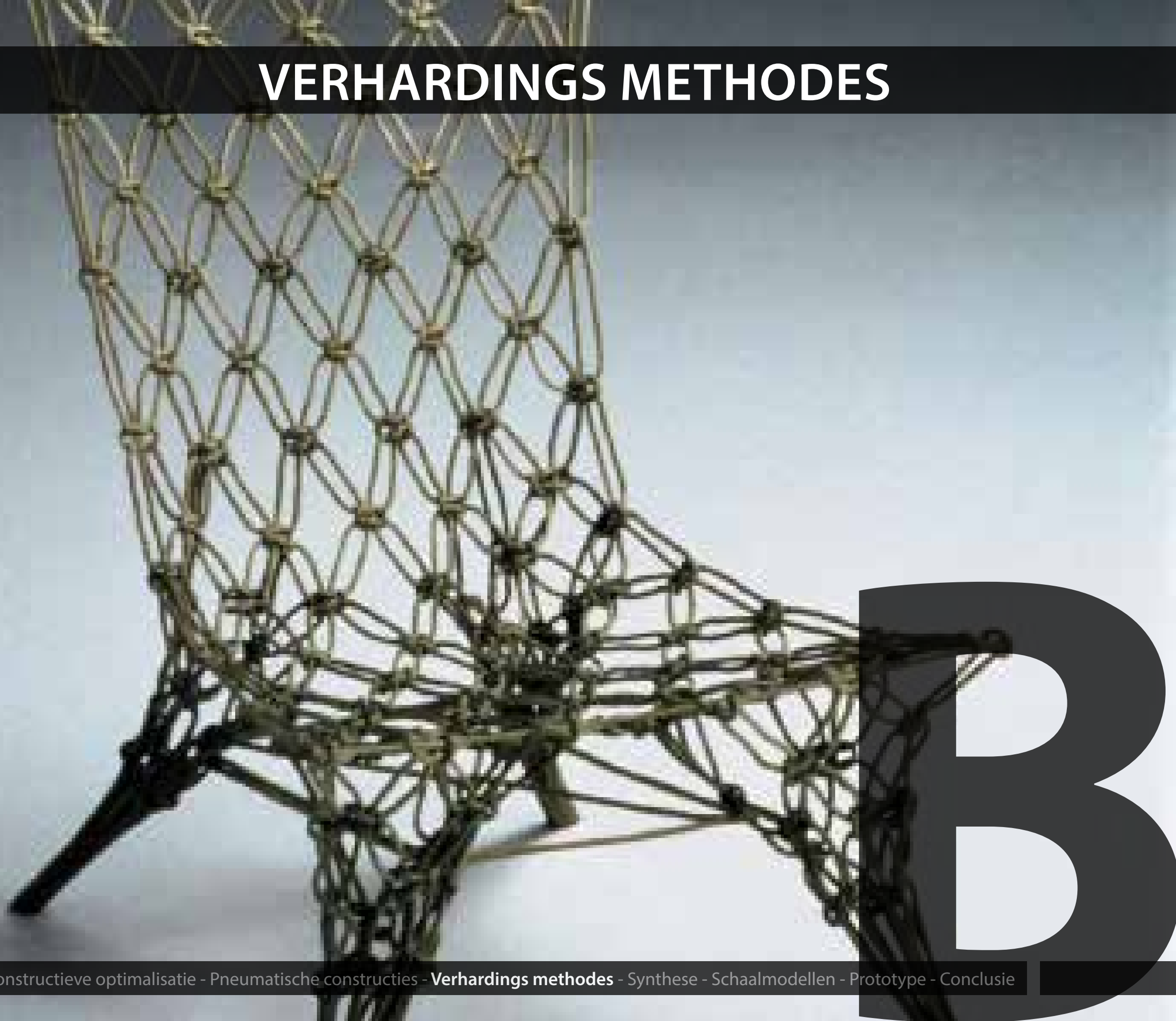


Membraan materialen

4 kansrijke membraan materialen

→ Keuze a.d.h.v. multi criteria tabel

Criterion	W.F	PVC Coated Polyester	PVC Coated Aramid	PTFE Coated Fibreglass	Silicone Coated Fibreglass
Low cost	3	excellent ^{1,2}	bad ³	acceptable ^{1,2}	good ^{3,9}
Simplicity to manufacture	3	excellent ^{2,4}	bad ^{2,5,6}	acceptable ^{2,3}	good ³
Availability	3	excellent ^{1,2,3,4}	bad ^{2,3,5,6}	excellent ^{1,2,3}	bad ³
Mechanical properties	2	good ^{2,3,8,9}	excellent ^{2,3,5,6,9}	good ^{2,3,8,9}	good ^{3,9}
Foldability	2	excellent ^{2,3,4,9,10}	good ^{3,7,10}	bad ^{2,3,4,9,10}	good ^{3,9,10}
Air permability	2	good ⁸	good	good ⁸	excellent ^{4,8}
Dimensional stability	2	good ^{2,3,8}	good ^{2,3,8}	excellent ^{2,3,8}	good ^{3,8}
Lifetime	2	good ^{2,3,8,10}	good ^{5,6}	excellent ^{2,3,8,10}	excellent ^{3,10}
Maintenance	1	acceptable ^{3,10}	acceptable	excellent ^{3,10}	acceptable ^{3,10}
Flame performance	1	good ^{3,10}	good ^{5,6}	excellent ^{3,10}	excellent ^{3,10}
TOTAL POINTS		73	46	62	61



RQ1

Welke verhardings methode is het meest geschikt voor het produceren van de case verkregen in RQ1?

SRQ 3.1

Aan welke eisen, randvoorwaarden en eigenschappen moeten verhardbare materialen voldoen?

SRQ 3.2

Welke verharding methodes bestaan er?

4 materialen geschikt voor het verharden van een membraan (*Pronk 2013*)

- Beton / cement gebonden composieten
- Ijs / water
- Glas
- **Polymeer composieten** → **Hoogte specifieke stijfheid**

Matrix:

Epoxy

Polyester

Polyimide

Fenol

Versterking (vezels):

Polypropyleen

Aramide

Glas

Koolstof

PBO

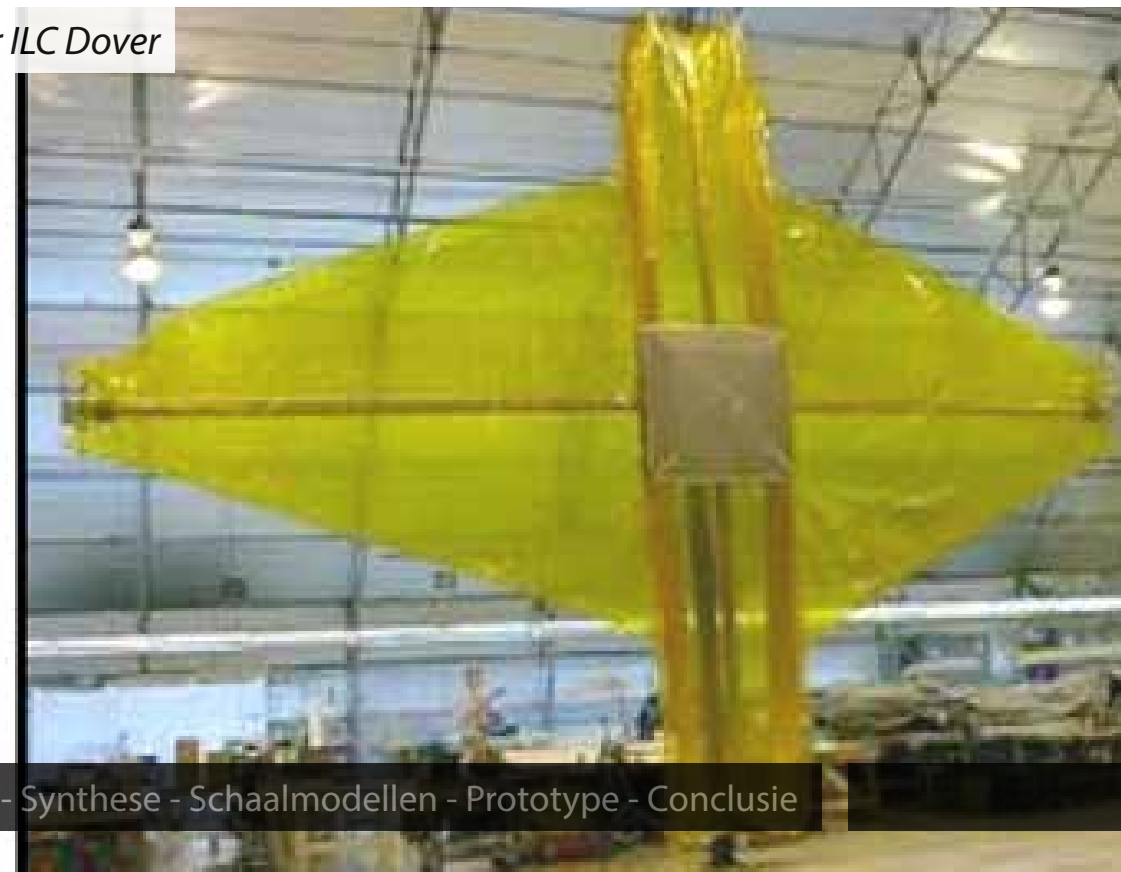
Vectran

Commerciële technieken (Kakani 2004; Budinksi 2002);

- Hand lay-up
- Resin Transfer Moulding
- Vacuum infusie

“Rigidizable materials” voor “Gossamer” ruimte constructies;

“Materialen die in eerste instantie flexibel zijn zodat ze kunnen worden opgeblazen en uitgevouwen, en vervolgens kunnen worden verhard d.m.v. blootstelling aan een externe invloed” (Cadogan et al. 2001)



3 categoriën (Defoort 2005; Cadogan et al. 2001):

- A Mechanische verharding
 - 1. Aluminium & “thin film” composieten
- B Fysische verharding
 - 2. “Plasticizer / solvent boil off” composieten
 - 3. Tweede orde overgangs en vormgeheugen polymeer composieten
- C Chemische verharding
 - 4. Thermisch geharde thermoset composieten
 - 5. UV geharde composieten
 - 6. Verharding d.m.v. schuim
 - 7. Opblaasgas reactie composieten

4

Rigidizable materials

Top 4 best presterende;

1. UV geharde composieten 46
2. Thermisch geharde composieten 45
3. Verharding d.m.v. schuim 44
4. "Plasticizer / solvent boil off" composieten 43

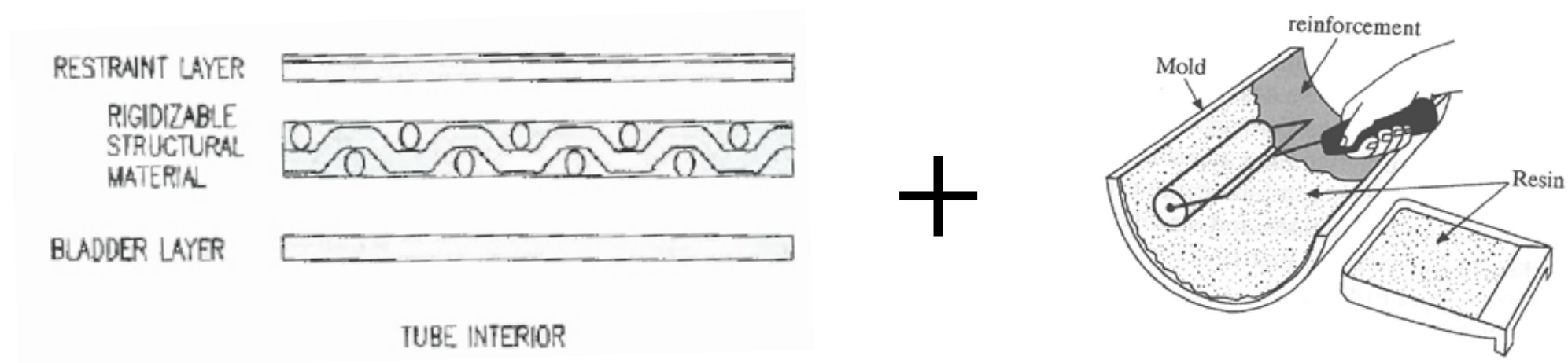
	W.F	Aluminium laminates	SOFC / SMP	Boil off composites	Heat cured composites	UV cured composites (solar)	UV cured composites (internal source)	Gas reaction composites	Foam rigidization
Predictable and controlled rigidization process	3	good ^{1,2,4}	bad ⁴	bad ¹	excellent ^{1,1}	acceptable ^{1,1}	good ^{1,2}	bad ^{1,1}	bad ^{1,4}
Simple to manufacture / availability	3	acceptable ^{1,2,4}	bad ^{1,4}	good ¹	bad ¹	good ^{1,1}	bad ^{1,2}	bad ¹	excellent
High specific strength and stiffness materials	2	bad ^{1,2,3}	good ^{1,4}	acceptable ^{1,2}	excellent ¹	acceptable ^{1,2,7}	acceptable ^{1,1}	acceptable ^{1,2}	bad ^{1,2}
Rapid rigidization process	2	excellent ^{1,2,4}	acceptable	acceptable	good ¹	good ^{1,1}	good ^{1,2}	acceptable	acceptable ⁴
Low cost	2	acceptable	bad	bad	bad	bad	bad	bad	excellent
Reversible	2	acceptable ^{1,1,3,4}	good ^{1,2,4,4}	excellent ^{1,2,4,3}	bad ^{1,1,3}	bad ^{1,1,3}	bad ^{1,2,3}	bad ^{1,1}	bad ^{1,2}
Minimal energy required for deployment and rigidization	1	good ^{1,2,4,3}	bad ^{1,2,4}	good	bad ^{1,1,4}	excellent ¹	bad ¹	good ^{1,2}	bad ⁴
No adverse effects from packaging or deployment	1	bad ^{1,2}	good ^{1,2}	good ¹	good ¹	good	good	good	excellent
Long storage life (2+ years)	1	good ^{1,2}	good ^{1,1,4}	acceptable	acceptable ^{1,2}	excellent ^{2,7}	good ²	good ^{1,2}	bad ^{1,2}
Corrosion ability	1	acceptable ^{1,3}	good ³	good ^{1,3}	good ³	good ³	good ³	good	excellent
Allow rigidization in a wide range of thermal environments	1	acceptable	bad ^{1,4}	bad ¹	good	good ⁷	excellent	good	acceptable
TOTAL POINTS		44	35	42	45	46	40	33	43

Multi criteria tabel voor rigidizable materials

4

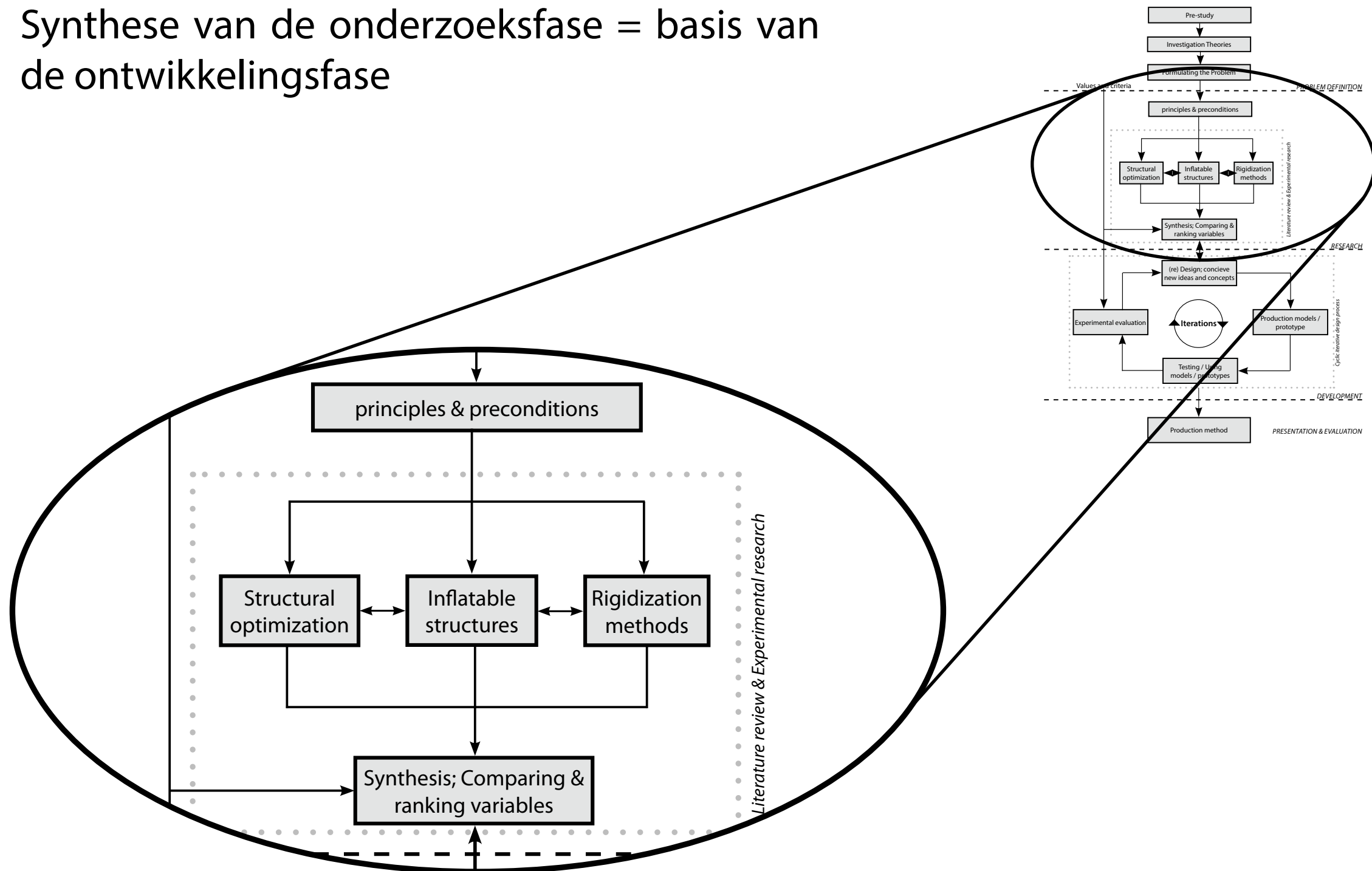
Rigidizable materials

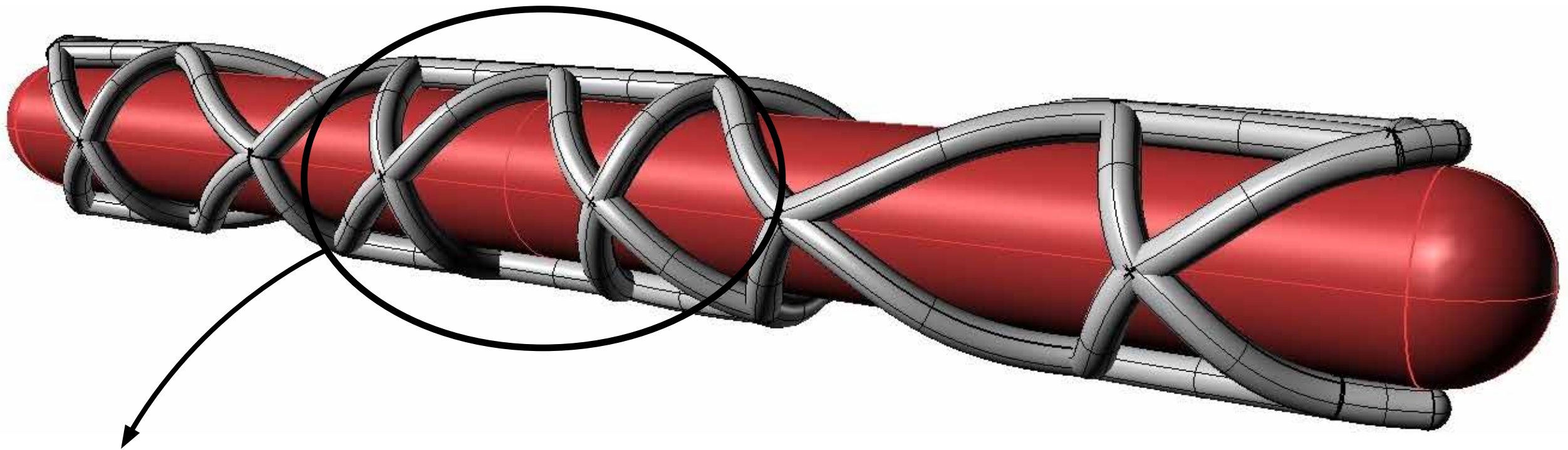
- Geen “rigidizable material” zoals gebruikt in de ruimtevaart is direct toepasbaar in de bouw
- De sterke punten benutten door de opbouw te combineren met commerciële productie technieken





Synthese van de onderzoeksfase = basis van de ontwikkelingsfase





RQ 1

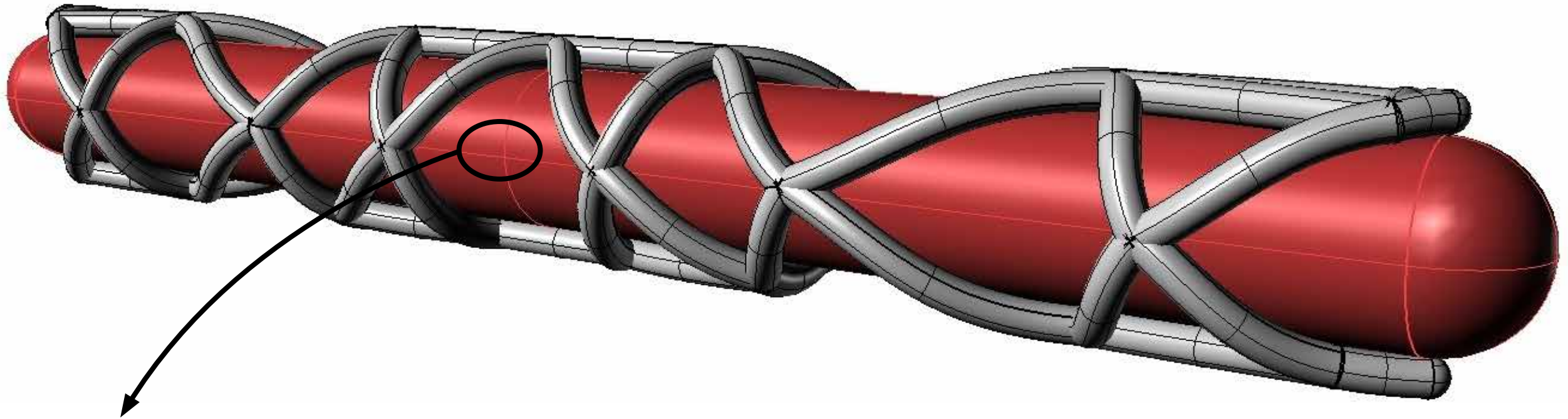
Welk constructief geoptimaliseerde doorsnede actief constructie systeem kan het beste worden gebruikt als case?

➔ **Balk constructies**

Topologisch geoptimaliseerd met Inspire

Vorm geoptimaliseerd met de ParaGen methode

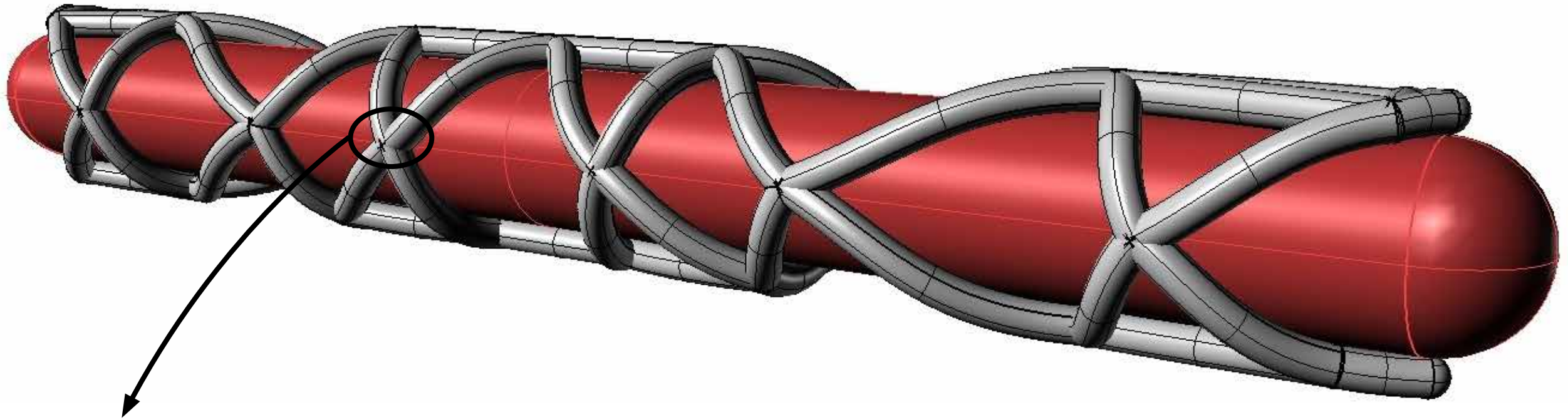
Grootte geoptimaliseerd met GSA en Staad Pro



RQ 2

Op welke manier kan een opblaasbare constructie worden gebruikt als hulpconstructie voor het produceren van constructief geoptimaliseerde doorsnede actieve elementen?

- ➔ **Recht hogedruk systeem**
- ➔ **PVC gecoat polyester**

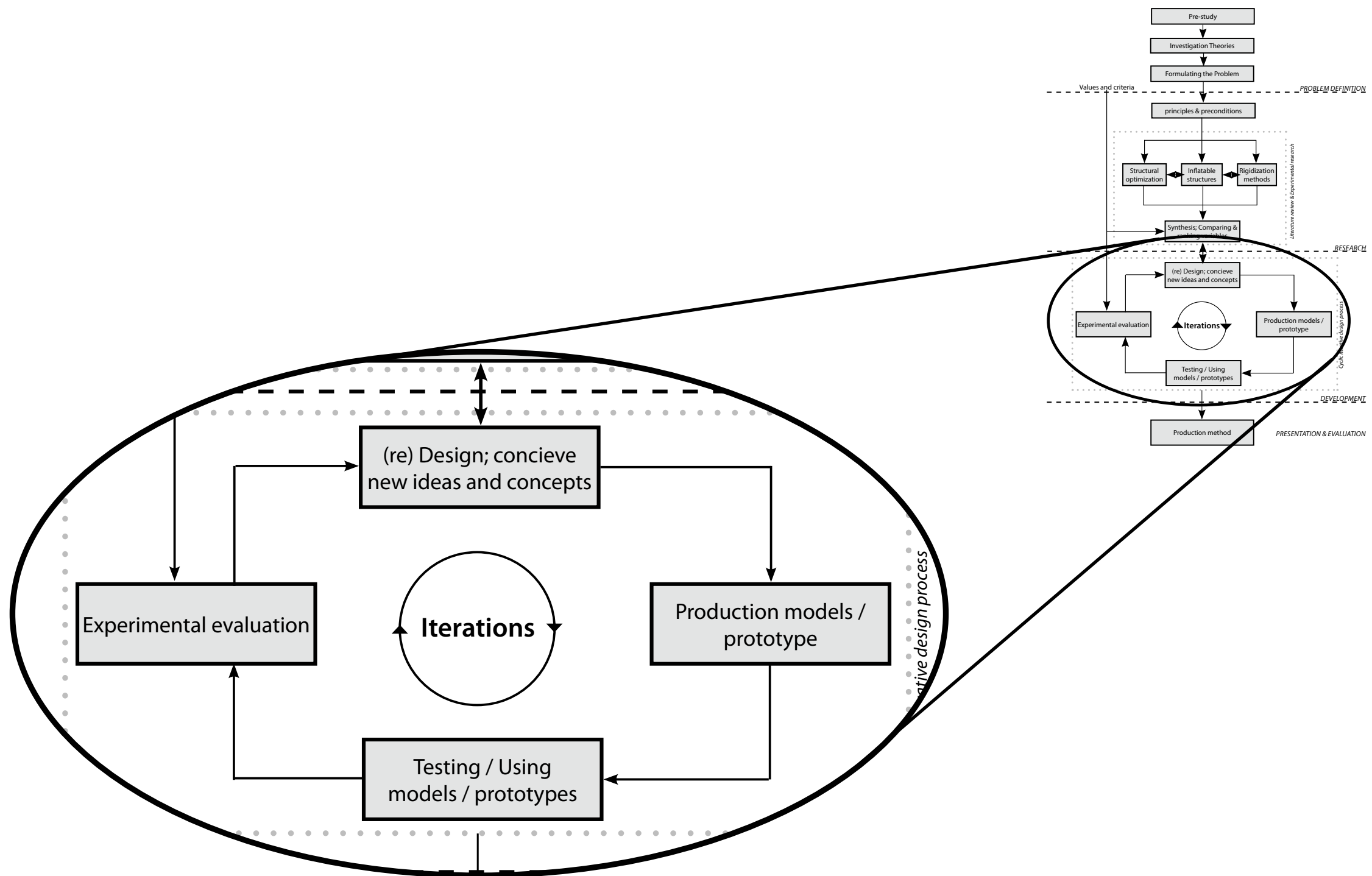


RQ 3

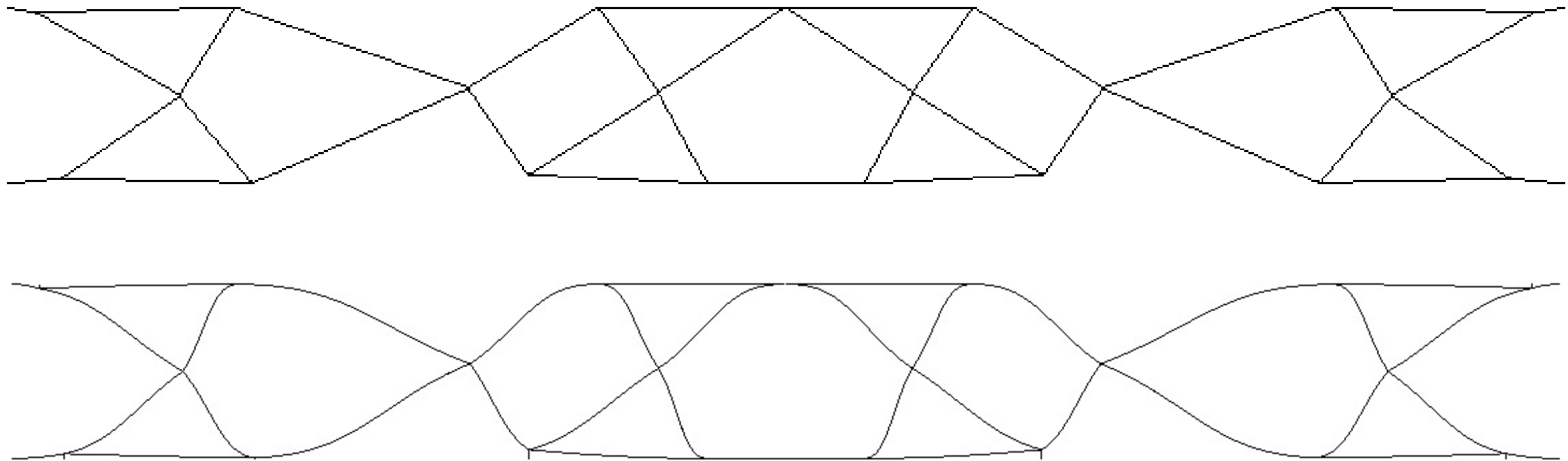
Welke verhardings methode is het meest geschikt voor het produceren van de case verkregen in RQ1?

➔ De opbouw van “rigidizable materials” uit de ruimtevaart combineren met commerciële productie technieken als hand lay-up, RTM of vacuüm infusie





- Bepalen van de invloed van gekromde staven vs. lineaire staven
- Validatie ParaGen
- Praktische ervaring met fabric formwork

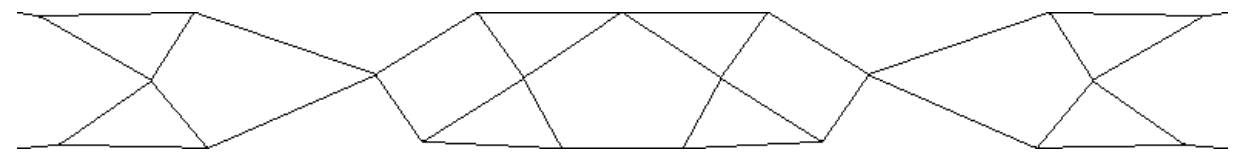


ID_1269 met rechte staven en gekromde staven

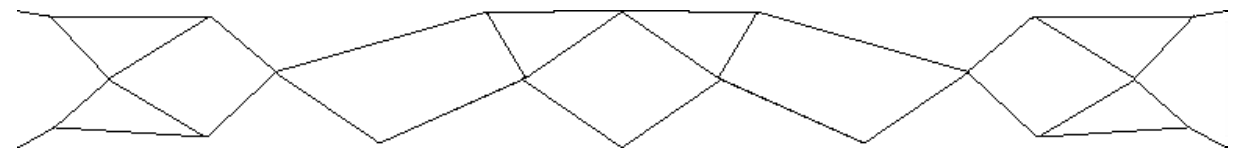
4 geometrieën, elk 3 keer gefabriceerd

➔ Keuze geometrieën gebaseerd op stijfheid en doorbuiging

- ID 1269: Hoogste specifieke stijfheid



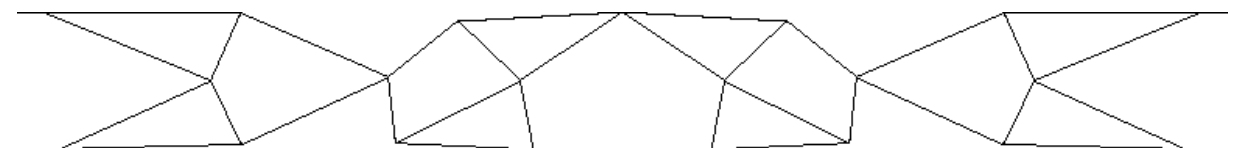
- ID 799: Lage specifieke stijfheid



- ID 1259: Laagste doorbuiging



- ID 1249: Hoogste stijfheid



6

Fabricatie



Fabricatie van de schaalmodellen

6

Fabricatie



ID 1269



ID 799



ID 1259



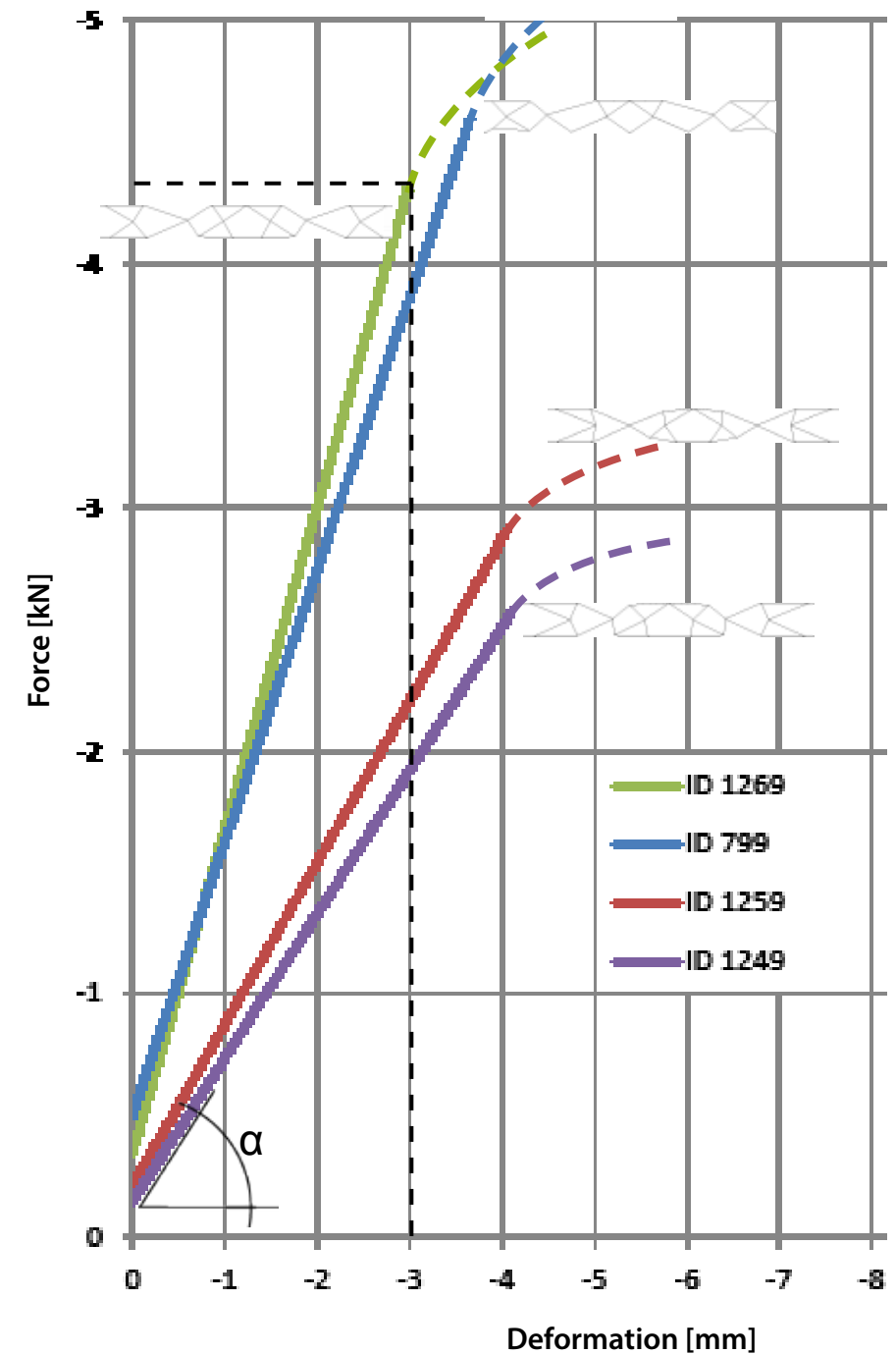
ID 1249



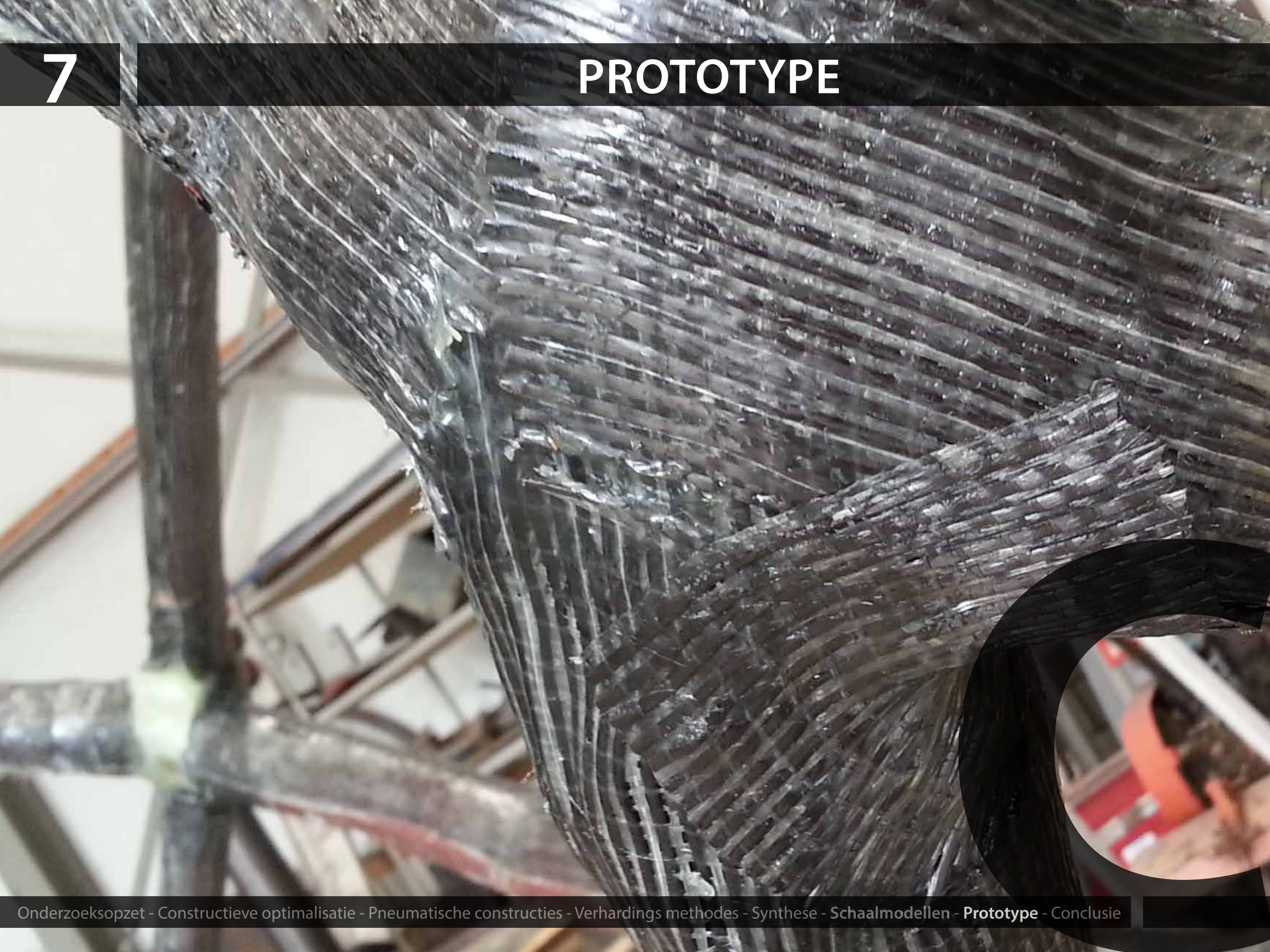
6

Conclusies

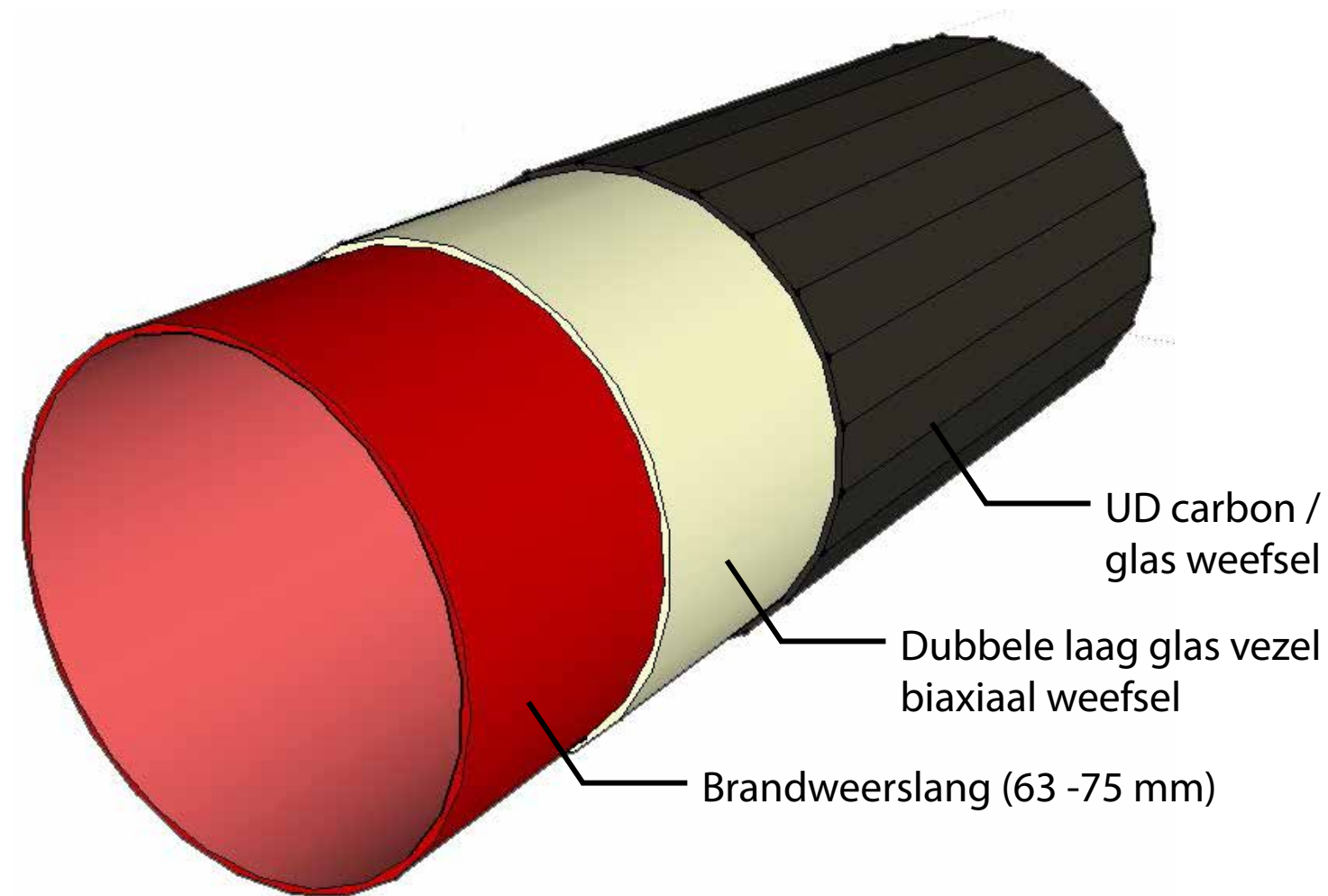
- ID_1269 heeft de hoogste stijfheid
- ID_1259 heeft een nadelige geometrie m.b.t. gekromde staven
- Staven bezwijken altijd dichtbij de knopen
- Grote hoeken tussen de staven moeten vermeden worden i.v.m. stabiliteit
- Staaflengte in de dwarsrichting moet beperkt worden



Gemiddeld linear elastisch gebied



Doel: Demonstreren van de voorgestelde productie methode



Opbouw van de staven

7

Prototype



7

Prototype



7

Prototype



7

Prototype



7

Prototype



Conclusies

Doel van het onderzoek:

Bijdragen aan het duurzaamheids debat door het verminderen van het materiaal gebruik in de bouw.

Doel in het onderzoek:

Het ontwikkelen van een productie methode voor constructief geoptimaliseerde doornsede actieve constructie systemen.

- Algemene morfologische eigenschappen van geoptimaliseerde elementen
- Vorm en grootte optimalisatie op de topologisch geoptimaliseerde balk
- Opblaasbare constructie als hulpconstructie
- Opblaasbare constructie die verhard kan worden als dragend element
- Schaal modellen als validatie van de computer modellen
- Prototype om de productie methode te demonstreren

Conclusies

- Een antwoord op de vraag naar productie methoden voor geoptimaliseerde ruimtelijke constructies
- Synthese tussen de optimalisatie van dragende elementen en de optimalisatie van fabric formwork
- Licht gewicht
- Snel toepasbaar
- Vouwbaar
- Multi functioneel

Aanbevelingen

- De synergie tussen de opblaasbare hulpconstructie en de opblaasbare, verhardbare buitenste staven moet worden onderzocht.
- Topologie optimalisatie met andere ontwerp ruimtes (deels “non design space” i.v.m. aangrijpen krachten) moet nog onderzocht worden
- De mogelijkheid om de methode te gebruiken voor het versterken van bestaande constructies, zoals bruggen, moet worden onderzocht
- De methode moet worden getest voor verschillende geometrieën

Vragen

