



# Topologie-optimalisatie als ontwerptool voor bouwkundige constructies

Gieljan Vantyghem

CONCRETE PRINTING: EVOLUTIE OF REVOLUTIE?

**donderdag 12 mei 2022 | 09:30–09:50**  
**Technopolis Mechelen**

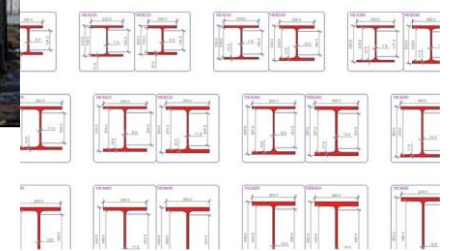
Vakgroep Bouwkundige Constructies en Bouwmaterialen  
Universiteit Gent

# INTRODUCTIE

- 1) DUURZAAM BOUWEN! → LESS IS MORE !
- 2) STRUCTURELE TOPOLOGIE-OPTIMALISATIE
- 3) STRUCTURELE & THERMISCHE OPTIMALISATIE
- 4) 3D (BETON-)PRINTING
- 5) 3D-GEPRINTE BRUGGEN
- 6) CONCLUSIES

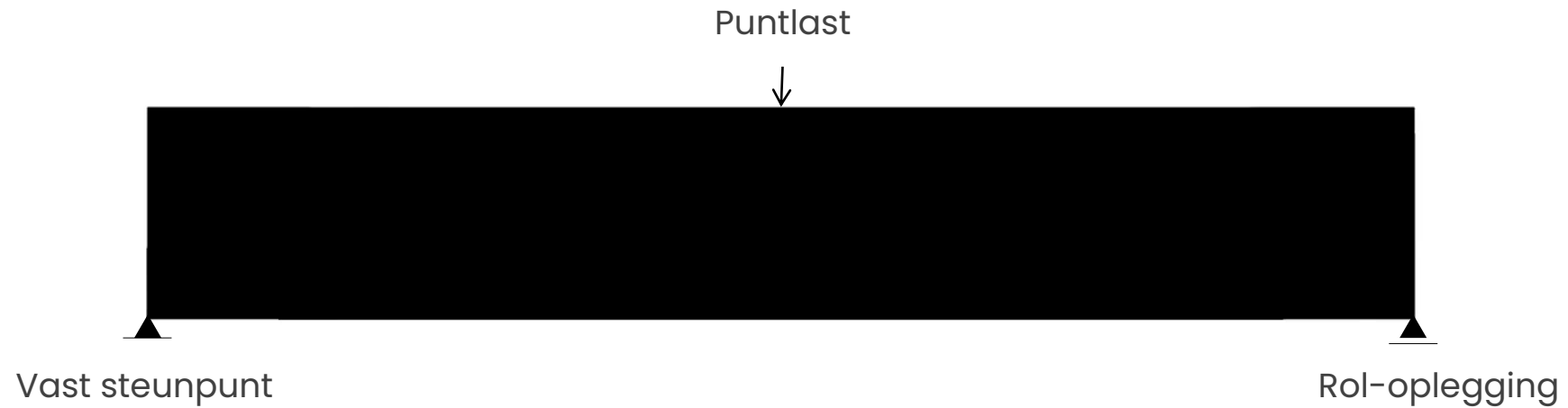


# STRUCTURELE TOPOLOGIE OPTIMALISATIE



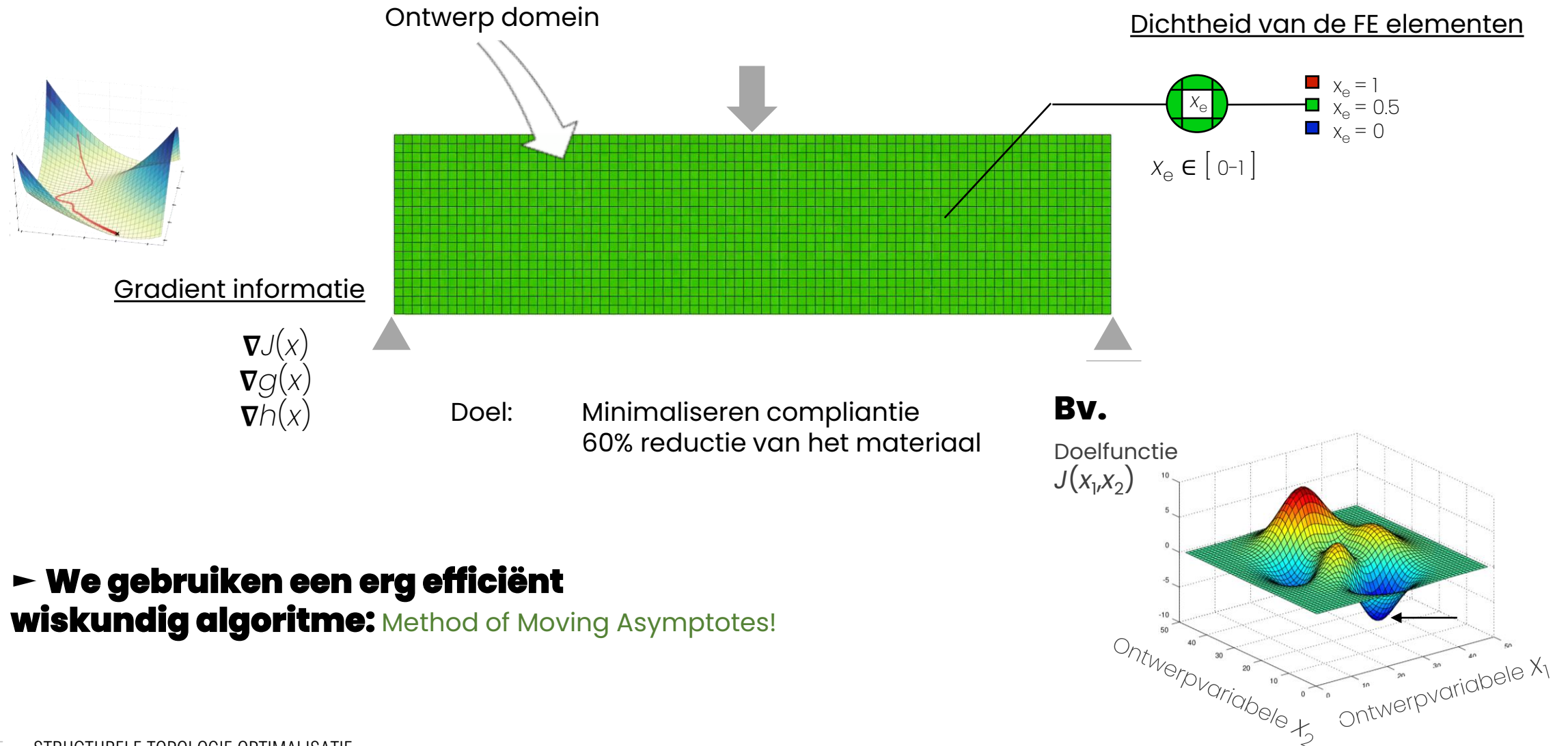
► **STRUCTURELE OPTIMALISATIE ?** Verhogen van de efficiëntie (kostprijs, gewicht...) van de structuur!

# STRUCTURELE TOPOLOGIE OPTIMALISATIE



- **Hoe vinden we de meest optimale structuur?** *Genetische/evolutionaire algoritmen?*

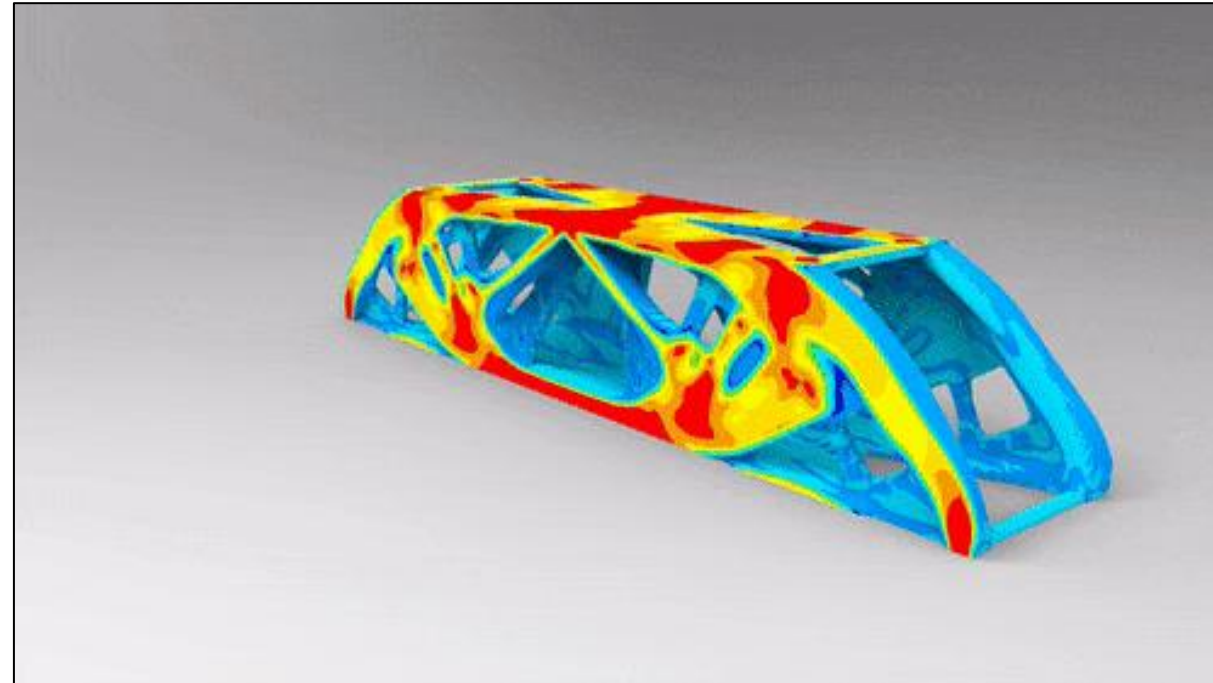
# STRUCTURELE TOPOLOGIE OPTIMALISATIE



► **We gebruiken een erg efficiënt wiskundig algoritme:** Method of Moving Asymptotes!

# STRUCTURELE TOPOLOGIE OPTIMALISATIE

En werkt zowel in  
2D, als in 3D!



# STRUCTURELE TOPOLOGIE OPTIMALISATIE

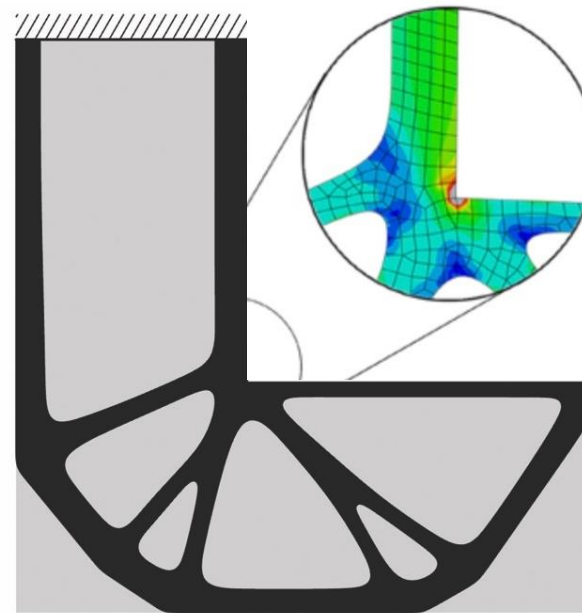
Niet

enkel

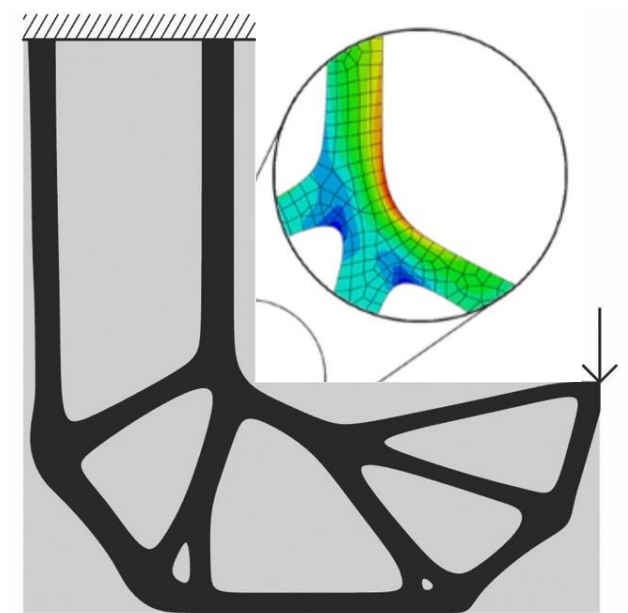
optimaliseren

naar

stijfheid!



minimaliseren van de vervorming



minimaliseren van de spanningen

# STRUCTURELE TOPOLOGIE OPTIMALISATIE

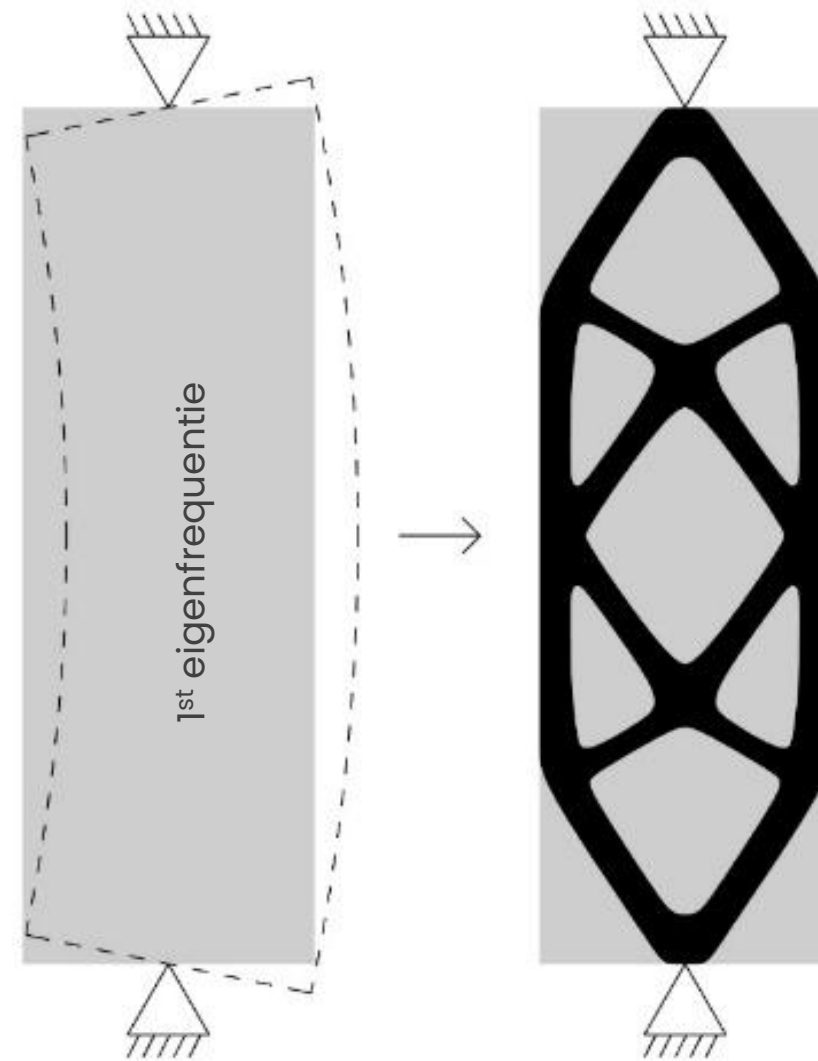
Niet

enkel

optimaliseren

naar

stijfheid!





# STRUCTURELE TOPOLOGIE OPTIMALISATIE

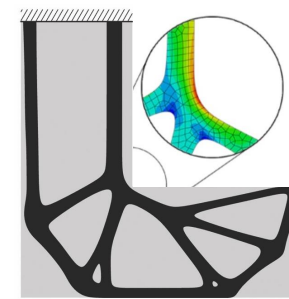
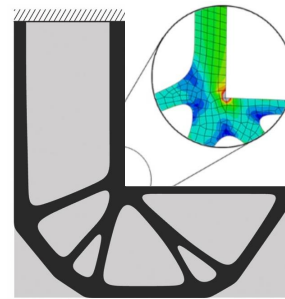
Niet

enkel

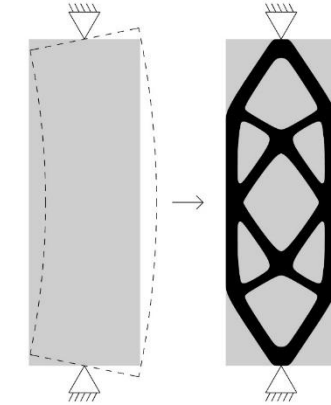
optimaliseren

naar

stijfheid!



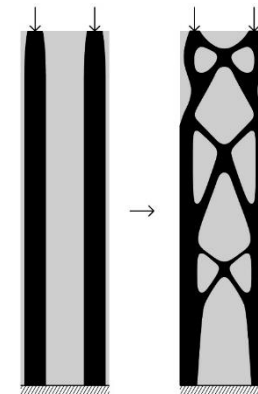
Min. von Mises spanningen



Max. Eigenfrequenties

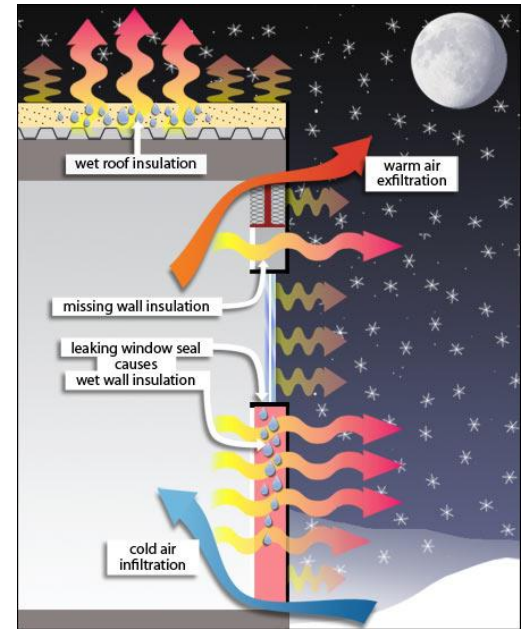
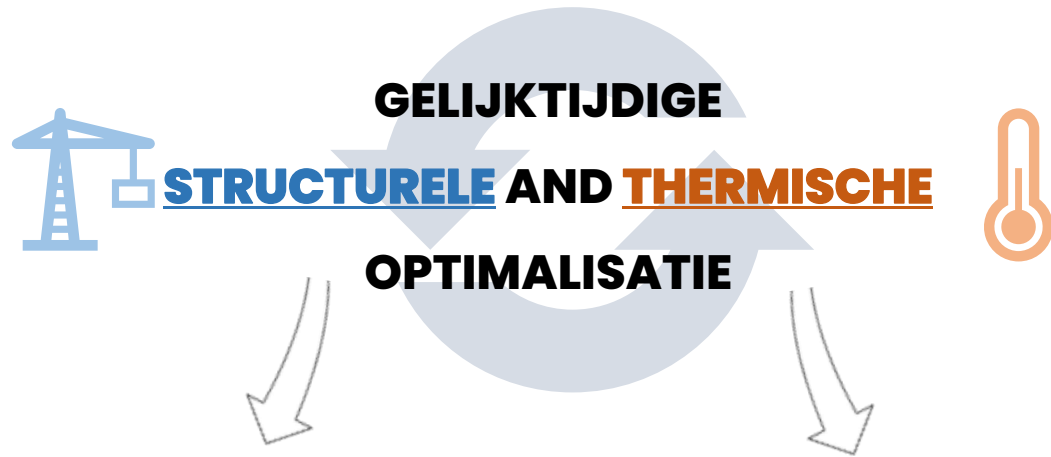


Non-lineaire analyses  
(grote vervormingen)

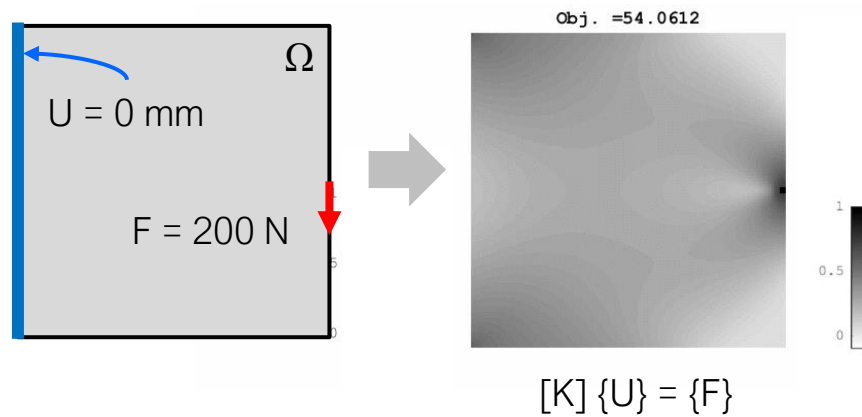


Max. Eigenwaarden  
(instabiliteitsverschijnsel: knik)

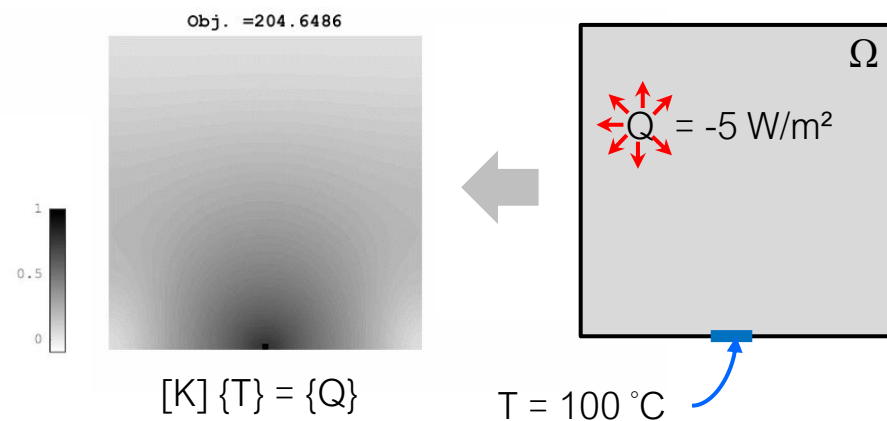
# STRUCTURELE EN THERMISCHE OPTIMALISATIE



**CANTILEVER BEAM PROBLEM (CB)**  
 Lengte-hoogte ratio van 1:1



minimaliseren  
 compliantie

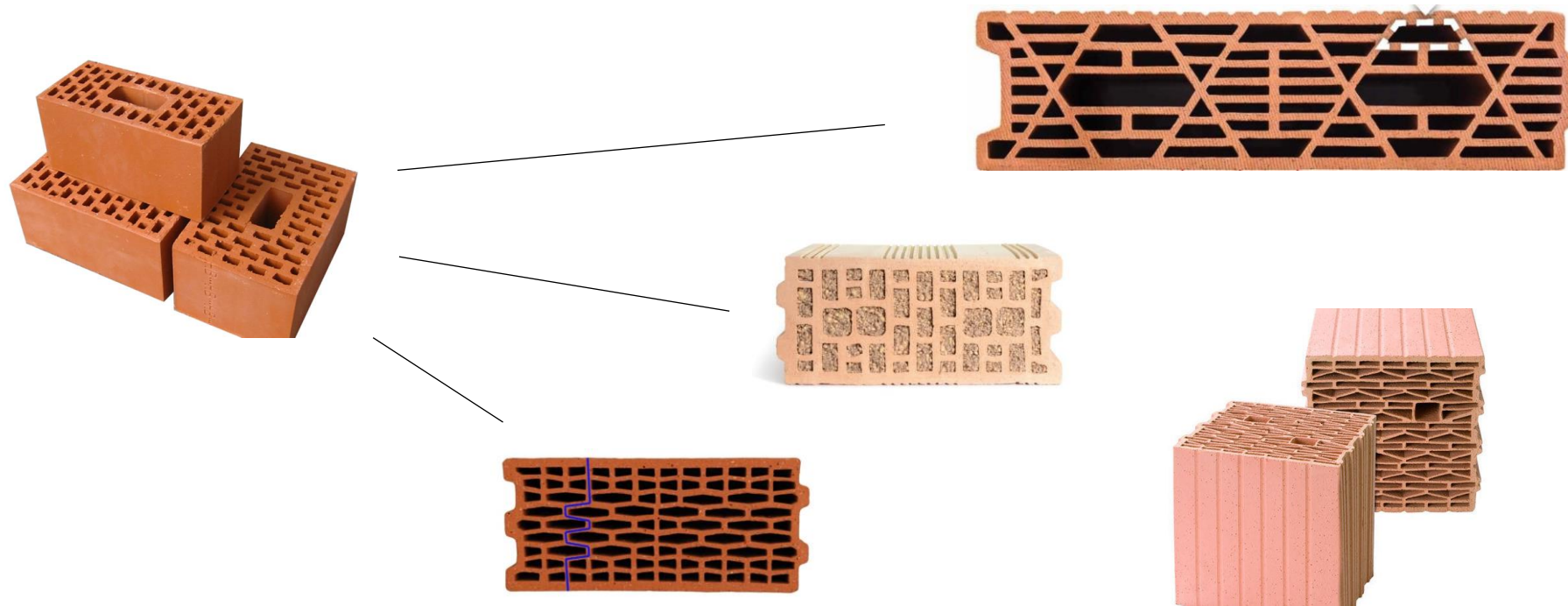


# STRUCTURELE EN THERMISCHE OPTIMALISATIE

## VOORBEELD

Ontwerp van een baksteen met verbeterde isolerende eigenschappen

- Interesse uit industrie

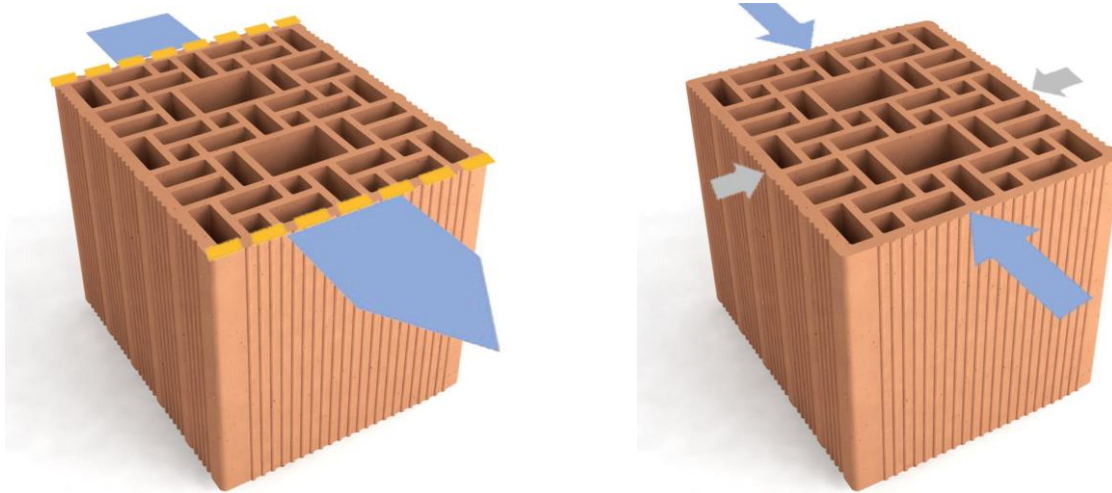


# STRUCTURELE EN THERMISCHE OPTIMALISATIE

## VOORBEELD

Ontwerp van een baksteen met verbeterde isolerende eigenschappen

- Interesse uit industrie
- Doel: minimaliseren van de thermische geleiding door de steen  
bepalingen opgelegd aan de zijdelingse stijfheden  
50% volume t.o.v. een vol blok

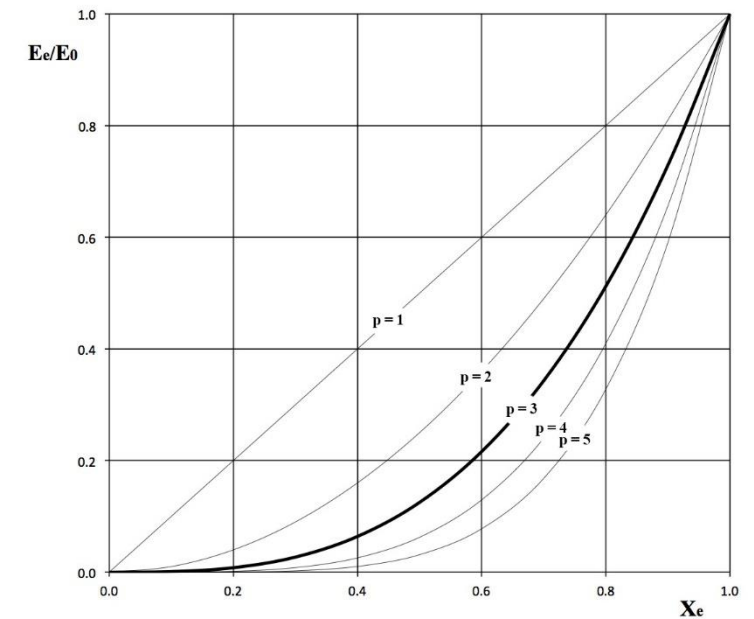
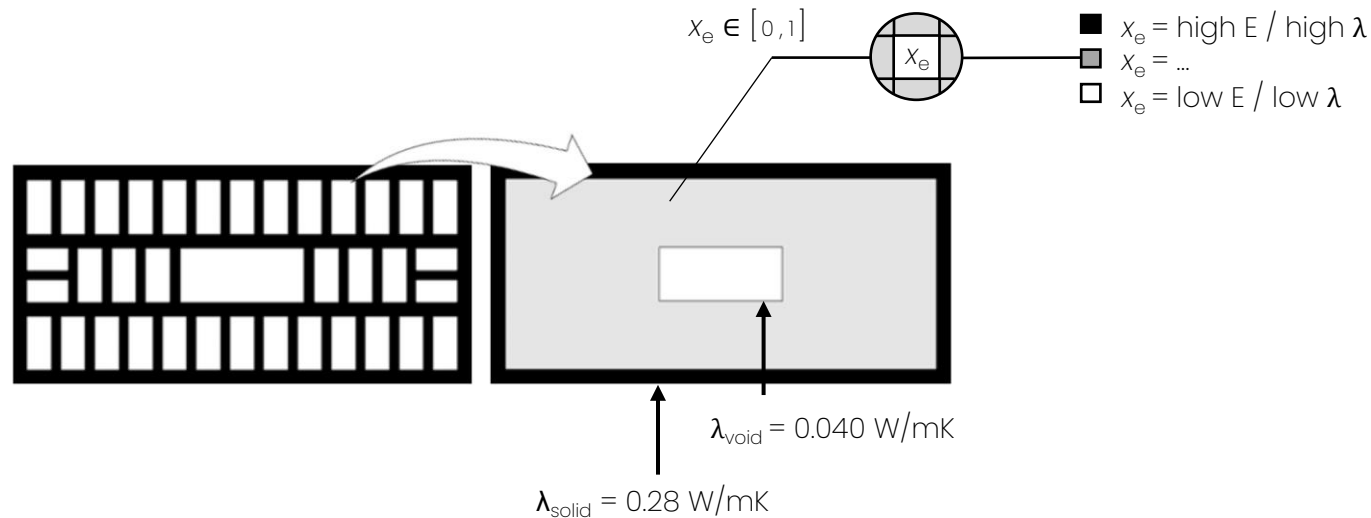


# STRUCTURELE EN THERMISCHE OPTIMALISATIE

## VOORBEELD

Ontwerp van een baksteen met verbeterde isolerende eigenschappen

- Interesse uit industrie
- Doel: minimaliseren van de thermische geleiding door de steen  
bependingen opgelegd aan de zijdelingse stijfheden  
50% volume t.o.v. een vol blok
- Ontwerpvoorwaarden

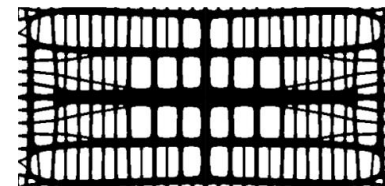
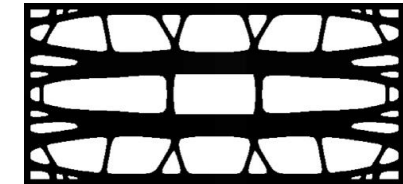
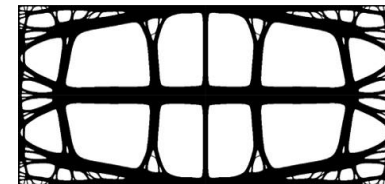


# STRUCTURELE EN THERMISCHE OPTIMALISATIE

## VOORBEELD

Ontwerp van een baksteen met verbeterde isolerende eigenschappen

- Interesse uit industrie
- Doel: minimaliseren van de thermische geleiding door de steen  
beperkingen opgelegd aan de zijdelingse stijfheden  
50% volume t.o.v. een vol blok
- Ontwerpvoorwaarden
- Resultaten: lambda-waarde 15% lager, en licht verbeterde structurele eigenschappen



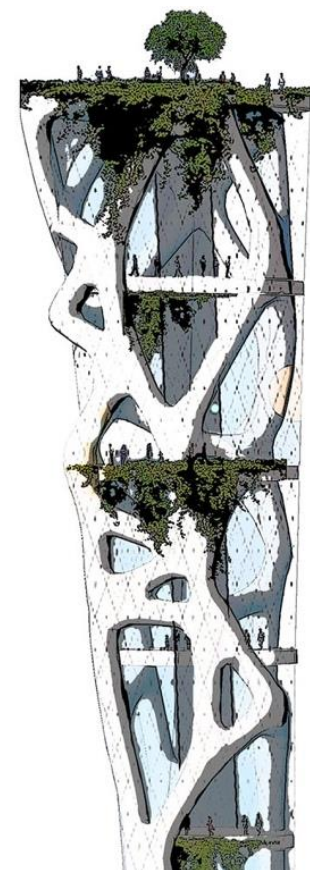
# 3D (BETON-)PRINTING

TWO (E)MERGING TECHNOLOGIES

**3D-PRINTING**

It's a  Match!

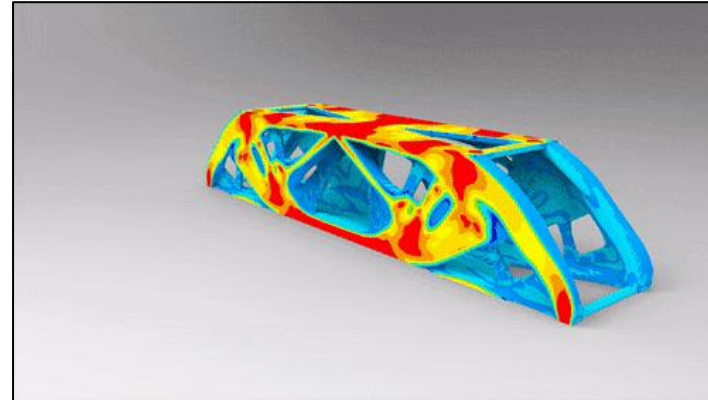
**TOPOLOGIE-OPTIMALISATIE**



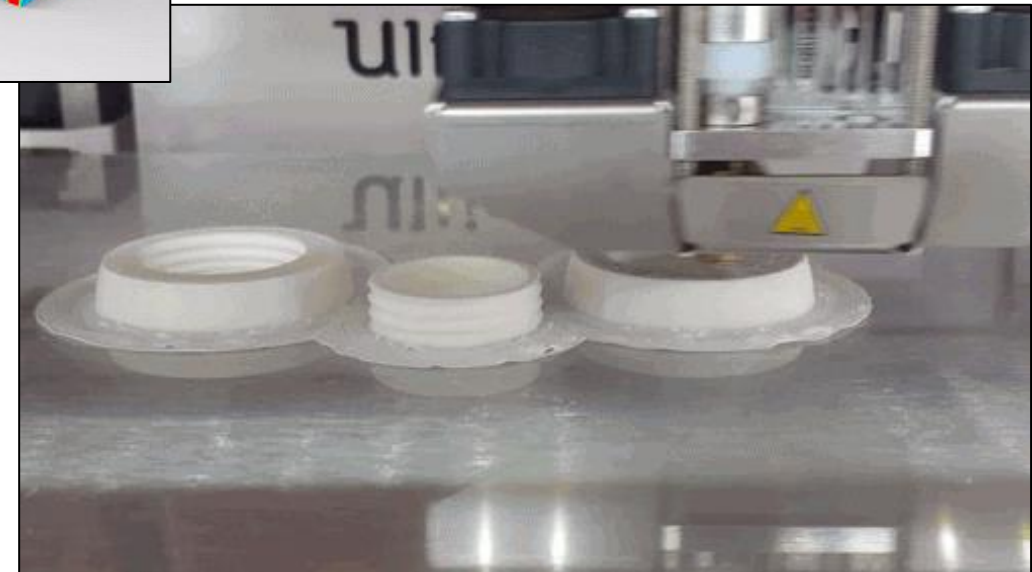
# 3D (BETON-)PRINTING

TWO (E)MERGING TECHNOLOGIES

Hoe kunnen we deze vorm-complexe structuren produceren?



It's a  Match!

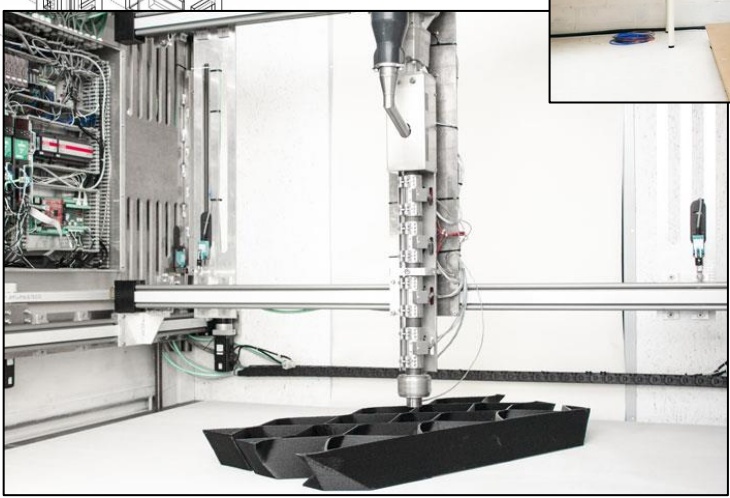
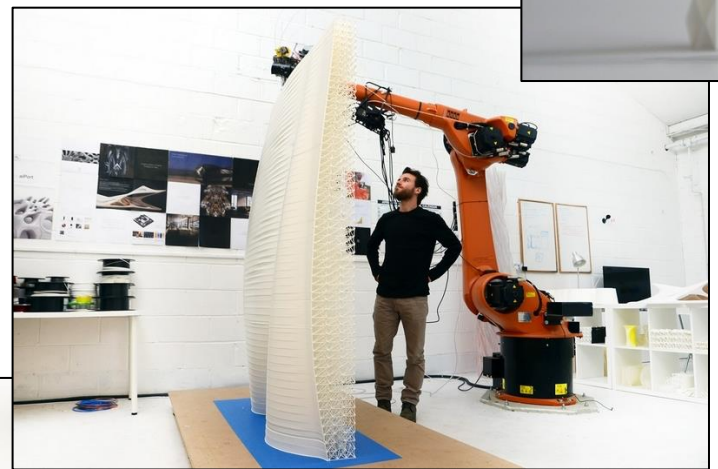
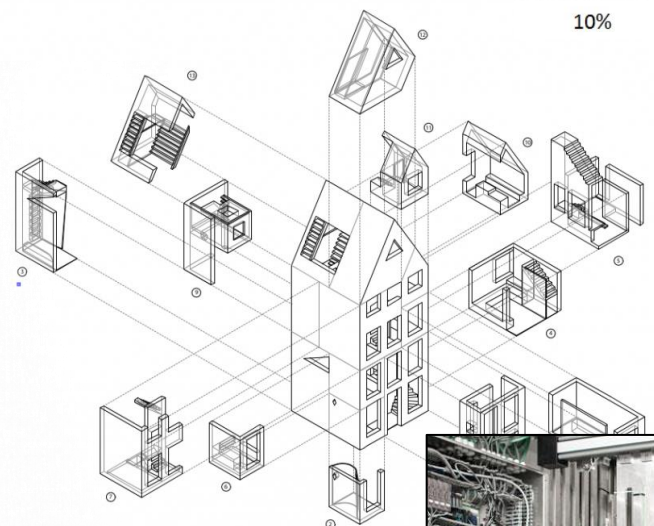


*"Additive Manufacturing (AM) is an appropriate name to describe the technologies that build 3D objects by adding layer-upon-layer of material, whether the material is plastic, metal, concrete or one day ... human tissue."*



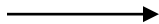
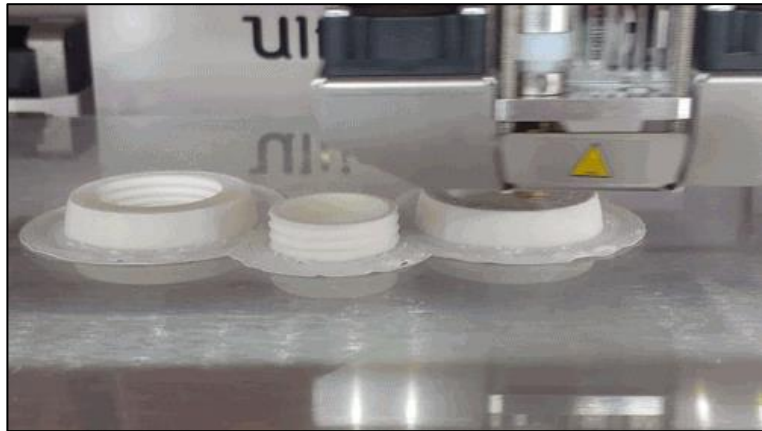
# 3D (BETON-)PRINTING

OP GROTE SCHAAL?



# 3D (BETON-)PRINTING

3D PRINTEN MET BETON! HOE?

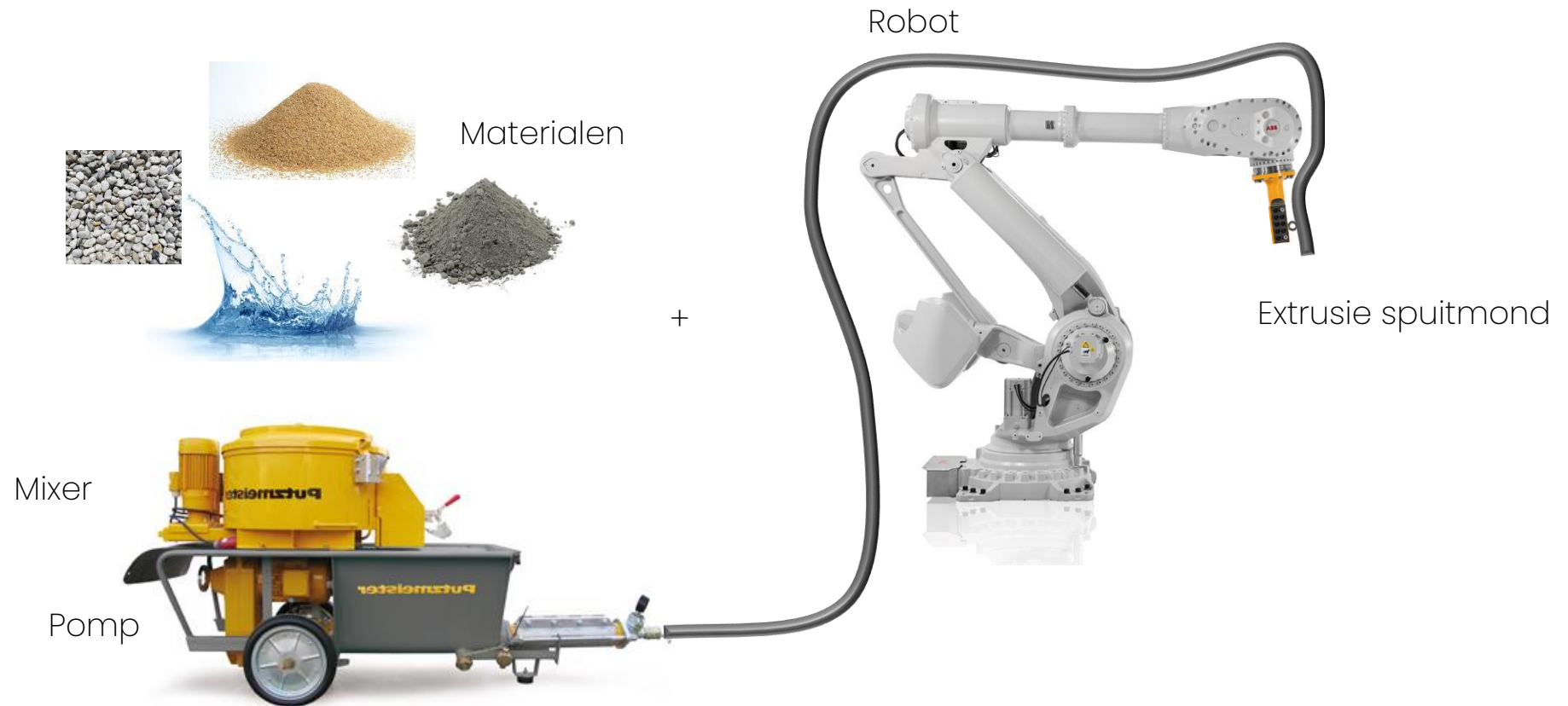


# 3D (BETON-)PRINTING

## 3D PRINTEN MET BETON! HOE?

### Ingrediënten

- Beton mixer + pomp
- Robotische sturing
- Aangepaste materialen

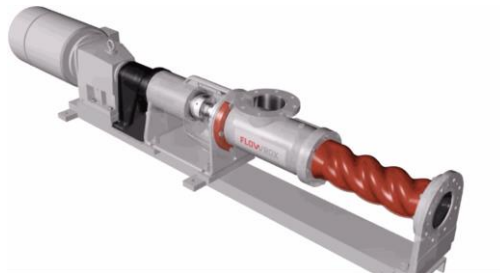


# 3D (BETON-)PRINTING

## 3D PRINTEN MET BETON! HOE?

### Ingrediënten

- Beton mixer + pomp
- Robotische sturing
- Aangepaste materialen
- En wat Know-How...



# 3D (BETON-)PRINTING

## 3D PRINTEN MET BETON! HOE?

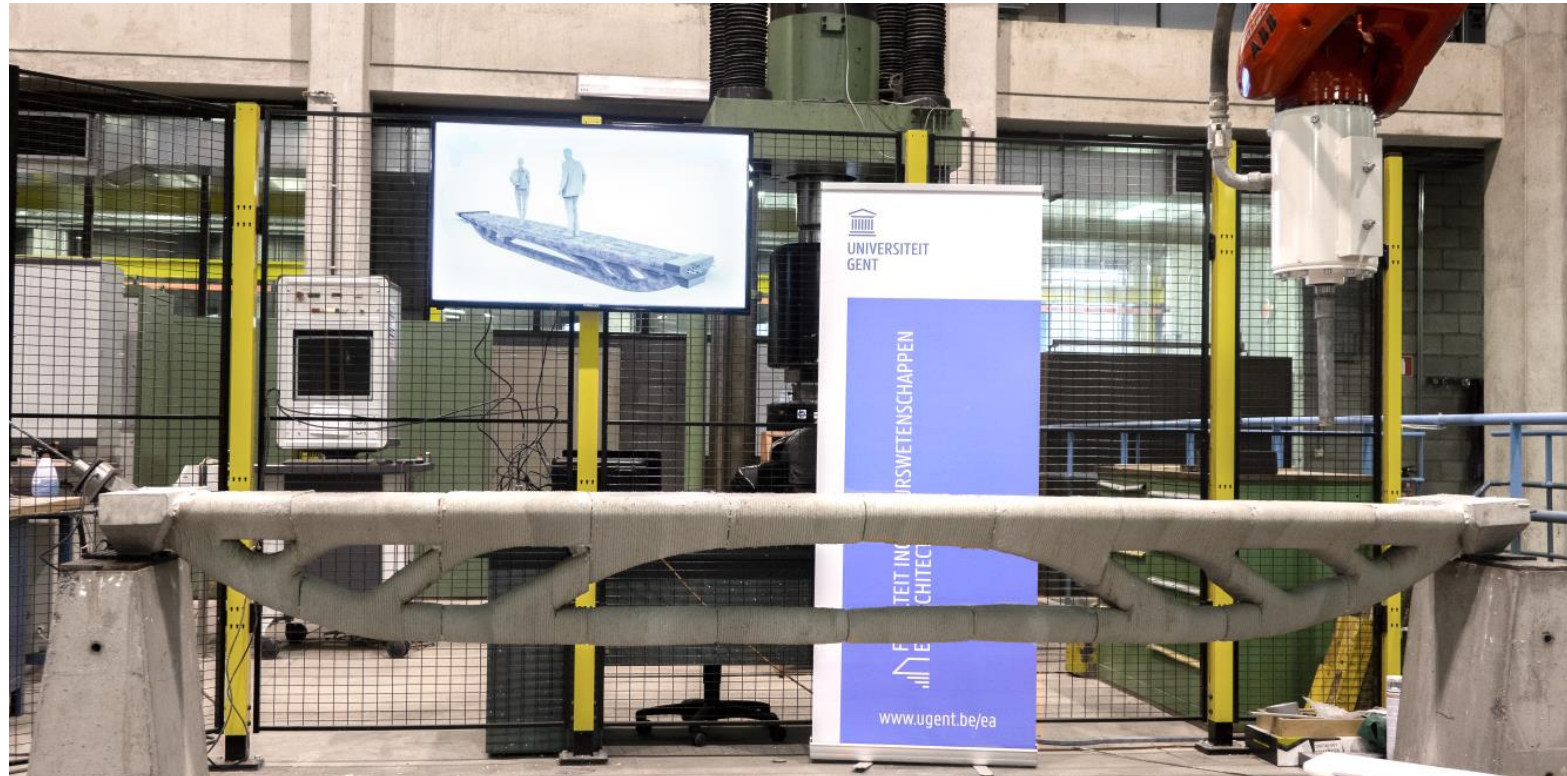
### Ingrediënten

- Beton mixer + pomp
  - Robotische sturing
  - Aangepaste materialen
  - En wat Know-How...
- 
- Successen + Failures (Fail Fast > Learn Fast)



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE)  
DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

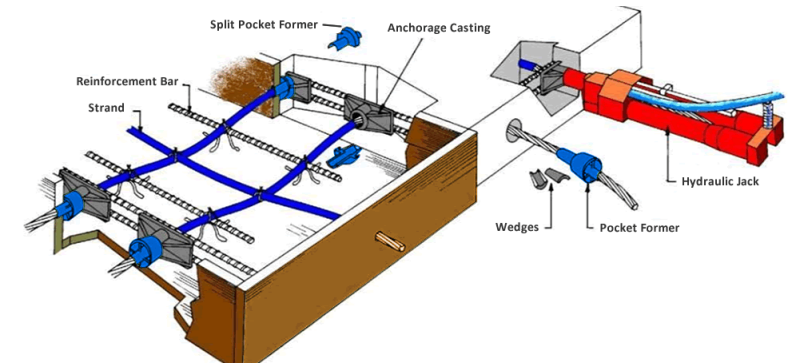
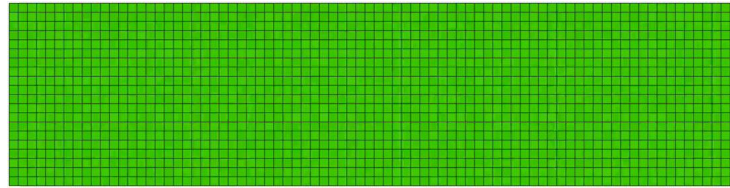
*3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE)  
DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION*



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE)  
DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION

Multidisciplinair project:





# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

## 3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE) DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION

Samenwerking Prof. Oded Amir (Technion)

→ Optimalisatie met inbegrip van naspanstrengen



$$\min_{[\rho, \mathbf{P}]} \phi = (\mathbf{f}_{ext}^T \mathbf{u}_{total})^2$$

$$\text{s.t.: } \mathbf{g} = \frac{\sum_{e=1}^{N_E} \rho_e v_e}{\sum_{e=1}^{N_E} v_e} - V^* \leq 0$$

$$0 \leq \rho_e \leq 1, \quad e = 1, \dots, N_E$$

$$\underline{\mathbf{P}} \leq \mathbf{P} \leq \bar{\mathbf{P}}$$

$$\mathbf{K} \mathbf{u}_{total} = \mathbf{f}_{ext} + \mathbf{f}_{pre}$$

### Topology optimization of post-tensioned concrete beams

by Oded Amir and Emad Shakour



Figure 2: Optimized topology and tendon layout of a simply-supported beam, constant pre-stressing force  
 $T_{pre}^0 = 625$



Figure 6: Optimized topology and tendon layout of a two-span beam, variable pre-stressing force  
 $T_{pre} = 842.941$  and a curvature constraint  $\bar{\kappa} = 0.0035$



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

## 3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE) DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION

Vertaling van 2D optimalisatie naar 3D ontwerp

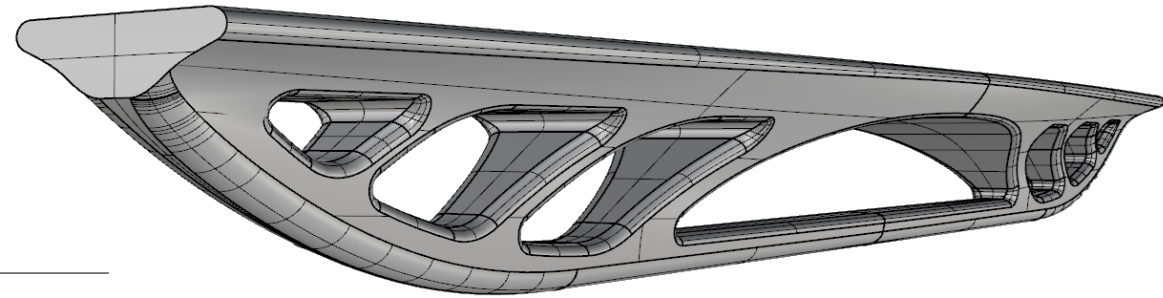
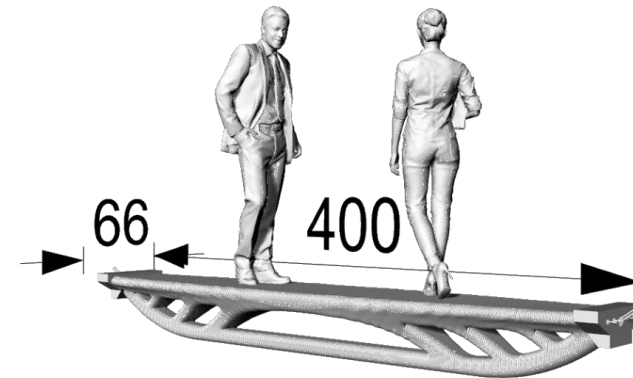


Table 1 Optimization of a simply-supported beam with uniform load and various values of the prestressing force

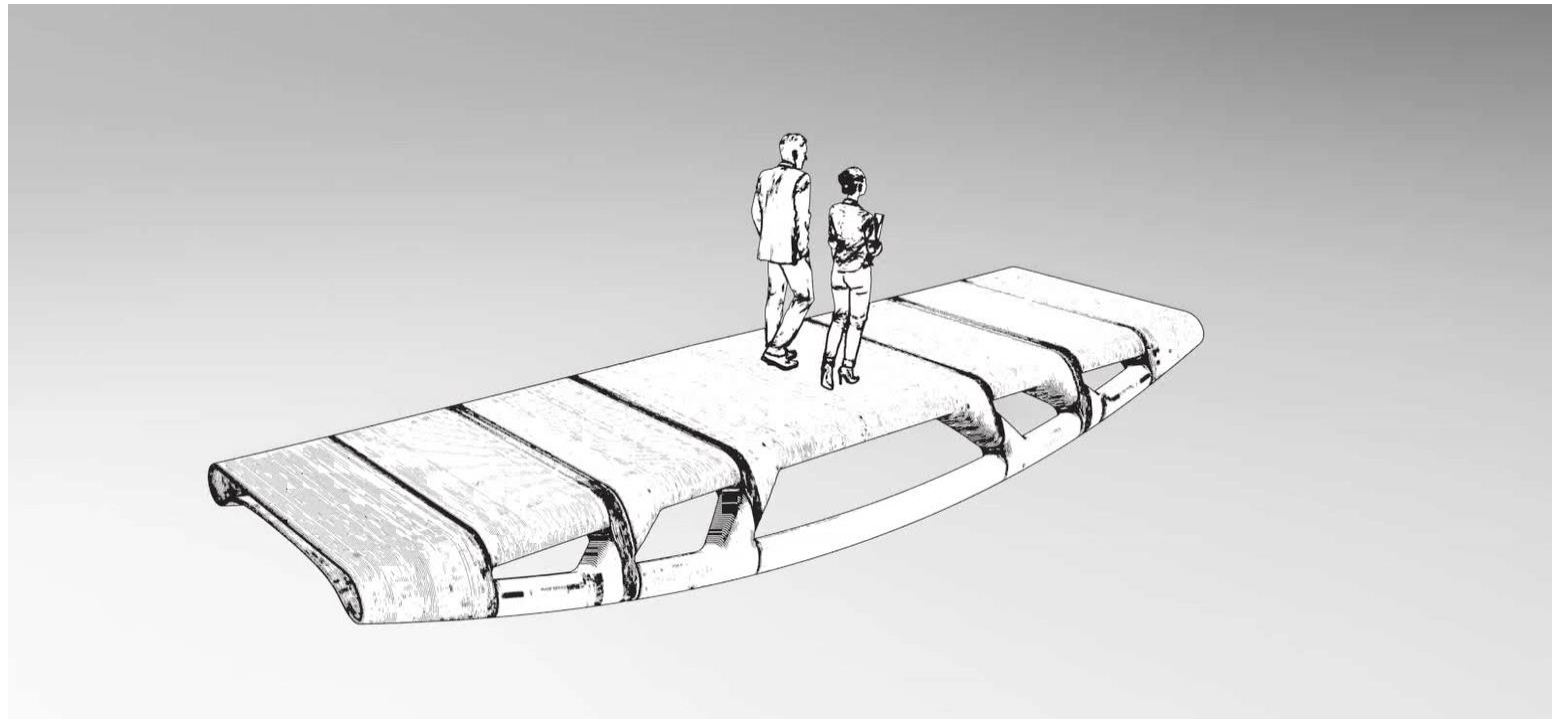
Case	optimized layout		
$T_{pre} = 0.6 \times T_{STD}$	$\phi$	8.1490e+03	
	$f_{ext}^T u_{ext}$	204.6562	
	$f_{ext}^T u_{pre}$	-114.3846	
$T_{pre} = 0.8 \times T_{STD}$	$\phi$	2.9178e+03	
	$f_{ext}^T u_{ext}$	211.6173	
	$f_{ext}^T u_{pre}$	-157.6005	
$T_{pre} = 1.0 \times T_{STD}$	$\phi$	2.0800e+02	
	$f_{ext}^T u_{ext}$	213.1219	
	$f_{ext}^T u_{pre}$	-198.6995	
$T_{pre} = 1.2 \times T_{STD}$	$\phi$	4.9464e-05	
	$f_{ext}^T u_{ext}$	222.6423	
	$f_{ext}^T u_{pre}$	-222.6353	
$T_{pre} = 1.4 \times T_{STD}$	$\phi$	1.0854e-04	
	$f_{ext}^T u_{ext}$	251.9399	
	$f_{ext}^T u_{pre}$	-251.9295	



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

*3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE)  
DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION*

Vertaling van 2D optimalisatie naar 3D ontwerp



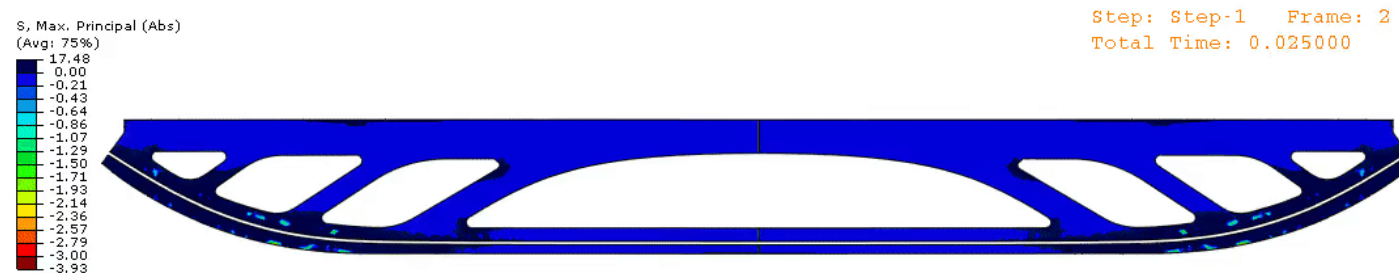
# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

## 3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE)

DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION

Vertaling van 2D optimalisatie naar 3D ontwerp

Verificatie van 3D ontwerp m.b.v. FEA



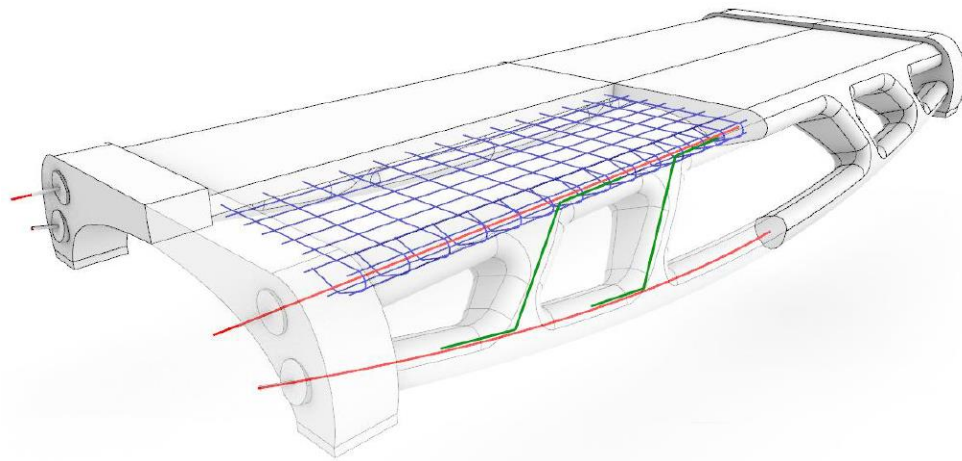
Het model werd bestudeerd met behulp van 3D-eindige-elementenanalyse en de structurele respons onder verschillende belastings-condities werd geanalyseerd

# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

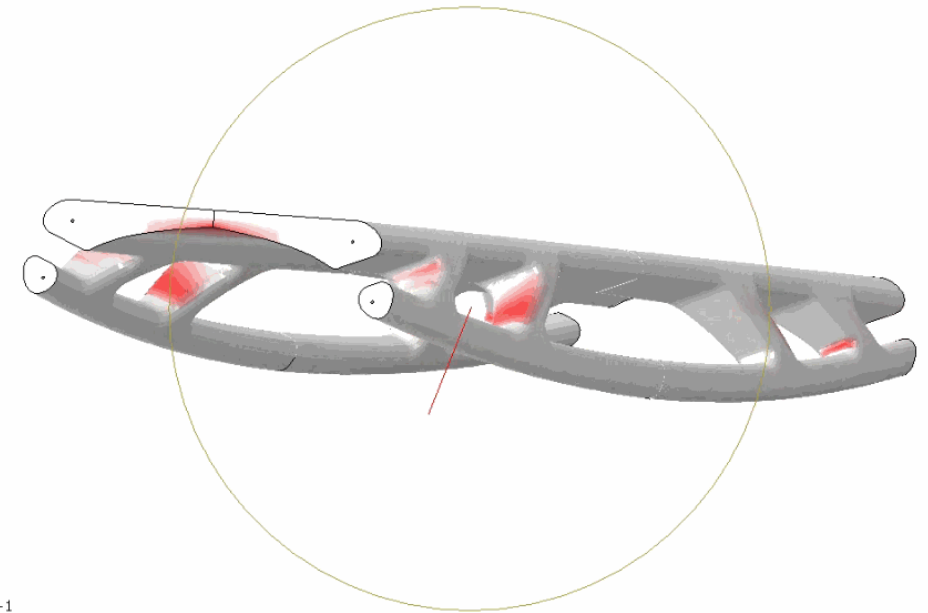
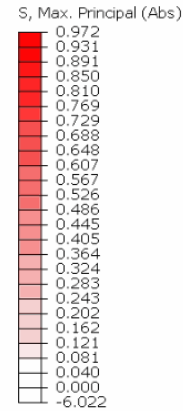
## 3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE) DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION

Vertaling van 2D optimalisatie naar 3D ontwerp

Verificatie van 3D ontwerp m.b.v. FEA



Step: Step-1  
Increment: 17; Step Time = 1.000  
Primary Var: S, Max. Principal (Abs)  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



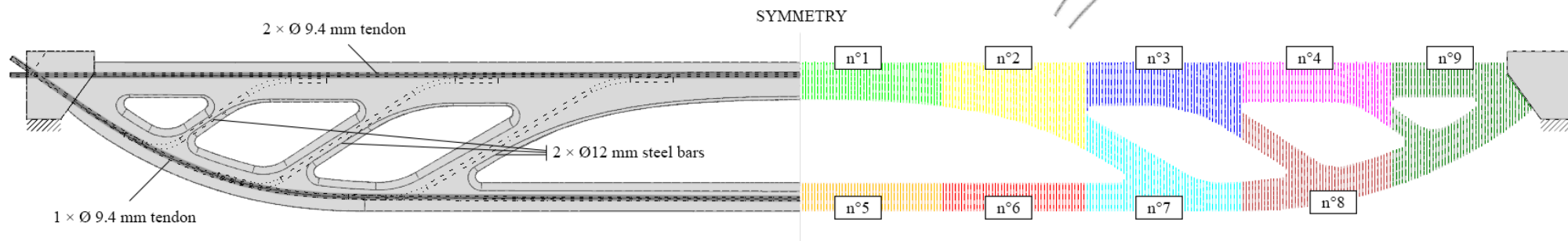
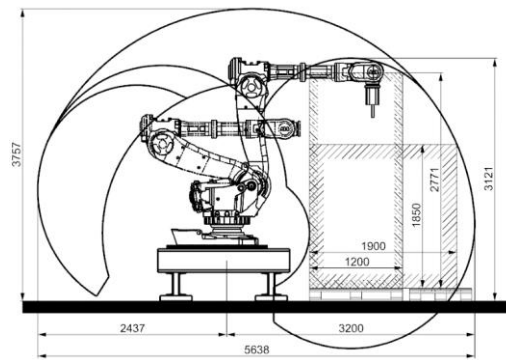
Step: Step-1  
Increment: 17; Step Time = 1.000  
Primary Var: S, Max. Principal (Abs)  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

50 kN (na-span onder) – 10 kN (na-span boven) – 5 kN/m<sup>2</sup> op het wegdek

# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE)  
DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION

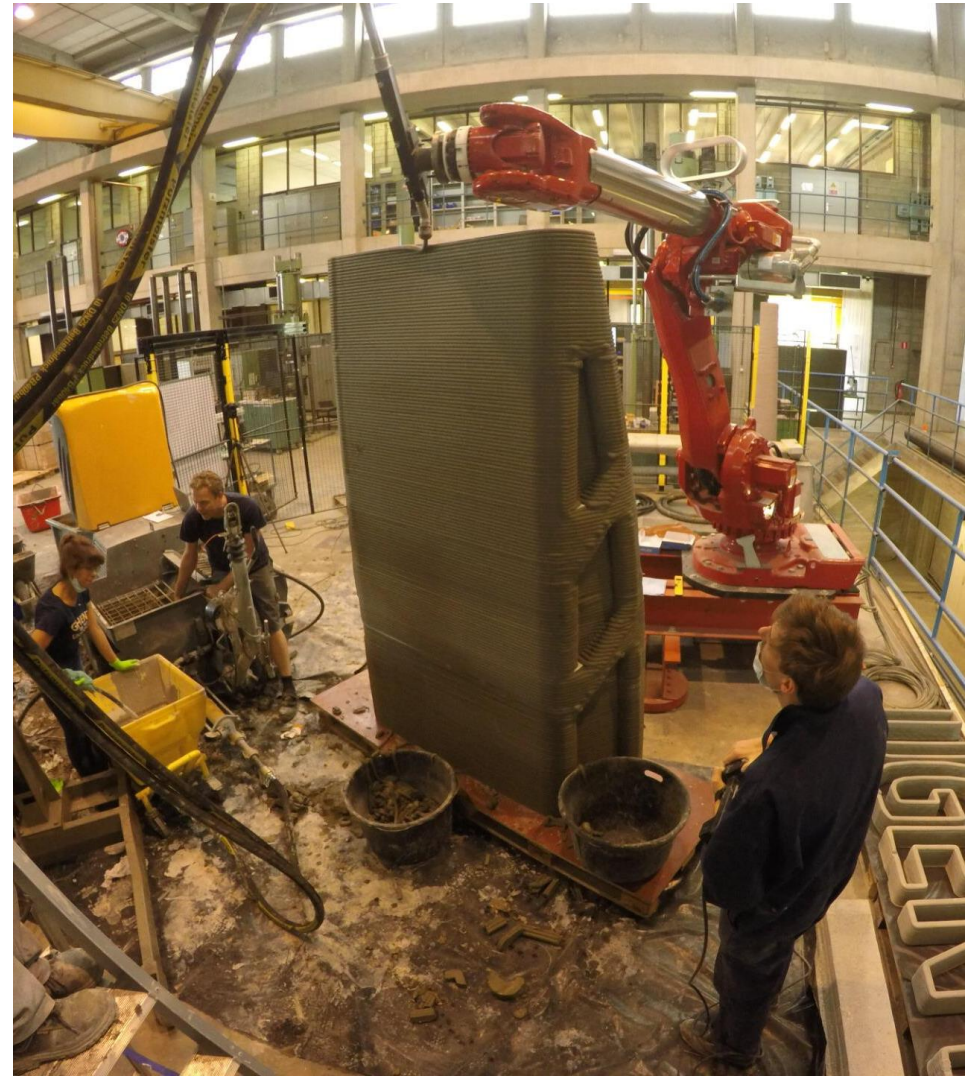
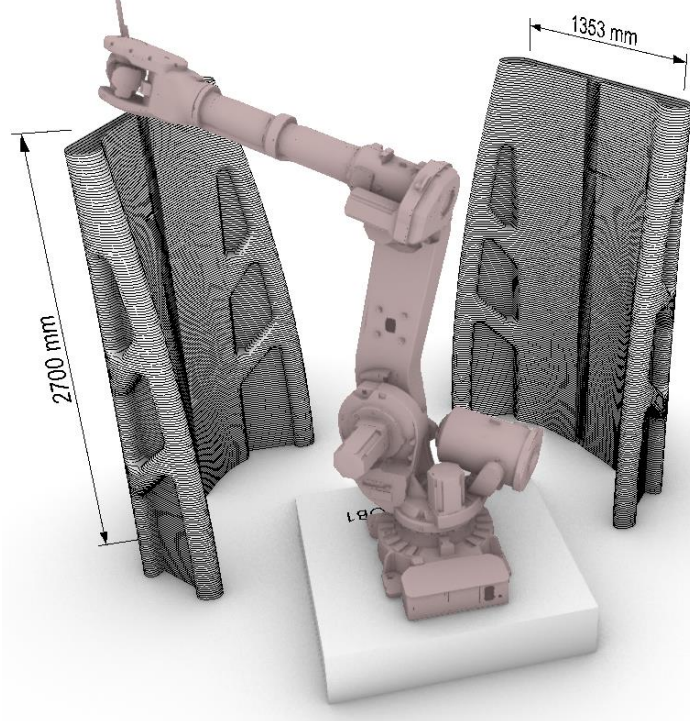
Praktische overwegingen



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIDGE)  
DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION

Praktische overwegingen



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE)  
DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION

Montage, integratie van wapening, voegen en naspannen van de brug

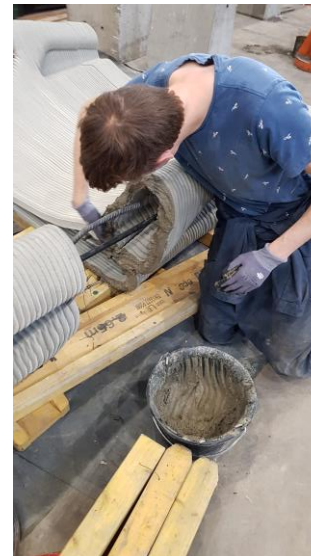




# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE)  
DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION

Montage, integratie van wapening, voegen en naspannen van de brug



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIDGE)  
DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION

Resultaat:



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE)  
DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION

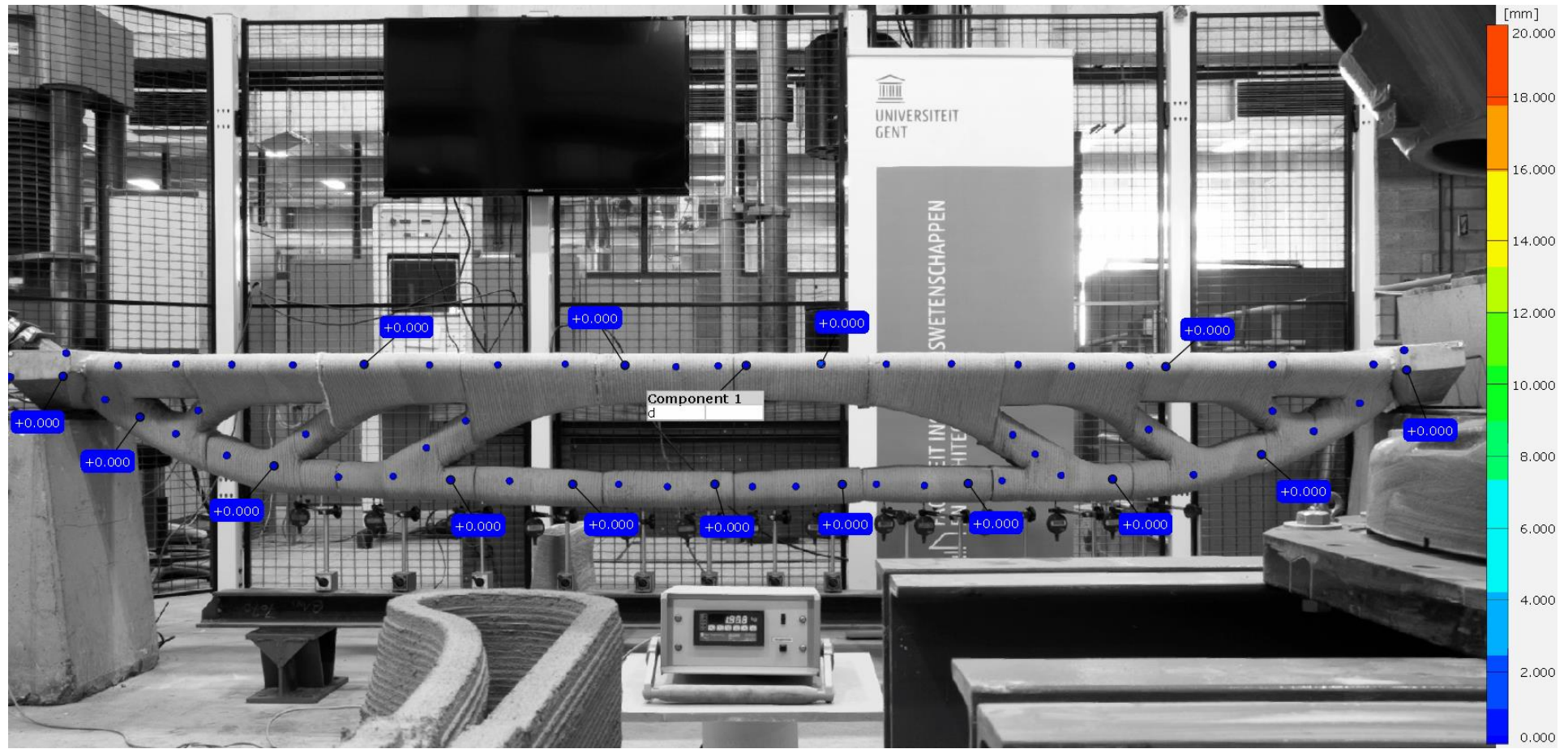
Validatie mechanisch gedrag van de brug (Ontwerp vs Uitvoering)



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIDGE)

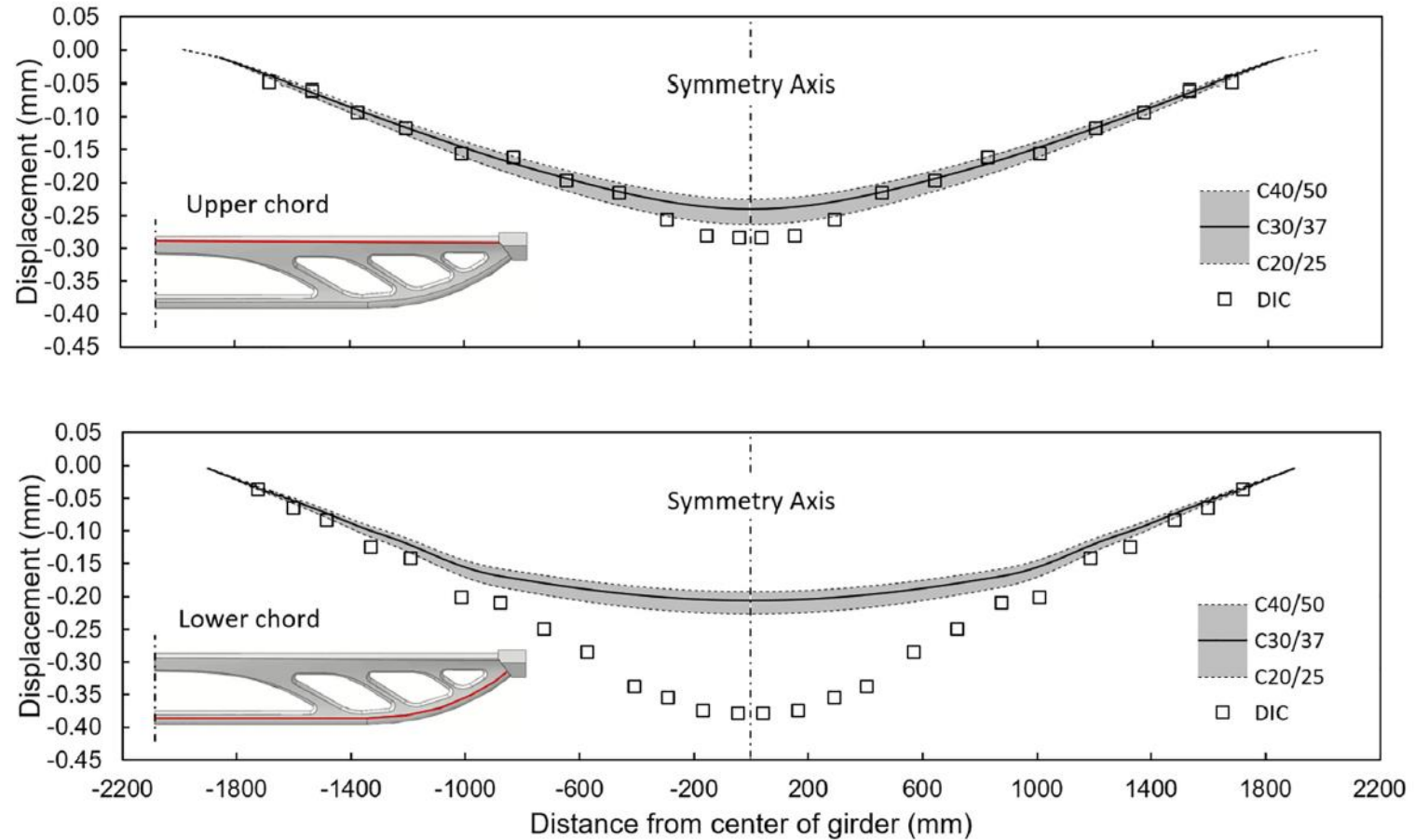
DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

## 3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE)

DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION



# 3D-GEPRINTE BRUGGEN

3D PRINTING OF A POST-TENSIONED CONCRETE GIRDER (BRIGDE)  
DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION



## CONCLUSIES

**"Is er potentieel in het combineren van topologie-optimalisatie en 3D-printen in de bouw?"**, Ik denk dat het antwoord duidelijk is: Ja! Op basis van de bevindingen van deze casestudies en recente onderzoekstudies, ziet de toekomst van ontwerpoptimalisatie gecombineerd met een digitale fabricage er rooskleurig uit.

DESALNIETTEMIN,

**... blijven er enkele uitdagingen ...** het probleem is dat we ontwerpen voor ongelooflijk complexe problemen; onze gebouw-omgeving is niet louter een structuur (of een thermisch probleem). Het heeft vele functies en creëert en beïnvloed ook de omgeving eromheen!

**Is het mogelijk om met al deze aspecten rekening te houden?**

... waarschijnlijk niet ...

Maar ik geloof wel dat **TOPOLOGIE OPTIMALISATIE** kan worden gebruikt als een hulpmiddel (**ontwerp-tool**) in het ontwerpproces!

Vooraf in combinatie met **ADDITIVE MANUFACTURING**





**Bedankt voor uw aandacht!**



**Vragen ?**