

Spanningen & rekken

SectionPro-handleiding — Zeshoekige, holle vierkante & U-ligger doorsnede onder BGT- en UGT-belastingen volgens drie normen (EC2, NBR-6118, BAEL 91)

BridgeKernel · 2026

Inleiding

Gegeven opgelegde krachten (N, M_y, M_z), bepaalt SectionPro iteratief de rektoestand ($\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z$) die het intern evenwicht vervult. Hieruit volgen spanningen, rekken, interne krachten en een veiligheidscoëfficiënt (FS).

Drie doorsneden en drie normen worden behandeld: **zeshoekig** (EC2), **hol vierkant** (NBR-6118) en **U-ligger** (BAEL 91), elk op BGT (lineair) en UGT (niet-lineair). Sommige gevallen slagen (OK), andere falen (KO).

Berekende resultaten

SectionPro rapporteert drie categorieën resultaten voor elk belastinggeval:

Spanningen & rekken

σ_c — Uiterste betonspanning
 $\sigma_{s, \min}, \sigma_{s, \max}$ — Staalspanningen
 ε_c — Uiterste betonrek
 $\varepsilon_{s, \min}, \varepsilon_{s, \max}$ — Staalrekken
FS — Veiligheidscoëfficiënt
Controle — OK / KO

Interne krachten

N_c — Drukresultante
 N_t — Trekresultante
 (x_C, y_C) — Drukwaartepunt
 (x_T, y_T) — Trekwaartepunt
 z — Interne hefboomsarm

Convergentie

N_{iter} — Iteraties
Tol — Convergentietolerantie
 $N_{\text{int}}, M_{z, \text{int}}, M_{y, \text{int}}$ — Interne krachten
 $\varepsilon_0, \kappa_x, \kappa_y$ — Rektoestand

Testscenario's

Elke doorsnede wordt op BGT (lineair-elastisch) en UGT (niet-lineair: parabool-rechthoek voor beton, bilineair voor staal) geanalyseerd, steeds met gescheurde doorsnede. De belastinggevallen combineren uniaxiale ($N + M_z$) en biaxiale buiging ($N + M_y + M_z$), met een mix van OK- en KO-resultaten.

Doorsnede	BGT (lineair)	UGT (niet-lineair)	Biaxiaal?	Norm
Zeshoekig	OK	KO	Ja (UGT)	EC2
Hol vierkant	OK	OK	Ja	NBR-6118
U-ligger	KO	OK	Ja (UGT)	BAEL 91

Massieve zeshoekige doorsnede

Invoergegevens

Beton

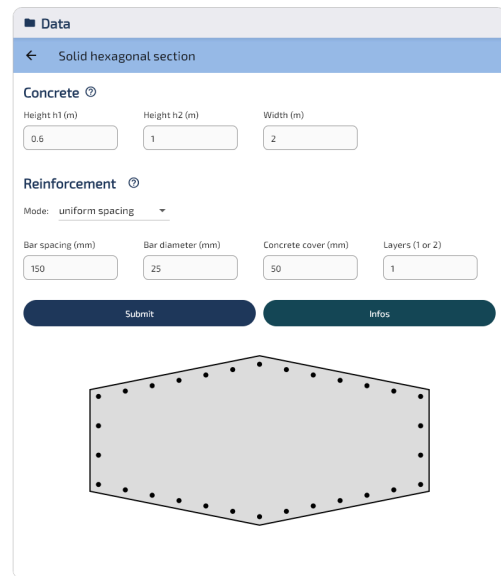
- Zeshoekige doorsnede
- Breedte $B = 2,00$ m
- Minimale dikte $h_1 = 0,60$ m
- Maximale dikte $h_2 = 1,00$ m

Wapening

- Uniforme stafverdeling 150 mm
- 30 wapeningsstaven
- Diameter 25 mm
- Dekking 50 mm
- 1 laag

Materiaalwetten (EC2)

- Beton C30/37: $f_{ck} = 30$ MPa
- Staal B500B: $f_{yk} = 500$ MPa

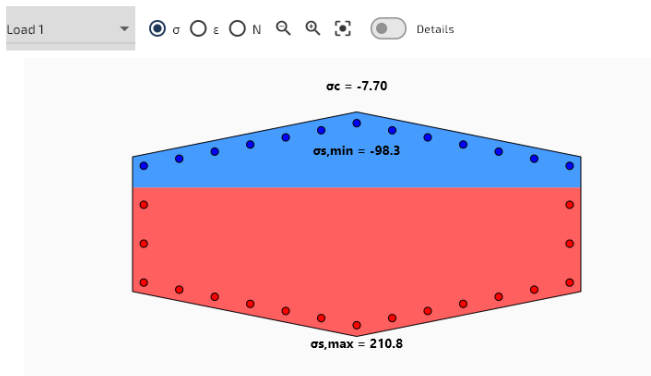


Figuur 1: Zeshoekige doorsnede — geometrie en wapening.

BGT — Gecombineerde buiging ($N + M_z$)

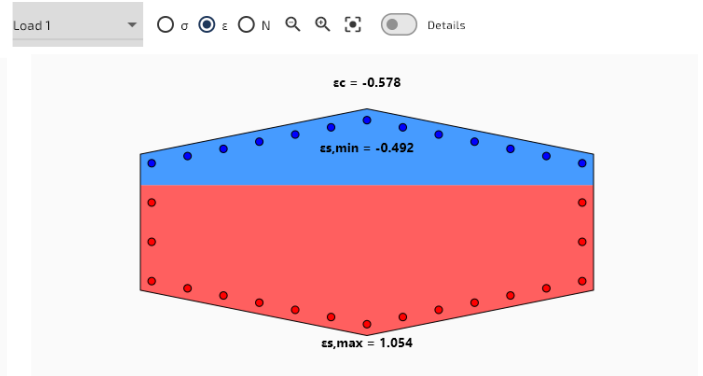
Opgelegde belastingen: $N = 500$ kN, $M_z = 1000$ kN · m, $M_y = 0$

Visualization of stresses and strains



Figuur 2: Spanningsverdeling.

Visualization of stresses and strains



Figuur 3: Rekverdeling.

Spanningen & rekken

Interne krachten

Convergentie

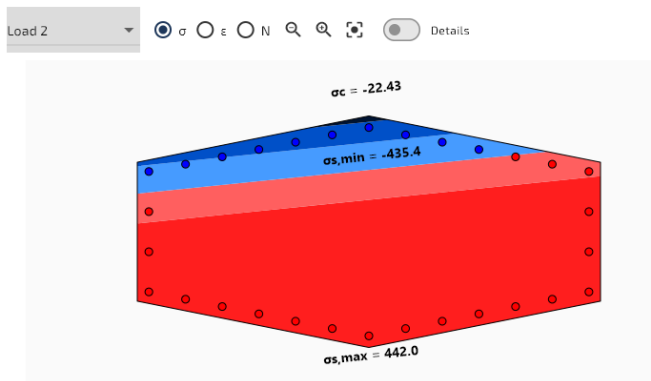
σ_c	-7,70 MPa	N_c	1731,2 kN	N_{iter}	4
------------	-----------	-------	-----------	------------	---

$\sigma_{s, \min}$	-98,33 MPa	N_t	-1231,2 kN	Tol	$3,91 \times 10^{-9}$
$\sigma_{s, \max}$	210,77 MPa	x_C	0,000 m	N_{int}	500,0 kN
ε_c	-0,578‰	y_C	0,345 m	$M_{z, \text{int}}$	1000,0 kN · m
$\varepsilon_{s, \min}$	-0,492‰	x_T	0,000 m	$M_{y, \text{int}}$	0,0 kN · m
$\varepsilon_{s, \max}$	1,054‰	y_T	-0,327 m	ε_0	$0,281 \times 10^{-3}$
FS	0,527	z	0,672 m	κ_x	$-1,717 \times 10^{-3}$
Controle	OK			κ_y	$0,000 \times 10^{-3}$

UGT — Biaxiale buiging ($N + M_y + M_z$)

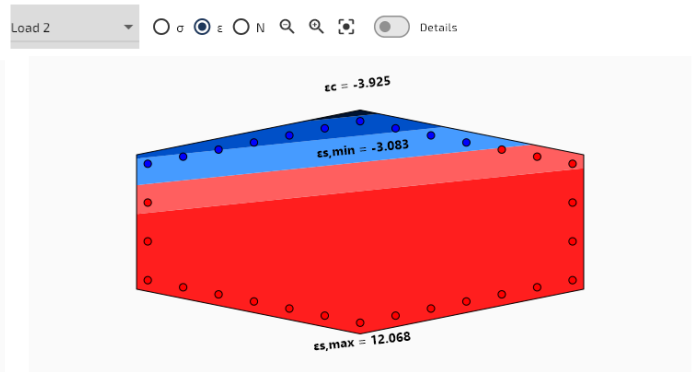
Opgelegde belastingen: $N = 2000$ kN, $M_z = 3000$ kN · m, $M_y = 1800$ kN · m

Visualization of stresses and strains



Figuur 4: Spanningsverdeling.

Visualization of stresses and strains



Figuur 5: Rekverdeling.

Spanningen & rekken

σ_c	-22,43 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-435,44 MPa
$\sigma_{s, \max}$	441,98 MPa
ε_c	-3,925‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-3,083‰
$\varepsilon_{s, \max}$	12,068‰
FS	1,121

Controle

KO

Interne krachten

N_c	5871,9 kN
N_t	-3871,9 kN
x_C	-0,252 m
y_C	0,356 m
x_T	0,083 m
y_T	-0,235 m
z	0,679 m

Convergentie

N_{iter}	8
Tol	$6,84 \times 10^{-9}$
N_{int}	2000,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	3000,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	1800,0 kN · m
ε_0	$4,492 \times 10^{-3}$
κ_x	$-16,834 \times 10^{-3}$
κ_y	$-1,721 \times 10^{-3}$

Wanneer $FS > 1$, overschrijden de opgelegde belastingen de doorsnede-capaciteit. Hier is het beton verpletterd ($\varepsilon_c = 3,925\text{‰} > \varepsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$). Voorbij het faalmoment verlengt een secansmodulus de materiaalwet om een fictief post-faalmoment evenwicht te bereiken, waarmee de overschrijding wordt gekwantificeerd ($FS = 1,121$).

Holle vierkante doorsnede

Invoergegevens

Beton

- Holle vierkante doorsnede
- Buitenzijde $a = 2,0$ m
- Wanddikte $t = 0,30$ m

Wapening

- Uniforme stafverdeling 150 mm
- 64 wapeningsstaven
- Diameter 20 mm
- Dekking 40 mm
- 1 laag per zijde (binnen + buiten)

Materiaalwetten (NBR-6118)

- Beton C30: $f_{ck} = 30$ MPa
- Staal: $f_{yk} = 500$ MPa

Data

Hollow Square Section

Concrete

Side length (m) Thickness (m)

Reinforcement

Mode: uniform spacing

Bar spacing (mm) Bar diameter (mm) Concrete cover (mm) Layers (1 or 2)

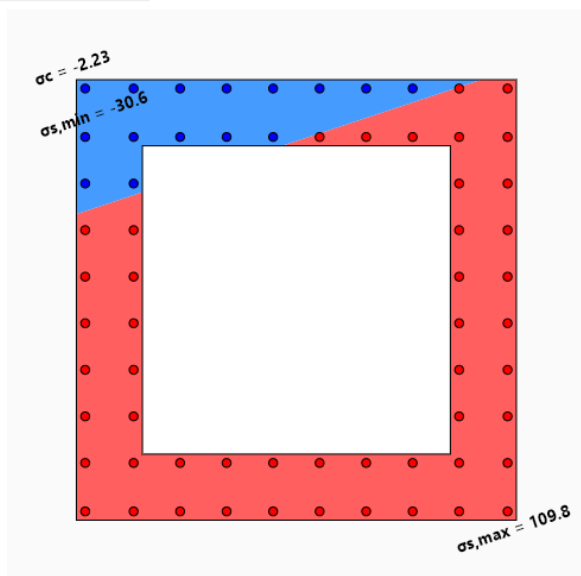
Submit Infos

Figuur 6: Holle vierkante doorsnede — geometrie en wapening.

BGT — Biaxiale buiging ($N + M_y + M_z$)

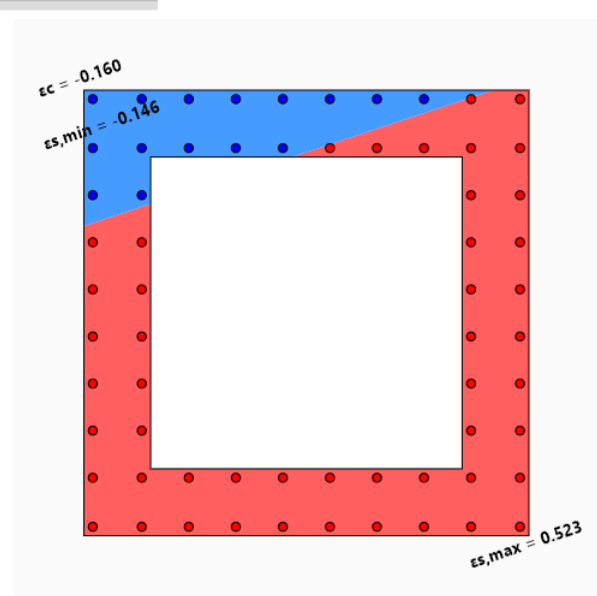
Opgelegde belastingen: $N = -400$ kN, $M_z = 900$ kN · m, $M_y = 400$ kN · m

Visualization of stresses and strains



Figuur 7: Spanningsverdeling.

Visualization of stresses and strains



Figuur 8: Rekverdeling.

Spanningen & rekken

σ_c	-2,23 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-30,57 MPa
$\sigma_{s, \max}$	109,79 MPa
ε_c	-0,160‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-0,146‰
$\varepsilon_{s, \max}$	0,523‰
FS	0,274
Controle	OK

Interne krachten

N_c	458,9 kN
N_t	-858,9 kN
x_C	-0,541 m
y_C	0,859 m
x_T	0,177 m
y_T	-0,589 m
z	1,616 m

Convergentie

N_{iter}	4
Tol	$7,72 \times 10^{-10}$
N_{int}	-400,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	900,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	400,0 kN · m
ε_0	$0,189 \times 10^{-3}$
κ_x	$-0,261 \times 10^{-3}$
κ_y	$-0,087 \times 10^{-3}$

UGT — Biaxiale buiging ($N + M_y + M_z$)

Opgelegde belastingen: $N = 0$ kN, $M_z = 6000$ kN · m, $M_y = 6000$ kN · m

Visualization of stresses and strains

Load 2 σ ε N M T Q R S V W X Y Z θ ϕ ψ χ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ λ μ ν ξ \omicron π ρ σ τ υ ϕ χ ψ ω δ ϵ ζ η θ ι κ

Maatwerk doorsnede — U-ligger

Invoergegevens

Deze doorsnede gebruikt de **maatwerk geometrie**-functie: buitencontour als XY-puntenlijst en wapening als (x, y, φ) -tabel.

Beton

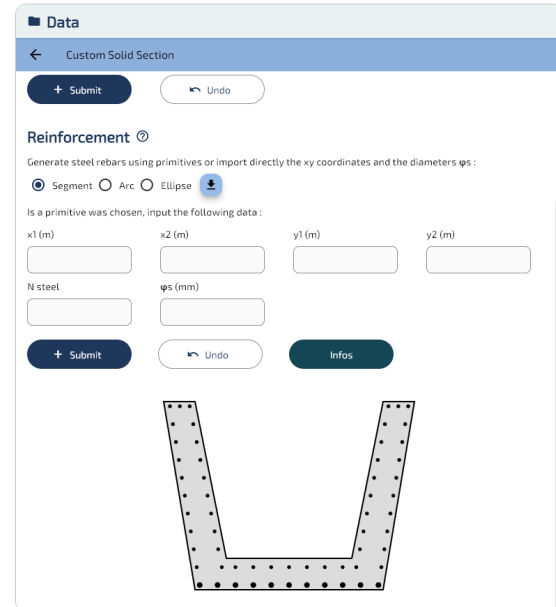
- U-ligger met schuine lijven
- Totale hoogte $h = 1,20$ m

Wapening

- Uniforme stafverdeling 150 mm
- Onderplaat: 11 wapeningsstaven, diameter 20 mm
- Lijven: 49 wapeningsstaven, diameter 12 mm
- 2 lagen per lijf

Materiaalwetten (BAEL 91)

- Beton: $f_{c28} = 30$ MPa, $\theta = 0,85$
- Staal fe500: $f_e = 500$ MPa



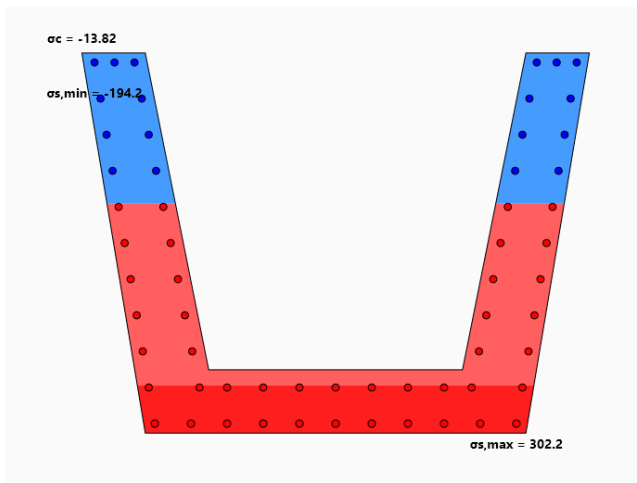
Figuur 11: U-ligger — geometrie en wapening.

BGT — Zuivere buiging (M_z)

Opgelegde belastingen: $N = 0$ kN, $M_z = 1500$ kN · m, $M_y = 0$

Visualization of stresses and strains

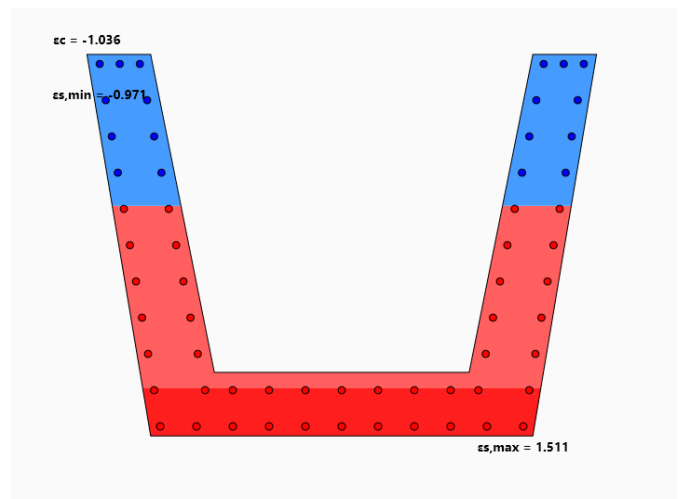
Load 1 σ ε N Q R Details



Figuur 12: Spanningsverdeling.

Visualization of stresses and strains

Load 1 σ ε N Q R Details



Figuur 13: Rekverdeling.

Spanningen & rekken

σ_c	-13,82 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-194,19 MPa
$\sigma_{s, \max}$	302,23 MPa
ε_c	-1,036‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-0,971‰
$\varepsilon_{s, \max}$	1,511‰
FS	1,209
Controle	KO

Interne krachten

N_c	1593,2 kN
N_t	-1593,2 kN
x_C	0,000 m
y_C	0,571 m
x_T	0,000 m
y_T	-0,371 m
z	0,942 m

Convergentie

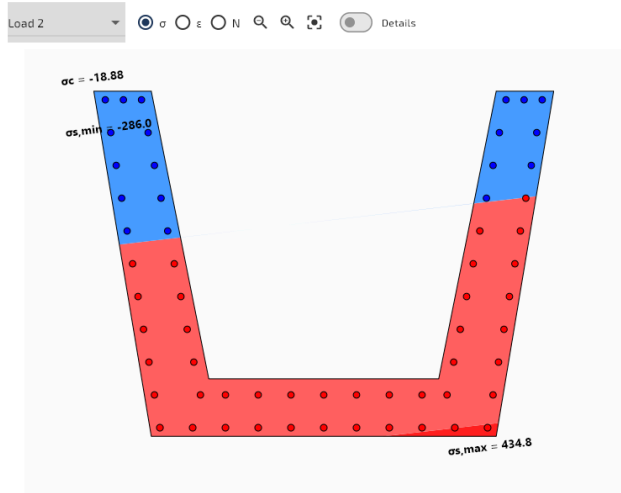
N_{iter}	4
Tol	$2,26 \times 10^{-13}$
N_{int}	0,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	1500,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	0,0 kN · m
ε_0	$0,543 \times 10^{-3}$
κ_x	$-2,177 \times 10^{-3}$
κ_y	$0,000 \times 10^{-3}$

Bij BGT is de controle KO: $\sigma_{s, \max} = 302,2$ MPa overschrijdt de BAEL toelaatbare spanning $\bar{\sigma}_s = 250,0$ MPa (schadelijke scheurvorming, $\eta = 1,60$), wat FS = 1,209 oplevert.

UGT — Biaxiale buiging ($M_y + M_z$)

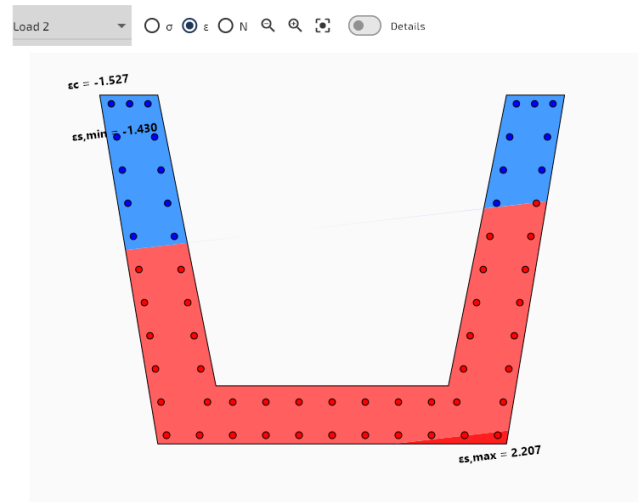
Opgelegde belastingen: $N = 0$ kN, $M_z = 2000$ kN · m, $M_y = 500$ kN · m

Visualization of stresses and strains



Figuur 14: Spanningsverdeling.

Visualization of stresses and strains



Figuur 15: Rekverdeling.

Spanningen & rekken

σ_c	-18,88 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-286,01 MPa
$\sigma_{s, \max}$	434,78 MPa
ε_c	-1,527‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-1,430‰
$\varepsilon_{s, \max}$	2,207‰
FS	0,436
Controle	OK

Interne krachten

N_c	2158,2 kN
N_t	-2158,2 kN
x_C	-0,192 m
y_C	0,562 m
x_T	0,039 m
y_T	-0,365 m
z	0,955 m

Convergentie

N_{iter}	4
Tol	$5,50 \times 10^{-9}$
N_{int}	0,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	2000,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	500,0 kN · m
ε_0	$0,772 \times 10^{-3}$
κ_x	$-2,811 \times 10^{-3}$
κ_y	$-0,325 \times 10^{-3}$

Validatie van resultaten

Controle intern evenwicht

De opgelegde belastingen (N, M_y, M_z) zijn de invoer. SectionPro bepaalt iteratief ($\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z$) en integreert de spanningen tot interne krachten ($N_{\text{int}}, M_{y,\text{int}}, M_{z,\text{int}}$). Bij convergentie geldt:

$$N_{\text{int}} \approx N \quad M_{y,\text{int}} \approx M_y \quad M_{z,\text{int}} \approx M_z$$

Doorsnede	Belasting	N (kN)	N_{int} (kN)	M_z (kN·m)	$M_{z,\text{int}}$ (kN·m)	Δ
Zeshoekig	BGT	500,0	500,0	1000,0	1000,0	0,00 %
	UGT	2000,0	2000,0	3000,0	3000,0	0,00 %
Hol vierk.	BGT	-400,0	-400,0	900,0	900,0	0,00 %
	UGT	0,0	0,0	6000,0	6000,0	0,00 %
U-ligger	BGT	0,0	0,0	1500,0	1500,0	0,00 %
	UGT	0,0	0,0	2000,0	2000,0	0,00 %

Het intern evenwicht is met machineprecisie vervuld voor alle zes belastinggevallen.

Prestatiebenchmark — 100.000 belastinggevallen

We voeren 100.000 belastinggevallen uit op **elk van de drie doorsneden** (BGT/UGT, uni-/biaxiaal, OK/KO-mix). De benchmark meet zuivere rekestijd; convergentie werd bereikt voor alle 300.000 gevallen.

Metriek	Zeshoekig	Hol vierkant	U-ligger
Belastinggevallen	100.000	100.000	100.000
Rekestijd	0,173 s	0,304 s	0,260 s
Snelheid	578.000 gev./s	329.000 gev./s	385.000 gev./s

Alle doorsneden worden in minder dan 0,3 s afgehandeld (329k–578k gevallen/s), geschikt voor systematische verificaties van belastingenveloppen uit EE-software.

Export

SectionPro exporteert resultaten als **PDF**, **tekst** en **Excel** (.xlsx), inclusief alle spanningen, krachten, convergentiegegevens en figuren.

STRESS AND STRAIN VERIFICATION RESULTS $\sigma - \epsilon$

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-04 13:27

Load case #1 is the most unfavorable

Stresses and strains $\sigma - \epsilon$

σ and ϵ are the stresses and strains of concrete and steel (indices c and s). The safety factor reflects the ratio between maximum strain and limit strain. SF=1 therefore indicates non-verification of the material.

Param	Unit	#1	#2
σ_c	MPa	-13.82	-18.88
$\sigma_{s,min}$	MPa	-194.19	-286.01
$\sigma_{s,max}$	MPa	302.23	434.78
ϵ_c	‰	-1.036	-1.527
$\epsilon_{s,min}$	‰	-0.971	-1.430
$\epsilon_{s,max}$	‰	1.511	2.207
SF	-	1.209	0.436
Check	-	Ko	Ok

Internal forces

N_c and N_t are the compression and tension forces resulting from the integration of stresses over the section. The application coordinates of these forces are given by xy . The lever arm z is the distance between these forces.

Param	Unit	#1	#2
N_c	kN	1593.2	2158.2
N_t	kN	-1593.2	-2158.2
x_C	m	0.000	-0.192
y_C	m	0.571	0.561
x_T	m	0.000	0.039
y_T	m	-0.371	-0.365
z	m	0.942	0.955

Convergence

Given below are the number of iterations necessary for convergence of the solution algorithm, the tolerance achieved, the internal forces (N, M_z, M_y) and the deformation state of the section ($\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$).

Param	Unit	#1	#2
N_{iter}	-	4	4
Tol	-	9.99e-9	9.99e-9
N_{int}	kN	0.0	0.0
M_z,int	kN-m	1500.0	2000.0
M_y,int	kN-m	-0.0	500.00
ϵ_o	‰	0.543	0.772
ϵ_{xx}	‰	-2.177	-2.811
ϵ_{yy}	‰	-0.000	-0.325

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

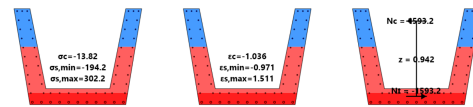
Figuur 16: PDF-export — pagina 1: resultaattabellen.

STRESS AND STRAIN VERIFICATION RESULTS $\sigma - \epsilon$

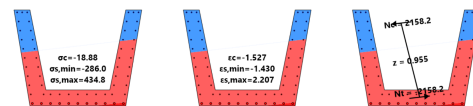
GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-04 13:27

Given below are figures representing graphically the previous tabular results.

Load case n°1 - Safety Factor = 1.209 (σ, ϵ and N_c, N_t)



Load case n°2 - Safety Factor = 0.436 (σ, ϵ and N_c, N_t)



GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

Figuur 17: PDF-export — pagina 2: figuren.

Conclusie

De analyse identificeert correct de belastinggevallen die de capaciteit overschrijden, met intern evenwicht met machineprecisie in alle gevallen.

Doorsnede	Belastinggeval	Norm	Controle	Evenwicht Δ
Zeshoekig	BGT (lineair)	EC2	OK	0,00 %
	UGT (niet-lineair)	EC2	KO	0,00 %
Hol vierk.	BGT (lineair)	NBR-6118	OK	0,00 %
	UGT (niet-lineair)	NBR-6118	OK	0,00 %
U-ligger	BGT (lineair)	BAEL 91	KO	0,00 %
	UGT (niet-lineair)	BAEL 91	OK	0,00 %

De benchmark (100k gevallen) toont 0,17–0,30 s per doorsnede (329k–578k gev./s), met convergentie voor alle 300.000 gevallen.