

Wapeningsontwerp

SectionPro Tutorial — Benodigde wapening voor zeshoekige, vierkante koker & U-profiel doorsneden onder SLS- en ULS-belastingen (EC2, NBR-6118, BAEL 91)

BridgeKernel · 2026

Inleiding

Gegeven opgelegde interne krachten (N, M_y, M_z) en een vooraf gedefinieerde wapeningsindeling (staafposities en afstand), bepaalt SectionPro de minimale staafdiameter φ_s om aan de normatieve grenswaarden te voldoen. Dit is het inverse probleem van de spanningsverificatie (Artikel #2): in plaats van te controleren of een wapening voldoende is, vindt de software de wapening die evenwicht bereikt.

De oplosser itereert op φ_s totdat de rekstoestand $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$ intern evenwicht bereikt met de normatieve rekgrenzen exact bereikt. Wanneer het beton alleen de belastingen kan weerstaan, is het resultaat $A_s = 0$ — geen staal nodig.

Dit artikel gebruikt dezelfde drie doorsneden en belastingsgevallen als Artikel #2. Daar was de wapening vastgelegd en overschreden sommige gevallen de capaciteit ($FS > 1$, controle KO). Hier bepalen we de benodigde wapening. De correlatie is direct: hogere FS in Artikel #2 betekent grotere φ_s in Artikel #3.

Berekende resultaten

SectionPro rapporteert drie categorieën resultaten voor elk belastingsgeval:

Spanningen & rekken + ontwerp

σ_c — Extreme betonspanning
 $\sigma_{s, \min}, \sigma_{s, \max}$ — Staalspanningen
 ε_c — Extreme betonrek
 $\varepsilon_{s, \min}, \varepsilon_{s, \max}$ — Staalrekken
Pivot — Bezwijkmodus (A, B, of $A_s = 0$)
 φ_s — Benodigde staafdiameter

Interne krachten

N_c — Drukresultante
 N_t — Trekresultante
 (x_C, y_C) — Drukzwaartepunt
 (x_T, y_T) — Trekszwaartepunt
 z — Interne hefboomsarm

Convergentie

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

Bezwijkpunten

Het bezwijkpunt geeft aan welk materiaal als eerste zijn uiterste rek bereikt:

- **Pivot A — Staalbreuk.** De trekwapening bereikt ε_{su} voordat het beton bezwijkt. Typisch voor licht gewapende doorsneden. Maatgevende rek: $\varepsilon_s = \varepsilon_{su}$.
- **Pivot B — Betonbreuk.** Het beton bereikt ε_{cu} voordat het staal volledig vloeit. Typisch voor zwaar belaste doorsneden. Maatgevende rek: $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$.
- **Pivot C — Zware druk.** De rek bereikt $\varepsilon_c = \varepsilon_{c2}$ op $(1 - \varepsilon_{c2}/\varepsilon_{cu2}) \cdot h$ vanaf de meest gedrukte vezel ($3h/7$ voor $\varepsilon_{c2} = 2\%$ en $\varepsilon_{cu2} = 3.5\%$). Zeldzaam in de praktijk.
- **Pivot $A_s = 0$ — Geen wapening nodig.** Het beton alleen weerstaat de belastingen. Benodigd staaloppervlak is nul.

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

Wapeningsindeling

- Gelijkmatige afstand 150 mm
- 30 staaftposities
- Dekking 50 mm — 1 laag
- Diameter φ_s : te bepalen

Materiaalwetten (EC2)

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

Data

← Solid hexagonal section

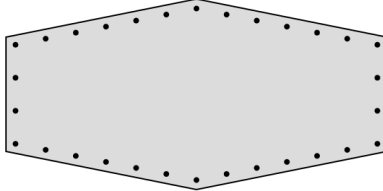
Concrete ⓘ

Height h1 (m) Height h2 (m) Width (m)

Reinforcement ⓘ

Mode: uniform spacing

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



Figuur 1: Zeshoekige doorsnede.

SLS — Gecombineerde buiging ($N + M_z$)

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

Visualization of stresses and strains

Load 1 σ ε N Q M R S T U V W X Y Z A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z A B C D E F G H I

Spanningen & rekken + ontwerp

Interne krachten

Convergentie

σ_c	-11.30 MPa	N_c	1697.8 kN	N_{iter}	4
$\sigma_{s, min}$	-139.49 MPa	N_t	-1197.8 kN	Tol	3.57×10^{-8}
$\sigma_{s, max}$	400.00 MPa	x_C	0.000 m	N_{int}	500.0 kN
ε_c	-0.847‰	y_C	0.364 m	$M_{z, int}$	1000.0 kN · m
$\varepsilon_{s, min}$	-0.697‰	x_T	0.000 m	$M_{y, int}$	0.0 kN · m
$\varepsilon_{s, max}$	2.000‰	y_T	-0.320 m	ε_0	0.651×10^{-3}
Pivot	A	z	0.683 m	κ_x	-2.997×10^{-3}
φ_s	17.60 mm			κ_y	0.000×10^{-3}

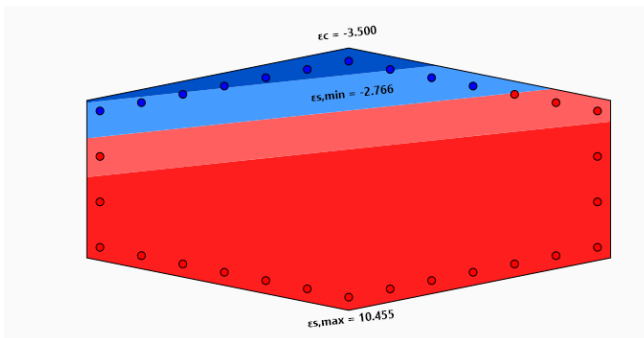
Pivot A: het staal is maatgevend ($\varepsilon_{s, max} = 2.000\text{‰} = \varepsilon_{su}$). De benodigde diameter is $\varphi_s = 17.60$ mm voor alle 30 staafposities.

ULS — Tweeassige 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

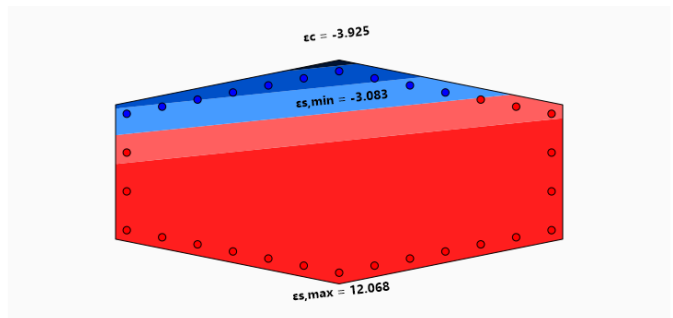
Load 2 σ ε N Q κ Details



Figuur 4: Spanningsverdeling.

Visualization of stresses and strains

Load 2 σ ε N Q κ Details



Figuur 5: Rekverdeling.

Spanningen & rekken + ontwerp

Interne krachten

Convergentie

σ_c	-20.00 MPa	N_c	5827.2 kN	N_{iter}	43
$\sigma_{s, min}$	-435.21 MPa	N_t	-3827.2 kN	Tol	3.66×10^{-8}
$\sigma_{s, max}$	440.81 MPa	x_C	-0.255 m	N_{int}	2000.0 kN
ε_c	-3.500‰	y_C	0.355 m	$M_{z, int}$	3000.0 kN · m
$\varepsilon_{s, min}$	-2.766‰	x_T	0.082 m	$M_{y, int}$	1800.0 kN · m
$\varepsilon_{s, max}$	10.455‰	y_T	-0.243 m	ε_0	3.845×10^{-3}
Pivot	B	z	0.687 m	κ_x	-14.689×10^{-3}
φ_s	25.12 mm			κ_y	-1.556×10^{-3}

Pivot B: het beton is maatgevend ($\varepsilon_c = -3.500\text{‰} = \varepsilon_{cu}$). Benodigde diameter: $\varphi_s = 25.12$ mm voor de ULS tweeassige belasting.

Vierkante koker doorsnede

Invoergegevens

Beton

- Vierkante koker doorsnede
- Buitenzijde $a = 2.0$ m
- Wanddikte $t = 0.30$ m

Wapeningsindeling

- Gelijkmatige afstand 150 mm
- 64 staafposities
- Dekking 40 mm
- 1 laag per vlak (binnen + buiten)
- Diameter φ_s : te bepalen

Materiaalwetten (NBR-6118)

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

Data

Hollow Square Section

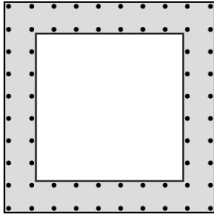
Concrete

Side length (m) Thickness (m)

Reinforcement ⓘ

Mode: uniform spacing ▾

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



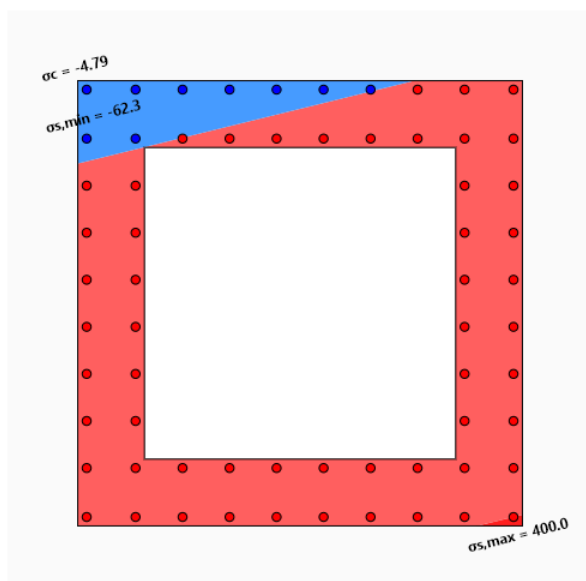
Figuur 6: Vierkante koker doorsnede — geometrie en wapeningsindeling.

SLS — Tweeassige 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

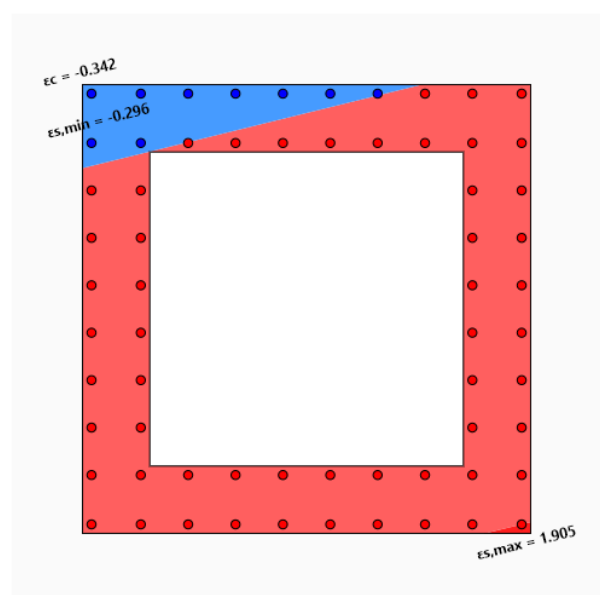
Load 1 σ ε N



Figuur 7: Spanningsverdeling.

Visualization of stresses and strains

Load 1 σ ε N



Figuur 8: Rekverdeling.

Aangepaste doorsnede — U-profiel

Invoergegevens

Deze doorsnede gebruikt de functie **aangepaste massieve geometrie**. De buitencontour is een lijst van XY-punten en de wapeningsindeling een tabel van (x, y) -posities. Dit is de aanbevolen procedure voor niet-standaard geometrieën.

Beton

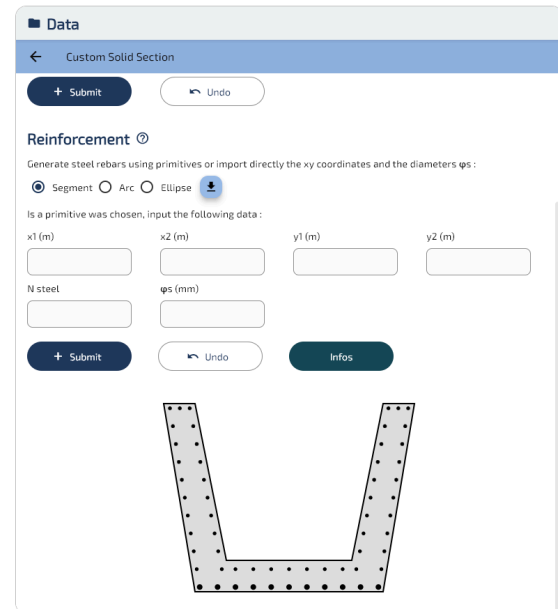
- U-profiel met schuine lijven
- Totale hoogte $h = 1.20$ m

Wapeningsindeling

- Gelijkmatige afstand 150 mm
- Ondervloer: 11 posities
- Lijven: 49 posities
- 2 lagen per lijf
- Diameter φ_s : te bepalen

Materiaalwetten (BAEL 91)

- Beton: $f_{c28} = 30$ MPa, $\theta = 0.85$
- Staal fe500: $f_e = 500$ MPa

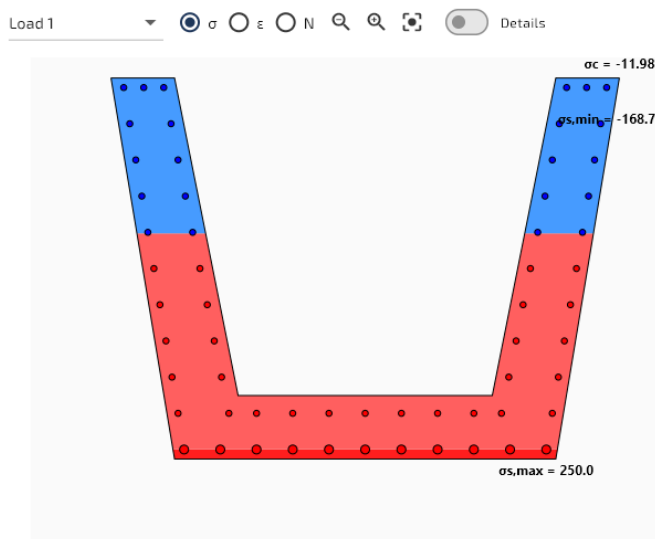


Figuur 11: U-profiel — geometrie en wapeningsindeling.

SLS — Zuivere buiging (M_z)

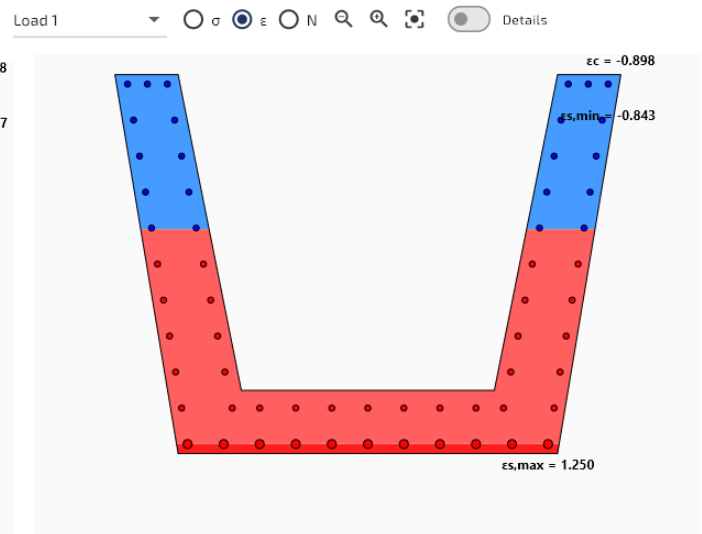
Opgelegde belastingen: $N = 0$ kN, $M_z = 1500$ kN · m, $M_y = 0$

Visualization of stresses and strains



Figuur 12: Spanningsverdeling.

Visualization of stresses and strains



Figuur 13: Rekverdeling.

Spanningen & rekken + ontwerp

σ_c	-11.98 MPa
$\sigma_{s,\min}$	-168.65 MPa
$\sigma_{s,\max}$	250.00 MPa
ε_c	-0.898‰
$\varepsilon_{s,\min}$	-0.843‰
$\varepsilon_{s,\max}$	1.250‰
Pivot	A
φ_s	17.88 mm

Interne krachten

N_c	1680.9 kN
N_t	-1680.9 kN
x_C	0.000 m
y_C	0.571 m
x_T	0.000 m
y_T	-0.321 m
z	0.892 m

Convergentie

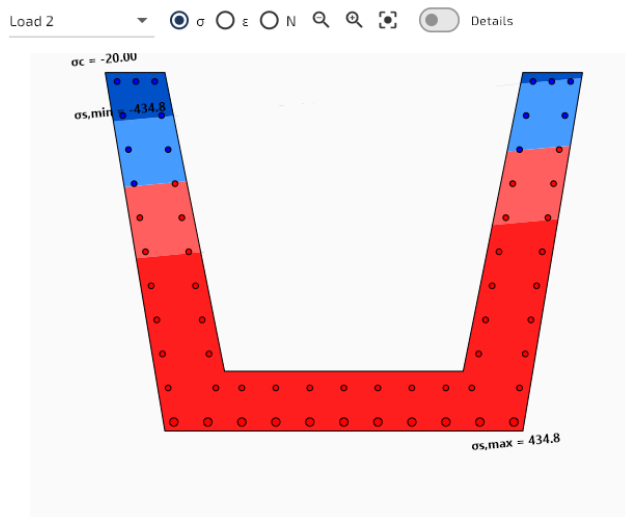
N_{iter}	4
Tol	2.21×10^{-7}
N_{int}	0.0 kN
$M_{z,\text{int}}$	1500.0 kN · m
$M_{y,\text{int}}$	0.0 kN · m
ε_0	0.434×10^{-3}
κ_x	-1.836×10^{-3}
κ_y	0.000×10^{-3}

Pivot A: het staal is maatgevend ($\sigma_{s,\max} = 250.00 \text{ MPa} = \bar{\sigma}_s$, BAEL toelaatbare spanning voor schadelijke scheurvorming). Benodigde diameter: $\varphi_s = 17.88 \text{ mm}$, uniform op alle 60 staafposities.

ULS — Tweeassige buiging ($M_y + M_z$)

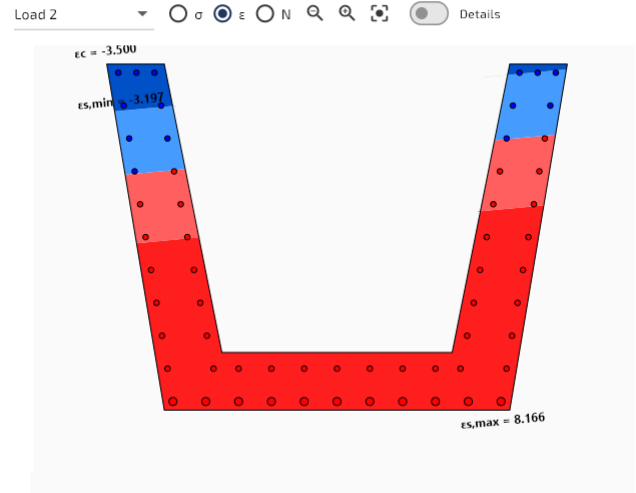
Opgelegde belastingen: $N = 0 \text{ kN}$, $M_z = 2000 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $M_y = 500 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Visualization of stresses and strains



Figuur 14: Spanningsverdeling.

Visualization of stresses and strains



Figuur 15: Rekverdeling.

Spanningen & rekken + ontwerp

σ_c	-20.00 MPa
$\sigma_{s,\min}$	-434.78 MPa
$\sigma_{s,\max}$	434.78 MPa
ε_c	-3.500‰
$\varepsilon_{s,\min}$	-3.197‰
$\varepsilon_{s,\max}$	8.166‰
Pivot	B
φ_s	13.26 mm

Interne krachten

N_c	2386.2 kN
N_t	-405.4 kN
x_C	-0.142 m
y_C	0.596 m
x_T	-0.060 m
y_T	0.191 m
z	0.413 m

Convergentie

N_{iter}	39
Tol	3.29×10^{-8}
N_{int}	0.0 kN
$M_{z,\text{int}}$	2000.0 kN · m
$M_{y,\text{int}}$	500.0 kN · m
ε_0	3.693×10^{-3}
κ_x	-8.996×10^{-3}
κ_y	-0.833×10^{-3}

Pivot B: het beton is maatgevend ($\varepsilon_c = -3.500\text{‰} = \varepsilon_{cu}$). Benodigde diameter: $\varphi_s = 13.26 \text{ mm}$ voor de ULS tweeassige belasting.

Validatie van resultaten

Controle intern evenwicht

De opgelegde belastingen (N, M_y, M_z) zijn de **invoer**. SectionPro vindt φ_s en de rekstoestand ($\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z$) iteratief, en integreert spanningen over de doorsnede om de **interne** krachten ($N_{\text{int}}, M_{y,\text{int}}, M_{z,\text{int}}$) te verkrijgen. Bij convergentie moeten deze overeenkomen met de opgelegde belastingen:

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

Doorsnede	Belasting	N (kN)	N_{int} (kN)	M_z (kN·m)	$M_{z,\text{int}}$ (kN·m)	Δ
Zeshoekig	SLS	500.0	500.0	1000.0	1000.0	0.00 %
	ULS	2000.0	2000.0	3000.0	3000.0	0.00 %
Vierk. koker	SLS	-400.0	-400.0	900.0	900.0	0.00 %
	ULS	0.0	0.0	6000.0	6000.0	0.00 %
U-profiel	SLS	0.0	0.0	1500.0	1500.0	0.00 %
	ULS	0.0	0.0	2000.0	2000.0	0.00 %

Intern evenwicht is tot machineprecisie voldaan voor alle zes gevallen — drie geometrieën, drie normatieve codes, lineaire (SLS) en niet-lineaire (ULS) materiaalwetten.

Kruisverwijzing met Artikel #2

De onderstaande tabel vergelijkt de veiligheidsfactor uit Artikel #2 (vaste wapening) met de benodigde φ_s berekend in dit artikel. Het wapeningsontwerp past een uniforme φ_s toe op alle staafposities.

Doorsnede	Belasting	φ_s (Art. #2)	FS (Art. #2)	Controle (Art. #2)	Pivot	φ_s benodigd
Zeshoekig	SLS	25 mm	0.527	OK	A	17.6 mm
	ULS	25 mm	1.121	KO	B	25.1 mm
Vierk. koker	SLS	20 mm	0.274	OK	A	10.0 mm
	ULS	20 mm	0.634	OK	B	19.4 mm
U-profiel	SLS	20/12 mm	1.209	KO	A	17.9 mm
	ULS	20/12 mm	0.436	OK	B	13.3 mm

Voor uniforme wapening (zeshoekig en vierkante koker) is de correlatie eenvoudig: $FS > 1$ impliceert $\varphi_{s,\text{required}} > \varphi_{s,\text{original}}$ en omgekeerd. Voor het U-profiel met gemengde diameters moet de vergelijking op totaal staaloppervlak worden gemaakt.

Prestatiebenchmark — 100.000 belastingsgevallen

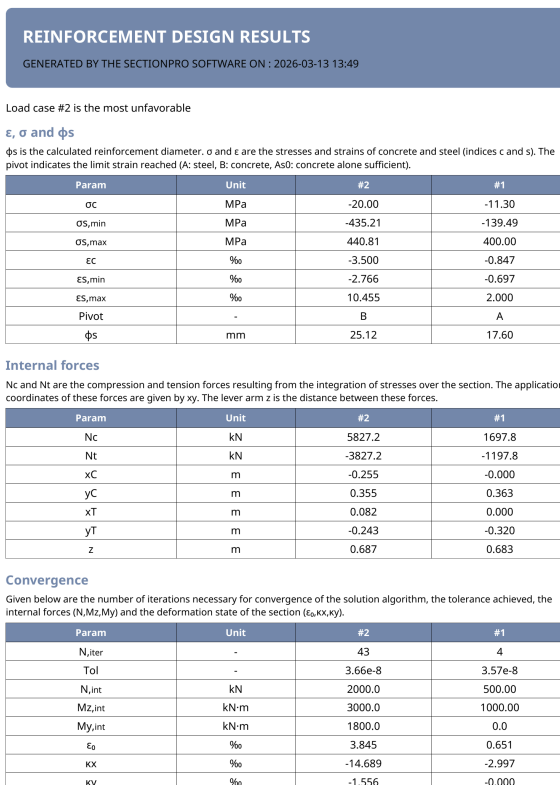
Om de geschiktheid van SectionPro aan te tonen, voeren we 100.000 belastingsgevallen uit op **elk van de drie doorsneden**. De gevallen combineren SLS en ULS, eenassige en tweeassige buiging. De benchmark meet de pure rekentijd, exclusief UI-overhead. Convergentie werd bereikt voor alle 300.000 gevallen.

Metriek	Zeshoekig	Vierkante koker	U-profiel
Belastingsgevallen	100.000	100.000	100.000
Rekentijd	5,26 s	5,30 s	5,35 s
Snelheid	19.000 bel./s	18.900 bel./s	18.700 bel./s

Alle drie doorsneden voltooien in 5,3 s voor 100.000 gevallen — snelheden van 18.700–19.000 ontwerpen/s. Trager dan de spanningsverificatie (Artikel #2): het ontwerp voegt een buitenlus op φ_s toe, met volledige oplossing van $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$ per iteratie. Convergentie bereikt voor alle 300.000 gevallen. SectionPro ontwerpt 100.000 gevallen in onder 6 s.

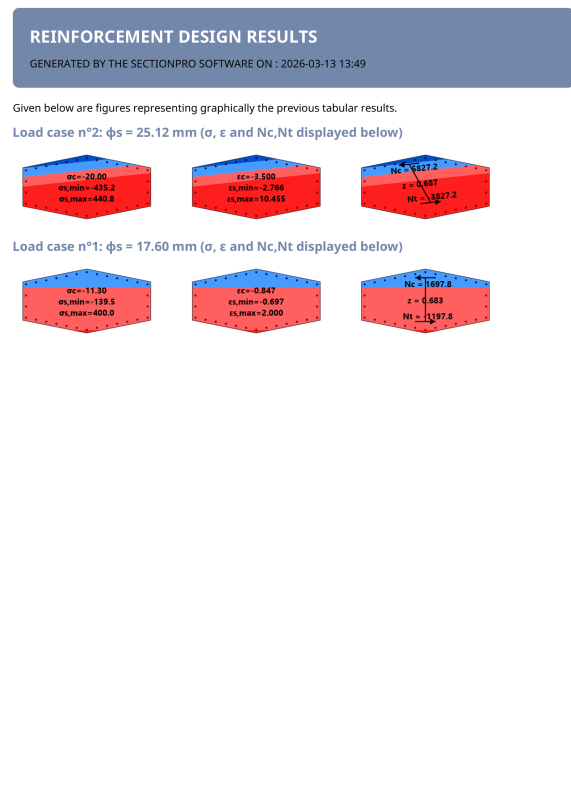
Export

Resultaten exporteerbaar als **PDF**, **tekst** en **Excel** (.xlsx). Gegevens per geval: spanningen, rekken, pivot, φ_s , interne krachten en convergentie.



GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

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



GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

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

| Conclusie

In de praktijk staat een constructief ingenieur doorgaans voor twee complementaire problemen: het verifiëren van een doorsnede met bekende wapening — zoals behandeld in Artikel #2 — of het bepalen van de benodigde wapening om een gegeven set belastingen te weerstaan. De functie voor wapeningsontwerp behandelt het tweede geval rechtstreeks. Wanneer de staafindeling bekend is maar de diameter niet vaststaat, vindt SectionPro de minimale φ_s zodanig dat de doorsnede exact tot 100% van haar capaciteit wordt belast onder de normatieve rekgrenzen. Dit geeft de ingenieur de strikt minimale wapening als uitgangspunt, van waaruit een praktische staafdiameter kan worden gekozen.

De resultaten zijn consistent met de formulering van het inverse probleem: intern evenwicht is tot machineprecisie voldaan voor alle belastingsgevallen, over drie verschillende geometrieën, drie normatieve codes en zowel SLS- als ULS-grenstoestanden. De oplosser convergeert betrouwbaar in alle gevallen. Wat prestaties betreft dient de benchmark van 100.000 gevallen als bovengrens — in de praktijk werkt een constructief ingenieur doorgaans met enkele honderden combinaties. Bij de gemeten snelheid van 19.000 ontwerpen per seconde zijn 500 combinaties in minder dan 30 milliseconden voltooid: de berekening is in essentie instantaan.