

# Bewehrungsbemessung

SectionPro-Tutorial — Erforderliche Bewehrung für Sechseck-, Hohlquadrat- & U-Profil unter GZG/GZT (EC2, NBR-6118, BAEL 91)

BridgeKernel · 2026

## Einleitung

Für gegebene Schnittgrößen ( $N, M_y, M_z$ ) und eine vordefinierte Bewehrungsanordnung (Stabpositionen und Abstände) ermittelt SectionPro den minimalen Stabdurchmesser  $\varphi_s$ , der die normativen Grenzwerte an jeder Stabposition einhält. Dies ist das inverse Problem zur Spannungsprüfung aus Artikel #2: statt zu prüfen, ob eine vorhandene Bewehrung ausreicht, findet die Software die Bewehrung, die das Gleichgewicht unter den aufgetragenen Lasten herstellt.

Der Löser iteriert über  $\varphi_s$ , bis der Dehnungszustand ( $\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z$ ) das innere Gleichgewicht erfüllt und die normativen Dehnungsgrenzen exakt erreicht sind. Kann der Beton allein die aufgetragenen Lasten ohne Bewehrung aufnehmen, ergibt sich  $A_s = 0$  — es wird kein Stahl benötigt.

Dieser Artikel nutzt dieselben drei Querschnitte und Lastfälle wie Artikel #2. Dort war die Bewehrung fest vorgegeben und einige Lastfälle überschritten die Tragfähigkeit ( $FS > 1$ , Nachweis KO). Hier wird die tatsächlich nötige Bewehrung bestimmt. Der Zusammenhang ist direkt: ein höherer FS in Artikel #2 bedeutet ein größeres  $\varphi_s$  in Artikel #3.

## Berechnete Ergebnisse

SectionPro liefert pro Lastfall drei Ergebniskategorien:

### Spannungen & Dehnungen + Bemessung

$\sigma_c$  — Betonrandspannung  
 $\sigma_{s, \min}, \sigma_{s, \max}$  — Stahlspannungen  
 $\varepsilon_c$  — Betonranddehnung  
 $\varepsilon_{s, \min}, \varepsilon_{s, \max}$  — Stahldehnungen  
Pivot — Versagensart (A, B oder  $A_s = 0$ )  
 $\varphi_s$  — Erf. Stabdurchmesser

### Schnittgrößen

$N_c$  — Druckresultierende  
 $N_t$  — Zugresultierende  
 $(x_C, y_C)$  — Druckschwerpunkt  
 $(x_T, y_T)$  — Zugschwerpunkt  
 $z$  — Innerer Hebelarm

### Konvergenz

$N_{\text{iter}}$  — Iterationen  
Tol — Konvergenztoleranz  
 $N_{\text{int}}, M_{z, \text{int}}, M_{y, \text{int}}$  — Schnittgrößen  
 $\varepsilon_0, \kappa_x, \kappa_y$  — Dehnungszustand

## Versagenspunkte

Der Pivot gibt an, welches Material zuerst seine Grenzdehnung erreicht:

- **Pivot A — Stahlversagen.** Die Zugbewehrung erreicht ihre Grenzdehnung  $\varepsilon_{su}$  vor dem Betonversagen. Typisch bei schwach bewehrten oder zugdominierten Querschnitten. Maßgebende Dehnung:  $\varepsilon_s = \varepsilon_{su}$ .
- **Pivot B — Betonversagen.** Der Beton erreicht seine Grenzstauchung  $\varepsilon_{cu}$  vor dem vollständigen Stahlfließen. Typisch bei hoch belasteten oder druckdominierten Querschnitten. Maßgebende Dehnung:  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ .
- **Pivot C — Starke Druckbeanspruchung.** Der Querschnitt ist stark druckbeansprucht. Die Dehnung erreicht  $\varepsilon_c = \varepsilon_{c2}$  an einem Punkt bei  $(1 - \varepsilon_{c2}/\varepsilon_{cu2}) \cdot h$  von der meistgedrückten Faser (d.h.  $3h/7$  für die üblichen Werte  $\varepsilon_{c2} = 2\text{‰}$  und  $\varepsilon_{cu2} = 3.5\text{‰}$ ). In der Praxis selten.
- **Pivot  $A_s = 0$  — Keine Bewehrung nötig.** Der Beton allein kann die aufgebrachten Lasten aufnehmen. Die erforderliche Stahlfläche ist null.

## Sechseck-Vollquerschnitt

### Eingabedaten

#### Beton

- Sechseckquerschnitt
- Breite  $B = 2.00$  m
- Minimale Dicke  $h_1 = 0.60$  m
- Maximale Dicke  $h_2 = 1.00$  m

#### Bewehrungsanordnung

- Gleichmäßiger Abstand 150 mm
- 30 Stabpositionen
- Betondeckung 50 mm — 1 Lage
- Durchmesser  $\varphi_s$ : **zu bestimmen**

#### Stoffgesetze (EC2)

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

Abbildung 1: Sechseckquerschnitt.

## GZG — Biegung mit Normalkraft ( $N + M_z$ )

**Aufgebrachte Lasten:**  $N = 500$  kN,  $M_z = 1000$  kN · m,  $M_y = 0$

Visualization of stresses and strains

Load 1   $\sigma$    $\varepsilon$    $N$    $M$    $M_y$    $M_z$    $\varphi$    $\varphi_s$    $\varphi_{s2}$    $\varphi_{s3}$    $\varphi_{s4}$    $\varphi_{s5}$    $\varphi_{s6}$    $\varphi_{s7}$    $\varphi_{s8}$    $\varphi_{s9}$    $\varphi_{s10}$    $\varphi_{s11}$    $\varphi_{s12}$    $\varphi_{s13}$    $\varphi_{s14}$    $\varphi_{s15}$    $\varphi_{s16}$    $\varphi_{s17}$    $\varphi_{s18}$    $\varphi_{s19}$    $\varphi_{s20}$    $\varphi_{s21}$    $\varphi_{s22}$    $\varphi_{s23}$    $\varphi_{s24}$    $\varphi_{s25}$    $\varphi_{s26}$    $\varphi_{s27}$    $\varphi_{s28}$    $\varphi_{s29}$    $\varphi_{s30}$    $\varphi_{s31}$    $\varphi_{s32}$    $\varphi_{s33}$    $\varphi_{s34}$    $\varphi_{s35}$    $\varphi_{s36}$    $\varphi_{s37}$    $\varphi_{s38}$    $\varphi_{s39}$    $\varphi_{s40}$    $\varphi_{s41}$    $\varphi_{s42}$    $\varphi_{s43}$    $\varphi_{s44}$    $\varphi_{s45}$    $\varphi_{s46}$    $\varphi_{s47}$    $\varphi_{s48}$    $\varphi_{s49}$    $\varphi_{s50}$    $\varphi_{s51}$    $\varphi_{s52}$    $\varphi_{s53}$    $\varphi_{s54}$    $\varphi_{s55}$    $\varphi_{s56}$    $\varphi_{s57}$    $\varphi_{s58}$    $\varphi_{s59}$    $\varphi_{s60}$    $\varphi_{s61}$    $\varphi_{s62}$    $\varphi_{s63}$    $\varphi_{s64}$    $\varphi_{s65}$    $\varphi_{s66}$    $\varphi_{s67}$    $\varphi_{s68}$    $\varphi_{s69}$    $\varphi_{s70}$    $\varphi_{s71}$    $\varphi_{s72}$    $\varphi_{s73}$    $\varphi_{s74}$    $\varphi_{s75}$    $\varphi_{s76}$    $\varphi_{s77}$    $\varphi_{s78}$    $\varphi_{s79}$    $\varphi_{s80}$    $\varphi_{s81}$    $\varphi_{s82}$    $\varphi_{s83}$    $\varphi_{s84}$    $\varphi_{s85}$    $\varphi_{s86}$    $\varphi_{s87}$    $\varphi_{s88}$    $\varphi_{s89}$    $\varphi_{s90}$    $\varphi_{s91}$    $\varphi_{s92}$    $\varphi_{s93}$    $\varphi_{s94}$    $\varphi_{s95}$    $\varphi_{s96}$    $\varphi_{s97}$    $\varphi_{s98}$    $\varphi_{s99}$    $\varphi_{s100}$    $\varphi_{s101}$    $\varphi_{s102}$    $\varphi_{s103}$    $\varphi_{s104}$    $\varphi_{s105}$    $\varphi_{s106}$    $\varphi_{s107}$    $\varphi_{s108}$    $\varphi_{s109}$    $\varphi_{s110}$    $\varphi_{s111}$    $\varphi_{s112}$    $\varphi_{s113}$    $\varphi_{s114}$    $\varphi_{s115}$    $\varphi_{s116}$    $\varphi_{s117}$    $\varphi_{s118}$    $\varphi_{s119}$    $\varphi_{s120}$    $\varphi_{s121}$    $\varphi_{s122}$    $\varphi_{s123}$    $\varphi_{s124}$    $\varphi_{s125}$    $\varphi_{s126}$    $\varphi_{s127}$    $\varphi_{s128}$    $\varphi_{s129}$    $\varphi_{s130}$    $\varphi_{s131}$    $\varphi_{s132}$    $\varphi_{s133}$    $\varphi_{s134}$    $\varphi_{s135}$    $\varphi_{s136}$    $\varphi_{s137}$    $\varphi_{s138}$    $\varphi_{s139}$    $\varphi_{s140}$    $\varphi_{s141}$    $\varphi_{s142}$    $\varphi_{s143}$    $\varphi_{s144}$    $\varphi_{s145}$    $\varphi_{s146}$    $\varphi_{s147}$    $\varphi_{s148}$    $\varphi_{s149}$    $\varphi_{s150}$    $\varphi_{s151}$    $\varphi_{s152}$    $\varphi_{s153}$    $\varphi_{s154}$    $\varphi_{s155}$    $\varphi_{s156}$    $\varphi_{s157}$    $\varphi_{s158}$    $\varphi_{s159}$    $\varphi_{s160}$    $\varphi_{s161}$    $\varphi_{s162}$    $\varphi_{s163}$    $\varphi_{s164}$    $\varphi_{s165}$    $\varphi_{s166}$    $\varphi_{s167}$    $\varphi_{s168}$    $\varphi_{s169}$    $\varphi_{s170}$    $\varphi_{s171}$    $\varphi_{s172}$    $\varphi_{s173}$    $\varphi_{s174}$    $\varphi_{s175}$    $\varphi_{s176}$    $\varphi_{s177}$    $\varphi_{s178}$    $\varphi_{s179}$    $\varphi_{s180}$    $\varphi_{s181}$    $\varphi_{s182}$    $\varphi_{s183}$    $\varphi_{s184}$    $\varphi_{s185}$    $\varphi_{s186}$    $\varphi_{s187}$    $\varphi_{s188}$    $\varphi_{s189}$    $\varphi_{s190}$    $\varphi_{s191}$    $\varphi_{s192}$    $\varphi_{s193}$    $\varphi_{s194}$    $\varphi_{s195}$    $\varphi_{s196}$    $\varphi_{s197}$    $\varphi_{s198}$    $\varphi_{s199}$    $\varphi_{s200}$    $\varphi_{s201}$    $\varphi_{s202}$    $\varphi_{s203}$    $\varphi_{s204}$    $\varphi_{s205}$    $\varphi_{s206}$    $\varphi_{s207}$    $\varphi_{s208}$    $\varphi_{s209}$    $\varphi_{s210}$    $\varphi_{s211}$    $\varphi_{s212}$    $\varphi_{s213}$    $\varphi_{s214}$    $\varphi_{s215}$    $\varphi_{s216}$    $\varphi_{s217}$    $\varphi_{s218}$    $\varphi_{s219}$    $\varphi_{s220}$    $\varphi_{s221}$    $\varphi_{s222}$    $\varphi_{s223}$    $\varphi_{s224}$    $\varphi_{s225}$    $\varphi_{s226}$    $\varphi_{s227}$    $\varphi_{s228}$    $\varphi_{s229}$    $\varphi_{s230}$    $\varphi_{s231}$    $\varphi_{s232}$    $\varphi_{s233}$    $\varphi_{s234}$    $\varphi_{s235}$    $\varphi_{s236}$    $\varphi_{s237}$    $\varphi_{s238}$    $\varphi_{s239}$    $\varphi_{s240}$    $\varphi_{s241}$    $\varphi_{s242}$    $\varphi_{s243}$    $\varphi_{s244}$    $\varphi_{s245}$    $\varphi_{s246}$    $\varphi_{s247}$    $\varphi_{s248}$    $\varphi_{s249}$    $\varphi_{s250}$    $\varphi_{s251}$    $\varphi_{s252}$    $\varphi_{s253}$    $\varphi_{s254}$    $\varphi_{s255}$    $\varphi_{s256}$    $\varphi_{s257}$    $\varphi_{s258}$    $\varphi_{s259}$    $\varphi_{s260}$    $\varphi_{s261}$    $\varphi_{s262}$    $\varphi_{s263}$    $\varphi_{s264}$    $\varphi_{s265}$    $\varphi_{s266}$    $\varphi_{s267}$    $\varphi_{s268}$    $\varphi_{s269}$    $\varphi_{s270}$    $\varphi_{s271}$    $\varphi_{s272}$    $\varphi_{s273}$    $\varphi_{s274}$    $\varphi_{s275}$    $\varphi_{s276}$    $\varphi_{s277}$    $\varphi_{s278}$    $\varphi_{s279}$    $\varphi_{s280}$    $\varphi_{s281}$    $\varphi_{s282}$    $\varphi_{s283}$    $\varphi_{s284}$    $\varphi_{s285}$    $\varphi_{s286}$    $\varphi_{s287}$    $\varphi_{s288}$    $\varphi_{s289}$    $\varphi_{s290}$    $\varphi_{s291}$    $\varphi_{s292}$    $\varphi_{s293}$    $\varphi_{s294}$    $\varphi_{s295}$    $\varphi_{s296}$    $\varphi_{s297}$    $\varphi_{s298}$    $\varphi_{s299}$    $\varphi_{s300}$    $\varphi_{s301}$    $\varphi_{s302}$    $\varphi_{s303}$    $\varphi_{s304}$    $\varphi_{s305}$    $\varphi_{s306}$    $\varphi_{s307}$    $\varphi_{s308}$    $\varphi_{s309}$    $\varphi_{s310}$    $\varphi_{s311}$    $\varphi_{s312}$    $\varphi_{s313}$    $\varphi_{s314}$    $\varphi_{s315}$    $\varphi_{s316}$    $\varphi_{s317}$    $\varphi_{s318}$    $\varphi_{s319}$    $\varphi_{s320}$    $\varphi_{s321}$    $\varphi_{s322}$    $\varphi_{s323}$    $\varphi_{s324}$    $\varphi_{s325}$    $\varphi_{s326}$    $\varphi_{s327}$    $\varphi_{s328}$    $\varphi_{s329}$    $\varphi_{s330}$    $\varphi_{s331}$    $\varphi_{s332}$    $\varphi_{s333}$    $\varphi_{s334}$    $\varphi_{s335}$    $\varphi_{s336}$    $\varphi_{s337}$    $\varphi_{s338}$    $\varphi_{s339}$    $\varphi_{s340}$    $\varphi_{s341}$    $\varphi_{s342}$    $\varphi_{s343}$    $\varphi_{s344}$    $\varphi_{s345}$    $\varphi_{s346}$    $\varphi_{s347}$    $\varphi_{s348}$    $\varphi_{s349}$    $\varphi_{s350}$    $\varphi_{s351}$    $\varphi_{s352}$    $\varphi_{s353}$    $\varphi_{s354}$    $\varphi_{s355}$    $\varphi_{s356}$    $\varphi_{s357}$    $\varphi_{s358}$    $\varphi_{s359}$    $\varphi_{s360}$    $\varphi_{s361}$    $\varphi_{s362}$    $\varphi_{s363}$    $\varphi_{s364}$    $\varphi_{s365}$    $\varphi_{s366}$    $\varphi_{s367}$    $\varphi_{s368}$    $\varphi_{s369}$    $\varphi_{s370}$    $\varphi_{s371}$    $\varphi_{s372}$    $\varphi_{s373}$    $\varphi_{s374}$    $\varphi_{s375}$    $\varphi_{s376}$    $\varphi_{s377}$    $\varphi_{s378}$    $\varphi_{s379}$    $\varphi_{s380}$    $\varphi_{s381}$    $\varphi_{s382}$    $\varphi_{s383}$    $\varphi_{s384}$    $\varphi_{s385}$    $\varphi_{s386}$    $\varphi_{s387}$    $\varphi_{s388}$    $\varphi_{s389}$    $\varphi_{s390}$    $\varphi_{s391}$    $\varphi_{s392}$    $\varphi_{s393}$    $\varphi_{s394}$    $\varphi_{s395}$    $\varphi_{s396}$    $\varphi_{s397}$    $\varphi_{s398}$    $\varphi_{s399}$    $\varphi_{s400}$    $\varphi_{s401}$    $\varphi_{s402}$    $\varphi_{s403}$    $\varphi_{s404}$    $\varphi_{s405}$    $\varphi_{s406}$    $\varphi_{s407}$    $\varphi_{s408}$    $\varphi_{s409}$    $\varphi_{s410}$    $\varphi_{s411}$    $\varphi_{s412}$    $\varphi_{s413}$    $\varphi_{s414}$    $\varphi_{s415}$    $\varphi_{s416}$    $\varphi_{s417}$    $\varphi_{s418}$    $\varphi_{s419}$    $\varphi_{s420}$    $\varphi_{s421}$    $\varphi_{s422}$    $\varphi_{s423}$    $\varphi_{s424}$    $\varphi_{s425}$    $\varphi_{s426}$    $\varphi_{s427}$    $\varphi_{s428}$    $\varphi_{s429}$    $\varphi_{s430}$    $\varphi_{s431}$    $\varphi_{s432}$    $\varphi_{s433}$    $\varphi_{s434}$    $\varphi_{s435}$    $\varphi_{s436}$    $\varphi_{s437}$    $\varphi_{s438}$    $\varphi_{s439}$    $\varphi_{s440}$    $\varphi_{s441}$    $\varphi_{s442}$    $\varphi_{s443}$    $\varphi_{s444}$    $\varphi_{s445}$    $\varphi_{s446}$    $\varphi_{s447}$    $\varphi_{s448}$    $\varphi_{s449}$    $\varphi_{s450}$    $\varphi_{s451}$    $\varphi_{s452}$    $\varphi_{s453}$    $\varphi_{s454}$    $\varphi_{s455}$    $\varphi_{s456}$    $\varphi_{s457}$    $\varphi_{s458}$    $\varphi_{s459}$    $\varphi_{s460}$    $\varphi_{s461}$    $\varphi_{s462}$    $\varphi_{s463}$    $\varphi_{s464}$    $\varphi_{s465}$    $\varphi_{s466}$    $\varphi_{s467}$    $\varphi_{s468}$    $\varphi_{s469}$    $\varphi_{s470}$    $\varphi_{s471}$    $\varphi_{s472}$    $\varphi_{s473}$    $\varphi_{s474}$    $\varphi_{s475}$    $\varphi_{s476}$    $\varphi_{s477}$    $\varphi_{s478}$    $\varphi_{s479}$    $\varphi_{s480}$    $\varphi_{s481}$    $\varphi_{s482}$    $\varphi_{s483}$    $\varphi_{s484}$    $\varphi_{s485}$    $\varphi_{s486}$    $\varphi_{s487}$    $\varphi_{s488}$    $\varphi_{s489}$    $\varphi_{s490}$    $\varphi_{s491}$    $\varphi_{s492}$    $\varphi_{s493}$    $\varphi_{s494}$    $\varphi_{s495}$    $\varphi_{s496}$    $\varphi_{s497}$    $\varphi_{s498}$    $\varphi_{s499}$    $\varphi_{s500}$    $\varphi_{s501}$    $\varphi_{s502}$    $\varphi_{s503}$    $\varphi_{s504}$    $\varphi_{s505}$    $\varphi_{s506}$    $\varphi_{s507}$    $\varphi_{s508}$    $\varphi_{s509}$    $\varphi_{s510}$    $\varphi_{s511}$    $\varphi_{s512}$    $\varphi_{s513}$    $\varphi_{s514}$    $\varphi_{s515}$    $\varphi_{s516}$    $\varphi_{s517}$    $\varphi_{s518}$    $\varphi_{s519}$    $\varphi_{s520}$    $\varphi_{s521}$    $\varphi_{s522}$    $\varphi_{s523}$    $\varphi_{s524}$    $\varphi_{s525}$    $\varphi_{s526}$    $\varphi_{s527}$    $\varphi_{s528}$    $\varphi_{s529}$    $\varphi_{s530}$    $\varphi_{s531}$    $\varphi_{s532}$    $\varphi_{s533}$    $\varphi_{s534}$    $\varphi_{s535}$    $\varphi_{s536}$    $\varphi_{s537}$    $\varphi_{s538}$    $\varphi_{s539}$    $\varphi_{s540}$    $\varphi_{s541}$    $\varphi_{s542}$    $\varphi_{s543}$    $\varphi_{s544}$    $\varphi_{s545}$    $\varphi_{s546}$    $\varphi_{s547}$    $\varphi_{s548}$    $\varphi_{s549}$    $\varphi_{s550}$    $\varphi_{s551}$    $\varphi_{s552}$    $\varphi_{s553}$    $\varphi_{s554}$    $\varphi_{s555}$    $\varphi_{s556}$    $\varphi_{s557}$    $\varphi_{s558}$    $\varphi_{s559}$    $\varphi_{s560}$    $\varphi_{s561}$    $\varphi_{s562}$    $\varphi_{s563}$    $\varphi_{s564}$    $\varphi_{s565}$    $\varphi_{s566}$    $\varphi_{s567}$    $\varphi_{s568}$    $\varphi_{s569}$    $\varphi_{s570}$    $\varphi_{s571}$    $\varphi_{s572}$    $\varphi_{s573}$    $\varphi_{s574}$    $\varphi_{s575}$    $\varphi_{s576}$    $\varphi_{s577}$    $\varphi_{s578}$    $\varphi_{s579}$

## Spannungen & Dehnungen + Bemessung

$\sigma_c$	-11.30 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-139.49 MPa
$\sigma_{s, \max}$	400.00 MPa
$\varepsilon_c$	-0.847‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-0.697‰
$\varepsilon_{s, \max}$	2.000‰
Pivot	<b>A</b>
$\varphi_s$	17.60 mm

## Schnittgrößen

$N_c$	1697.8 kN
$N_t$	-1197.8 kN
$x_C$	0.000 m
$y_C$	0.364 m
$x_T$	0.000 m
$y_T$	-0.320 m
$z$	0.683 m

## Konvergenz

$N_{\text{iter}}$	4
Tol	$3.57 \times 10^{-8}$
$N_{\text{int}}$	500.0 kN
$M_{z, \text{int}}$	1000.0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	0.0 kN · m
$\varepsilon_0$	$0.651 \times 10^{-3}$
$\kappa_x$	$-2.997 \times 10^{-3}$
$\kappa_y$	$0.000 \times 10^{-3}$

Pivot A: Stahl maßgebend ( $\varepsilon_{s, \max} = 2.000\text{‰} = \varepsilon_{su}$ ). Erf. Durchmesser:  $\varphi_s = 17.60$  mm für alle 30 Stäbe.

## GZT — Zweiachsige Biegung ( $N + M_y + M_z$ )

**Aufgebrachte Lasten:**  $N = 2000$  kN,  $M_z = 3000$  kN · m,  $M_y = 1800$  kN · m

Visualization of stresses and strains

Load 2   $\sigma$    $\varepsilon$   N  Q  R  Details

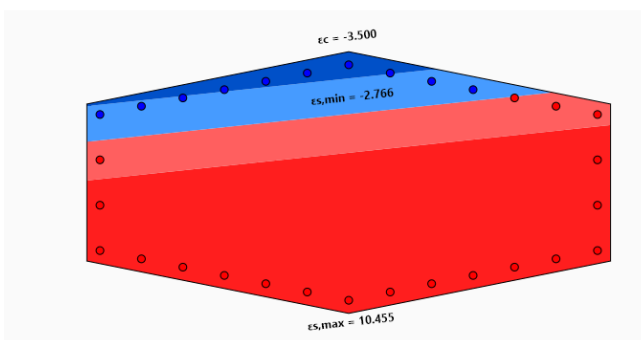


Abbildung 4: Spannungsverteilung.

Visualization of stresses and strains

Load 2   $\sigma$    $\varepsilon$   N  Q  R  Details

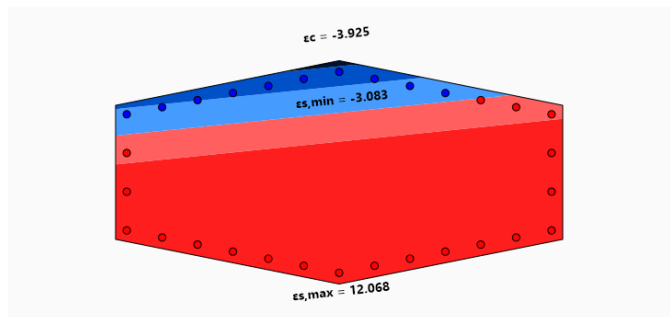


Abbildung 5: Dehnungsverteilung.

## Spannungen & Dehnungen + Bemessung

$\sigma_c$	-20.00 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-435.21 MPa
$\sigma_{s, \max}$	440.81 MPa
$\varepsilon_c$	-3.500‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-2.766‰
$\varepsilon_{s, \max}$	10.455‰
Pivot	<b>B</b>
$\varphi_s$	25.12 mm

## Schnittgrößen

$N_c$	5827.2 kN
$N_t$	-3827.2 kN
$x_C$	-0.255 m
$y_C$	0.355 m
$x_T$	0.082 m
$y_T$	-0.243 m
$z$	0.687 m

## Konvergenz

$N_{\text{iter}}$	43
Tol	$3.66 \times 10^{-8}$
$N_{\text{int}}$	2000.0 kN
$M_{z, \text{int}}$	3000.0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	1800.0 kN · m
$\varepsilon_0$	$3.845 \times 10^{-3}$
$\kappa_x$	$-14.689 \times 10^{-3}$
$\kappa_y$	$-1.556 \times 10^{-3}$



### Spannungen & Dehnungen + Bemessung

$\sigma_c$	-4.79 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-62.26 MPa
$\sigma_{s, \max}$	400.02 MPa
$\varepsilon_c$	-0.342‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-0.296‰
$\varepsilon_{s, \max}$	1.905‰
Pivot	<b>A</b>
$\varphi_s$	<b>10.00 mm</b>

### Schnittgrößen

$N_c$	468.2 kN
$N_t$	-868.2 kN
$x_C$	-0.622 m
$y_C$	0.908 m
$x_T$	0.126 m
$y_T$	-0.547 m
$z$	1.636 m

### Konvergenz

$N_{\text{iter}}$	575
Tol	$2.63 \times 10^{-8}$
$N_{\text{int}}$	-400.0 kN
$M_{z, \text{int}}$	900.0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	400.0 kN · m
$\varepsilon_0$	$0.804 \times 10^{-3}$
$\kappa_x$	$-0.920 \times 10^{-3}$
$\kappa_y$	$-0.226 \times 10^{-3}$

Pivot A: Stahl maßgebend ( $\varepsilon_{s, \max} = 2.000\text{‰} = \varepsilon_{su}$ ). Erf. Durchmesser:  $\varphi_s = 10.00$  mm.

## GZT — Zweiachsige Biegung ( $N + M_y + M_z$ )

Aufgebrachte Lasten:  $N = 0$  kN,  $M_z = 6000$  kN · m,  $M_y = 6000$  kN · m

Visualization of stresses and strains

Load 2   $\sigma$    $\varepsilon$   N  M  Q  R  Details

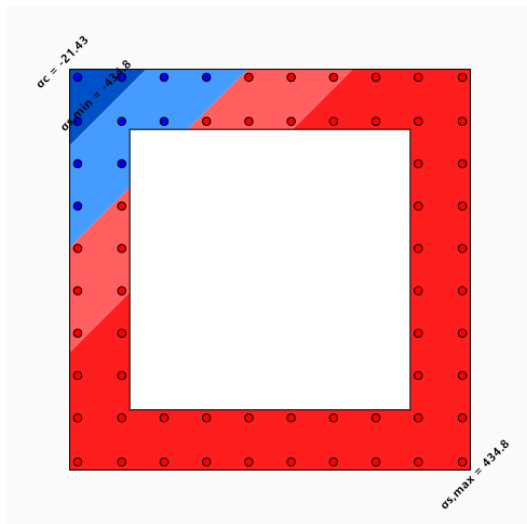


Abbildung 9: Spannungsverteilung.

Visualization of stresses and strains

Load 2   $\sigma$    $\varepsilon$   N  M  Q  R  Details

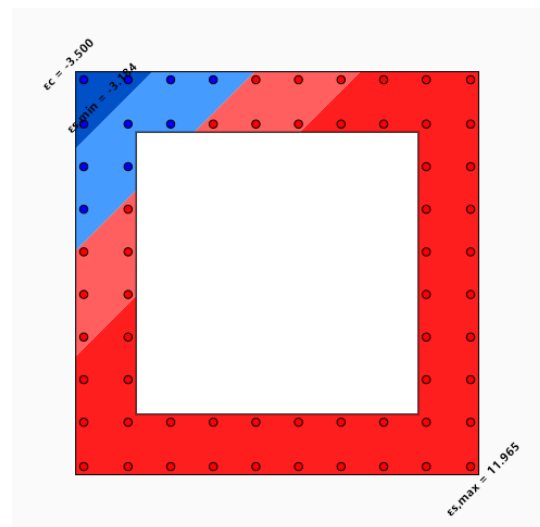


Abbildung 10: Dehnungsverteilung.

### Spannungen & Dehnungen + Bemessung

$\sigma_c$	-21.43 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-434.78 MPa
$\sigma_{s, \max}$	434.78 MPa
$\varepsilon_c$	-3.500‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-3.184‰
$\varepsilon_{s, \max}$	11.965‰
Pivot	<b>B</b>
$\varphi_s$	<b>19.38 mm</b>

### Schnittgrößen

$N_c$	5901.2 kN
$N_t$	-899.0 kN
$x_C$	-0.756 m
$y_C$	0.751 m
$x_T$	-0.179 m
$y_T$	0.421 m
$z$	0.664 m

### Konvergenz

$N_{\text{iter}}$	41
Tol	$3.40 \times 10^{-8}$
$N_{\text{int}}$	0.0 kN
$M_{z, \text{int}}$	6000.0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	6000.0 kN · m
$\varepsilon_0$	$4.390 \times 10^{-3}$
$\kappa_x$	$-3.945 \times 10^{-3}$
$\kappa_y$	$-3.945 \times 10^{-3}$



## Spannungen & Dehnungen + Bemessung Schnittgrößen

$\sigma_c$	-11.98 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-168.65 MPa
$\sigma_{s, \max}$	250.00 MPa
$\varepsilon_c$	-0.898‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-0.843‰
$\varepsilon_{s, \max}$	1.250‰
Pivot	<b>A</b>
$\varphi_s$	<b>17.88 mm</b>

$N_c$	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

## Konvergenz

$N_{\text{iter}}$	4
Tol	$2.21 \times 10^{-7}$
$N_{\text{int}}$	0.0 kN
$M_{z, \text{int}}$	1500.0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	0.0 kN · m
$\varepsilon_0$	$0.434 \times 10^{-3}$
$\kappa_x$	$-1.836 \times 10^{-3}$
$\kappa_y$	$0.000 \times 10^{-3}$

Pivot A: Stahl maßgebend ( $\sigma_{s, \max} = 250.00 \text{ MPa} = \bar{\sigma}_s$ , zul. BAEL-Spannung). Erf. Durchmesser:  $\varphi_s = 17.88 \text{ mm}$  für alle 60 Stäbe.

## GZT — Zweiachsige Biegung ( $M_y + M_z$ )

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

Visualization of stresses and strains

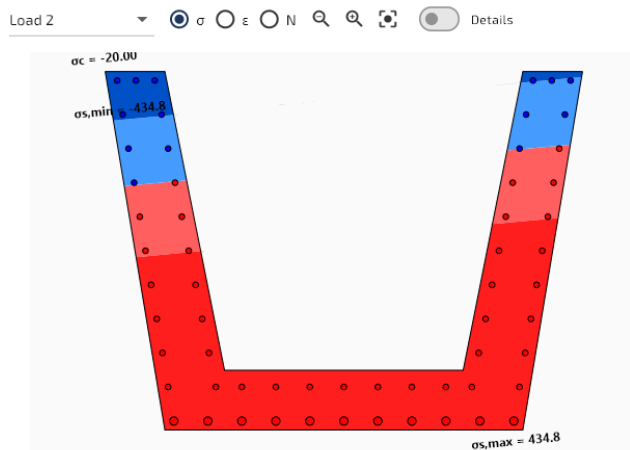


Abbildung 14: Spannungsverteilung.

Visualization of stresses and strains

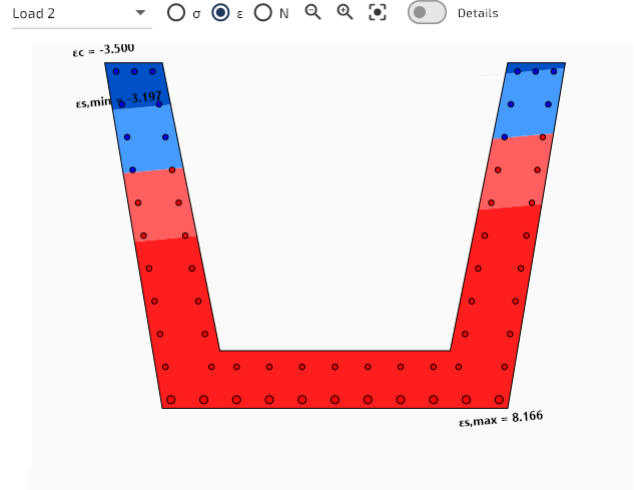


Abbildung 15: Dehnungsverteilung.

## Spannungen & Dehnungen + Bemessung Schnittgrößen

$\sigma_c$	-20.00 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-434.78 MPa
$\sigma_{s, \max}$	434.78 MPa
$\varepsilon_c$	-3.500‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-3.197‰
$\varepsilon_{s, \max}$	8.166‰
Pivot	<b>B</b>
$\varphi_s$	<b>13.26 mm</b>

$N_c$	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

## Konvergenz

$N_{\text{iter}}$	39
Tol	$3.29 \times 10^{-8}$
$N_{\text{int}}$	0.0 kN
$M_{z, \text{int}}$	2000.0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	500.0 kN · m
$\varepsilon_0$	$3.693 \times 10^{-3}$
$\kappa_x$	$-8.996 \times 10^{-3}$
$\kappa_y$	$-0.833 \times 10^{-3}$

Pivot B: Beton maßgebend ( $\varepsilon_c = -3.500\text{‰} = \varepsilon_{cu}$ ). Erf. Durchmesser:  $\varphi_s = 13.26$  mm bei zweiachsiger GZT-Last.

## Ergebnisvalidierung

### Nachweis des inneren Gleichgewichts

Die aufgebrachten Lasten ( $N, M_y, M_z$ ) sind die **Eingabe**. SectionPro ermittelt den Stabdurchmesser  $\varphi_s$  und den zugehörigen Dehnungszustand ( $\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z$ ) durch iterative Lösung, integriert dann die Spannungen über den Querschnitt und erhält die **inneren** Schnittgrößen ( $N_{\text{int}}, M_{y,\text{int}}, M_{z,\text{int}}$ ). Bei Konvergenz müssen diese mit den aufgebrachten Lasten übereinstimmen:

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

Querschnitt	Last	$N$ (kN)	$N_{\text{int}}$ (kN)	$M_z$ (kN·m)	$M_{z,\text{int}}$ (kN·m)	$\Delta$
Sechseck	GZG	500.0	500.0	1000.0	1000.0	0.00 %
	GZT	2000.0	2000.0	3000.0	3000.0	0.00 %
Hohles Quadrat	GZG	-400.0	-400.0	900.0	900.0	0.00 %
	GZT	0.0	0.0	6000.0	6000.0	0.00 %
U-Profil	GZG	0.0	0.0	1500.0	1500.0	0.00 %
	GZT	0.0	0.0	2000.0	2000.0	0.00 %

Das innere Gleichgewicht ist für alle sechs Lastfälle bis auf Maschinengenauigkeit erfüllt — über drei verschiedene Geometrien, drei normative Regelwerke und sowohl lineare (GZG) als auch nichtlineare (GZT) Stoffgesetze.

### Quervergleich mit Artikel #2

Die nachfolgende Tabelle vergleicht den Sicherheitsbeiwert aus Artikel #2 (feste Bewehrung) mit dem hier berechneten erforderlichen  $\varphi_s$ . Die Bewehrungsbemessung wendet einen einheitlichen  $\varphi_s$  auf alle Stabpositionen an.

Querschnitt	Last	$\varphi_s$ (Art. #2)	FS (Art. #2)	Nachweis (Art. #2)	Pivot	$\varphi_s$ erforderl.
Sechseck	GZG	25 mm	0.527	OK	A	17.6 mm
	GZT	25 mm	1.121	KO	B	25.1 mm
Hohles Quadrat	GZG	20 mm	0.274	OK	A	10.0 mm
	GZT	20 mm	0.634	OK	B	19.4 mm
U-Profil	GZG	20/12 mm	1.209	KO	A	17.9 mm
	GZT	20/12 mm	0.436	OK	B	13.3 mm

Bei Querschnitten mit einheitlicher Bewehrung (Sechseck und Hohlquadrat) ist der Zusammenhang direkt:  $FS > 1$  bedeutet  $\varphi_{s,\text{erf.}} > \varphi_{s,\text{orig.}}$  und umgekehrt. Beim U-Profil, das gemischte Durchmesser aufwies, muss der Vergleich über die Gesamtstahlfläche statt über  $\varphi_s$  allein erfolgen.

# Leistungsbenchmark — 100.000 Lastfälle

Zur Demonstration werden 100.000 Lastfälle auf **jeden der drei Querschnitte** angewandt (GZG/GZT, ein-/zweiachsig). Gemessen wird die reine Rechenzeit ohne UI. Konvergenz wurde für alle 300.000 Fälle erreicht.

Kennwert	Sechseck	Hohles Quadrat	U-Profil
Lastfälle	100.000	100.000	100.000
Rechenzeit	5,26 s	5,30 s	5,35 s
Rate	19.000 Lastf./s	18.900 Lastf./s	18.700 Lastf./s

Alle drei Querschnitte benötigen ca. 5,3 s für 100.000 Lastfälle — 18.700 bis 19.000 Bemessungen/s. Dies ist langsamer als die Spannungsprüfung (Artikel #2), da die Bemessung eine äußere Schleife über  $\varphi_s$  erfordert, wobei jede Iteration den Dehnungszustand ( $\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z$ ) vollständig löst.

Konvergenz für alle 300.000 Fälle über drei Geometrien, Normen und Grenzzustände. SectionPro bemisst 100.000 Fälle in unter 6 s — praxistauglich für große Lasthüllkurven.

## Export

SectionPro exportiert Ergebnisse in drei Formaten: **PDF**, **Text** (Festbreite) und **Excel** (.xlsx). Die exportierten Daten enthalten pro Lastfall: Spannungen und Dehnungen, den Versagenspivot, den erforderlichen Stabdurchmesser  $\varphi_s$ , Schnittgrößen (mit Schwerpunkten und Hebelarm) sowie vollständige Konvergenzinformationen.

**REINFORCEMENT DESIGN RESULTS**  
GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-13 13:49

Load case #2 is the most unfavorable

$\varepsilon, \sigma$  and  $\varphi_s$

$\varphi_s$  is the calculated reinforcement diameter.  $\sigma$  and  $\varepsilon$  are the stresses and strains of concrete and steel (indices c and s). The pivot indicates the limit strain reached (A: steel, B: concrete, As0: concrete alone sufficient).

Param	Unit	#2	#1
$\sigma_c$	MPa	-20.00	-11.30
$\sigma_{s,min}$	MPa	-435.21	-139.49
$\sigma_{s,max}$	MPa	440.81	400.00
$\varepsilon_c$	‰	-3.500	-0.847
$\varepsilon_{s,min}$	‰	-2.766	-0.697
$\varepsilon_{s,max}$	‰	10.455	2.000
Pivot	-	B	A
$\varphi_s$	mm	25.12	17.60

**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	#2	#1
$N_c$	kN	5827.2	1697.8
$N_t$	kN	-3827.2	-1197.8
xC	m	-0.255	-0.000
yC	m	0.355	0.363
xT	m	0.082	0.000
yT	m	-0.243	-0.320
z	m	0.687	0.683

**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 ( $\varepsilon_0, \kappa_x, \kappa_y$ ).

Param	Unit	#2	#1
$N_{iter}$	-	43	4
Tol	-	3.66e-8	3.57e-8
$N_{int}$	kN	2000.0	500.00
$M_z_{int}$	kN-m	3000.0	1000.00
$M_y_{int}$	kN-m	1800.0	0.0
$\varepsilon_0$	‰	3.845	0.651
$\kappa_x$	‰	-14.689	-2.997
$\kappa_y$	‰	-1.556	-0.000

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

**REINFORCEMENT DESIGN RESULTS**  
GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-13 13:49

Given below are figures representing graphically the previous tabular results.

Load case n°2:  $\varphi_s = 25.12$  mm ( $\sigma, \varepsilon$  and  $N_c, N_t$  displayed below)

Load case n°1:  $\varphi_s = 17.60$  mm ( $\sigma, \varepsilon$  and  $N_c, N_t$  displayed below)

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

Abbildung 16: PDF-Export — Seite 1: Ergebnistabellen.

Abbildung 17: PDF-Export — Seite 2: Abbildungen.

## | Schlussfolgerung

In der Praxis steht ein Tragwerksplaner typischerweise vor zwei komplementären Aufgaben: entweder die Verifikation eines Querschnitts mit bekannter Bewehrung — wie in Artikel #2 behandelt — oder die Bestimmung der Bewehrung, die zur Aufnahme gegebener Lasten erforderlich ist. Die Bewehrungsbemessung adressiert den zweiten Fall direkt. Wenn die Stablage bekannt ist, der Durchmesser aber noch nicht festgelegt wurde, findet SectionPro den minimalen  $\varphi_s$ , bei dem der Querschnitt exakt zu 100% unter den normativen Dehnungsgrenzen ausgelastet ist. Dies liefert dem Ingenieur die streng minimale Bewehrung als Ausgangspunkt, von dem aus ein praxisgerechter Stabdurchmesser gewählt werden kann.

Die Ergebnisse sind konsistent mit der inversen Problemformulierung: das innere Gleichgewicht ist für alle Lastfälle bis auf Maschinengenauigkeit erfüllt, über drei verschiedene Geometrien, drei normative Regelwerke und sowohl GZG- als auch GZT-Grenzzustände. Der Löser konvergiert zuverlässig in allen Fällen. Hinsichtlich der Leistung dient der Benchmark von 100.000 Lastfällen als Obergrenze — in der Praxis arbeitet ein Tragwerksplaner typischerweise mit einigen hundert Lastkombinationen. Bei der gemessenen Rate von 19.000 Bemessungen pro Sekunde werden 500 Kombinationen in unter 30 Millisekunden berechnet: die Berechnung ist praktisch instantan.