



Wapeningsbemeting via interactieoppervlakken

SectionPro Handleiding: bepaling van de minimale wapening voor een reeks belastingcombinaties met behulp van het 3D-weerstandsdomein

BridgeKernel · 2026

Inleiding

SectionPro biedt twee verificatieworkflows: de doorsnede-evenwichtoplosser (Artikel #3), die een willekeurig aantal belastingcombinaties verwerkt en voor elk afzonderlijk de gedetailleerde spannings-/rektoestand teruggeeft; en de interactieoppervlak-verificatie (Artikel #5), die het 3D-weerstandsdomein (N, M_z, M_y) opbouwt en alle belastingen tegelijk evalueert door hun genormaliseerde afstand η tot het oppervlak te meten. Beide beantwoorden de verificatievraag: is de doorsnede toereikend voor een gegeven φ_s ?

Dit artikel behandelt het omgekeerde probleem, de bemeting: gegeven een wapeningsindeling en een reeks belastingcombinaties, bepaal de minimale staafdiameter φ_s zodanig dat elke belasting binnen het interactieoppervlak valt. Het algoritme zoekt naar de diameter die een oppervlak oplevert waarbij de meest kritieke belasting precies op de grens terecht komt ($\eta = 1$), tot op een numeriek tolerantie-criterium. Elke grenstoestand wordt onafhankelijk opgelost en SectionPro rapporteert φ_s per toestand alsook de maatgevende waarde over alle toestanden.

Voor ACI 318, CSA A23.3 en AASHTO wordt het oppervlak rechtstreeks opgebouwd uit het Whitney-spanningsblok met sterktereductiefactoren. Omdat belastingen geometrisch worden geëvalueerd in plaats van door iteratieve convergentie, wordt deze methode aanzienlijk sneller voor grote belasting-enveloppen (zie Paragraaf 5).

Berekende resultaten

SectionPro rapporteert drie categorieën resultaten:

Wapeningsbemeting

φ_s : vereiste staafdiameter
 A_s : vereist staaloppervlak per staaf
Eén resultaat per grenstoestand
Maatgevende φ_s over alle grenstoestanden

Afstanden & 3D-weergave

η : genormaliseerde afstand per belasting
Status: **Intern** / **Grens**
3D-scatter op het uiteindelijke oppervlak
Eén oppervlak per grenstoestand

Exports

PDF: 3D-weergaven + bemetings-tabel
XLS: φ_s , belastingen, afstanden, status
TXT: tabulaire resultaten (kolommen)

Achthoekige doorsnede (Eurocode 2)

Invoergegevens

De doorsnede-geometrie, wapeningsindeling en materiaaleigenschappen zijn identiek aan die in Artikelen #4 en #5. Er zijn 30 belastingcombinaties gedefinieerd: 15 bij ULS-F (Fundamenteel) en 15 bij SLS-C (Karakteristiek).

Beton

- Achthoekige doorsnede
- $b_1 = 2,00$ m, $b_2 = 0,50$ m
- $h_1 = 1,00$ m, $h_2 = 0,60$ m

Wapeningsindeling

- 48 staafposities, uniforme tussenafstand 150 mm
- Dekking 50 mm, 1 laag
- Diameter φ_s : te bepalen

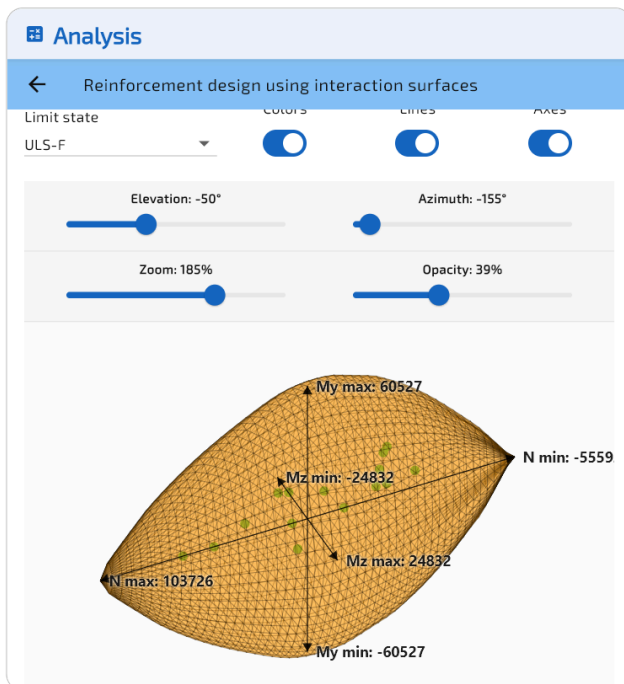
Materiaalwetten (EC2)

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

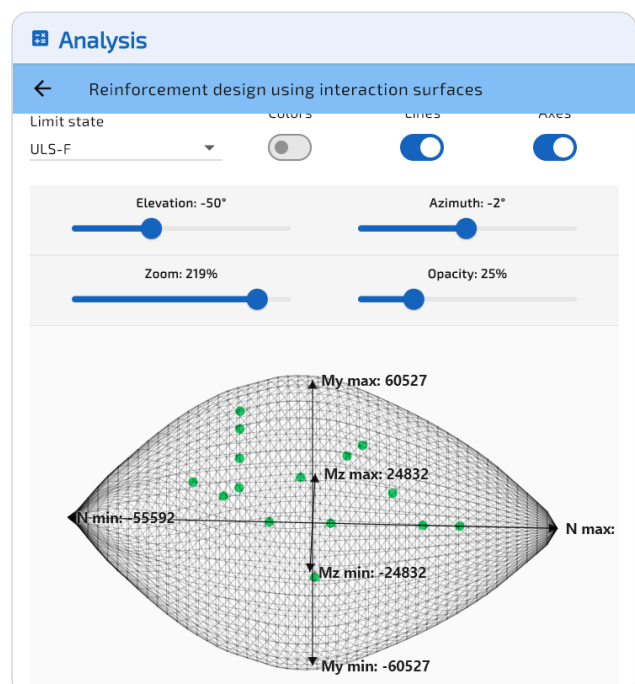
The screenshot shows a 'Data' panel for an 'Octagonal solid section'. Under 'Concrete', the dimensions are: Width b1 (m) = 2, Width b2 (m) = 0.5, Height h1 (m) = 1, and Height h2 (m) = 0.6. Under 'Reinforcement', the mode is 'uniform spacing', bar spacing is 150 mm, bar diameter is 32 mm, concrete cover is 50 mm, and there is 1 layer. A 'Submit' button and an 'Infos' button are visible. Below the form is a 3D model of the octagonal cross-section with reinforcement bars.

Figuur 1: Achthoekige doorsnede: geometrie en wapeningsindeling.

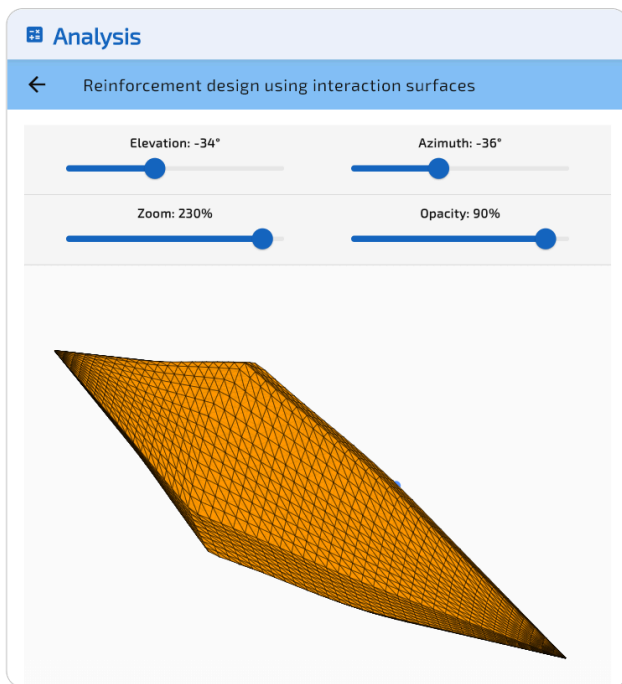
Bemettingsresultaten



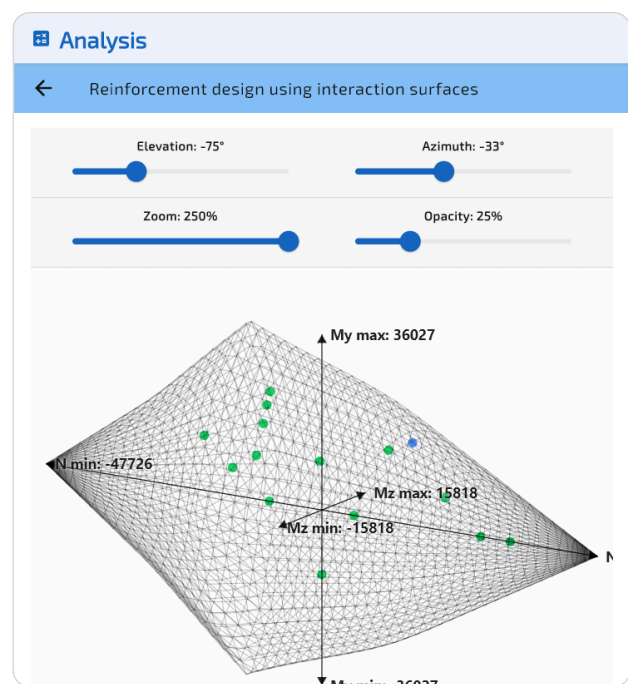
Figuur 2: ULS-F: interactieoppervlak bij geconvergeerde φ_s .



Figuur 3: ULS-F, geroteerd.



Figuur 4: SLS-C: interactieoppervlak bij geconvergeerde φ_s .



Figuur 5: SLS-C, geroteerd.

SLS-C is maatgevend met $\varphi_s = 56,26$ mm (versus 55,09 mm bij ULS-F). Bij de maatgevende diameter is de SLS-C grensbelasting (#26) zichtbaar in blauw op het oppervlak, terwijl alle ULS-F belastingen intern zijn (groen).

| Toestand | φ_s (mm) | η_{worst} | Maatgevende belasting | Status |
|----------|------------------|-----------------------|-----------------------|--------|
| ULS-F | 55,09 | 0,970 | #8 | Intern |
| SLS-C | 56,26 | 1,000 | #26 | Grens |

Afstanden bij de maatgevende wapening

Zodra de maatgevende $\varphi_s = 56,26$ mm is bepaald (SLS-C is bepalend), herbouwt SectionPro het interactieoppervlak voor elke grenstoestand bij deze diameter en berekent de afstanden voor alle 30 belastingen. Elke belasting moet Intern ($\eta < 1$) of op de Grens ($\eta \approx 1$) zijn.

| Belasting | Toestand | N (kN) | M_z (kN·m) | M_y (kN·m) | η | Status |
|-----------|----------|----------|--------------|--------------|--------|--------|
| 26 | SLS-C | 35000 | 6000 | 15000 | 1,000 | Grens |
| 8 | ULS-F | 0 | 14000 | 35000 | 0,970 | Intern |
| 23 | SLS-C | 0 | 8000 | 20000 | 0,883 | Intern |
| 7 | ULS-F | 0 | 11000 | 30000 | 0,820 | Intern |
| 25 | SLS-C | 30000 | 5000 | 13000 | 0,815 | Intern |
| 22 | SLS-C | 0 | 6800 | 17500 | 0,797 | Intern |
| 28 | SLS-C | -13000 | 4000 | 10000 | 0,796 | Intern |
| 11 | ULS-F | 40000 | 10000 | 25000 | 0,727 | Intern |
| 29 | SLS-C | 45000 | 2500 | 6000 | 0,716 | Intern |
| 4 | ULS-F | 72000 | 0 | 0 | 0,603 | Intern |

De overige 20 belastingen hebben allemaal $\eta < 0,60$. De volledige tabel kan door de software worden geëxporteerd in PDF-, TXT- en XLS-formaat.

Elliptische doorsnede (ACI 318)

Invoergegevens

De doorsnede-geometrie, wapening en materiaaleigenschappen zijn identiek aan die in het artikel over de interactieoppervlak-verificatie. Er zijn 30 belastingcombinaties gedefinieerd: 15 bij ULS en 15 bij SLS. Het ACI 318 Whitney-spanningsblok wordt rechtstreeks gebruikt om het ULS-interactieoppervlak op te bouwen, inclusief de sterktereductiefactoren ($\varphi = 0,90$ trekbeheerst, $\varphi = 0,65$ drukbeheerst, $\varphi_N = 0,80$ bovengrens). Het SLS-oppervlak gebruikt lineair elastisch gedrag met toelaatbare spanningen ($\sigma_c = 11,5$ MPa, $\sigma_s = 250$ MPa).

Beton

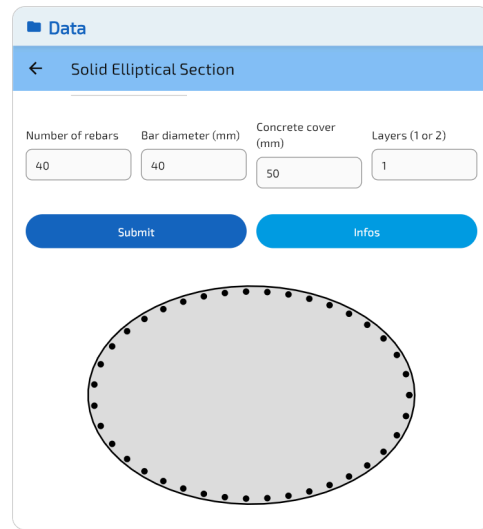
- Elliptische doorsnede
- Breedte = 3,00 m, Hoogte = 2,00 m

Wapeningsindeling

- 40 staven langs de omtrek
- Dekking 50 mm
- Diameter φ_s : te bepalen

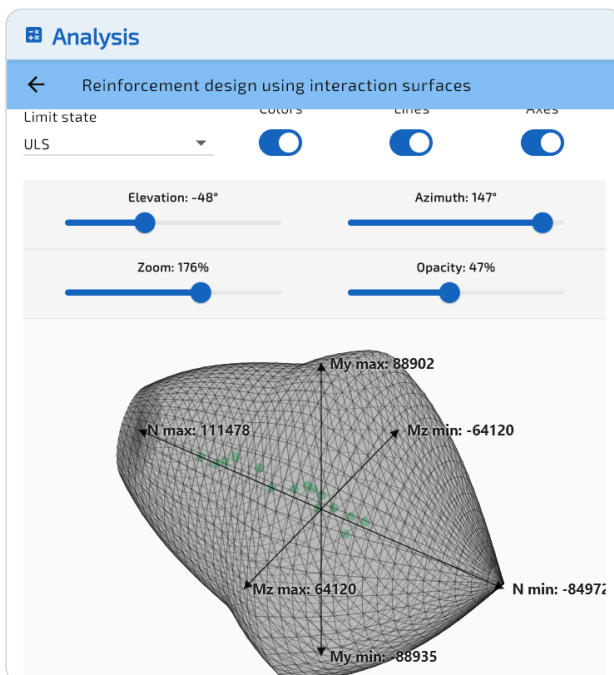
Materiaalwetten (ACI 318)

- Beton: $f'_c = 30$ MPa
- Staal: $f_y = 500$ MPa
- Whitney-blok: $\beta_1 = 0,832$

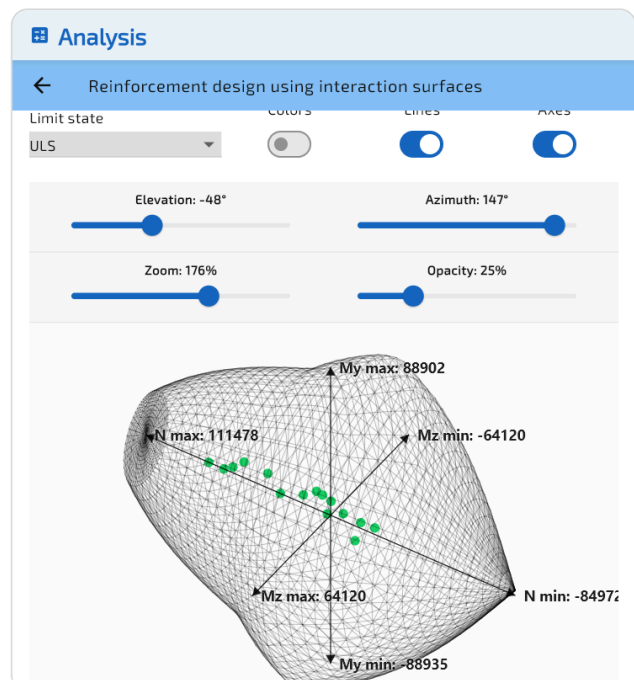


Figuur 6: Elliptische doorsnede: geometrie en wapeningsindeling.

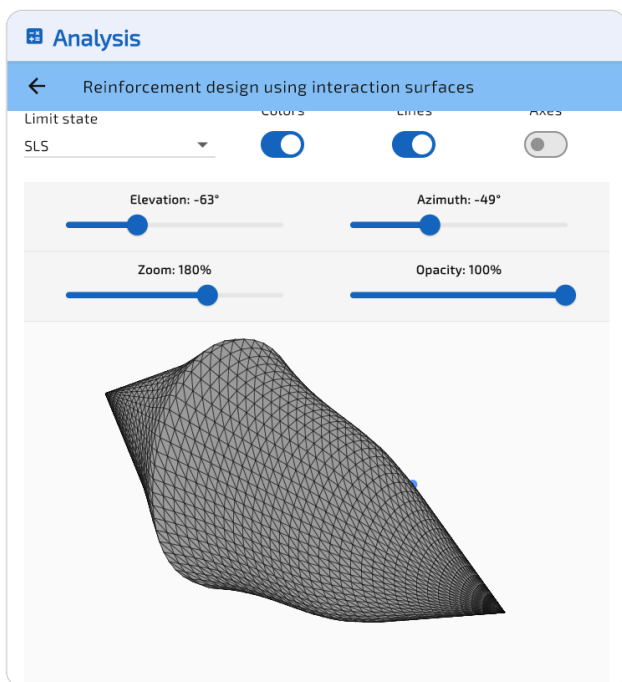
Bemettingsresultaten



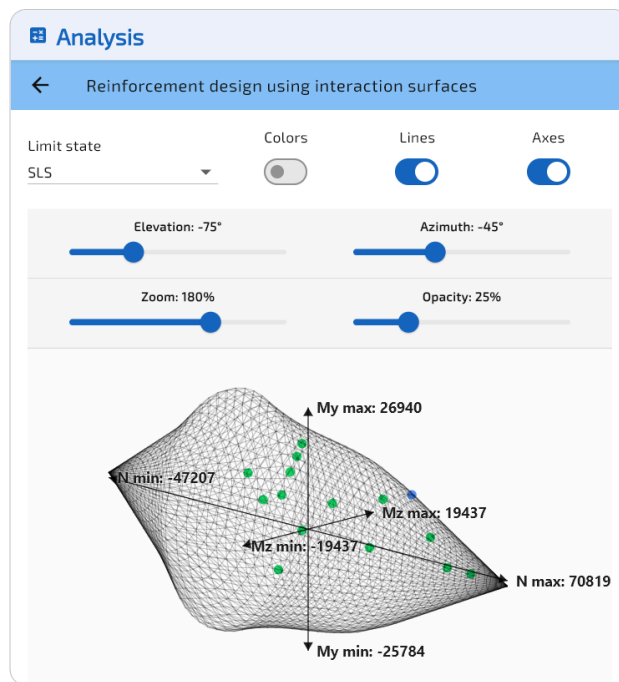
Figuur 7: ULS: interactieoppervlak bij geconvergeerde φ_s .



Figuur 8: ULS, groteerd.



Figuur 9: SLS: interactieoppervlak bij geconvergeerde φ_s .



Figuur 10: SLS, groteerd.

SLS is maatgevend met $\varphi_s = 77,53$ mm (versus 64,71 mm bij ULS). De SLS-grensbelasting (#26) is zichtbaar in blauw op het oppervlak, terwijl alle ULS-belastingen intern zijn (groen).

| Toestand | φ_s (mm) | η_{worst} | Maatgevende belasting | Status |
|----------|------------------|-----------------------|-----------------------|--------|
| ULS | 64,71 | 0,781 | #8 | Intern |
| SLS | 77,53 | 1,000 | #26 | Grens |

Afstanden bij de maatgevende wapening

Bij de maatgevende $\varphi_s = 77,53$ mm (SLS is bepalend) zijn alle 30 belastingen Intern. De 10 meest kritieke belastingen zijn:

| Belasting | Toestand | N (kN) | M_z (kN·m) | M_y (kN·m) | η | Status |
|-----------|----------|----------|--------------|--------------|--------|--------|
| 26 | SLS | 35000 | 7500 | 11000 | 1,000 | Grens |
| 23 | SLS | 0 | 10000 | 15000 | 0,866 | Intern |
| 19 | SLS | 60000 | 0 | 0 | 0,835 | Intern |
| 29 | SLS | 45000 | 3000 | 4500 | 0,812 | Intern |
| 8 | ULS | 0 | 32000 | 45000 | 0,781 | Intern |
| 25 | SLS | 28000 | 6000 | 9000 | 0,766 | Intern |
| 18 | SLS | 53000 | 0 | 0 | 0,712 | Intern |
| 11 | ULS | 45000 | 22000 | 33000 | 0,710 | Intern |
| 7 | ULS | 0 | 27000 | 39000 | 0,699 | Intern |
| 22 | SLS | 0 | 8500 | 12500 | 0,695 | Intern |

Kruisvalidatie met interactieoppervlak-verificatie (Artikel #5)

De interactieoppervlak-verificatie (Artikel #5) analyseerde dezelfde twee doorsneden met vaste staafdiameters ($\varphi = 32$ mm voor de achthoek, $\varphi = 40$ mm voor de ellips). Bij die diameters werden meerdere belastingen geclassificeerd als Extern ($\eta > 1$), wat betekent dat de doorsnedeCapaciteit werd overschreden. De bemetingsmodule (dit artikel) moet daarom φ_s -waarden opleveren die groter zijn dan die vaste diameters.

Achthoekige doorsnede (EC2, vast $\varphi = 32$ mm in Art. #5)

Met $\varphi = 32$ mm waren 7 van de 15 ULS-F belastingen Extern en 8 van de 15 SLS-C belastingen Extern. De bemetingsmodule levert $\varphi_s = 55,09$ mm (ULS-F) en $\varphi_s = 56,26$ mm (SLS-C), beide ruim boven 32 mm, wat bevestigt dat de vaste diameter ontoereikend was. De maatgevende SLS-C diameter is 76% groter dan de verificatiediameter.

| Grenstoestand | φ Art.#5 (mm) | φ_s bemet. (mm) | Extern in Art.#5 |
|---------------|-----------------------|-------------------------|------------------|
| ULS-F | 32 | 55,09 | 7 / 15 |
| SLS-C | 32 | 56,26 | 8 / 15 |

Elliptische doorsnede (ACI 318, vast $\varphi = 40$ mm in Art. #5)

Evenzo waren met $\varphi = 40$ mm 7 van de 15 ULS-belastingen en 8 van de 15 SLS-belastingen Extern. De bemetingsmodule levert $\varphi_s = 64,71$ mm (ULS) en $\varphi_s = 77,53$ mm (SLS). De maatgevende SLS-diameter is 94% groter dan de verificatiediameter.

| Grenstoestand | φ Art.#5 (mm) | φ_s bemet. (mm) | Extern in Art.#5 |
|---------------|-----------------------|-------------------------|------------------|
| ULS | 40 | 64,71 | 7 / 15 |
| SLS | 40 | 77,53 | 8 / 15 |

In beide gevallen levert de bemetingsmodule correct diameters op die de verificatiediameter overschrijden wanneer externe belastingen aanwezig waren, wat de volledige consistentie tussen de verificatie- en bemetingsworkflows bevestigt.

Kruisvalidatie met doorsnede-evenwichtsopløser (Artikel #3)

De doorsnede-evenwichtsopløser (Artikel #3) berekende de vereiste φ_s voor individuele belastinggevallen op een massieve zeshoekige doorsnede (EC2, C30/37, 30 staven, 150 mm tussenafstand). Twee belastinggevallen bij ULS-F werden geanalyseerd: een gecombineerde tweeeassige belasting en een eenassig buigingsgeval. Bij het uitvoeren van de bemetingsmodule op dezelfde doorsnede met deze twee belastingen als enveloppe, moet de maatgevende φ_s overeenkomen met de grootste diameter gevonden door de directe opløser.

Zeshoekige doorsnede, enveloppe met twee belastingen

| Belasting | N (kN) | M_z (kN·m) | M_y (kN·m) | φ_s^{NR} (mm) | φ_s^{SI} (mm) |
|-----------|----------|--------------|--------------|------------------------------|------------------------------|
| ULS | 2000 | 3000 | 1800 | 10,73 | — |
| SLS | 500 | 1000 | 0 | 6,40 | — |
| Maatg. | | | | 10,73 | 10,82 |

Beide oplossers convergeren naar dezelfde maatgevende diameter: $\varphi_s = 10,73$ mm (evenwicht) versus $\varphi_s = 10,82$ mm (interactieoppervlak).

Prestatiebenchmark

De volgende tabel vergelijkt de rekestijd op de achthoekige EC2-doorsnede (5 grenstoestanden, 48 staven), waarbij het aantal belastingcombinaties wordt opgeschaald van 2 tot 1 000 000. Belastingen worden willekeurig verdeeld over alle grenstoestanden. De evenwichtsopllosser voert één iteratieve convergentie per belasting uit. De interactieoppervlak-methode bouwt het oppervlak op en evalueert alle belastingen geometrisch.

| Belastingen | Directe oplossing (ms) | SI-bemeting (ms) | Versnelling |
|-------------|------------------------|------------------|-------------|
| 2 | 2,1 | 154 | 0,01 × |
| 100 | 5,6 | 382 | 0,01 × |
| 1000 | 23 | 441 | 0,05 × |
| 10000 | 167 | 526 | 0,32 × |
| 100000 | 1688 | 1306 | 1,29 × |

Beide methoden leveren vergelijkbare prestaties op alle schalen, waarbij de evenwichtsopllosser sneller is bij kleine enveloppen en de interactieoppervlak-methode bijtrekt rond 100000 belastingen. De φ_s -waarden komen overeen tot op 0,1% op alle schalen. Het praktische voordeel van de interactieoppervlak-bemeting is niet de ruwe snelheid maar de visuele output: de 3D-scatter op het maatgevende oppervlak geeft onmiddellijke bevestiging dat alle belastingen omsloten zijn, wat de evenwichtsopllosser niet biedt.

Conclusie

De interactieoppervlak-bemeting biedt een efficiënte manier om de minimale wapeningsdiameter te bepalen voor een volledige belastingenveloppe:

- Eén berekening, alle belastingen: het algoritme verwerkt een willekeurig aantal belastingcombinaties in één enkele doorgang.
- Whitney-natief voor Amerikaanse normen: voor ACI 318, CSA A23.3 en AASHTO wordt het oppervlak rechtstreeks opgebouwd uit het Whitney-spanningsblok met sterkereductiefactoren.
- Kruisgevalideerd: de bemetingsresultaten komen overeen met de interactieoppervlak-verificatie (Artikel #5: belastingen die Extern waren bij de vaste diameter vereisen nu een grotere φ_s) en de doorsnede-evenwichtsopllosser (Artikel #3: beide methoden convergeren naar dezelfde maatgevende diameter binnen numerieke tolerantie).
- Visuele bevestiging: de 3D-scatter bij de maatgevende φ_s toont onmiddellijk dat alle belastingen omsloten zijn, met de kritieke belasting op de grens.

- Complementair aan de evenwichtsopllosser: de evenwichtsopllosser levert de volledige spannings/rektoestand, terwijl de interactieoppervlak-methode een visuele enveloppecontrole biedt tegen vergelijkbare rekenkosten.

Export

SectionPro exporteert de bemetingsresultaten in PDF-, TXT- en XLS-formaat. Het PDF-rapport bevat 3D-weergaven van het uiteindelijke interactieoppervlak met verspreide belastingpunten en een resultatentabel.

Reinforcement design based on IS

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-28 07:17

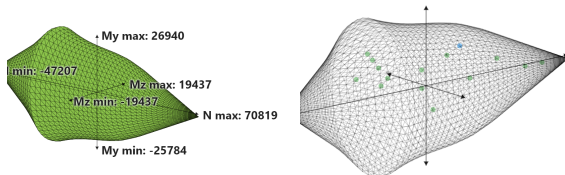
Minimum reinforcement diameters ϕ_s for each limit state:

| State | SLS | ULS |
|---------------|-------|-------|
| ϕ_s (mm) | 77.53 | 64.71 |
| Load | #26 | #8 |

The calculation performed allows dimensioning the reinforcement diameters such that the reinforced concrete section strictly satisfies the resistance requirements with respect to the given loads.

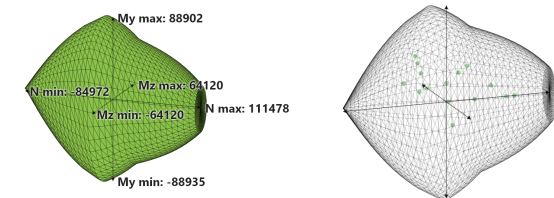
SLS : Serviceability limit state ($\phi_s = 77.53$ mm)

14 loads are internal to the N-Mz-My surface. Scattered in green
 0 loads are external to the N-Mz-My surface. Scattered in red
 1 load is on the boundary of the N-Mz-My surface. Scattered in blue



ULS : Ultimate limit state ($\phi_s = 64.71$ mm)

15 loads are internal to the N-Mz-My surface. Scattered in green
 0 loads are external to the N-Mz-My surface. Scattered in red
 0 loads are on the boundary of the N-Mz-My surface. Scattered in blue



GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

Figuur 11: PDF-export pagina 1: 3D-weergaven.

Distances of loads to surface

Load case #26 is the most unfavorable

Distances are calculated considering the largest calculated ϕ_s .

| Load | Limit state | N (kN) | Mz (kN-m) | My (kN-m) | SF | Status |
|------|-------------|----------|-----------|-----------|-------|----------|
| 26 | SLS | 35000.0 | 7500.0 | 11000.0 | 1.000 | Boundary |
| 23 | SLS | 0.0 | 10000.0 | 15000.0 | 0.866 | Internal |
| 19 | SLS | 60000.0 | 0.0 | 0.0 | 0.835 | Internal |
| 29 | SLS | 45000.0 | 3000.0 | 4500.0 | 0.812 | Internal |
| 8 | ULS | 0.0 | 32000.0 | 45000.0 | 0.781 | Internal |
| 25 | SLS | 28000.0 | 6000.0 | 9000.0 | 0.766 | Internal |
| 18 | SLS | 53000.0 | 0.0 | 0.0 | 0.712 | Internal |
| 11 | ULS | 45000.0 | 22000.0 | 33000.0 | 0.710 | Internal |
| 7 | ULS | 0.0 | 27000.0 | 39000.0 | 0.699 | Internal |
| 22 | SLS | 0.0 | 8500.0 | 12500.0 | 0.695 | Internal |
| 13 | ULS | -20000.0 | 15000.0 | 20000.0 | 0.647 | Internal |
| 28 | SLS | -11000.0 | 5000.0 | 7500.0 | 0.620 | Internal |
| 6 | ULS | 0.0 | 20000.0 | 30000.0 | 0.587 | Internal |
| 4 | ULS | 78000.0 | 0.0 | 0.0 | 0.539 | Internal |
| 10 | ULS | 35000.0 | 18000.0 | 28000.0 | 0.521 | Internal |
| 21 | SLS | 0.0 | 6500.0 | 9500.0 | 0.492 | Internal |
| 30 | SLS | 8000.0 | -5000.0 | -8000.0 | 0.490 | Internal |
| 15 | ULS | 10000.0 | -15000.0 | -25000.0 | 0.472 | Internal |
| 12 | ULS | -8000.0 | 8000.0 | 12000.0 | 0.470 | Internal |
| 5 | ULS | 0.0 | 10000.0 | 15000.0 | 0.434 | Internal |
| 3 | ULS | 70000.0 | 0.0 | 0.0 | 0.429 | Internal |
| 24 | SLS | 15000.0 | 4000.0 | 6000.0 | 0.407 | Internal |
| 14 | ULS | 60000.0 | 8000.0 | 12000.0 | 0.398 | Internal |
| 27 | SLS | -4000.0 | 2500.0 | 3500.0 | 0.375 | Internal |
| 20 | SLS | 0.0 | 4000.0 | 5000.0 | 0.367 | Internal |

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

Figuur 12: PDF-export pagina 2: resultatentabel.