

Geavanceerde doorsneden

Modelleren van complexe doorsneden in SectionPro

Toepassing op een voorgespannen brugkokerprofiel over een steunpunt

BridgeKernel · 2026

Inleiding

Standaard ligger-, kolom- en wanddoorsneden worden over het algemeen beschreven door een enkele contour en uniforme wapening. Echte constructies combineren vaak verschillende materialen, holtes, afzonderlijke wapeningslagen, voorspankabels of ingebedde stalen elementen. Hun analyse vereist een representatie die zowel de geometrie als de constitutieve wet van elk onderdeel behoudt.

De geavanceerde doorsneden van SectionPro voorzien in deze behoefte. Een geavanceerde doorsnede wordt samengesteld uit geometrische domeinen, passieve wapening, voorspanstaal, constructiestaalprofielen en dunne platen. Aan elk onderdeel wordt de materiaalwet toegewezen die in de analyses wordt gebruikt. Dezelfde beschrijving dient vervolgens voor de berekening van doorsnede-eigenschappen, de controle van spanningen en rekken onder opgelegde doorsnedekrachten, de berekening van scheurwijdten en de opbouw van interactiedomeinen.

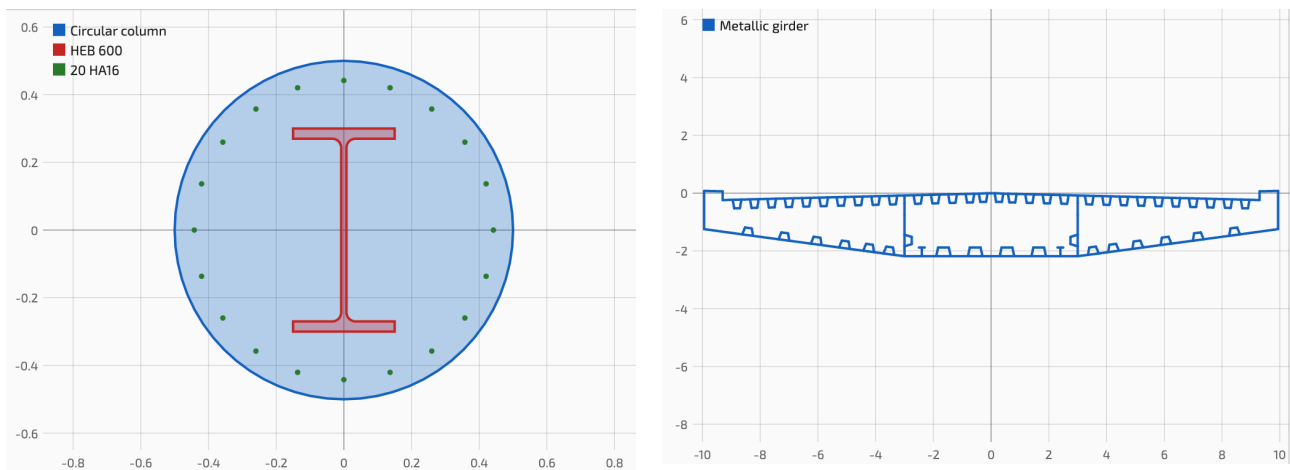
Dit artikel presenteert eerst het datamodel van een geavanceerde doorsnede. Als voorbeeld wordt dan een kritisch gedeelte over een steunpunt in een voorgespannen betonnen kokerligger gebruikt. Deze geometrie combineert een grote leegte en wapening verdeeld over verschillende vlakken en groepen spankabels binnen één model.

Een geavanceerde doorsnede definiëren

Een geavanceerde doorsnede combineert verschillende groepen mechanische objecten. De rekenkern behoudt hun positie in het doorsnedecoördinatenstelsel en bepaalt hun bijdrage met de aan elk object toegewezen materiaalwet.

- Een geometrisch domein, of GeoDomain, wordt gedefinieerd door een buitencontour en kan meerdere holtes bevatten. Eén doorsnede kan meerdere domeinen bevatten, elk met een eigen materiaalwet.
- Passieve wapening is georganiseerd in onafhankelijke lagen. Elke staaf heeft een positie, een diameter en een staalwet, waardoor afzonderlijke lagen, vlakken en staalsoorten kunnen worden weergegeven.

- Voorspanstaal wordt gegroepeerd in kabelfamilies die zijn gedefinieerd door hun posities, oppervlakken, hechtingsparameters en begintoestand.
- Constructiestalen profielen kunnen worden geselecteerd uit de geïntegreerde bibliotheek van 535 profielen die elf Europese families bestrijken: IPE, HEA, HEB, HEM, UNP, UPE, UAP, LNP, en vierkante, rechthoekige en ronde holle profielen. Ze kunnen worden weergegeven door een GeoDomain die over het werkelijke gebied is geïntegreerd, inclusief gebogen overgangen en afrondingen, of door een samenstel van TSP-elementen.
- Een TSP-element beschrijft de rechte of gebogen middellijn van een plaat en de dikte ervan. De bijdrage ervan wordt verkregen door lijnintegratie, waarbij de spanning uniform wordt aangenomen over de dikte. Deze weergave is geschikt voor dunne platen, constructiestaalprofielen en meercellige kokerprofielen.
- Materiaalwetten worden rechtstreeks aan de componenten toegewezen. Hiervoor kunnen de normmodellen van SectionPro of een algemene, door de gebruiker gedefinieerde spanning–rekrelatie voor de beschouwde grenstoestanden worden gebruikt.



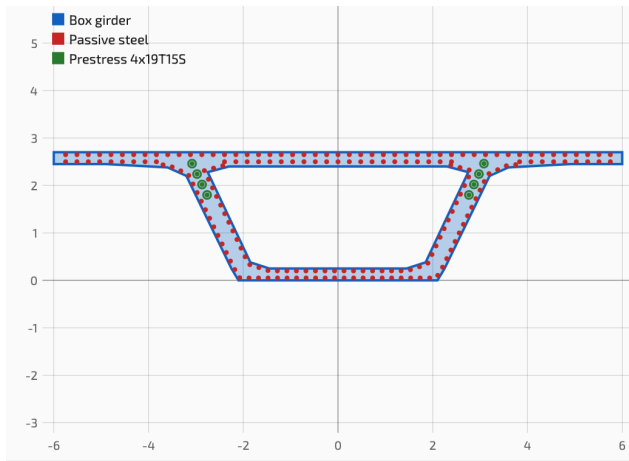
Samengestelde kolom: beton, HEB-profiel en passieve wapening.

Stalen kokerligger: 267 TSP-elementen en 51 Bredt-cellen.

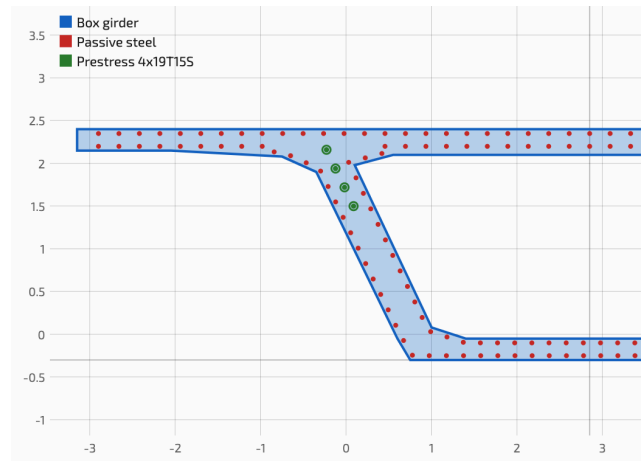
Figuur 1: Voorbeelden van geavanceerde doorsneden in SectionPro.

Voorbeeld: brugkokerligger

De onderzochte doorsnede is een kritische steunpuntdoorsnede van een eencellige kokerligger. Zij is 12,00 m breed en 2,70 m hoog. De bovenplaat, schuine lijven, vouten en onderplaat vormen één betondomein. De centrale cel is als interne holte gedefinieerd.



(a) Algemeen beeld van de doorsnede.



(b) Detail van de voute linksboven.

Figuur 2: SectionPro-model: betondomein, passieve wapening en voorspangroepen.

Onderdeel	Materiaal	Definitie in voorbeeld
GeoDomain 1	Beton C45/55	Contour van de koker, één binnencel, brutooppervlakte 6,759 m ²
Passieve wapening	B500B	186 HA16-staven op 50 mm van de betonoppervlakken
Voorspanning	Y1860	Acht 19T15S-kabels, vier langs elk lijf, 2.850 mm ² per kabel en kabelkokers van 100 mm

De doorsnede bevat 186 wapeningsstaven en acht voorspankabels. De vier kabelkokers langs elk lijf zijn uitgelijnd met de lijfrichting en lopen door tot in de bovenste voute. Hun coördinaten worden met een script gegenereerd en vervolgens in het bestand van de geavanceerde doorsnede opgeslagen. Voor alle onderstaande analyses wordt hetzelfde bestand gebruikt.

Doorsnedekrachten en voorspanning

De totale doorsnedekrachtvector wordt ontleed in de effecten van permanente belastingen G , variabele belastingen Q en voorspanning P : $\mathbf{S} = \mathbf{S}_G + \mathbf{S}_Q + \mathbf{S}_P$.

Voor de beschouwde doorsnede geeft het eindige-elementenmodel, opgesteld in onze LFEM-software, de volgende $G + Q$ -snedekrachtenvectoren in MN en MN · m: $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{BGT}} = (0; -58,650; 0)$ en $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{UGT}} = (0; -92,650; 0)$.

In SectionPro wordt voorspanning op twee niveaus beschouwd. De werking op de constructie, met inbegrip van het primaire en een eventueel secundair effect, moet in de toegepaste snedekrachtenvector worden opgenomen. Door de dwarssymmetrie van de doorsnede en het kabelverloop is het moment om y hier nul; daarom geldt $\mathbf{S}_P = (N_P, M_{z,P}^{\text{primaair}} + M_{z,P}^{\text{secundair}}, 0)$.

De effectieve kabelspanning definieert de initiële toestand die verband houdt met de voorspanactie. Bij de weerstandsberekening verandert de evenwichtsrektoestand vervolgens de spankracht: verlening produceert een positieve spanningstoename en verhoogt de bijdrage van de spankabel, terwijl verkorting een spanningsafname veroorzaakt.

In het voorbeeld bedraagt de effectieve spanning na verliezen 1116 MPa. De overeenkomstige werking levert een normaalkracht van 25,445 MN. In de steunpuntdoorsnede liggen de kabels boven het zwaartepunt, wat een primair moment van +8,994 MN · m oplevert. Voor dit kabelverloop geeft het

constructiemodel een secundair moment met hetzelfde teken van $+4,400 \text{ MN} \cdot \text{m}$. Het in de doorsnede ingevoerde voorspanmoment bedraagt dus $+13,394 \text{ MN} \cdot \text{m}$.

Laatste doorsnedekrachtvector	N [MN]	M_z [MN·m]	M_y [MN·m]
BGT	25,445	-45,256	0,000
UGT	25,445	-79,256	0,000

Resultaten voor het volledige model

Mechanische kenmerken

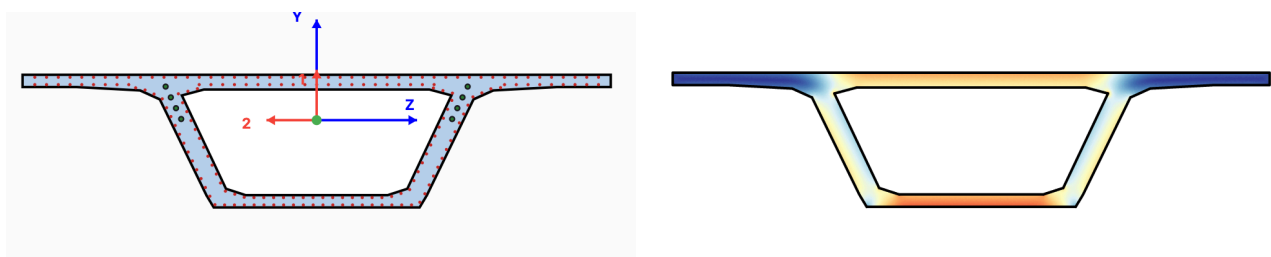
SectionPro berekent de eigenschappen van de bruto, netto en gehomogeniseerde doorsnede. In dit voorbeeld worden alleen de voorspankokers van de netto doorsnede afgetrokken; de passieve wapening blijft behouden. In de gehomogeniseerde doorsnede wordt voor zowel wapeningsstaal als voorspanstaal de equivalentiecoëfficiënt $n = 5$ gebruikt.

Doorsnede	A [m ²]	y_G [m]	I_{zz} [m ⁴]	I_{yy} [m ⁴]
Bruto	6,7590	1,7765	6,4096	55,5258
Netto	6,6962	1,7732	6,3979	54,9883
Gehomogeniseerd	6,9598	1,7777	6,5809	57,1632

De torsie- en afschuifeigenschappen van de bruto doorsnede worden hieronder gegeven.

J [m ⁴]	A_{sy} [m ²]	A_{sz} [m ²]	y_T [m]	Γ [m ⁶]
13,6059	1,5031	4,5502	1,3508	6,5277

Het onderstaande veld komt overeen met de schuifspanningen die worden veroorzaakt door een eenheidskoppel.



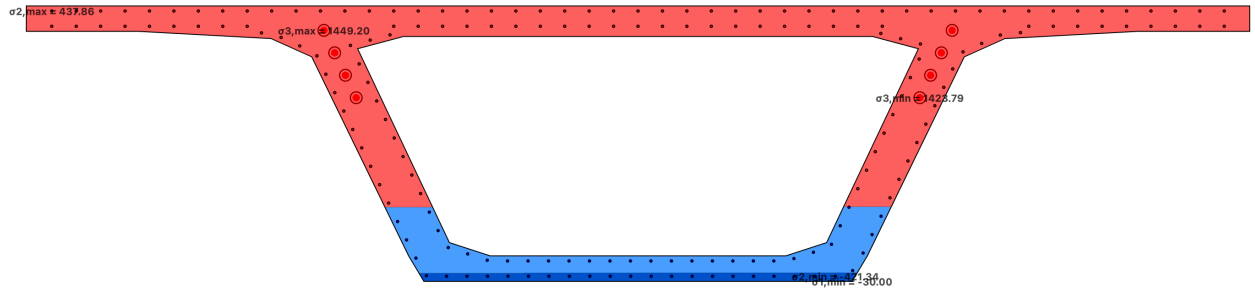
Figuur 3: Zwaartepunts- en hoofdassen (links) en schuifspanningsveld bij eenheidstorsie (rechts).

Evenwicht in de BGT en UGT

De rekenkern bepaalt de rektoestand van de doorsnede die de toegepaste snedekrachten in evenwicht brengt. De spanningen volgen vervolgens uit de respectieve materiaalwetten van beton, passieve wapening en voorspankabels. De gepresenteerde resultaten horen bij de karakteristieke combinatie in de BGT en de fundamentele combinatie in de UGT.

Voor voorspankabels wordt de eindspanning bepaald uit de cumulatieve rek $\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2$. De term ε_0 is de rek die hoort bij de effectieve spanning van 1116 MPa; $\Delta\varepsilon_1$ vertegenwoordigt een eventuele

decompressie van het beton naast de kabel; en $\Delta\varepsilon_2$ is de rek uit het doorsnede-evenwicht. In dit voorbeeld is het decompressie-effect ingeschakeld.



Figuur 4: Normalspanningsveld in de UGT, verkregen uit de niet-lineaire controle van de uiteindelijke snedekrachtenvector.

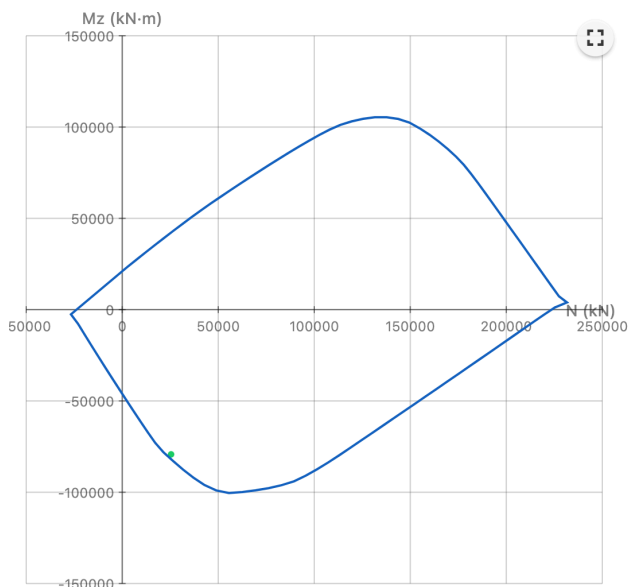
Resultaat	Eenheid	Karakteristieke BGT	Fundamentele UGT
Beton			
Minimale rek, $\varepsilon_{b, \min}$	‰	−0,531	−2,262
Minimale spanning, $\sigma_{b, \min}$	MPa	−19,264	−30,000
Passieve staalsoorten			
Minimale rek, $\varepsilon_{s, \min}$	‰	−0,512	−2,107
Maximale rek, $\varepsilon_{s, \max}$	‰	0,495	5,946
Minimale spanning, $\sigma_{s, \min}$	MPa	−102,31	−421,34
Maximale spanning, $\sigma_{s, \max}$	MPa	99,09	437,86
Voorspanning			
Minimale rek, $\varepsilon_{p, \min}$	‰	0,166	3,297
Minimale totale spanning, $\sigma_{p, \min}$	MPa	1148,32	1423,79
Minimale spanningstoename, $\Delta\sigma_{p, \min}$	MPa	32,32	307,79
Maximale rek, $\varepsilon_{p, \max}$	‰	0,422	5,352
Maximale totale spanning, $\sigma_{p, \max}$	MPa	1198,23	1449,20
Maximale spanningstoename, $\Delta\sigma_{p, \max}$	MPa	82,23	333,20
Oplossing			
Iteraties		4	6
Convergentie residu		$1,0 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-7}$
Convergentie		Ja	Ja

In de fundamentele UGT bereikt het beton van de onderplaat plaatselijk zijn plastische drukplateau, terwijl zich in de bovenplaat en de bovenzijde van de lijven een aanzienlijke trekzone ontwikkelt. De voorspankabels worden sterk aangesproken, met spanningstoenames tussen 307,8 en 333,2 MPa.

In de karakteristieke BGT wordt aan de spanningscontroles voldaan: de maximale betondrukspanning bedraagt 19,264 MPa, de maximale trekspanning in de passieve wapening 99,09 MPa en de maximale totale kabelspanning 1198,23 MPa. De scheurwijdte $w_k = 0,174$ mm blijft klein, hoewel zij hier onder de karakteristieke combinatie wordt beoordeeld.

Interactiedomeinen

De geavanceerde geometrie- en materiaalwetten worden ook gebruikt om weerstandsdomeinen te berekenen. De N - M_z -curve is een doorsnede door het domein bij $M_y = 0$. Het N - M_z - M_y -oppervlak breidt de berekening uit naar elke buigrichting.



Figuur 5: N - M_z -interactiecurve in de UGT voor $M_y = 0$, met de uiteindelijke snedekrachtenvector.

De volgende tabel geeft het kader van het interactieoppervlak weer, gedefinieerd door de minimum- en maximumwaarden van elk van de drie componenten.

Onderdeel	Minimum	Maximaal
N	-26,70 MN	231,62 MN
M_z	-100,41 MN · m	105,35 MN · m
M_y	-287,82 MN · m	287,82 MN · m

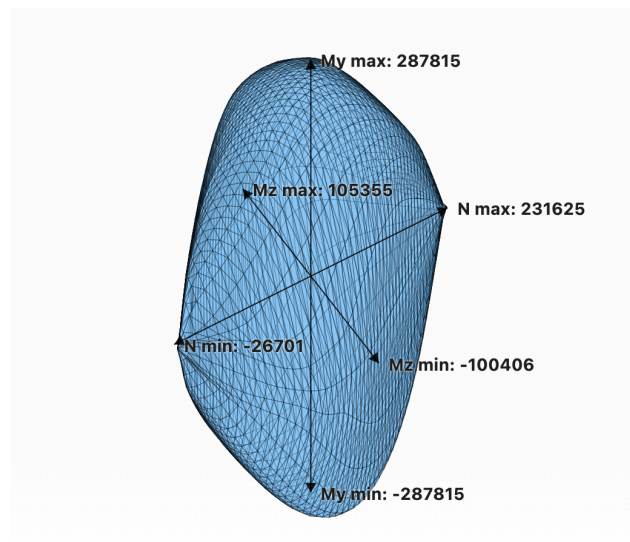
De positieve en negatieve capaciteiten rond M_y vallen samen, zoals op grond van de dwarssymmetrie van de doorsnede wordt verwacht. Het verschil tussen de positieve en negatieve capaciteiten rond M_z weerspiegelt de verschillende geometrie en wapening van boven- en onderplaat. De uiteindelijke snedekrachtenvector ligt zeer dicht bij de grens van het weerstandsdomein. De afstand-tot-domein-module geeft $FS = 0,983$: iets kleiner dan één, maar zeer dicht bij de grens.

Prestaties

De onderstaande tabel toont de uitvoeringstijden van aanroepen van de SectionPro-rekenkern voor het kokermodel. De grafische interface en de weergave van resultaten zijn hierin niet opgenomen.

Analyse	Berekeningstijd
Mechanische kenmerken	28,3 ms
Spannings- en rektoestand	0,73 ms
Berekening van de scheuopening	2,38 ms
N - M_z interactiecurve, 200 punten	1,11 ms
Interactieoppervlak N - M_z - M_y , maaswijdte 50×50	208 ms

Deze resultaten illustreren een van de sterke punten van SectionPro: de vergaande optimalisatie van de rekenkern houdt de rektijden uiterst laag, ook voor niet-lineaire analyses en de opbouw van driedimensionale weerstandsdomeinen. Controles en ontwerpvarianten leveren daardoor vrijwel onmiddellijk resultaat, wat rechtstreeks bijdraagt aan een vloeiende gebruikerservaring.



Figuur 6: N - M_z - M_y -interactieoppervlak in de UGT.

Conclusie

Geavanceerde doorsneden combineren in één model meerdere geometrische domeinen en hun holtes, lagen passieve wapening, groepen voorspanstaal, constructiestaalprofielen en dunne platen. Elk onderdeel behoudt zijn eigen materiaalwet voor de verschillende grenstoestanden.

De hier onderzochte kokerligger illustreert deze voorstelling. De steunpuntsdoorsnede combineert een betondomein met een interne holte, over de oppervlakken verdeelde wapening en voorspankabels langs de lijven. De voorspanning wordt via haar primaire en secundaire effecten in de toegepaste snedekrachtenvector opgenomen. De bijdrage van de kabels aan de weerstand wordt bepaald uit de verandering van de kabelspanning, rekening houdend met de aanvankelijke voorspanning, een eventuele decompressie van het aangrenzende beton en de evenwichtsrektoestand van de doorsnede.

De geavanceerde modus kan daarom vrijwel elke doorsnede analyseren, ongeacht de geometrische complexiteit of de materialen waaruit deze is samengesteld. Deze algemeenheid blijft uiteraard onderworpen aan de aannames van dwarsdoorsnedeanalyse, in het bijzonder dat vlakke doorsneden vlak blijven en dat gekoppelde componenten voldoen aan rekcompatibiliteit. Dankzij de geoptimaliseerde rekenkern behouden zelfs deze gedetailleerde modellen vrijwel onmiddellijke responstijden.