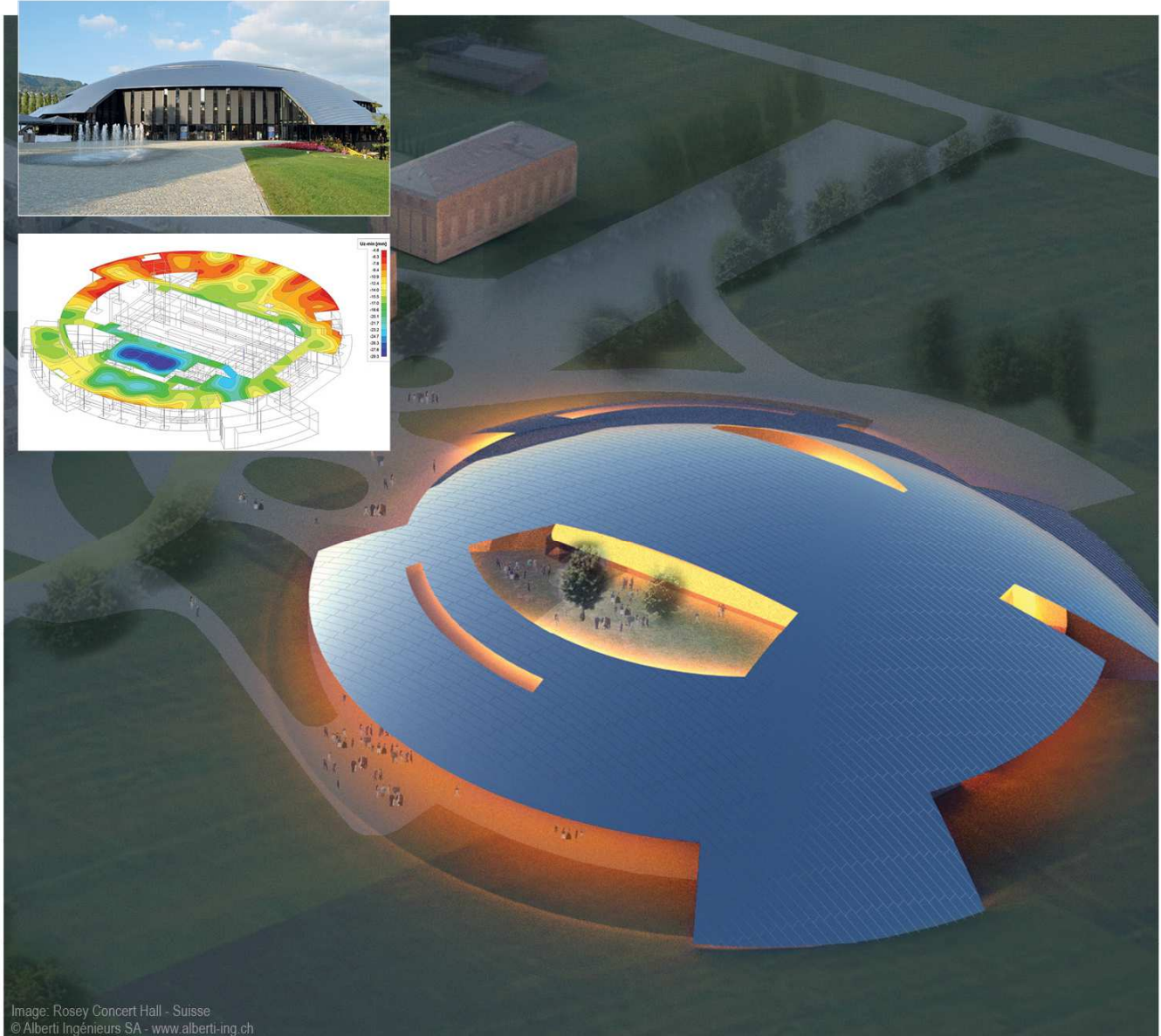


# SCIENGINEER



## Advanced Expert Training Naspanning

All information in this document is subject to modification without prior notice. No part of this manual may be reproduced, stored in a database or retrieval system or published, in any form or in any way, electronically, mechanically, by print, photo print, microfilm or any other means without prior written permission from the publisher. SCIA is not responsible for any direct or indirect damage because of imperfections in the documentation and/or the software.

© Copyright 2015 SCIA nv. All rights reserved.

## Inhoudstafel

Inleiding .....	5
Lineaire analyse van een nagespannen balk .....	6
1_Invoer geometrie en naspanning .....	6
2_Bouwfasen (en belastingen) .....	11
3_Berekening .....	11
4_Resultaten .....	12
5_Controles in het betonmenu en ontwerp passieve wapening .....	13
Tijdsafhankelijke analyse van een nagespannen ligger .....	17
1_Invoer geometrie en naspanning .....	17
2_Bouwfasen (en belastingen) .....	20
3_Berekening .....	23
4_Resultaten .....	24
5_Controles in het betonmenu .....	26
Lineaire analyse van een nagespannen brugdek .....	28
1_Invoer geometrie en naspanning .....	28
2_Invoer van de belastingen .....	31
3_Berekening .....	32
4_Resultaten .....	32
Analyse van een nagespannen plaat in 2 richtingen .....	35
1_Invoer geometrie en naspanning .....	35
2_Invoer belasting .....	36
3_Berekening .....	36
4_Resultaten .....	37
Gedetailleerde bespreking ontwerp en controle van nagespannen platen .....	38



## Inleiding

Alle besproken onderwerpen zijn beschikbaar in de **Expert Editie** van SCIA Engineer.

De voorspanmodule van SCIA Engineer laat toe om een analyse te doen van structuren die voorgespannen of nagespannen zijn. Het verschil tussen het berekenen van een voorgespannen en nagespannen constructie in SCIA Engineer zit enkel in de invoer. Bij voorspanning wordt gewerkt met een boorgatpatroon. Bij naspanning moet een kabelverloop bepaald worden. Deze cursus behandelt enkele voorbeelden van nagespannen constructies.

Het maken van een lineaire analyse van een nagespannen constructie heeft geen enkele beperking wat betreft het model. Dit is zeker een sterk punt van het programma. In algemeen xyz omgeving kunnen de meest ingewikkelde nagespannen schaalconstructies perfect geanalyseerd worden. Met analyse wordt hier bedoeld een lineaire berekening met eindige elementen van de nagespannen constructie.

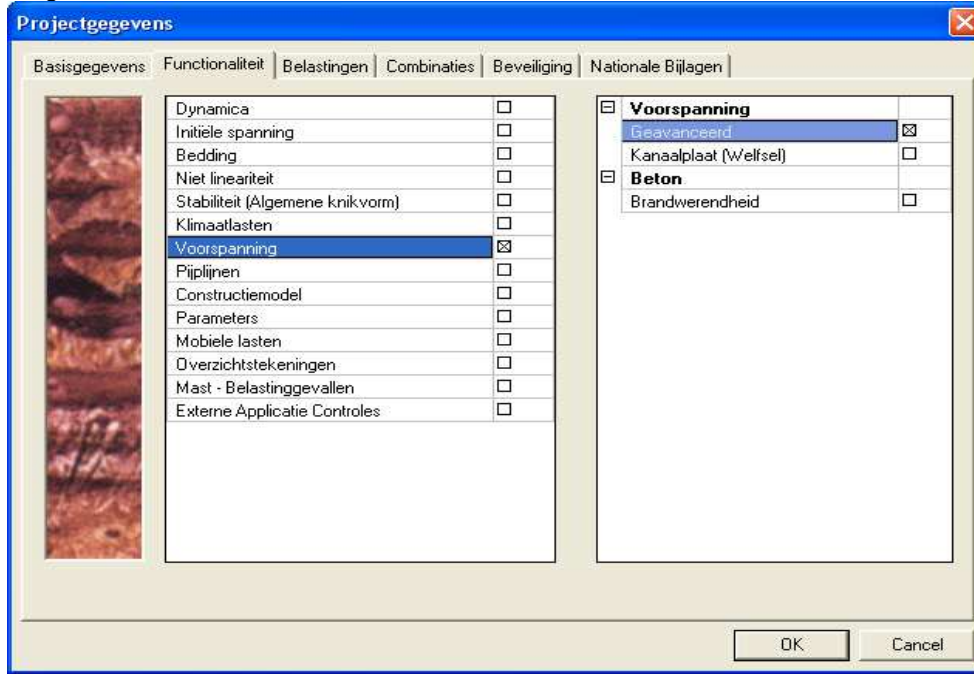
De grote beperking hierbij is echter dat de lange termijnverliezen niet kunnen berekend worden omdat een tijdsafhankelijke analyse enkel mogelijk is in 2D omgeving. Daarom zullen we ons in de eerste twee voorbeelden beperken tot 2D omgeving, omdat dan ook de tijdsafhankelijke verliezen kunnen berekend worden. Bovendien kunnen op een nagespannen ligger ook de nodige EN controles worden uitgevoerd.

Het eerste hoofdstuk zal het voorbeeld behandelen een zeer eenvoudige rechthoekige balk en dient om de invoer en uitvoermogelijkheden van een nagespannen constructie toe te lichten. Het tweede hoofdstuk zal handelen over een troglijger, waarbij de nagespannen kabel wordt ingevoerd door middel van brongeometrie. Verder wordt hier ook een tijdsafhankelijke analyse op verricht zodat de berekening van krimp, kruip en relaxatie met de TDA module wordt geïllustreerd. Het derde en vierde hoofdstuk ten slotte zullen voorbeelden behandelen van een nagespannen plaatmodel in algemeen xyz omgeving.

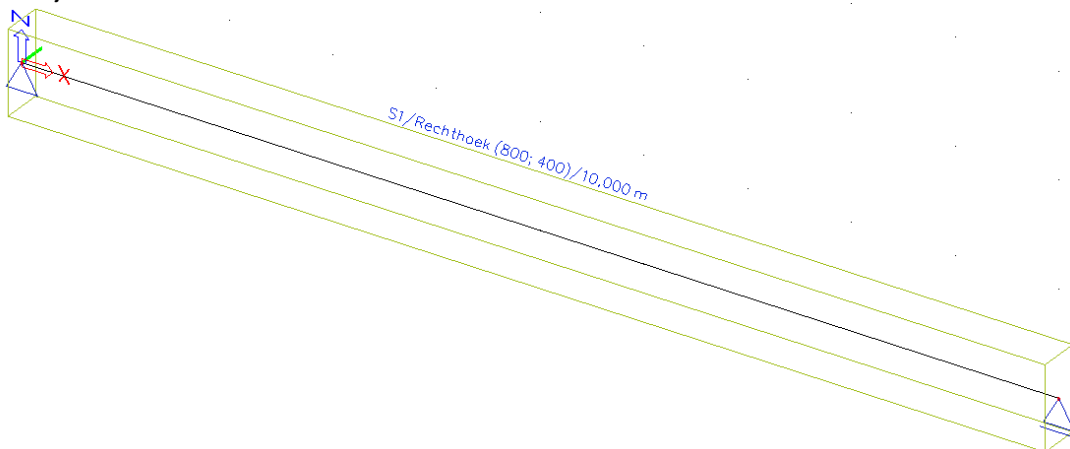
## Lineaire analyse van een nagespannen balk

### 1\_Invoer geometrie en naspanning

- Alvorens een project met voorspanning aan te vangen dient eerst de betreffende functionaliteit aangevinkt te worden.



- Vervolgens kan de ligger gemodelleerd worden. In dit voorbeeld modelleren we een rechthoekige ligger (400mm op 800mm van C60/75 betonkwaliteit) van 10m lang die scharnierend is opgelegd aan zijn uiteinden.



- Het aanbrengen van de naspanning gebeurt ook in het constructiemenu. Hier vind je onder voorspankabels de mogelijkheid om een Nagespannen Interne Kabel in te voeren. (opm: het aanbrengen van voorspanstrengen gebeurt in het betonmenu)

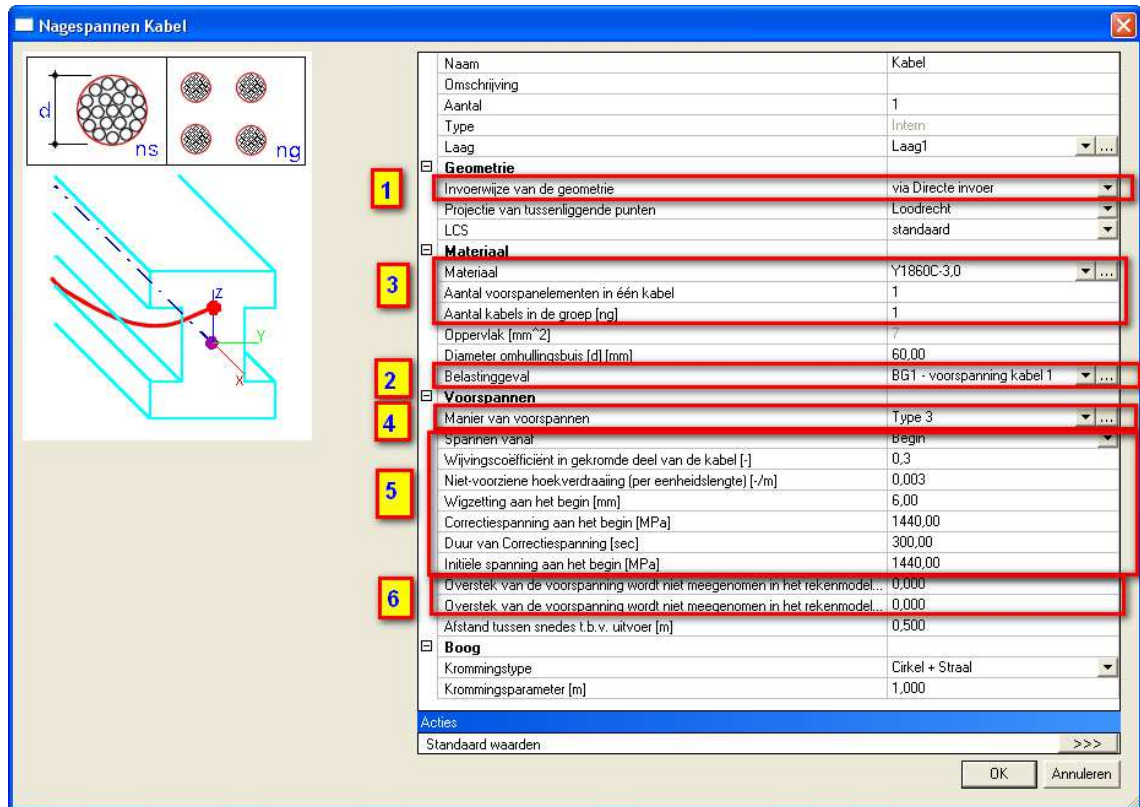
De invoer van deze nagespannen interne kabel kan op drie manieren gebeuren:

- Via directe invoer waarbij de gebruiker zelf de kabel rechtstreeks invoert op het model.
- Via directe invoer waarbij een kabellijn geïmporteerd via dwg/dxf wordt omgezet in een kabel.
- Via brongeometrie waarbij de gebruiker zelf coördinaten opgeeft van de kabel en het programma via verschillende mogelijke geometrische bewerkingen hiertussen interpoleert.

Geen van deze drie mogelijke manieren van invoeren berekent werkelijk de optimale kabellijn. De invoer is volledig de verantwoordelijkheid van de gebruiker. Het programma doet enkel de analyse na invoer. Onze ervaring is dat meestal optie 2 gevolgd wordt voor de invoer. De import van een dwg waarbij de kabellijn wordt geïmporteerd uit een grafisch programma (zoals AutoCad,...).

In dit voorbeeld houden we het eenvoudig en voeren we twee rechtlijnige kabels in door middel van optie 1.

- Vooraleer een kabel kan ingevoerd worden, wordt eerst een belastingsgeval van type 'voorspanning' aangemaakt. Dit is nodig om de belasting ten gevolge van de voorspanning bij op te slaan. Het aanbrengen van een voorspanning wordt dus beschouwd als een (gunstige) belasting op de structuur. Door het aanmaken van meerdere belastingsgevallen 'voorspanning', kan het sequentieel aanspannen van de kabels en de daarbij horende verliezen gemodelleerd worden. Dit sequentieel naspannen kan ook gemodelleerd worden door middel van lineaire bouwfases. De belastingsgevallen voorspanning moeten dan in aparte bouwfases worden toegevoegd.
- Vervolgens komt men terecht in de eigenschappen van de kabel:



Het eerste punt betreft de wijze van invoer.

Het tweede punt is het toekennen van de kabel aan een belastingsgeval type 'voorspanning'.

Het derde punt is de keuze van een materiaal en het aantal voorspanelementen per kabel.

Het vierde punt is de wijze van voorspannen.

Het vijfde punt is ter invulling van de parameters van de wijze van voorspanning.

Het zesde punt laat toe om eventueel een overstek te modelleren.

- De keuze van het materiaal:

Materialen		
Y1860C-3,0	Naam	Y1860C-3,0
Y1860C-4,0	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Normonafhankelijk</b>	
Y1860C-5,0	Materiaaltype	Gladde ronde draad
Y1770C-3,2	Thermische uitzetting [m/mK]	0,00
Y1770C-5,0	Massa eenheid [kg/m <sup>3</sup> ]	7850,0
Y1770C-6,0	E-modulus [MPa]	205000,00
Y1670C-6,9	Poisson coëff.	0,15
Y1670C-7,0	Onafhankelijke G-modulus	<input type="checkbox"/>
Y1670C-7,5	G-modulus [MPa]	89130,43
Y1670C-8,0	Log. decrement	0,15
Y1570C-9,4	Kleur	
Y1570C-9,5	Specifieke hitte [J/gK]	6,0000e-01
Y1570C-10,0	Thermische geleiding [W/mK]	4,5000e+01
Y1860C-3,0-I	Diameter [mm]	3,0
Y1860C-4,0-I	Oppervlak [mm <sup>2</sup> ]	7
Y1860C-5,0-I	<input checked="" type="checkbox"/> <b>prEN 10138</b>	
Y1770C-3,2-I	Karakteristieke waarde van de m...	13
Y1770C-5,0-I	Karakteristiek 0,1% aangetoonde...	11
Y1770C-6,0-I	Totale verlenging van maximale ...	350,0
Y1670C-6,9-I	Vermoeings spanningsbereik (Fr)...	0,2
Y1670C-7,0-I	<input checked="" type="checkbox"/> <b>EN 1992-1-1</b>	
Y1670C-7,5-I	Karakteristieke treksterkte (f <sub>pk</sub> ) [...]	1850,0
Y1670C-8,0-I	Karakteristiek 0,1% aangetoonde...	1600,0
Y1570C-9,4-I	Karakteristieke rek bij maximale b...	350,0
Y1570C-9,5-I	Ductiliteitsfactor (k = f <sub>pk</sub> / f <sub>p01k</sub> )...	1,16
Y1570C-10,0-I	Rekenvloeiesterkte - blijvend (f <sub>pd</sub> ...)	1391,3
Y1770S2-5,6	Rekenvloeiesterkte - buitengewoo...	1600,0
Y1770S2-6,0	Rekenreklimiet (eps <sub>ud</sub> ) [1e-4]	315,0
Y1770S3-7,5	Oppervlakte karakteristieken	Glad
Y1860S2-4,5	Ralaxatieklasse	Klasse 2 - lage relaxatie draden en strengen
Y1860S3-4,85	Productie	"Stress-relieved"
Y1860S3-6,5	Relaxatie door gebruiker	<input type="checkbox"/>
Y1860S3-6,9	Relaxatietabel	>>>
Y1860S3-7,5	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Spanning/rek diagram</b>	
Y1860S3-8,6	Diagramtype	Bi-lineair met oplopende tak
Y1920S3-6,3	Afbeelding van spanning/rek di...	...

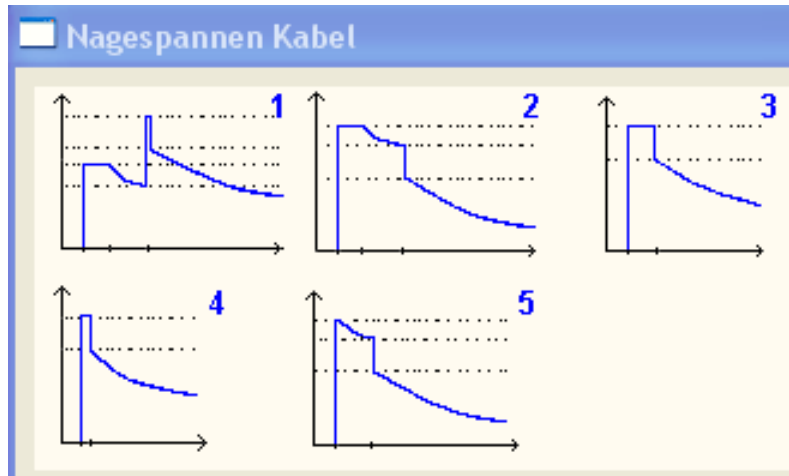
De materiaaleigenschappen bevatten ook de diameter van het voorspanmateriaal. In de eigenschappen van de kabel zelf, kan enkel het aantal draden nog worden ingesteld.

De relaxatietabel is hierbij ook opvraagbaar en werd overgenomen uit de norm. Deze kan eventueel ook door de gebruiker worden ingegeven. De relaxatie-eigenschappen hebben uiteraard enkel invloed bij een tijdsafhankelijke analyse.

In dit voorbeeld kiezen we voor het materiaal Y1860C -5,0 met 20 strengen in de kabel en 4 kabels in de kabelgroep.



- De wijze van voorspannen:



Voor een beschrijving van de verschillende types wordt verwezen naar het cursusdocument 'parameters, stages and prestress'.

Het komt erop neer dat hier gekozen wordt, welke onmiddellijke verliezen worden meegerekend.

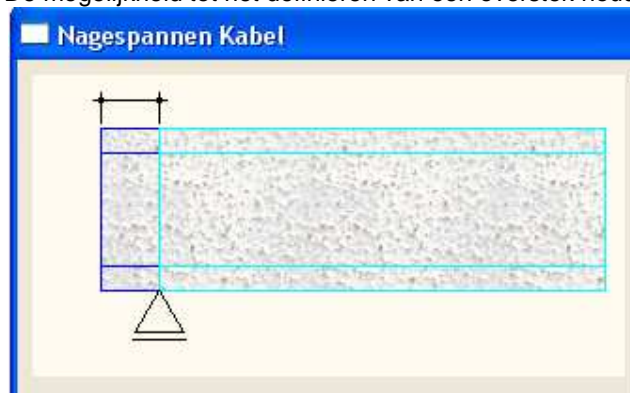
Er is in de 5 gevallen telkens het wigzettingsverlies. (In type 4 is dit het enige onmiddellijke verlies)

In de andere types kunnen hiernaast ook andere verliezen zoals korte termijnrelaxatie e.d. worden ingerekend. De lange termijnverliezen worden getoond bij de 5 types, maar kunnen enkel bepaald worden door middel van tijdsafhankelijke analyse.

In dit voorbeeld opteren we voor optie 4.

- De verdere parameters die horen bij de wijze van voorspanning worden ingevoerd bij de eigenschappen van de kabel.  
Dit is bijvoorbeeld de grootte van de wigzetting. Ook de initiële spanning in de kabel is uiteraard een zeer belangrijke invoerwaarde. Deze nemen we in het voorbeeld gelijk aan 1440 MPa.  
Bij nagespannen kabels wordt hiernaast ook het wrijvingsverlies ingerekend. Het is hierbij belangrijk of de kabel van het begin of het einde wordt aangespannen.

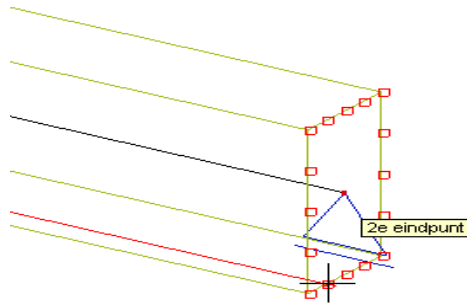
- De mogelijkheid tot het definiëren van een overstek houdt betrekking tot hetvolgende:



Deze overstek wordt niet meegenomen voor de EEM analyse, maar voor de berekening van de verliezen in de kabel wordt deze overstek wel meegerekend.

- Vervolgens kan de kabel ingevoerd worden. De eigenschappen van de kabel kunnen uiteraard ten allen tijde opgevraagd en gewijzigd worden.

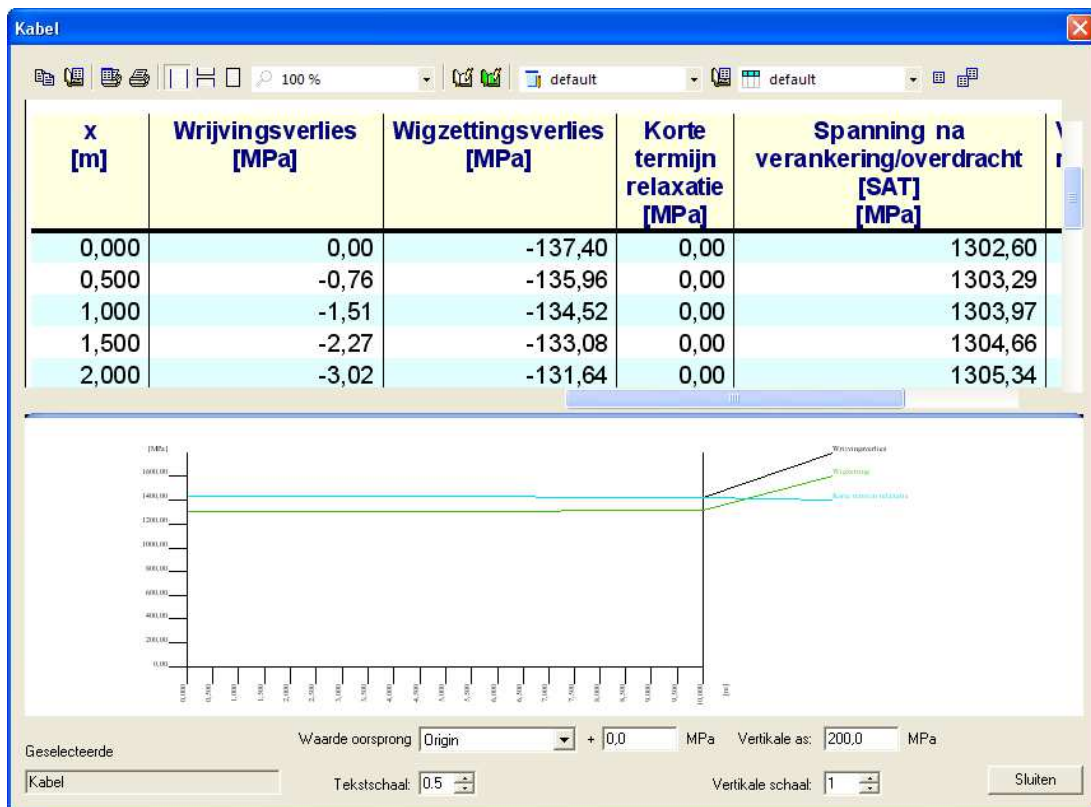
Voor de invoer kan de gebruiker aanpikken op aanpikpunten en eventueel achteraf via 'tabel bewerk geometrie' (uit actiemenu) de coördinaten nog bijsturen.



	Coördinaat X [	Coördinaat Y [	Coördinaat Z [m]
1	0,000	-0,100	-0,35
2	10,000	-0,100	-0,350
*	0,000	0,000	0,000

Buttons: OK, Annuleren, Toepassen

- Reeds vooraleer de analyse uit te voeren is het mogelijk om de onmiddellijke kabelverliezen op te vragen. Hiervoor drukt de gebruiker op 'kabelverliezen' in het actiemenu:



Bij aanspannen van in het begin van de kabel wordt gestart met een groot wigzettingsverlies in het begin dat naar het einde toe afneemt. Het wrijvingsverlies neemt naar het einde toe toe.

Om de 0,5 m (dit kan ook ingesteld worden in eigenschappen kabel) wordt de spanning na overdracht bekomen. Dit is de spanning die bekomen wordt door het wigzettingen en wrijvingsverlies af te trekken van de initiële spanning.

Deze spanning na overdracht (SAT: 'stress after transfer') is de spanning die naar de solver gestuurd wordt om de analyse uit te voeren.

- Analogoos aan de invoer van de eerste kabel, wordt er nu ook een tweede kabel ingevoerd in de andere benedenhoek. Deze kan eenvoudig gekopieerd worden. Nadien dient deze 2<sup>e</sup> kabel dan toegekend te worden aan een volgend belastingsgeval.

## 2\_Bouwfases (en belastingen)

Er worden drie lineaire bouwfases aangemaakt.

Fase 1: enkel eigengewicht

Fase 2: aanspannen 1<sup>e</sup> kabel

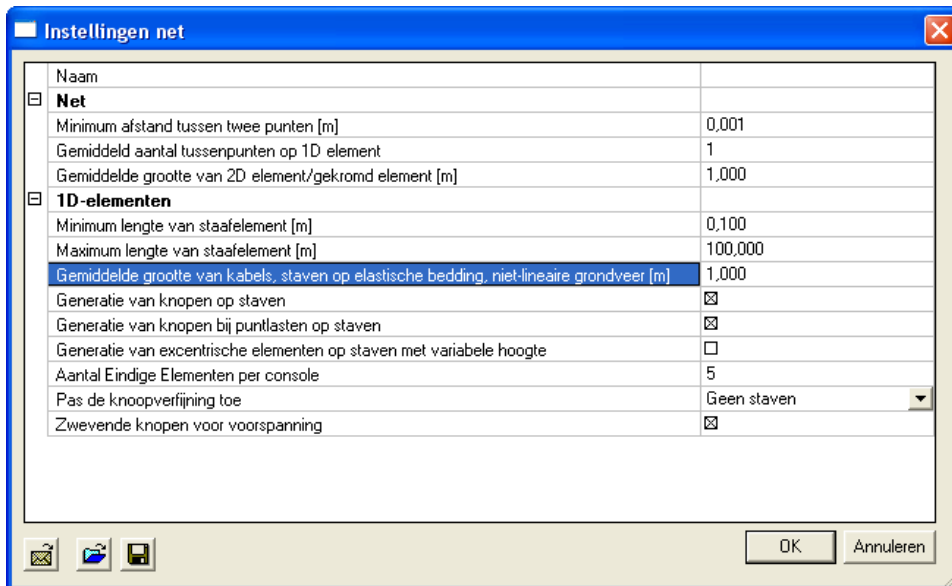
Fase 3: aanspannen 2<sup>e</sup> kabel

Er wordt in dit eenvoudig voorbeeld geen tijdsafhankelijke analyse gedaan. Er worden ook geen verdere fasen met gebruiksbelasting gedefinieerd.

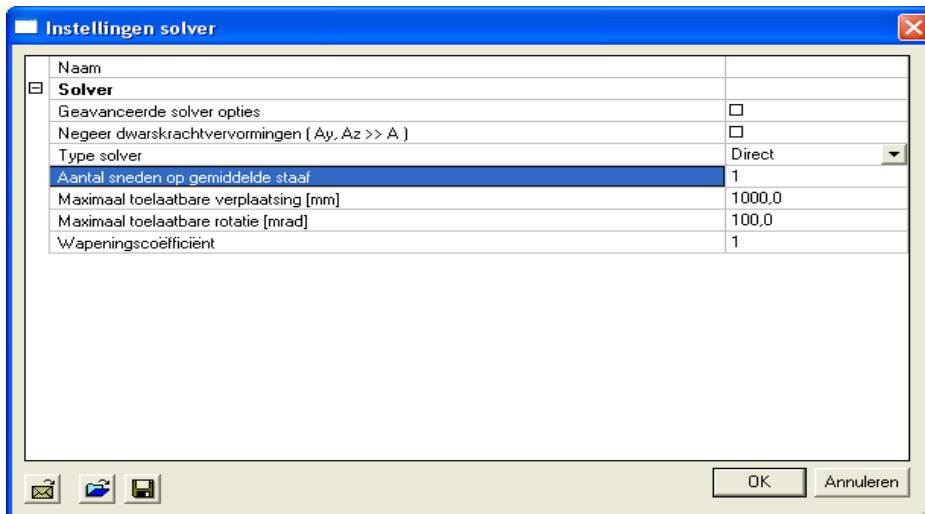
## 3\_Berekening

Alvorens een berekening met voorspanning uit te voeren moeten de netinstellingen en solverinstellingen goed ingesteld worden.

Het is immers van belang voor een nauwkeurige analyse dat de voorspankabels voldoende gemesht worden.



Indien de netinstellingen voldoende fijn worden gekozen, dan kan het aantal snedes voor de uitvoer beperkt worden tot 1 snede per netelement. Dit zal de snelheid bij postprocessors, zoals de EN controles, ten goede komen.



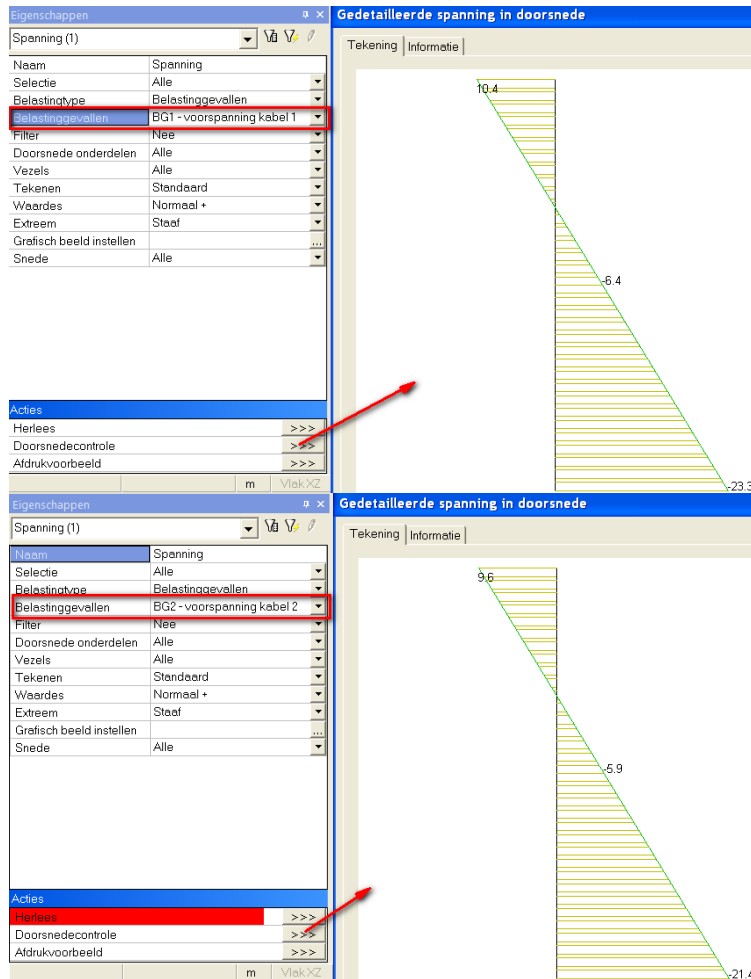
## 4 Resultaten

In het resultatenmenu kunnen interne krachten en kabelspanningen bekeken worden.

Zowel voor de individuele belastingsgevallen als voor de klassen die voor elke fase aangemaakt worden kunnen de resultaten bekeken worden.

We vergelijken eerst de resultaten van BG1 voorspanning kabel 1 en BG2 voorspanning kabel 2: Indien we kijken naar de staafspanningen, dan merken we op dat BG1 een grotere staafspanning veroorzaakt dan BG2.

Dit is ook logisch aangezien kabel 2 reeds aan kabelspanning zal verloren hebben doordat eerst kabel 1 wordt aangespannen. Dit vinden we later ook terug onder kabelspanningen.



Indien we dan de normaalkracht beschouwen onder interne krachten, dan vinden we ook terug dat deze lager is voor BG2 als voor BG1.

Noot: er is in het eigenschappenmenu bij interne krachten de mogelijkheid om de optie 'voorspanning' aan te vinken. Indien deze optie aangevinkt is, dan wordt er gerekend met een sectie met voorspanning. Voor BG1 zal dit geen verschil uitmaken, omdat op het moment dat kabel 1 wordt aangespannen er nog geen voorspanning in de sectie zit. Voor BG2 zal dit echter wel een verschil uitmaken, omdat op het moment dat kabel 1 wordt aangespannen er reeds voorspanning van kabel 1 in de sectie zit. Hierdoor wordt de equivalente doorsnede (alsook traagheidsmoment voor moment) dus groter, waardoor de resultaten voor BG2 op een voorgespannen sectie zullen overeenkomen met die van BG1 op een gewone sectie.

Opmerking: Indien de optie voorspanning aangevinkt staat, dan is het mogelijk om te kiezen voor totale resultante of enkel primaire of secundaire krachten. In een isostatische balk zullen de secundaire krachten nul zijn. Deze treden enkel op bij hyperstatische constructies (voorbeeld 5). Een achtergrond hierbij wordt gegeven op p86 van het boek Navrátil, J.: Prestressed concrete structures.

De kabelspanningen tonen het verloop van de kabelspanningen over hun lengte.

Hierbij wordt vertrokken van de spanning na overdracht (welke bekomen wordt door de onmiddellijke verliezen van de intiele spanning af te trekken, zie punt 1). De extra verliezen die zullen optreden zijn de LED en de LCS.

De LED zijn de verliezen ten gevolge van sequentiële naspanning en elastische vervorming van beton. Enkel in fase 3 (aanspannen 2<sup>e</sup> kabel) zullen deze verliezen optreden.

Deze worden hieronder getoond.

## Kabelspanningen

Kabelspanningen

Lineaire berekening, Extreem : Globaal

Selectie : Alle

Kabel: Alles met selectie

Klasse : ST3 (ULS)

BG	Kabel	x [m]	Spanning na verankering/overdracht [SAT] [MPa]	LED [MPa]	LCS [MPa]
ST3 (ULS)	Kabel	0,000	1302,60	-101,88	0,00
ST3 (ULS)	Kabel	10,000	1316,35	-102,96	0,00

De LCS zijn de lange termijn verliezen ten gevolge van krimp, kruip en lange termijn relaxatie. Deze worden enkel berekend bij een tijdsafhankelijke analyse en zijn in dit voorbeeld dus nul.

## 5\_Controles in het betonmenu en ontwerp passieve wapening

In het betonmenu kunnen we controleren of de nagespannen balk zal voldoen.

Dit betreft enerzijds een ontwerp van de passieve wapening en anderzijds de specifieke EN controles voor het voorspanstaal.

Het ontwerp van de passieve wapening alsook de bijhorende controles (scheurcontrole, responscontrole en capaciteitscontrole) verloopt analoog aan het ontwerp van wapening op 1D elementen. Er wordt hier dan ook naar de beton workshop verwezen.

De specifieke EN controles betreffen een controle van de toelaatbare betonspanning, de toelaatbare hoofdspansing en de toelaatbare spanning in voorspanelementen.

- Controle van de toelaatbare betonspanning:
  - We bekijken eerst de resultaten voor de UGT combinatie voor fase 3:

Hierbij wordt een controle verricht op  $\sigma_{cc,max}$ : toelaatbare spanning van beton na verankering van voorspanning. De waarde voor  $\sigma_{c,aa}$ : spanning in beton na verankering maakt een duidelijke overschreiding van  $\sigma_{cc,max}$  waardoor deze controle dus niet voldoet.

The screenshot shows a software window titled 'Eigenschappen' with a sub-window 'Afdrukvoorbeeld'. The main window displays 'Toelaatbare Betonspanningen voor gesele...' and a list of properties for 'Staal'. The 'Waardes' section is expanded to show 'sigma cc,max' set to 'Staal'. The 'Extreem' section is set to 'Staal'. The 'Grafisch beeld instellen' and 'Snelde' sections are also visible.

The 'Afdrukvoorbeeld' window shows a table titled 'Toelaatbare Betonspanningen voor gesele...' with the following data:

Staal	d [m]	BG	Vezel	$\sigma_{cc,aa}$ [MPa]	$\sigma_{cc,max}$ [MPa]
S1	0,000	F3-EN - UGT (STR)/1	7	-54,94	-36,00

- o We bekijken vervolgens de resultaten voor de BGT karakteristiek combinatie voor fase 3:

Hierbij wordt een controle verricht op  $f_{ct,eff}$ , eff: de toelaatbare betontrekspanning in BGT combinatie. De waarde van  $\sigma_{cm,max}$ : maximale beton(trek)spanning na toepassing van eigengewicht en alle quasi-permanente belasting overschrijdt deze waarde ruim, waardoor ook deze controle niet voldoet. Dit was ook enigszins te verwachten aangezien we naast het eigengewicht geen enkele quasi permanente last hebben aangebracht waardoor de bovenvezels van de balk onder trek zullen komen te staan. In een werkelijk voorbeeld waarin naast het eigengewicht ook andere lasten worden aangebracht, zal de waarde van  $\sigma_{cm,max}$  dus veel lager zijn.

**Toelaatbare Betonspanningen voor geselecteerde sta**

Lineaire berekening, Extreem : Staal  
 Selectie : Alle  
 Combinaties : F3-EN-BGT Karakteristiek

**Toelaatbare Betonspanningen voor geselecteerde staven**

Staal	$d_s$ [m]	BG	Vezel	$\sigma_{cm,sta}$ [MPa]	$\sigma_{cm,lim}$ [MPa]	$\sigma_{cm,max}$ [MPa]	$f_{ct,eff}$ [MPa]
S1	0,000	F3-EN-BGT Karakteristiek/2 ST3	3	-54,94	-60,43	25,60	4,40
				-36,00	0,00		

Merk op dat de waarde van  $\sigma_{cc,ch}$ : toelaatbare betondrukspanning in BGT karakteristieke combinatie niet wordt ingevuld. Dit komt omdat deze controle enkel vereist is voor omgevingsklassen XD, XF en XS.

- o De laatste controle ten slotte is voor de BGT quasi permanente combinatie voor fase 3:

Hierbij wordt een controle verricht op  $\sigma_{cm,qp}$  en  $f_{ct,eff,qp}$  welke respectievelijk de toelaatbare betondruk- en betontrekspanning voorstellen in BGT quasi-permanente combinaties (variabel lange duur). De waarden die moeten gecheckt worden zijn  $\sigma_{lt,min}$  en  $\sigma_{lt,max}$  welke respectievelijke de minimale en maximale betonspanning voorstellen ten gevolge van lange termijnlasten. De maximale toelaatbare trekspanning  $f_{ct,eff,qp}$  kan door de gebruiker zelf ingesteld worden in de betoninstelling en staat default op nul. Aangezien er trek optreedt, zal deze controle dus ook niet voldoen.

**Toelaatbare Betonspanningen voor geselecteerde staven EN 1992-1-1**

Lineaire berekening, Extreem : Staal  
 Selectie : Alle  
 Combinaties : F3-EN-BGT Quasi-Permanent

**Toelaatbare Betonspanningen voor geselecteerde staven**

Staal	$d_s$ [m]	BG	Vezel	$\sigma_{cm,sta}$ [MPa]	$\sigma_{cm,lim}$ [MPa]	$\sigma_{cm,max}$ [MPa]	$f_{ct,eff}$ [MPa]	$\sigma_{cm,qp}$ [MPa]	$f_{ct,eff,qp}$ [MPa]	Controle <sub>ber</sub> [-]	Controle <sub>lim</sub> [-]
S1	10,000	F3-EN-BGT Quasi-Permanent/2 ST3	3	-55,46	-55,46	23,49	-61,01	25,84	3,00	1,00	
				-36,00	0,00	0,00	-27,00	0,00			

- Controle van toelaatbare hoofdspanning:

Deze controle wordt beschreven in de code EN2 in art 12.6.3 (3):

Een betonnen ligger mag verondersteld worden ongescheurd te zijn in de uiterste grenstoestand als ofwel deze volledig onder druk blijft of indien de waarde van de hoofd(trek)spanning  $\sigma_1$  de waarde  $f_{ctd}$  (ontwerpwaarde betontreksterkte) niet overschrijdt.

Ook aan deze voorwaarde is in dit voorbeeld niet voldaan:

**Controle - Hoofdspanningen EN 1992-1-1**  
 Lineaire berekening, Extreem : Staal  
 Selectie : Alle  
 Combinaties : F3-EN - UGT (STR)  
**Controle - Hoofdspanningen voor geselecteerde staven**

Staal	$d_x$ [m]	BG	N [kN]	$V_{yd}$ [kN]	$V_{vd}$ [kN]	$M_{yd}$ [kNm]	$M_{vd}$ [kNm]	$\sigma_{fyd}$ [MPa]	Controle <sub>her</sub> [-]	Controle <sub>lim</sub> [-]
S1	10,000	F3-EN - UGT (STR)/1	-4960	0	-53	0	-1736	26,89	13,01	1,00

- Controle van spanning in voorspanelementen:

Deze controle betreft een controle van de spanning in de nagespannen kabels:

Combinaties : F3-EN - UGT (STR)

**Controle van voorspanwapening voor geselecteerde kabels**

Kabel	$d_x$ [m]	BG	$\sigma_{p,pa}$ [MPa]	$\sigma_{p,aa}$ [MPa]	$\sigma_{p,q,min}$ [MPa]	$\sigma_{p,q,max}$ [MPa]	$\sigma_{p,ltl}$ [MPa]	Check <sub>cal</sub> [-]	Check <sub>lim</sub> [-]
Kabel	0,00	F3-EN - UGT (STR)/1	1440,00	1302,60	1180,35	1180,35	1180,35	1,00	1,00
		ST3	1440,00	1360,00	1395,00	1395,00	1395,00	1,00	1,00

Deze controles zijn wel voldaan.

Hieronder vind je een lijst van de gebruikte symbolen, welke ook de controles verklaren:

$\sigma_{p,pa}$	Stress of prestressing reinforcement prior anchoring (during tensioning)
$\sigma_{p,aa}$	Stress of prestressing reinforcement after anchoring/transfer of prestress
$\sigma_{p,q,min}$	Minimum stress of prestressing reinforcement after application of self-weight, all permanent, and variable loads
$\sigma_{p,q,max}$	Maximum stress of prestressing reinforcement after application of self-weight, all permanent, and variable loads
$\sigma_{p,ltl}$	Stress of prestressing reinforcement after long-term losses (LTL)
Check <sub>cal</sub>	Maximum value of check of all performed checks of allowable stress of tendon
$\sigma_{p,max}$	Allowable stress of prestressing reinforcement prior anchoring (during tensioning)
$\sigma_{p,m0}$	Allowable stress of prestressing reinforcement after anchoring/transfer of prestress
$\sigma_{p,m}$	Allowable stress of prestressing reinforcement caused by SLS combinations

De toelaatbare spanningen voor en na verankering ( $\sigma_{p,max}$  en  $\sigma_{p,m0}$ ) worden berekend in de EN2 in respectievelijk hoofdstuk 5.10.2 en 5.10.3. De toelaatbare spanning  $\sigma_{p,m}$  in de kabels onder gebruiksgrenscombinaties wordt gegeven in hoofdstuk 7.2.

De gebruikte factoren kan men ook terugvinden in de betoninstelling.

**Instellingen beton - EN 1992-1-1, EN 1992-1-2, EN 1992-2**

Project standaard

Algemeen

  Berekening

UGT

  Bezwijkkrumme

  Dwarskracht

BGT

  Kruip

  BGT - Scheurcontrole

  NAV

**Toelaatbare spanning**

Instelling detaillering

  Wapeningsontwerp

    Haken

  AWO

  Voorspanning: voor-gespannen

  Voorspanning: na-gespannen

Doorsnedekarakteristiek

Fouten en waarschuwingen

**Toelaatbare spanning**

Spanningsbeperking gedurende spannen | BGT spanningsbeperking

Nationale bijlage

k1 - factor voor maximum spanning in voorgespannen wapening gedurende spannen	<input type="text" value="0.8"/>	5.10.2.1(1)
k2 - factor voor maximum spanning in voorgespannen wapening gedurende spannen	<input type="text" value="0.9"/>	5.10.2.1(1)
k3 - verhoogde factor voor maximum spanning in voorgespannen wapening gedurende spannen	<input type="text" value="0.95"/>	5.10.2.1(2)
k6 - verhoogde factor voor maximum druksterkte in voorspannen beton na overdracht van voorspanning	<input type="text" value="0.7"/>	5.10.2.2(5)
k7 - factor voor maximum spanning in voorgespannen wapening na verankering/overdracht van voorspanning	<input type="text" value="0.75"/>	5.10.3 (2)
k8 - factor voor maximum spanning in voorgespannen wapening na verankering/overdracht van voorspanning	<input type="text" value="0.85"/>	5.10.3 (2)

Een handberekening toont aan dat de berekende toelaatbare spanningen correct zijn:

### 5.10.2.1. Maximum stressing force

$$k1 := 0.8$$

$$k2 := 0.9$$

$$\sigma_{p\_max} := \min(k1 \cdot fpk, k2 \cdot fp_{01k}) \quad \sigma_{p\_max} = 1440 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.10.3. Prestressing Force

$$k7 := 0.75$$

$$k8 := 0.85$$

$$\sigma_{pm0} := \min(k7 \cdot fpk, k8 \cdot fp_{01k}) \quad \sigma_{pm0} = 1360 \frac{N}{mm^2}$$

De controles van toelaatbare betonspanning voldeden dus niet, de controles voor toelaatbare spanning in de voorspankabels voldeed wel.

De gebruiker moet nu zijn ontwerp aanpassen zodat ook de controles van toelaatbare betonspanning voldoen. Dit kan de gebruiker doen door ofwel de betonsectie te vergroten ofwel de betonkwaliteit te verhogen.



## Tijdsafhankelijke analyse van een nagespannen ligger

De bedoeling van dit hoofdstuk is om aan te tonen hoe de tijdsafhankelijke analyse gebeurt in SCIA Engineer. Een berekening met tijdsafhankelijke analyse is noodzakelijk om de tijdsafhankelijke verliezen van de strengen te kunnen berekenen. Dit is enkel toepasbaar op een 2D omgeving. Het is echter mogelijk en in de meeste gevallen ook aanvaardbaar om een 3D plaatmodel te vereenvoudigen tot een 2D ligger model. Dit is zeker aanvaardbaar indien de lengte/breedte verhouding voldoende groot is en de analyse in lengterichting dus de meest belangrijke is. Het voordeel van een 3D plaatmodel is dat ook krachtswerking in de breedterichting kan beschouwd worden. Dit wordt getoond in volgende hoofdstukken.

### 1\_ Invoer geometrie en naspanning

De TDA analyse van nagespannen brugdekken is een veel gebruikte toepassing van het programma. In de doorsnedebibliotheek zijn daarom vele voorgeparametriseerde brugdekken terug te vinden:

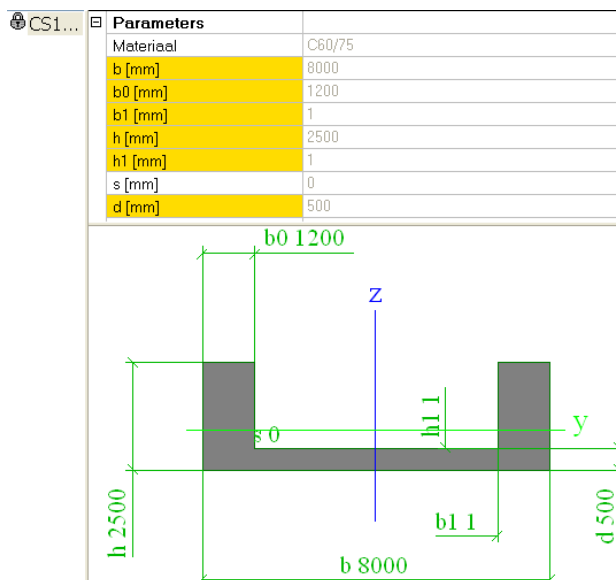


Dit vergemakkelijkt de invoer van de typische brugdekken.

Omdat deze lijst natuurlijk niet alle types van brugdek bevat, is het ook mogelijk om met behulp van de algemene doorsnede zelf een profiel aan te maken.

De algemene doorsnede brengt de gebruiker in een doorsnede-editor waarin het mogelijk is om zelf een doorsnede te tekenen via polygonen of via de import van een dwg/dxf.

We zullen in dit voorbeeld een trogligger aanmaken aan de hand van het voorgedefinieerde brugdekprofiel. Deze trogligger heeft volgende afmetingen:



We voeren de ligger in over een totale lengte van 40m met tussensteunpunten op 10m en 30m.

Het aanbrengen van de voorspankabels is het moeilijkste onderdeel uit de modellering. In vorig voorbeeld hebben we de invoer eenvoudig gehouden waardoor dit manueel mogelijk was. In dit voorbeeld zullen we de invoer aan de hand van brongeometrie illustreren.

In de praktijk wordt meestal vertrokken van een dwg die geïmporteerd wordt en die dan in SCIA Engineer wordt omgezet in een nagespannen kabel. Op de SCIA website [www.SCIA-online.com](http://www.SCIA-online.com) kan hierover een demonstratiefilmpje geraadpleegd worden.

De brongeometrie laat toe om aan de hand van enkele punten de geometrie van de nagespannen kabel te bepalen. Door middel van geometrische bewerkingen wordt het kabelverloop dan geïnterpoleerd tussen deze door de gebruiker ingegeven punten. Voor een achterliggende uitleg bij deze geometrische bewerkingen wordt verwezen naar het cursusdocument 'parameters, stages and prestress'.

De gebruikte brongeometrie in dit voorbeeld worden hieronder getoond:

**Geometrie in richting XZ**

	ördinaat X [	ördinaat Z [	Krommingstype	gsparan
1	0,000	0,050	Cirkel + Straa	2,000
2	5,000	0,050	Cirkel + Straa	4,000
3	10,000	2,450	Cirkel + Straa	4,000
4	15,000	0,050	Cirkel + Straa	4,000
5	25,000	0,050	Cirkel + Straa	4,000
6	30,000	2,450	Cirkel + Straa	4,000
7	35,000	0,050	Cirkel + Straa	4,000

**Geometrie in richting XY**

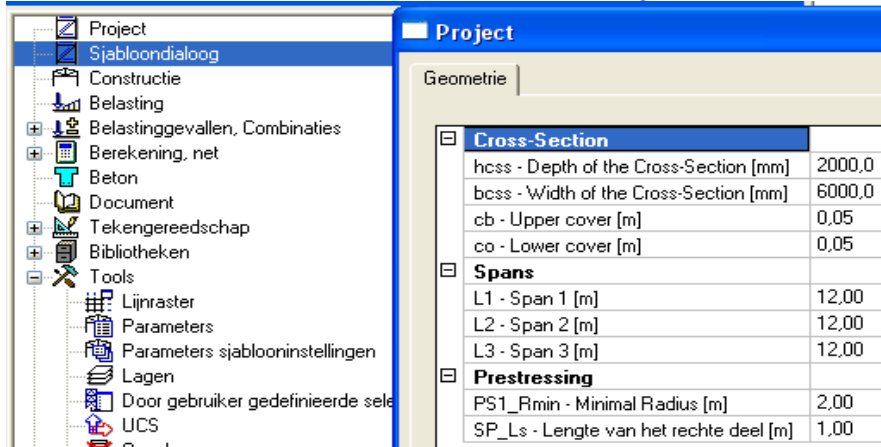
	ördinaat X [	ördinaat Y [	ommingstyp	imingsparamete
1	0,000	3,400	Cirkel + S	0,800
2	40,000	3,400	Cirkel + S	0,800
*	0,000	0,000		0,000

klaar NUM Help OK Annuleren

We modelleren twee kabels (aan de linker en rechterzijde van de trogligger) en plaatsen beide kabels in hetzelfde belastingsgeval BG 1 voorspanning. Dit wil dus zeggen dat we deze op hetzelfde moment zullen aanspannen.

Als opmerking bij de invoer met brongeometrie zouden we graag het gebruik van parameters aanbevelen. Aan de hand van parameters kunnen al de punten van de brongeometrie eenvoudig bepaald worden aan de hand van beperkte invoerwaarden.

Een voorbeeld van zulke invoerwaarden wordt hieronder getoond:

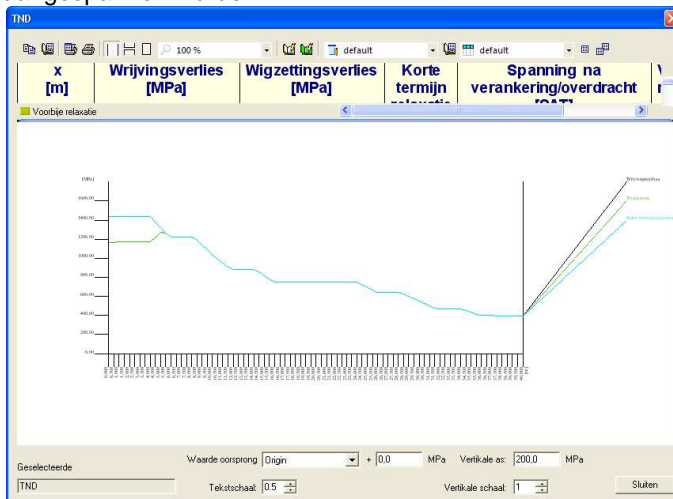


Deze invoerwaarden zijn dan gekoppeld met parameters die de coördinaten van de brongeometrie bepalen.

De verdere eigenschappen van de kabels nemen we als volgt:

<b>Materiaal</b>	
Materiaal	Y1670C-7,0
Aantal voorspanele...	20
Aantal kabels in de g...	1
Oppervlak [mm <sup>2</sup> ]	770
Diameter omhullings...	60,00
Belastinggeval	LC1 - post tensioning
<b>Voorspannen</b>	
Manier van voorspan...	Type 4
Spannen vanaf	Begin
Wijvingscoëfficiënt in ...	0,3
Niet-voorzien hoekv...	0,003
Wigzetting aan het b...	6,00
Initiële spanning aan ...	1440,00
Overstek van de voo...	0,000
Overstek van de voo...	0,000
Afstand tussen sned...	0,500

We bekijken de onmiddellijke verliezen van de kabel indien deze enkel van het begin zou aangespannen worden.

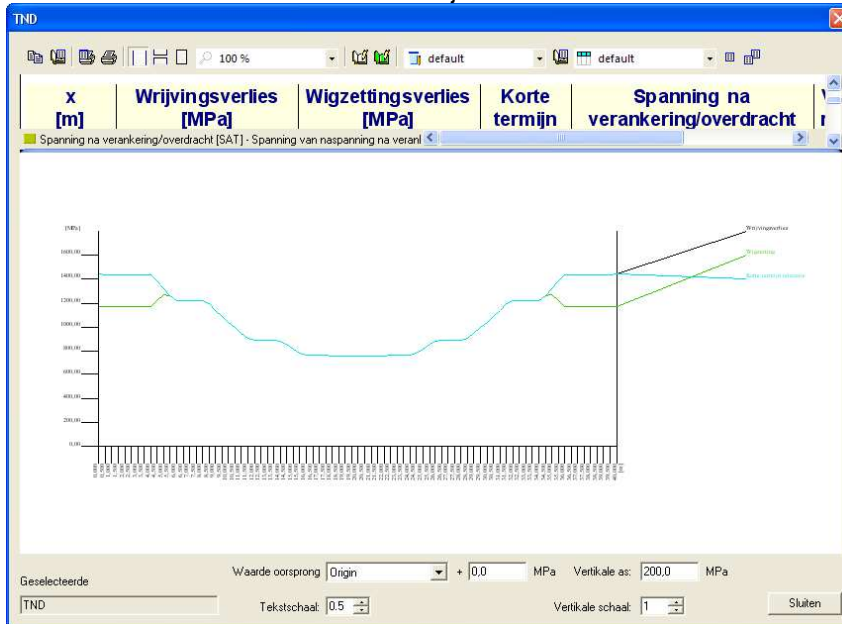


Het is duidelijk dat het wrijvingsverlies aan het einde van de 40m lange troglijger zeer groot is geworden.

Daarom is het raadzaam om deze kabels langs beide kanten aan te spannen. We spannen de kabels daarom op van beide einden, verankerd aan het einde, herspannen vanaf het begin.

Voorspannen	
Manier van voorspannen	Type 4
Spannen vanaf	Beide einden, verankerd aan het einde, herspannen vanaf het begin
Wijvingscoëfficiënt in gekr...	0,3
Niet-voorzien hoekverdra...	0,003
Wigzetting aan het begin [...]	6,00
Wigzetting aan het einde [...]	6,00
Initiële spanning aan het b...	1440,00
Initiële spanning aan het ei...	1440,00

Dit resulteert in onderstaande onmiddellijke verliezen:



## 2\_ Bouwfasen (en belastingen)

De bouwfasen van dit project zullen niet gewoon lineaire bouwfasen zijn, maar onderdeel uitmaken van een tijdsafhankelijke analyse. Dit wil zeggen dat er ook een tijdstip aan elke bouwfase moet toegekend worden.

- Fase 1: storten van de troglijger: dag 0
- Fase 2: aanbrengen van de nagespannen kabel: dag 28
- Fase 3: aanbrengen van de gebruikslast: dag 100
- Fase 4: controle van de structuur na 50 jaar: dag 18000

Als belastinggevallen laten we enkel het eigengewicht meespelen en een gebruikslast. Daarom creëren we volgende belastinggevallen:  
 BG2: eigengewicht  
 BG3: leeg belastinggeval (aanbrengen naspanning)  
 BG4: gebruikslast: variabel belastinggeval van lange duur  
 BG5: leeg belastinggeval (na 50 jaar)

Voor de gebruikslast (BG4) kiezen we in dit voorbeeld een lijnlast van 10 kN/m. Merk op dat men hiervoor ook gebruik zou kunnen maken van mobiele lasten om het belastinggeval te creëren dat een maximaal moment in het midden of in de zijvelden veroorzaakt. Voor het aanbrengen van mobiele lasten wordt verwezen naar de workshop mobiele lasten.

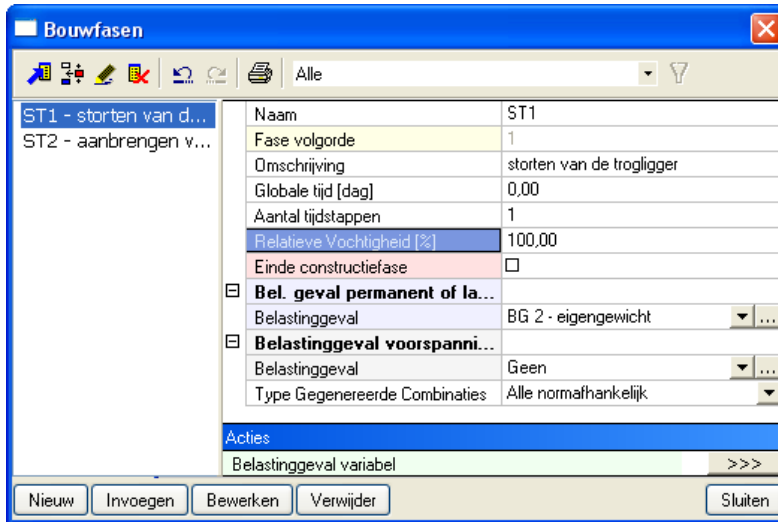
De instellingen voor een tijdsanalyse zien eruit als volgt:

Type	Tijdsanalyse
<b>Belastingfactoren</b>	
Permanent (lange termijn) belastinggevallen	
Belastinggeval voorspanning	
Lange termijn gedeelte van variabele last	
Psi-factor [-]	0,30
<b>TDA</b>	
Belastingfactoren voor gegeneerde belas...	
gamma-kruip min [-]	1,00
gamma-kruip max [-]	1,00
Tijd - Geschiedenis	
Aantal "time-nodes" tussen twee bouwfasen	1,0
Vochtige omgeving [%]	70,00
Automatische berekening van tijdstappen	<input type="checkbox"/> nee
Lokale tijdlijn	
Tijdstip van storten [dag]	-1,00
Verhardingstijd [dag]	0,00
Verhardingstijd van staal-beton delen van doorsne...	0,00
Lijnondersteuning (bekisting)	<input checked="" type="checkbox"/>
Tijdstip van vrijlaten van verplaatsingen in X-richtin...	14,00
Tijdstip van vrijlaten van verplaatsingen in Z-richtin...	14,00
Genereer uitvoer tekstbestand	<input type="checkbox"/>
<b>Resultaten</b>	

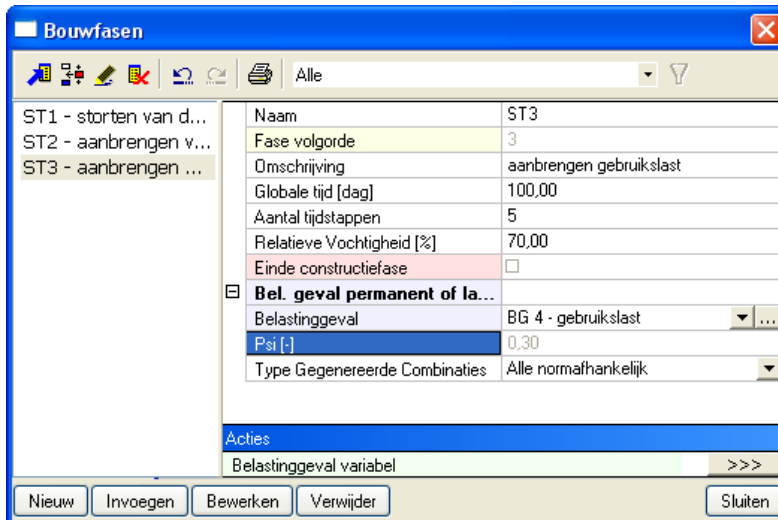
De belangrijke eigenschappen hieruit zijn:

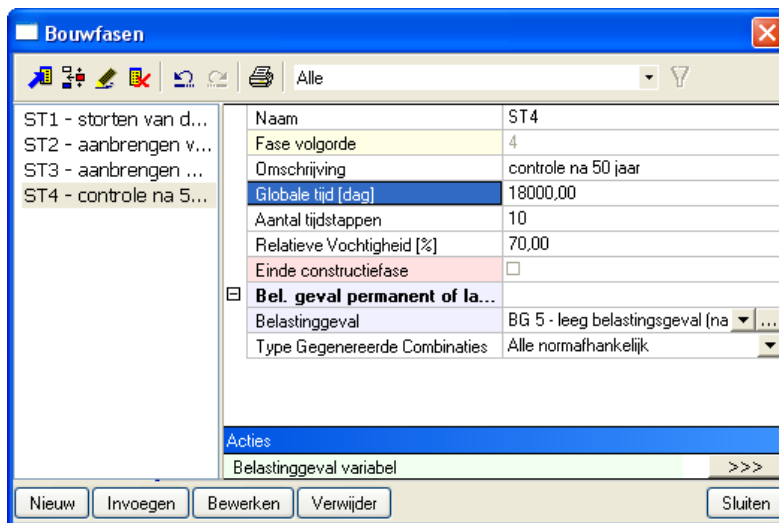
- Lange termijn gedeelte van variabele last:  $\Psi = 0,3$   
Dit houdt in dat variabele lasten van lange duur ook meegenomen worden in de tijdsanalyse, maar slechts voor 30%. (Permanente lasten worden voor 100% meegenomen.) Merk op dat dit enkel geldt voor variabele belastingsgevallen van 'lange duur'. De duur van het belastingsgeval kan ingesteld worden bij de eigenschappen van het belastingsgeval.
- Aantal "time-nodes" tussen twee bouwfasen:  
De numerieke TDA methode wordt des te nauwkeuriger naarmate er meer tijdsknopen worden aangemaakt tussen twee bouwfasen. Dit vraagt dan wel een langere rekentijd. Het aantal time-nodes kan bij voorkeur worden ingesteld bij elke bouwfase afzonderlijk. Zo zijn er meer time-nodes nodig tussen bouwphase 3 en 4 omdat hier een grotere tijdsperiode overbrugt wordt.
- Relatieve vochtigheid:  
Deze eigenschap gaat uiteraard de krimp beïnvloeden. Hoe hoger de relatieve vochtigheid, hoe lager de krimp.
- De lokale tijdlijn introduceert nog enkele extra tijdstippen op de tijdlijn waarvoor geen bouwphase gedefinieerd moet worden.
  - Tijdstip van storten: dit wordt bij voorkeur -1 genomen om te voorkomen dat op tijdstip dag 0 een element zonder stijfheid naar de solver gestuurd wordt. Vers gestort beton heeft immers nog geen stijfheid.
  - Verhardingstijd: speciale behandeling die krimp positief beïnvloedt, wordt enkel toegepast in prefabindustrie.
  - Bekisting: Deze eigenschap veronderstelt dat het beton zich in de bekisting bevindt gedurende de eerste dagen na het storten zodat het eerst stijfheid kan opbouwen.  
Merk op dat gedurende deze periode de structuur volledig ondersteund wordt beschouwd en de verplaatsingen en interne krachten dus nul blijven.

De bouwfases zien er daarom als volgt uit:



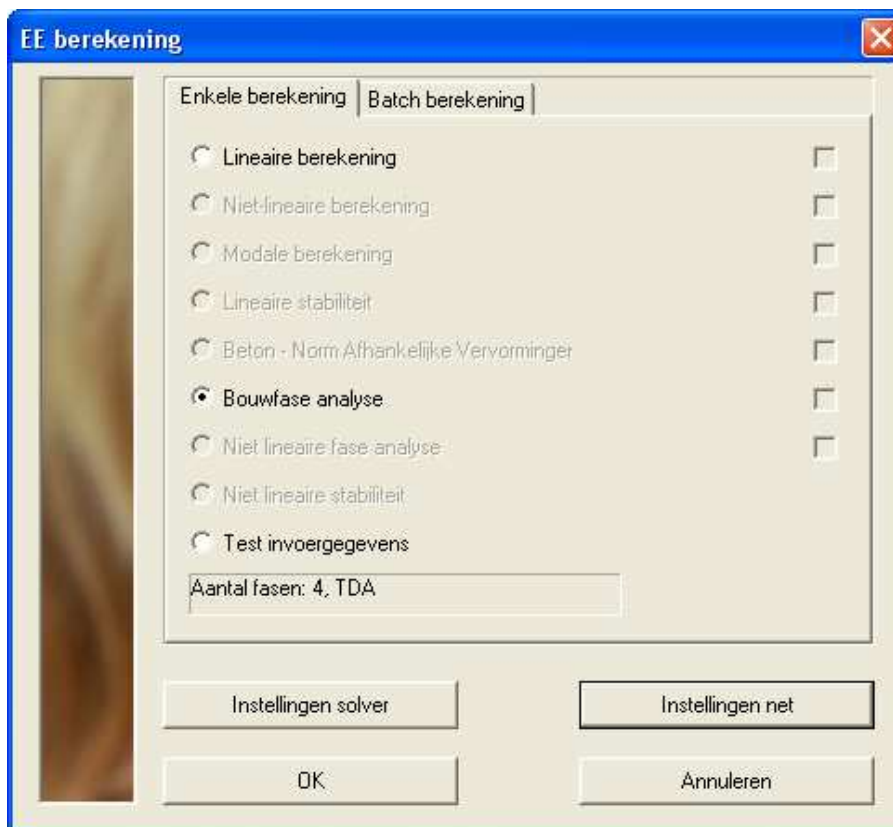
Merk op dat de fase 2 de laatste constructiefase is omdat hierna niets meer aan de structuur zal gewijzigd worden.





### 3\_Berekening

Na het instellen van de net- en solverinstellingen, kan de tijdsafhankelijke berekening uitgevoerd worden.



## 4 Resultaten

De resultaten die kunnen bekeken worden zijn dezelfde als in het voorgaande voorbeeld. Het interessante is echter dat er nu ook lange termijnverliezen berekend zijn kunnen worden.

We bekijken daarom de kabelspanningen in fase 3 en fase 4 en vergelijken het resultaat.

### Kabelspanningen

Kabelspanningen

Lineaire berekening, Extreem : Globaal

Selectie : Alle

Kabel: Alles met selectie

Klasse : ST3 (ULS)

BG	Kabel	x [m]	Spanning na verankering/overdracht [SAT] [MPa]	LED [MPa]	LCS [MPa]
ST3 (ULS)	TND	35,000	1273,88	0,00	-34,51
ST3 (ULS)	TND	20,000	753,61	0,19	-12,15

### Kabelspanningen

Kabelspanningen

Lineaire berekening, Extreem : Globaal

Selectie : Alle

Kabel: Alles met selectie

Klasse : ST4 (ULS)

BG	Kabel	x [m]	Spanning na verankering/overdracht [SAT] [MPa]	LED [MPa]	LCS [MPa]
ST4 (ULS)	TND	5,000	1273,88	-0,01	-99,07
ST4 (ULS)	TND	20,000	753,61	0,19	-49,01

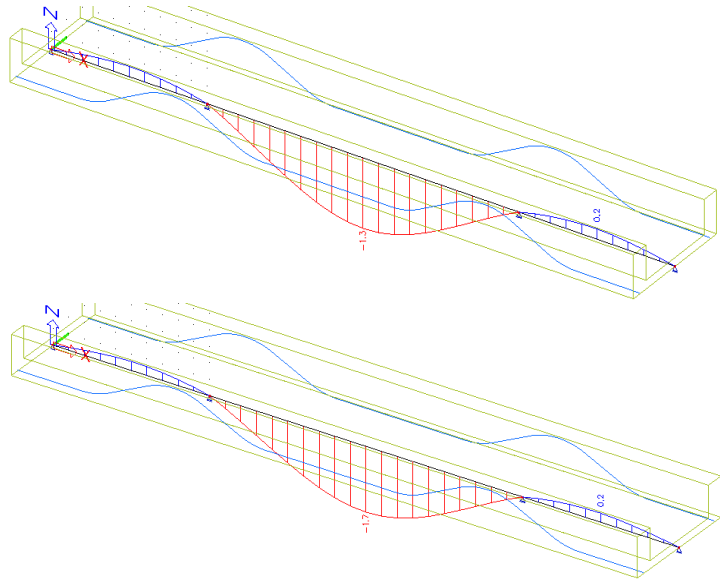
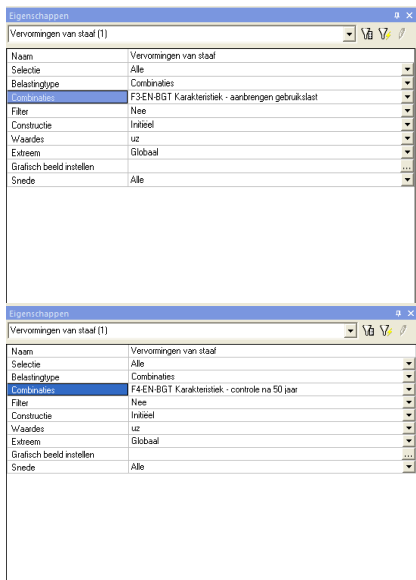
Het is duidelijk dat de lange termijnverliezen LCS beduidend hoger zijn na 50 jaar als bij het begin van de gebruiksfase na 100 dagen.

Het is ook op te merken dat de lange termijnverliezen in het midden van de ligger lager zijn dan aan de uiteinden. Dit komt omdat ook de spanning na verankering lager ligt in het midden (ten gevolge van wrijvingsverliezen). Het relaxatieverlies van de voorspankabels is immers afhankelijk van de spanning in de kabel.

Naast de kabelspanningen kunnen ook bijvoorbeeld de vervormingen bekeken worden.

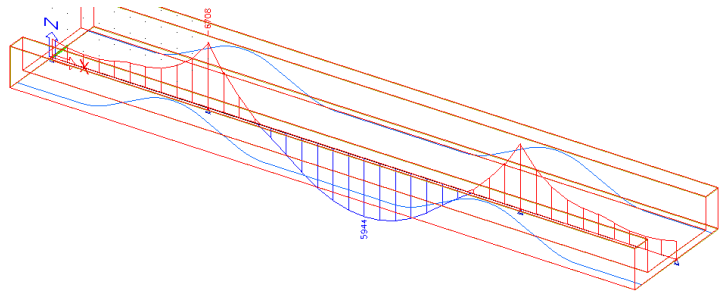
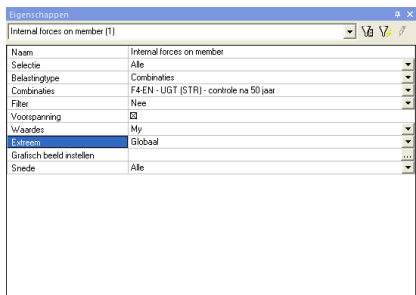
Het kan interessant zijn om ook de vervormingen eens te vergelijken tussen fase 3 en fase 4:





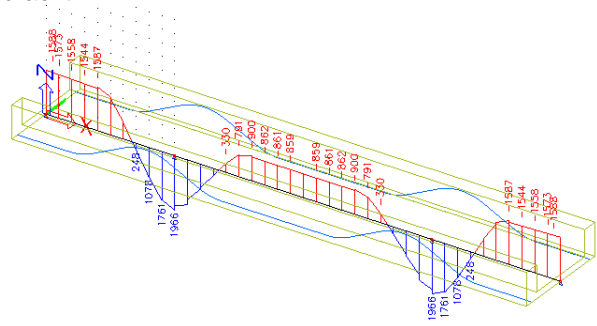
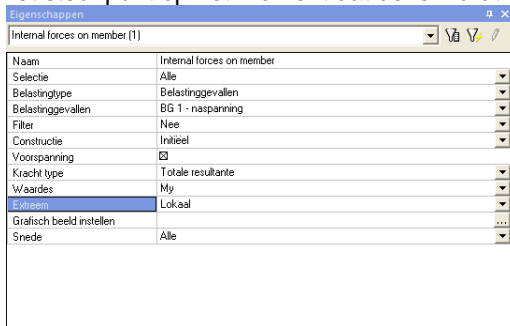
De vervorming in het midden van de ligger bedraagt 1,3mm bij het begin van de gebruiksfase en 1,7mm op het einde van de gebruiksfase.

De momentenlijn na 50 jaar wordt hieronder getoond:



5944kN/m in het midden van het veld en 6708kN/m over de steunpunten. Dit is dus de gecombineerde werking van eigengewicht, gebruikslast en naspanning na 50 jaar.

De naspanning zelf veroorzaakt een tegengesteld moment van 859kN/m in het veld en 1966kN/m over het steunpunt op het moment dat deze wordt aangebracht:

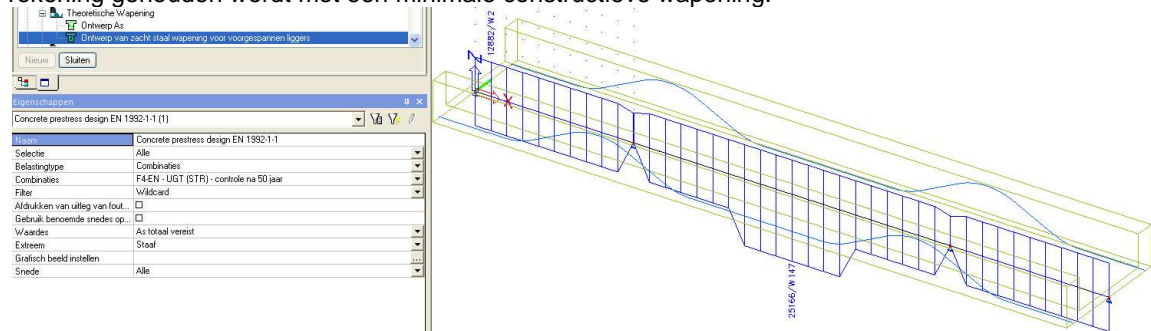


We kunnen hieruit reeds vermoeden dat er ofwel meer naspanning moet aangebracht worden ofwel dat er passieve wapening zal moeten bijgevoegd worden.

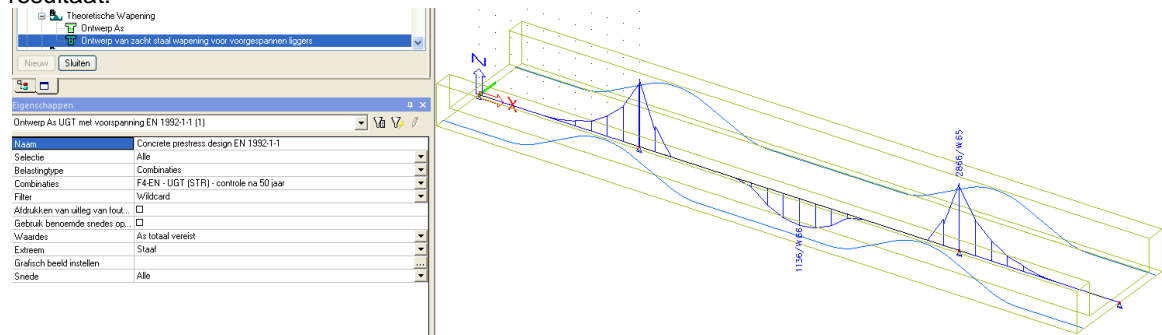
## 5\_Controlles in het betonmenu

In het betonmenu kan berekend worden hoeveel passieve wapening nog moet bijgevoegd worden.

Het ontwerp van zacht staal wapening voor de voorgespannen ligger geeft volgende resultaten indien rekening gehouden wordt met een minimale constructieve wapening:



Indien geen rekening gehouden wordt met minimale constructieve wapening, dan krijgen we volgend resultaat:



In het midden van de ligger toch nog een zekere onderwapening en over de steunpunten ook nog een zekere bovenwapening nodig. De constructie zal dus niet stabiel zijn zonder extra toevoeging van passieve wapening.

Bovendien moet steeds gecontroleerd worden of de aangebrachte naspanning de maximale betonspanning en de maximale spanning in de kabels zelf niet overschrijdt.

- De controle op toelaatbare spanning in het beton na verankering is ruim voldaan:

### Toelaatbare Betonspanningen voor geselecteerde staven EN 1992-1-1

Lineaire berekening, Extreem : Staal

Selectie : Alle

Combinaties : F2-EN - UGT (STR)

Toelaatbare Betonspanningen voor geselecteerde staven

StAAF	d <sub>x</sub> [m]	BG	Vezel	$\sigma_{c,aa}$	$\sigma_{c,ct,min}$	$\sigma_{c,ct,max}$	$\sigma_{c,ct,min}$	$\sigma_{c,ct,max}$	Controle <sub>ber</sub> [-]
				$\sigma_{c,cc,max}$	$\sigma_{c,cc,ch}$	f <sub>ct,eff</sub>	$\sigma_{c,cc,gr}$	f <sub>ct,eff,op</sub>	
B1	13,000	F2-EN - UGT (STR)4	1	-0,18	-0,20	-0,12	-0,20	-0,12	0,01
		ST2		-36,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

- De controle op toelaatbare trekspanning van de quasi-permanente lasten is ook voldaan:

### Toelaatbare Betonspanningen voor geselecteerde staven EN 1992-1-1

Lineaire berekening, Extreem : Staaf

Selectie : Alle

Combinaties : F4-EN-BGT Karakteristiek

#### Toelaatbare Betonspanningen voor geselecteerde staven

Staaf	$d_x$ [m]	BG	Vezel	$\sigma_{s,sa}$ [MPa]	$\sigma_{s,sa}^{min}$ [MPa]	$\sigma_{s,sa}^{max}$ [MPa]	$\sigma_{s,cl}^{min}$ [MPa]	$\sigma_{s,cl}^{max}$ [MPa]	Controle <sub>ber</sub> [-]
				$\sigma_{s,cc}^{max}$ [MPa]	$\sigma_{s,cc}^{ch}$ [MPa]	$f_{ct,eff}$ [MPa]	$\sigma_{s,cc,qb}$ [MPa]	$f_{ct,eff,qp}$ [MPa]	Controle <sub>lim</sub> [-]
B1	10,000	F4-EN-BGT Karakteristiek/6 ST4	3	-1,00	-1,02	1,32	-1,00	1,25	0,26
				0,00	0,00	5,16	0,00	0,00	1,00

De beperkte trekspanning die optreedt boven het steunpunt blijft binnen de toelaatbare grenzen.

- De controle van de toelaatbare spanning in de kabels zelf wordt hieronder weergegeven:

### Spanning in Voorspanelementen

Lineaire berekening, Extreem : Globaal

Selectie : Alle

Kabel: Alles met selectie

Combinaties : F4-EN - UGT (STR)

#### Controle van voorspanwapening voor geselecteerde kabels

Kabel	$d_x$ [m]	BG	$\sigma_{p,pa}$ [MPa]	$\sigma_{p,pa}$ [MPa]	$\sigma_{p,pp}^{min}$ [MPa]	$\sigma_{p,pp}^{max}$ [MPa]	$\sigma_{p,ld}$ [MPa]	Check <sub>cal</sub> [-]
			$\sigma_{p,max}$ [MPa]	$\sigma_{p,pp}^0$ [MPa]	$\sigma_{p,pp}$ [MPa]	$\sigma_{p,pp}$ [MPa]	$\sigma_{p,pp}$ [MPa]	Check <sub>lim</sub> [-]
TND	5,01	F4-EN - UGT (STR)3 ST4	1321,86	1273,88	1208,33	1208,33	1208,33	1,04
			1296,00	1224,00	1252,50	1252,50	1252,50	1,00

De spanning vlak voor en na de verankering overschrijdt de toelaatbare waarden. De kabelspanningen op lange termijn vallen wel binnen de toelaatbare waarden. (De lange termijnverliezen hebben de spanning in de kabels dus reeds voldoende doen afnemen waardoor de lange termijn kabelspanning onder de toelaatbare waarden valt )

De oplossing om ook de spanning vlak voor en na de verankering binnen de toelaatbare waarden te doen vallen, kan er in bestaan door ofwel een materiaal met een hogere sterkte te gebruiken ofwel door de aangebrachte spanning te verlagen. Indien men de aangebrachte spanning wil verlagen, maar toch de voorspankracht constant houden, dan zullen dus meer kabels moeten gebruikt worden.

## Lineaire analyse van een nagespannen brugdek

In dit hoofdstuk worden nagespannen kabels ingevoerd op een brugdek. Dit brugdek zal hierbij als 2D element gemodelleerd worden, waardoor de berekening zich in een algemeen xyz omgeving zal afspelen. Zoals reeds eerder aangehaald kan in deze algemeen xyz omgeving geen tijdsafhankelijke analyse verricht worden. Om toch een zeker lange termijn verlies in te rekenen, zou de gebruiker wel zelf een schatting kunnen maken van het verlies op lange termijn en dit inrekenen door gewoon een lagere initiële spanning voor de voorspankabels op te geven.

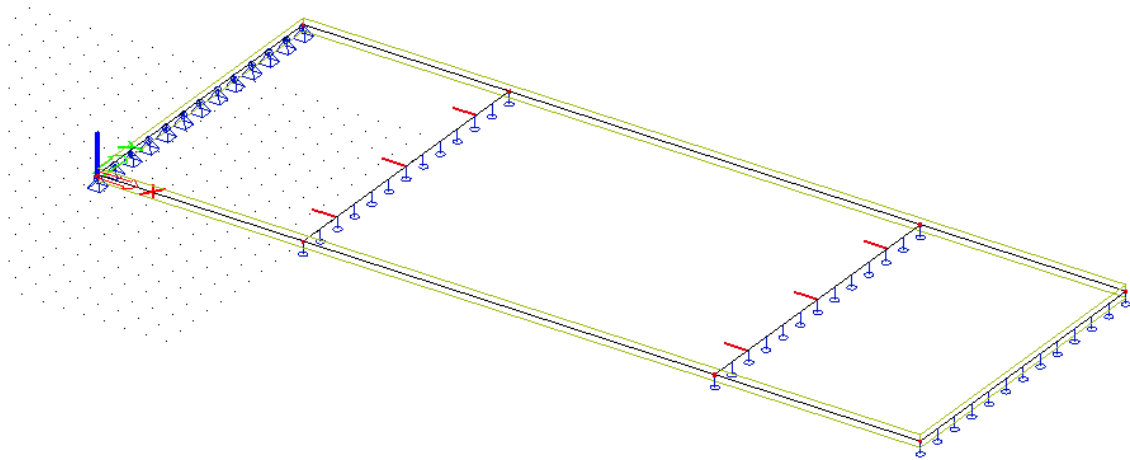
Het is eventueel wel mogelijk om de kabels sequentieel aan te spannen en deze verliezen te berekenen door te werken met lineaire bouwfases. De werkwijze is dan analoog aan voorbeeld 4.

Dit voorbeeld zal zich echter beperken tot een lineaire analyse van een nagespannen brugdek zonder te werken met bouwfases.

### 1\_Invoer geometrie en naspanning

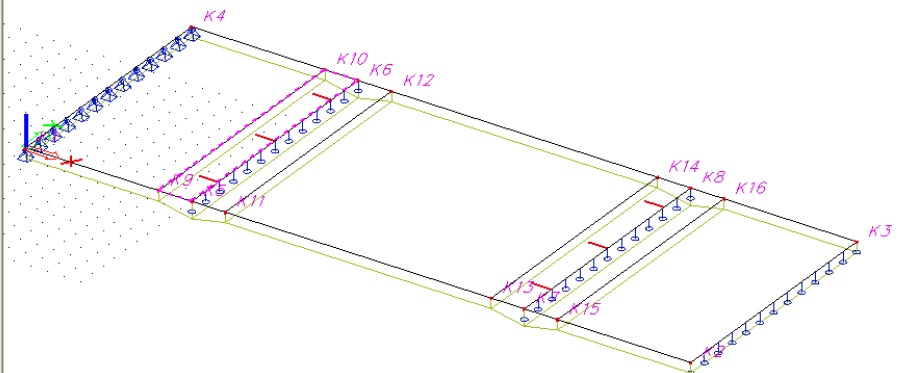
Alvorens de modellering kan beginnen, moeten eerst de projectgegevens ingevuld worden. We kiezen hier voor een algemeen xyz omgeving met als materiaal beton C50/60 en we vinken de functionaliteit voorspanning aan.

We voeren een plaat in met als afmetingen 40 op 15 meter en een plaatdikte van 600mm. Als ondersteuning voeren we een lijnondersteuning in op de uiteinden en op 10m afstand van de uiteinden. Om op 10m van het uiteinde een lijnondersteuning te kunnen invoeren maken we eerst een interne rand aan. De constructie ziet er nu uit als volgt:



Vervolgens maken we subregio's aan boven de interne steunpunten met als doel de plaat hier lokaal te verdikken. Vanaf 2m van het steunpunt laten we de dikte oplopen van 600mm tot 1000mm boven het steunpunt. Tot slot stellen we de uitlijning in zodat de bovenzvlakken gelijk liggen.

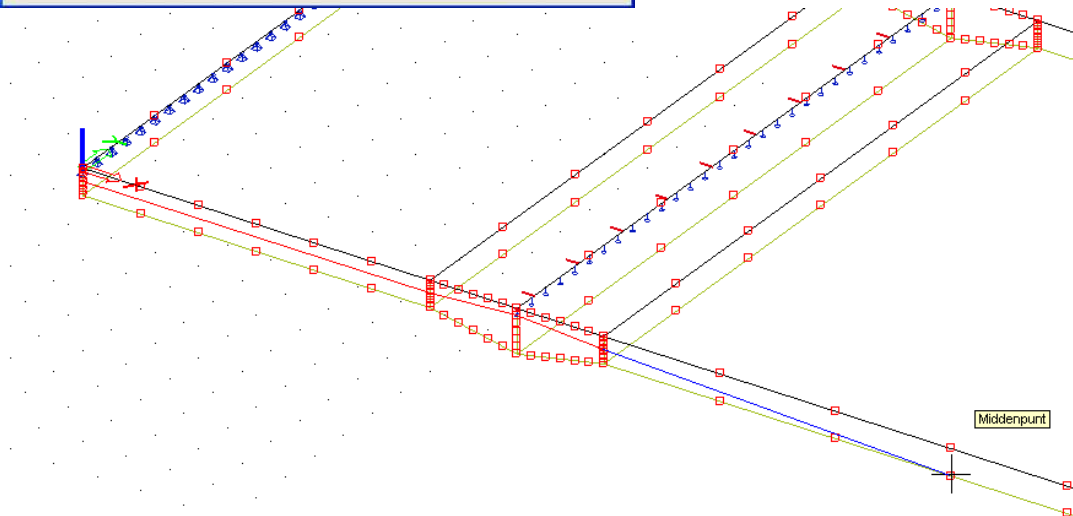
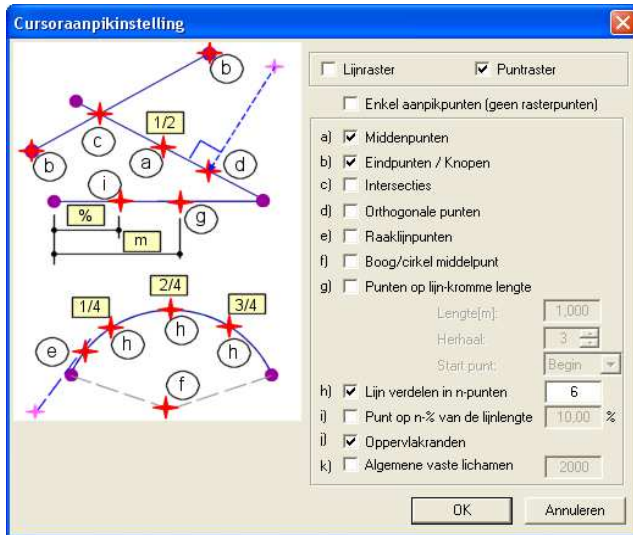
Eigenschappen	
Subregio (1)	
Naam	Regio1
Materiaal	C50/60
Dikte type	variabel
Variabele dikte	
Richting	Richting X
Dikte [mm]	600
Punt 1	K9
Dikte 2 [mm]	1000
Punt 2	K5
2D-element systeemvlak op	Boven
Excentriciteit z [mm]	0
2D-element	E1
Knopen	
K5	Abso
K6	Abso
K9	Abso
K10	Abso



Het aanbrengen van de nagespannen kabels gebeurt volledig analoog als bij 1D elementen. Er is dus mogelijkheid tot directe invoer, invoer via brongeometrie of vertrekkende van een dwg. De directe invoer of invoer via brongeometrie zou men kunnen vereenvoudigen aan de hand van parameters.

In dit voorbeeld voeren we 1 kabel in via directe invoer. Deze kabel zullen we dan enkele malen kopiëren over de breedte van de plaat.

De kabel zullen we invoeren via directe invoer gebruik makende van aanpikpunten. De coördinaten van de aanpikpunten kunnen achteraf bijgestuurd worden aan de hand van 'tabel bewerk geometrie'.



**Bewerken Geometrie**

	oördinaat X [	oördinaat Y [	oördinaat Z [	Krommingstype	rommingsparamete
1	0,000	0,000	-0,300		
2	8,000	0,000	-0,300	Cirkel + Straal	1,000
3	10,000	0,000	-0,167	Cirkel + Straal	1,000
4	12,000	0,000	-0,300	Cirkel + Straal	1,000
5	20,000	0,000	-0,550	Cirkel + Straal	1,000
6	28,000	0,000	-0,300	Cirkel + Straal	1,000
7	30,000	0,000	-0,167	Cirkel + Straal	1,000
8	32,000	0,000	-0,300	Cirkel + Straal	1,000
9	40,000	0,000	-0,300		

OK    Annuleren    Toepassen

Deze eerste kabel kopiëren we nu 20 keer over de volledige breedte van de plaat.

**Meer dere kopiën** ✖

Aantal kopiën   Verbind geselecteerde knopen met nieuwe staven

Voeg de allerlaatste kopie ook in  Additionele gegevens kopiëren

Afstandvector

Definieer afstand met de cursor

x  m

y  m

z  m

Rotatie

rx  deg

ry  deg

rz  deg

Hoe de afstand te definiëren ?

tussen twee kopiën

van origineel naar laatste kopie

Hoe de rotatie te definiëren ?

tussen twee kopiën

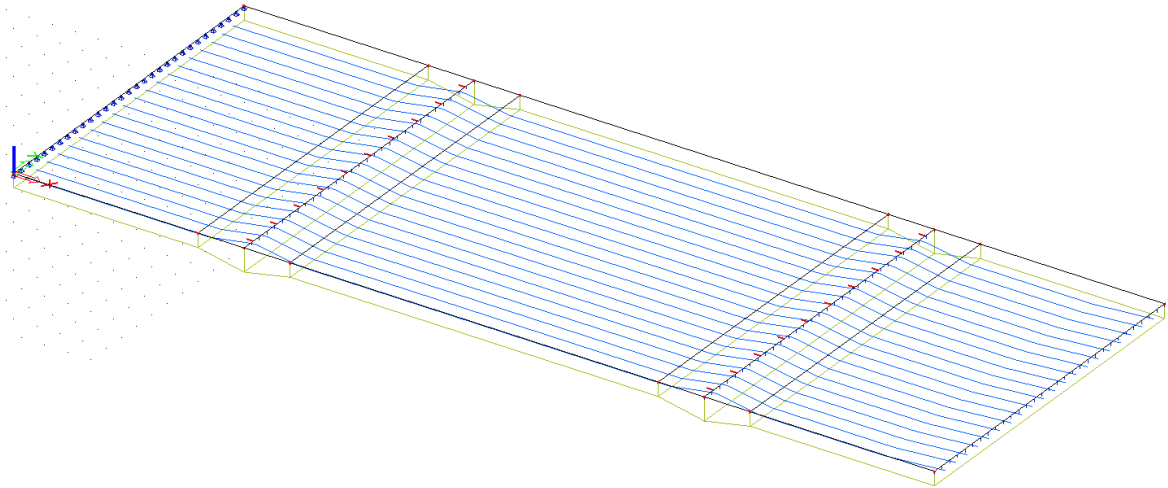
van origineel naar laatste kopie

Rotatie rondom

huidige UCS

afstandvector

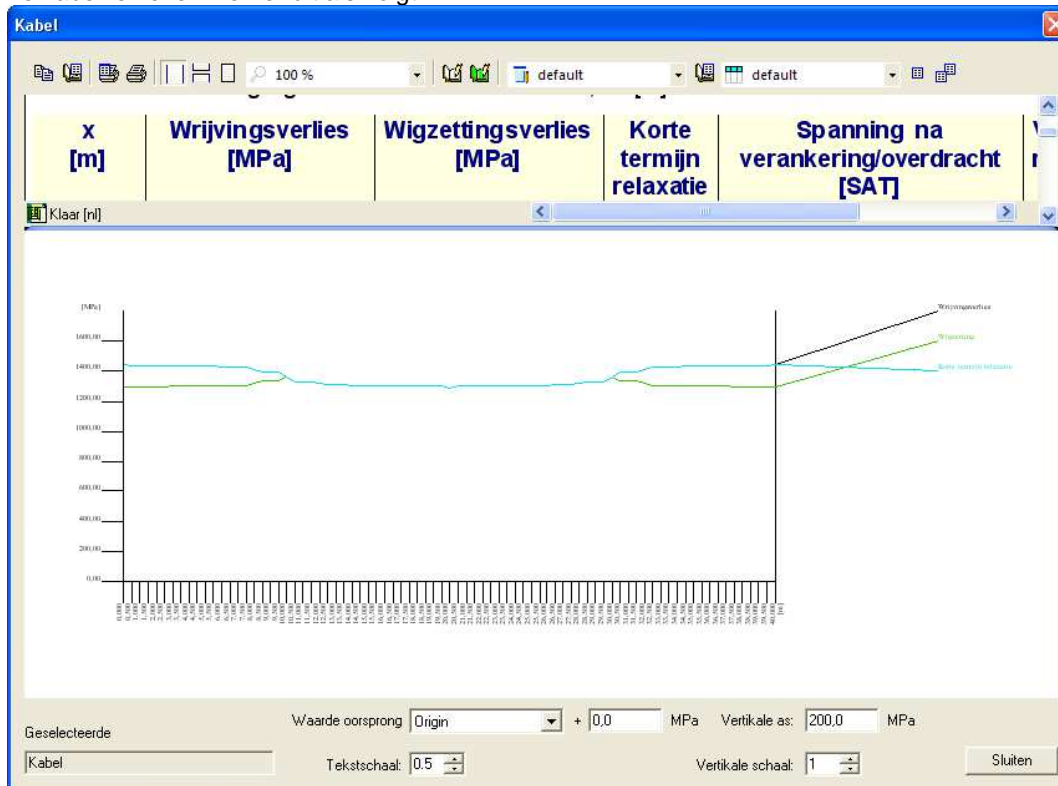
Nadien verwijderen we de twee buitenste kabels waardoor er 20 kabels in de hele plaat overblijven. Na de invoer van de nagespannen kabels moeten ze nog toegewezen worden aan de plaat. Dit kan voor alle kabels tegelijk via de actie 'automatisch toewijzen'.



De overige eigenschappen van de kabels nemen we als volgt:

<b>Material</b>	
Materiaal	Y1770S7-9
Aantal voorspanelementen...	20
Aantal kabels in de groep [...]	1
Oppervlak [mm <sup>2</sup> ]	1000
Diameter omhullingsbuis [d...]	60,00
Belastinggeval	BG1 - naspanning
<b>Voorspannen</b>	
Manier van voorspannen	Type 4
Spannen vanaf	Beide einden, verankerd aan het einde, herspannen vanaf het begin
Wijvingscoëfficiënt in gekr...	0,3
Niet-voorzien hoekverdra...	0,003
Wigzetting aan het begin [...]	6,00
Wigzetting aan het einde [...]	6,00
Initiële spanning aan het b...	1440,00
Initiële spanning aan het ei...	1440,00
Overstek van de voorspan...	0,000
Overstek van de voorspan...	0,000
Afstand tussen snedes t.b....	0,500

De kabelverliezen zien er uit als volgt:



## 2\_Invoer van de belastingen

In dit voorbeeld worden twee extra belastinggevallen aangemaakt:

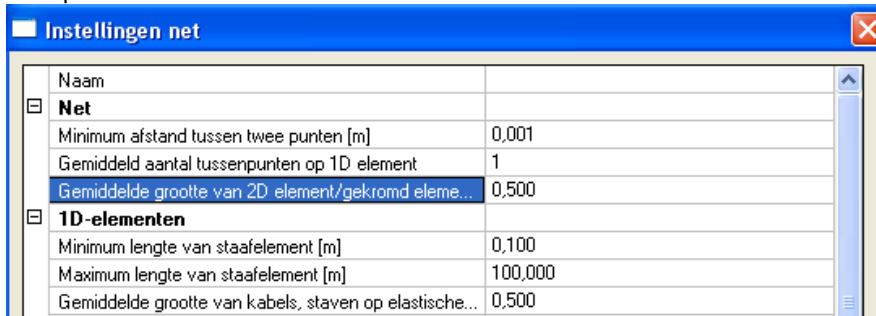
BG2: eigengewicht

BG3: gebruikslast: een oppervlaktebelasting van 5kN/m<sup>2</sup> aangebracht over de hele plaat

Hiervan maken we een UGT en BGT combinatie aan.

### 3\_Berekening

Vooraleer de berekening uit te voeren, stellen we eerst de netgrootte in. We zullen rekenen met een netgrootte van 0,5m en houden deze netgrootte ook aan voor de voorspankabels.



Hierna kan de lineaire berekening uitgevoerd worden.

### 4\_Resultaten

Na het uitvoeren van de lineaire berekening zijn de resultaten beschikbaar.

Aangezien we niet gewerkt hebben met bouwfasen zullen de kabelspanningen dezelfde blijven als de spanning na verankering, welke reeds voor de lineaire berekening kon bepaald worden.

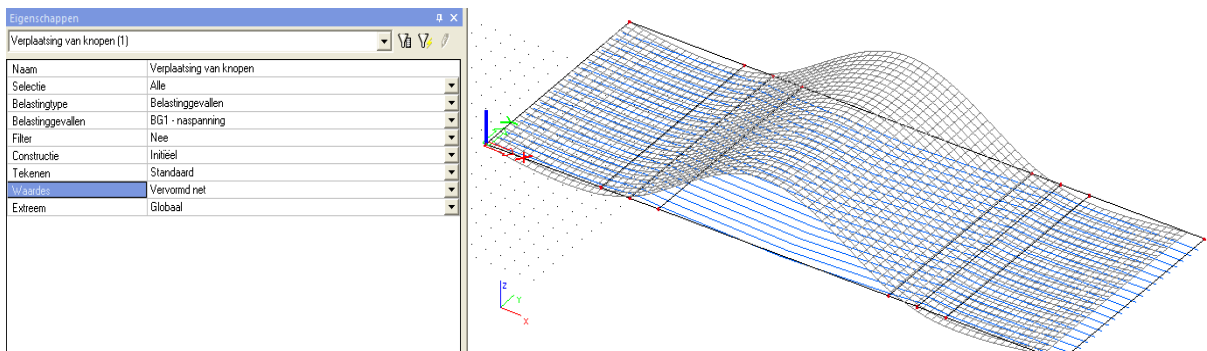
Het evalueren van de resultaten voor de vervorming en de interne krachten leert de gebruiker of de naspanning al dan niet optimaal is aangebracht.

Dit is een algemene opmerking bij het gebruik van voorspanning in SCIA Engineer. Het programma laat toe om deze zeer complexe analyse uit te voeren, maar ontwerpt op zich niet de hoeveelheid voorspanning. Het programma maakt enkel de analyse. Het is de verantwoordelijkheid van de gebruiker om uit de resultaten te evalueren of de aangebrachte voorspanning al dan niet optimaal is.

Het bekijken van de vervormde constructie onder naspanning geeft de gebruiker een idee of het kabelverloop optimaal is gekozen.

In deze constructie zal de doorbuiging in het midden van het veld immers het meest nadelig zijn. We willen dan ook de naspanning zodanig ontwerpen dat de doorbuiging van het middenveld wordt tegengegaan.

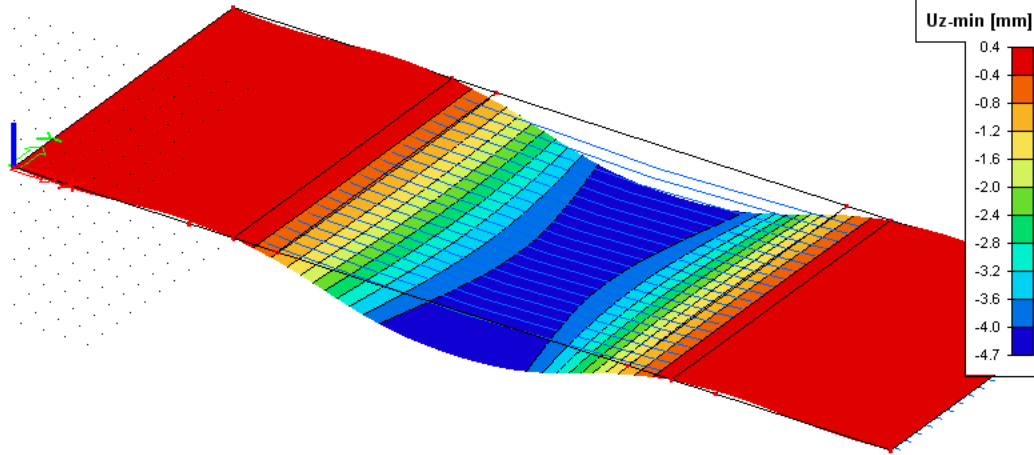
Hieronder wordt de vervorming onder naspanning getoond:



Deze vervorming is duidelijk tegengesteld aan de vervorming onder eigengewicht.



De vervorming van de BGT combinatie toont de resulterende vervorming van de nagespannen constructie belast met eigengewicht en gebruikslast.

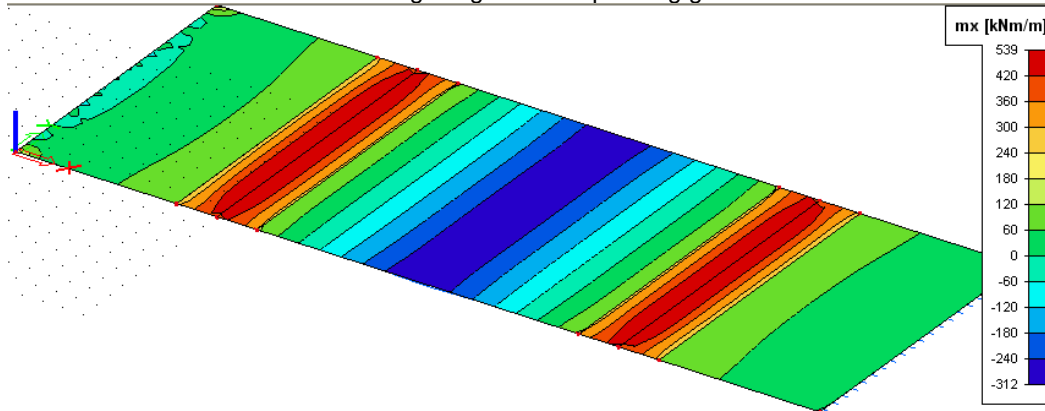


Het kabelverloop is dus goed gekozen omdat het de vervorming van het eigengewicht en gebruikslast tegenwerkt.

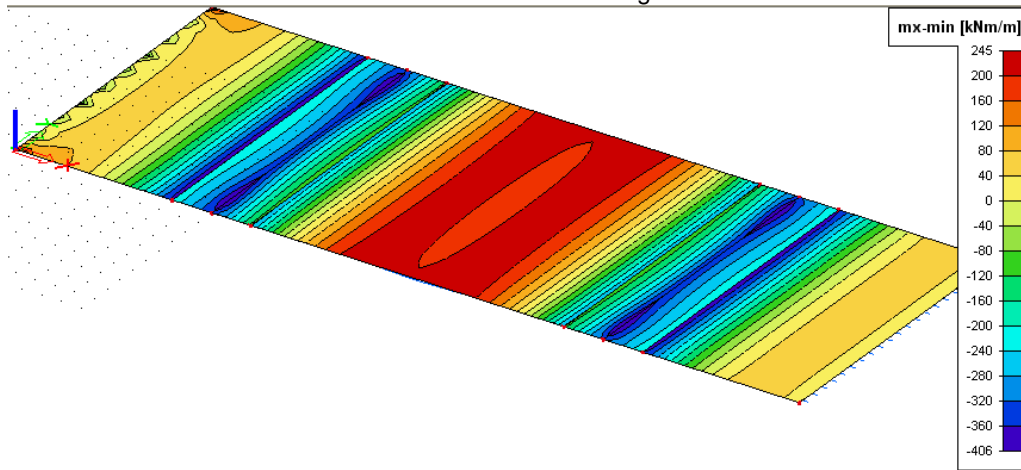
Hetzelfde geldt voor de interne krachten.

Het moment  $m_x$  ten gevolge van naspanning is duidelijk tegengesteld aan dat van het eigengewicht en de gebruikslast.

Hieronder wordt het moment  $m_x$  ten gevolge van naspanning getoond.



Het moment  $m_x$  van de UGT combinatie ziet er uit als volgt:



Opm: omdat de UGT een omhullende combinatie is en er dus enkel een omhullende resultaat zou kunnen opgevraagd worden, hebben we hier het resultaat getoond voor de lineaire UGT combinatie  $1 \cdot BG1 + 1,35 \cdot BG2 + 1,5 \cdot BG3$

De gebruiker dient verder zelf te evalueren of de resulterende interne krachten door het beton zelf of door passieve wapening kunnen opgenomen worden. Indien hij oordeelt dat dit niet het geval is, dan kan de voorspankracht worden opgedreven en kan men de lineaire berekening opnieuw uitvoeren.

Het ontwerp van de passieve wapening alsook de controles voor toelaatbare spanningen zijn enkel ondersteund voor 1D elementen.

## Analyse van een nagespannen plaat in 2 richtingen

Nagespannen kabels kunnen dus ook op 2D elementen aangebracht worden. Dit wil zeggen dat de naspanning ook in 2 richtingen kan aangebracht worden. Hieronder zal dan ook een voorbeeld besproken worden van een in 2 richtingen nagespannen plaat.

### 1\_Invoer geometrie en naspanning

Er wordt geopteerd voor een vierkante plaat die in beide richtingen draagt met een overspanning van 10m en scharnierend opgelegd aan de randen. Voor de betonkwaliteit wordt C30/37 aangenomen.

De kabels worden om de meter aangebracht in beide richtingen.

De geometrie van de kabels ziet er uit als volgt:

Bewerken Geometrie					
	oördinaat X [	oördinaat Y [	oördinaat Z [	rommingstyp	Krommingsparameter [m]
1	0,500	0,000	0,000		
2	0,500	2,000	-0,150	Cirkel + S	1,000
3	0,500	8,000	-0,150	Cirkel + S	1,000
4	0,500	10,000	0,000		
*	0,000	0,000	0,000		0,000

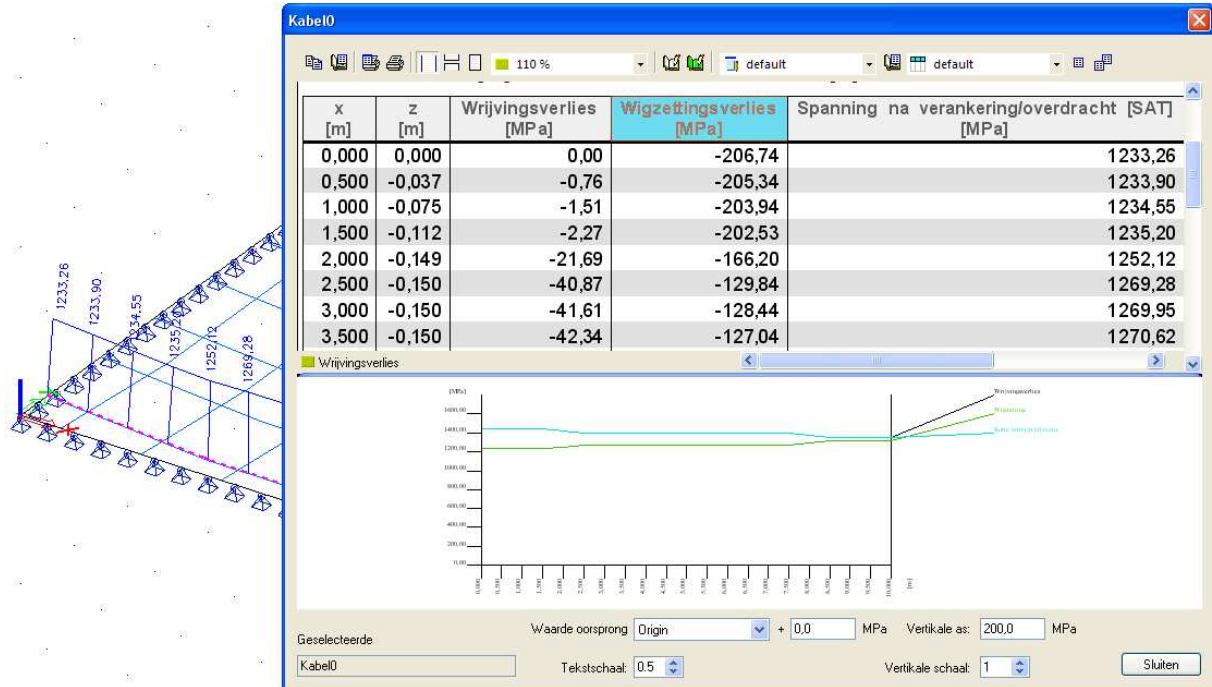
De kabels worden naar de rand van de plaat toe dus opgebogen.

De eigenschappen van de kabel worden hieronder weergegeven:

Nagespannen Kabel	
Naam	Kabel
Omschrijving	
Aantal	1
Type	Intern
Laag	Layer1
<b>Geometrie</b>	
Invoerwijze van de geometrie	via Directe invoer
Projectie van tussenliggende punten	Loodrecht
LCS	standaard
LCS-rotatie [deg]	0,00
<b>Materiaal</b>	
Materiaal	Y1860C-3.0
Aantal voorspannelementen in één kabel	20
Aantal kabels in de groep [ng]	1
Oppervlak [mm <sup>2</sup> ]	141
Diameter omhullingsbuis [d] [mm]	60,00
Belastingsgeval	BG1 - voorspanning
<b>Voorspannen</b>	
Manier van voorspannen	Type 4
Spannen vanaf	Begin
Wrijvingscoëfficiënt in gekromde deel van de kabel [-]	0,3
Niet-voorzien hoekverdraaiing [per eenheidslengte] [-/m]	0,003
Wigzetting aan het begin [mm]	6,00
Initiele spanning aan het begin [MPa]	1440,00
Overstek van de voorspanning wordt niet meegenomen in het reken...	0,000
Overstek van de voorspanning wordt niet meegenomen in het reken...	0,000
Alstand tussen snedes t.b.v. uitvoer [m]	0,500
<b>Boog</b>	
Krommingstype	Cirkel + Straal
Krommingsparameter [m]	1,00
Acties	
Standaard waarden	>>>

De kabels worden aangespannen vanaf het begin, zonder herspannen vanaf het einde.

Dit geeft volgend resultaat voor het verloop van de kabelverliezen:



## 2\_Invoer belasting

Omdat het om een zeer summier voorbeeld gaat, zullen we enkel het belastingsgeval voorspanning tonen. De voorspanning in richting X en richting Y hebben we samengevoegd in hetzelfde belastingsgeval BG1 voorspanning.

Het is eventueel ook mogelijk om dit in aparte belastingsgevallen op te delen. In dat geval kan de bijdrage van de voorspanning in beide richtingen apart onderzocht worden. Indien men in bouwfasen modelleert, kan men dan tevens het sequentieel aanspannen simuleren.

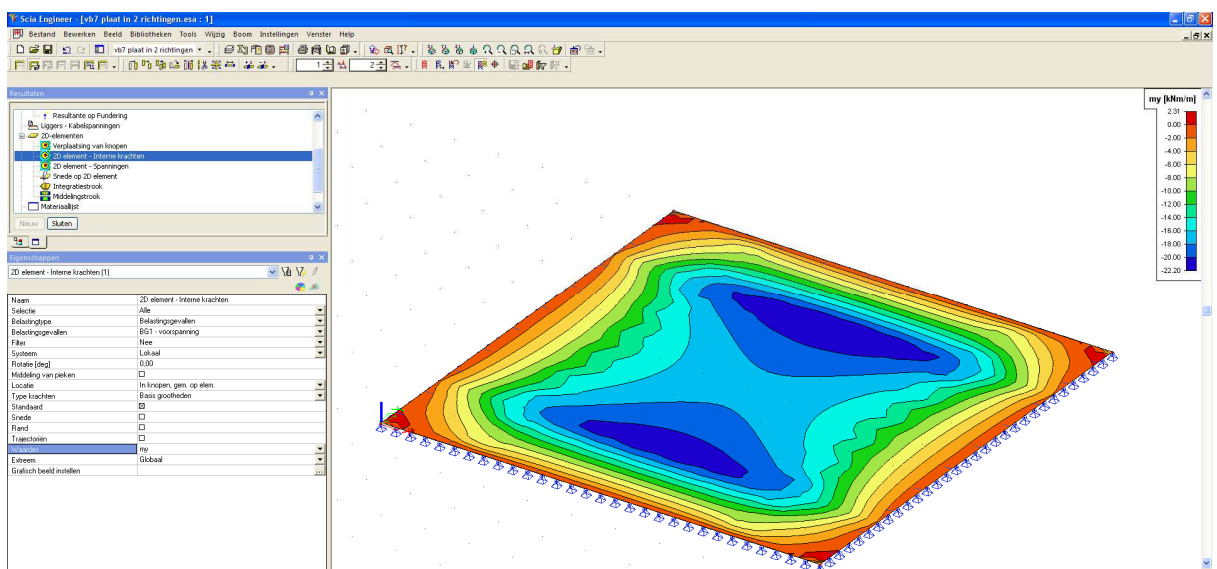
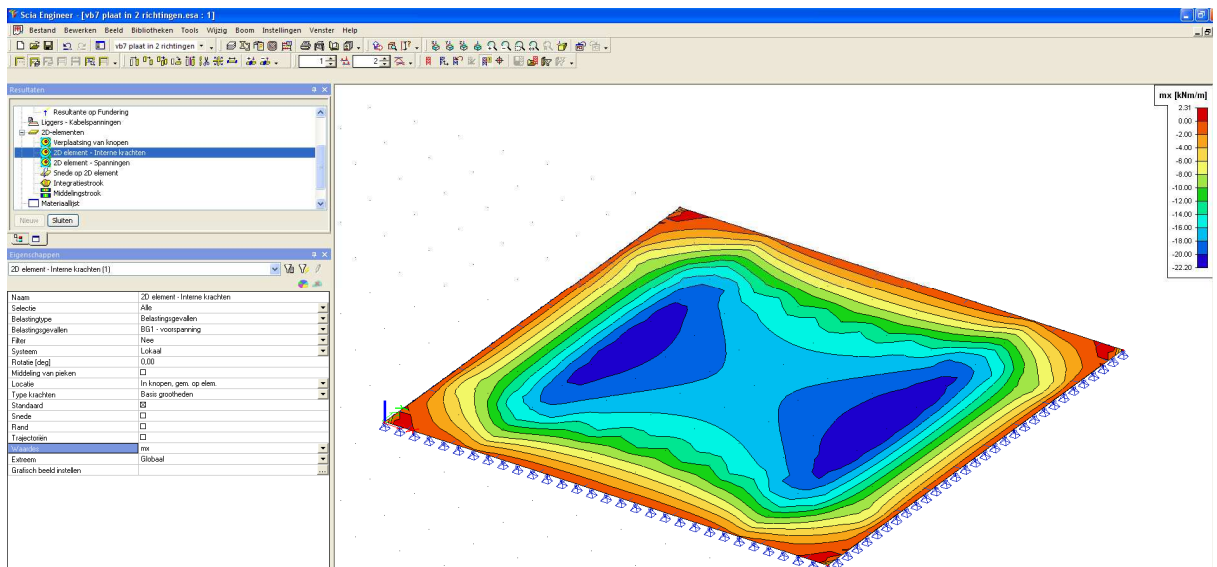
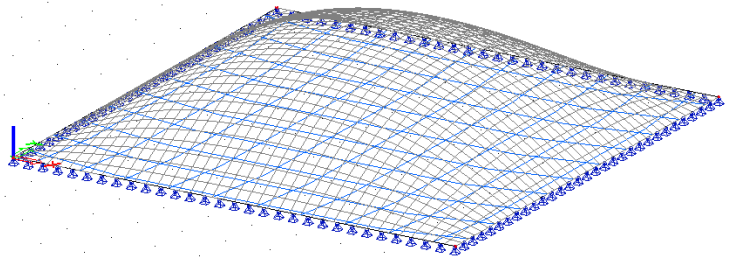
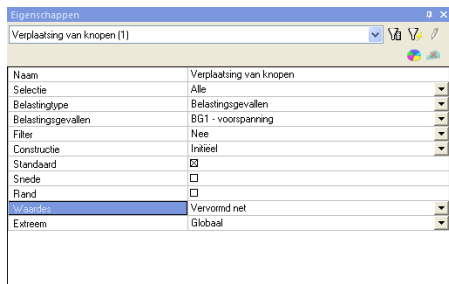
## 3\_Berekening

Een lineaire berekening met een meshgrootte van 0,25 wordt uitgevoerd.

Instellingen net	
Naam	
<b>Net</b>	
Minimum afstand tussen twee punten [m]	0,001
Gemiddeld aantal tussenpunten op 1D element	1
Gemiddelde grootte van 2D element/gekromd elemen...	0,250

## 4 Resultaten

De resultaten van de vervorming en interne krachten ten gevolge van de voorspanning worden hieronder getoond.



Voor een interpretatie van de resultaten wordt verwezen naar de voorgaande voorbeelden.

## **Gedetailleerde bespreking ontwerp en controle van nagespannen platen**

Hiervoor wordt doorverwezen naar de tutorial Post-tensioned concrete slab EN1992-1-1. In die tutorial wordt dieper ingegaan op het ontwerp en de controle van nagespannen plaelementen volgens EN 1992-1-1. De focus ligt niet zozeer op de invoer zoals in voorgaande hoofdstukken, maar wel op een bespreking van de uitvoer. Deze tutorial is enkel in Engelse taal beschikbaar.