

## Alfabetische woordenlijst

### Latijnse letters

$A_f$	doorsnede van de re-plate of re-bar
$A_s$	totale dwarsdoorsnede van de wapening
$a_s$	wapeningsoppervlak per meter
$b$	breedte van betondwarsdoorsnede
$d$	effectieve diepte van de wapening
$d_f$	effectieve diepte van re-plate of re-bar
$E_c$	elasticiteitsmodulus van beton
$E_{SMA}$	gereduceerde elasticiteitsmodulus van memory®-steel na activering
$F_c$	optredende drukkracht in beton
$f_{cd}$	rekenwaarde druksterkte beton
$F_{ms,u}$	trekkracht van memory®-steel voor dwarsdoorsnede-analyse
$F_{p,i}$	voorspankracht van memory®-steel direct na activering op $t=0$
$F_{p,\infty}$	voorspankracht van memory®-steel na ontspanning bij $t=\infty$
$F_s$	trekkracht in de dwarsdoorsnede van de wapening
$f$	geschatte maximale doorbuiging van betonplaten en -balken volgens Kordina en Hegger
$h_c$	dikte van betonplaat
$I$	traagheidsmoment
$l$	betonnen plaat/ligger overspanning
$l_b$	verankeringslengte
$L$	vrije lengte van de re-plate tussen de verankeringen
$\Delta L$	lengteverandering van de re-plate tot aan de breuk volgens Kordina en Hegger
$M_{Ed}$	rekenwaarde optredend buigend moment
$M_{p,BZ}$	voorspanmoment van het geheugenstaal in constructietoestand
$M_{p,GZ}$	voorspanmoment van het geheugenstaal na relaxatie (voor berekening van de grenstoestand)
$M_{Rd}$	rekenwaarde buigweerstand
$m_{Rd}$	ontwerpwaarde buigweerstand van een betonplaat
$P_0$	voorspankracht van een streng op $t=0$
$P_\infty$	voorspankracht van een streng op $t=\infty$
$V_{Ed}$	rekenwaarde dwarskracht
$V_{Rd}$	rekenwaarde dwarskrachtweerstand
$V_{Rd,s}$	rekenwaarde dwarskrachtweerstand van re-plate eindverankering met Hilti X-CR nagels
$w_{eff}$	bestaande doorbuiging
$w_{zul}$	toelaatbare doorbuiging
$x$	hoogte van de buigcompressiezone
$z$	hefboomarm

### Griekse letters

$\varepsilon_0$	voorspanning van een streng
$\varepsilon_c$	betonspanning
$\varepsilon_s$	rek in wapeningsstaal
$\varepsilon_f$	rek in memory®-steel
$\Delta\varepsilon_f$	rektoename memory®-steel als gevolg van lengteverandering
$\Delta\sigma_f$	spanningsverhoging in memory®-steel
$\Delta\sigma_{p,r}$	voorspanverlies na relaxatie (na 50 jaar)
$\sigma_c$	optredende betonspanning
$\sigma_{p,i}$	oorspronkelijke memory®-steel voorspanning direct na activering
$\sigma_{p,\infty}$	lange termijn geheugen®-steel voorspanning na ontspanning

## Inleiding

Het ontwerpen met memory®-steel producten volgt de gebruikelijke constructieve ontwerpregels voor gewapende en voorgespannen betonconstructies. De “re-plate” versterkingsplaat wordt beschouwd als een niet-gebonden externe strip met voorspanning. Voor het “re-bar” systeem kan worden uitgegaan van een starre verbinding tussen het initieel aanwezige geribde staal en het omringende mortel/gespoten beton. Ontwerpprincipes voor de buigversterking van constructies, in hun bruikbaarheidsgrens- en uiterste grenstoestand, worden hierna toegelicht. Voor een goed begrip worden vervolgens ook enkele voorbeelden getoond.

## Theoretische ontwerpprincipes

### re-plate

#### Constructieve toestand:

Het is belangrijk te controleren op mogelijke scheurvorming aan de bovenzijde van de plaat ten gevolge van de voorspanning. Hierbij wordt de initiële memory®-steel voorspanning  $\sigma_{p,i}$  in rekening gebracht. De voorspanning levert een constant buigend moment  $M_{p,BZ}$  tussen de verankeringen, te vergelijken met het scheurmoment.

$$M_{p,BZ} = F_{p,i} * z = \sigma_{p,i} * A_f * z \quad (1)$$

( $A_f$ = re-plate oppervlak,  $z$ = hefboomarm)

#### Bruikbaarheidsgrenstoestand:

Voor de bruikbaarheidsgrenstoestand over een lange periode moet de initiële voorspanning  $\sigma_{p,i}$  worden verminderd ten gevolge van relaxatie. Over een periode van 50 jaar bedraagt deze maximaal 15%. De volgende vergelijking is van toepassing:

$$\sigma_{p,\infty} = \sigma_{p,i} * \left( 1 - \frac{\Delta\sigma_{p,r}}{\sigma_{p,i}} \right) \approx \sigma_{p,i} * 0.85 \quad (2)$$

Het optredende voorspanmoment  $M_{p,GZ}$  tussen de verankeringen kan daarom worden beschreven als:

$$M_{p,GZ} = F_{p,\infty} * z = \sigma_{p,\infty} * A_f * z \quad (3)$$

#### Uiterste grenstoestand:

Bij het re-plate systeem worden de krachten via de twee eindankers op de constructie overgebracht; in de vrije lengte is er geen verbinding/hechting aanwezig met de betonconstructie. Dit betekent dat een conventionele dwarsdoorsnede-analyse met rekcompatibiliteit niet mogelijk is. Twee alternatieven zijn mogelijk:

##### a) Berekening zonder spanningsverhoging in de re-plate:

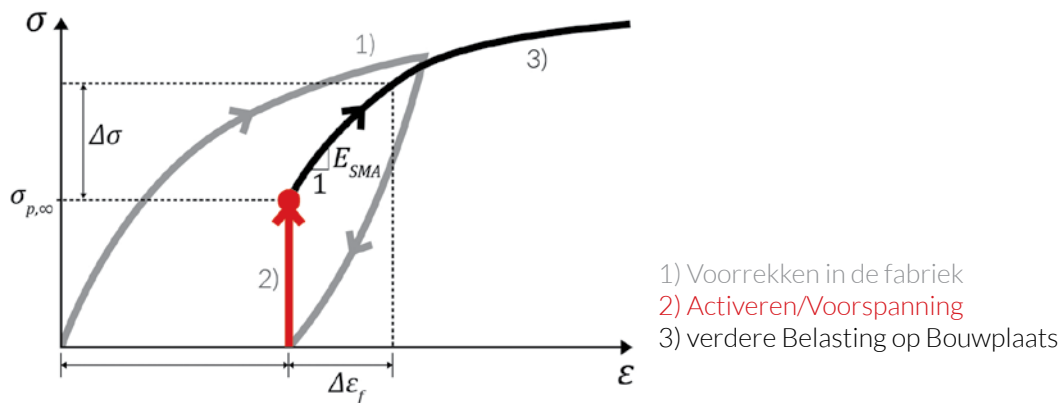
Bij deze vereenvoudigde berekeningsmethode wordt aangenomen dat de trekkracht  $F_{ms,u}$  in de re-plate constant is naarmate de vervorming van de constructie toeneemt. Deze aanname betekent dat het krachterevenwicht in de dwarsdoorsnede wordt verkregen door conventionele dwarsdoorsnede-analyse en dat de belastbaarheid kan worden afgeleid. Deze berekening kan handmatig worden uitgevoerd, door gegevensverwerking, b.v. Excel, of met computersoftware. Deze vereenvoudiging wordt ook gebruikt in standaard ontwerpsoftware met dwarsdoorsnede-analyses.

$$F_{ms,u} = \sigma_{p,\infty} * A_f \quad (4)$$

Deze conservatieve aanname onderschat de werkelijke capaciteit. Het concept is geschikt voor situaties waarin de bruikbaarheidsgrenstoestand van kritiek belang is voor het constructieontwerp

### b) Berekening met spanningsverhoging in de re-plate

Een tweede methode is gebaseerd op de schatting van de extra verandering in de plaatlengte naarmate de belasting of doorbuiging van het constructieonderdeel toeneemt. De basis is een empirische ontwerpbenadering, verkregen uit belastingsproeven op betonnen balken met voorgespannen ongebonden strengten [1]. Kort samengevat wordt op basis van de doorsnedeafmetingen een extra maximale doorbuiging  $f$  geschat die een lengteverandering  $\Delta L$  in de re-plate veroorzaakt. De methode gaat ervan uit dat alle vervorming in een ligger met één overspanning geconcentreerd is in een scheur in het midden van de ligger [2]. Deze lengteverandering kan worden omgerekend naar een extra rek  $\Delta \epsilon_f$  in de re-plate, die dan de spanningstoestand  $\sigma_{p,\infty} + \Delta \sigma$  in de re-plate doorsnede oplevert uit de bekende spanning-rek kromme na activering. Om dit te vereenvoudigen kan hier een gereduceerde elasticiteitsmodulus  $E_{SMA}$  van 70 GPa worden toegepast om de definitieve rek te berekenen.



Figuur 1: re-plate spanning-rek diagram met voorspanning, activering, en daaropvolgende belasting

Het volgende is van toepassing:

$$f = 0.9 * d - e_v < 0.02 * L \quad (5)$$

( $d$ =effectieve diepte,  $e_v=0$  in het geval van rechte lamellen,  $L$ =vrije lengte van de re-plate tussen de verankeringen)

$$\Delta L = \frac{4 * f * z}{L} \quad (6)$$

$$\Delta \epsilon_f = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

Op basis van de bekende extra rek en dus extra spanning is ook de trekkracht in de re-plate bekend en kan een krachtenevenwicht in de doorsnede worden berekend. Zo wordt de maximale capaciteit bepaald. De specifieke nationale ontwerpregels voor betonconstructies (betondruk en trekbreuk van de wapening) zijn van toepassing, met de van toepassing zijnde materiaalparameters.

## Verankering

Bovendien moet, voor het ontwerp van de constructieve veiligheid, de extra trekkracht in de re-plate worden gecontroleerd voor de verankerweerstand.

$$F_{ms,u} = (\sigma_{p,\infty} + \Delta\sigma_f) * A_f \leq V_{Rd,s} = \frac{108kN}{1.3} = 83.1kN \quad (8)$$

**Opmerking:** Voor veel voorkomende constructiegeometrieën wordt de verankeringsweerstand het doorslaggevende criterium voor de bezwijktoestand. Een expliciete verificatie kan in de meeste gevallen achterwege blijven.

De verankeringsweerstand van 108 kN geldt voor een aantal van 12 Hilti X-CR nagels en wordt vermindert met een veiligheidsfactor van 1,3 (aanbeveling re-fer). De gegevens zijn van toepassing op beton met een gemeten druksterkte (kubus) van >20 N/mm<sup>2</sup>. Voor beton met lagere sterktes, gelieve de afdeling re-fer engineering te contacteren.

## re-bar

### Constructieve toepassing

Gewoonlijk wordt de re-plate aan beide uiteinden bilateraal verankerd in de verankeringsgebieden door middel van een Sika-mortellaag op de dragende ondergrond en worden de tussenliggende gebieden voorgespannen. Het draagvermogen is hetzelfde voor de re-plate, aangezien het blootgestelde gebied als een externe trekstaaf fungeert. Naar analogie kan vergelijking (1) worden toegepast op de re-plate met een overeenkomstige doorsnede.

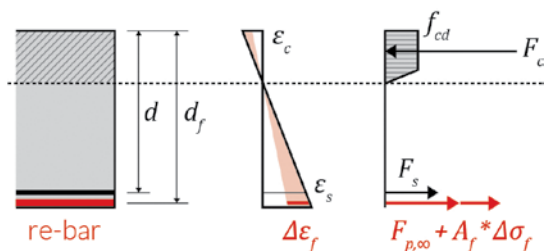
### Bruikbaarheidgrenstoestand:

Na de initiële activering/opspanning van de re-bar worden de gebieden tussen de verankeringen met mortel bekleed, waardoor een stevige verbinding met de dragende constructie ontstaat. De berekening kan worden uitgevoerd door middel van conventionele dwarsdoorsnede-analyse met afgeleide rekcompatibiliteit en krachten evenwicht. De initiële voorspanning  $\sigma_{p,i}$  moet worden verlaagd voor de bruikbaarheidsgrenstoestand, ten gevolge van de optredende relaxatie volgens vergelijking (2).

Voor dimensionering op doorbuigingsreductie ten gevolge van voorspanning kan weer worden uitgegaan van een homogeen buigend moment (zie vergelijking (3)).

### Uiterste grenstoestand:

Principes overeenkomstig die van de dwarsdoorsnede-analyse zijn van toepassing op de berekening van de constructieve veiligheid. Afhankelijk van de situatie wordt nu bij de re-bar extra rek/spanning toegevoegd aan de initiële voorspanning. De spanningsverandering in de re-bar bestaat uit de extra spanning tussen de toepassings-/aanspanningsdatum en de bezwijktoestand ( $\Delta\epsilon_f$ ).



Figuur 2: Schematische voorstelling van de dwarsdoorsnede-analyse van de uiterste grenstoestand

Het krachtenevenwicht wordt dan berekend met een equivalente kracht in de re-bar is samengesteld. Voor de eenvoud kan weer een gereduceerde elasticiteitsmodulus  $E_{SMA}$  van 70 GPa worden toegepast. De uiteindelijke kracht moet kleiner zijn dan de maximaal toelaatbare trekkracht van de re-bar.

$$F_{ms,u} = F_{p,\infty} + A_f * \Delta\sigma_f = A_f * (\sigma_{p,\infty} + \Delta\varepsilon_f * E_{SMA}) \quad (9)$$

### Verankering:

De re-fer richtlijnen stellen waarden voor de verankeringslengte van re-bar voor. De lengte van de verankeringsgebieden zijn afhankelijk van de te verwachten trekkrachten, de staafdiameters en de toepassing (in sleuven, dekking of spuitbeton). Ook moet worden voldaan aan standaard eisen voor de hechtsterkte, ruwheid etc. Voor bestaande betonnen dragende ondergronden worden klasse R3 en R4 mortels van Sika volgens de EN-voorschriften voor betonreparaties gebruikt. Een minimale hechtsterkte van de betonnen ondergrond van 1,5 N/mm<sup>2</sup> wordt aanbevolen.

Versterking op buigend moment moet worden verankerd achter het momenten nulpunt. De overdracht van de voorspankracht op het constructieve beton wordt gewoonlijk bereikt door de mortelverbinding. Als alternatief kunnen goedgekeurde deuvelsystemen of andere speciale oplossingen worden gebruikt..

## Opmerkingen

Specifieke productparameters moeten worden overgenomen uit de laatste versies van de nationale productinformatiebladen. De in de ontwerpvoorbeelden gebruikte waarden kunnen afwijken van de huidige materiaalparameters als gevolg van product- en normupdates en dienen altijd te worden gecontroleerd. De technische ondersteuning van re-fer helpt u als er iets onduidelijk is en/of bij specifieke ontwerpsituaties. Voor meer informatie kunt u terecht op onze website: [www.re-fer.eu](http://www.re-fer.eu) (bijv. met betrekking tot onze technologieën, referenties, technische gegevensbladen, aanbestedingsteksten, testrapporten enz.) U kunt ook rechtstreeks contact opnemen met ons re-fer engineering support team voor specifiek advies en bijstand.

### Corrosie

Op locaties met blootstelling aan chloride en verontreiniging moeten passende maatregelen worden genomen, ondanks de goede corrosiebestendigheid van memory<sup>®</sup>-steel (risico van spanningsscheurcorrosie). De mortelbedekking op de re-plate moet op deskundige wijze worden beoordeeld en zo nodig worden verhoogd. Voor re-plate producten kan een speciale coating aangebracht worden in de productiefaciliteit (SikaCor<sup>®</sup> EG-1), die vervolgens de maximaal toegestane warmtetemperatuur beperkt tot 165°C en dus ook de maximale voorspankracht.

### Brandbeveiliging

Brandbeveiliging is altijd vereist voor versterkingsmaatregelen indien zonder versterking niet aan de nationale standaardbrandbelasting kan worden voldaan. De onderstaande tabel is een eenvoudig vergelijkend voorbeeld van de resterende veiligheidsmarges voor brandbeveiliging op een dragende constructie met “lage” en alternatief “hoge” versterkingsniveaus.

Voorbeelden laden [kN/m <sup>2</sup> ]	Vóór de versterking	Na versterking	
		“laag” versterkingsniveau +3.0	“hoog” versterkingsniveau +5.0
Dode belasting/toegepaste belasting	5.0	5.0	5.0
Belasting onder spanning	3.0	3.0 + 3.0 = 6.0	3.0 + 5.0 = 8.0
gebruiksbelasting	<b>8.0</b>	<b>11.0</b>	<b>13.0</b>
Voorbeeld met globale veiligheidsfactor	8.0 * 1.5 = 12.0	11.0 * 1.5 = 16.5	13.0 * 1.5 = 19.5
Te overbruggen laadvermogen	<b>12.0</b>	16.5	19.5
Brandbeveiliging Criterium: nieuwe werklust moet < 12,0 zijn (bestaand draagvermogen)	-	<b>11.0 &lt; 12.0</b> Niet vereist	<b>13.0 &gt; 12.0</b> Vereist

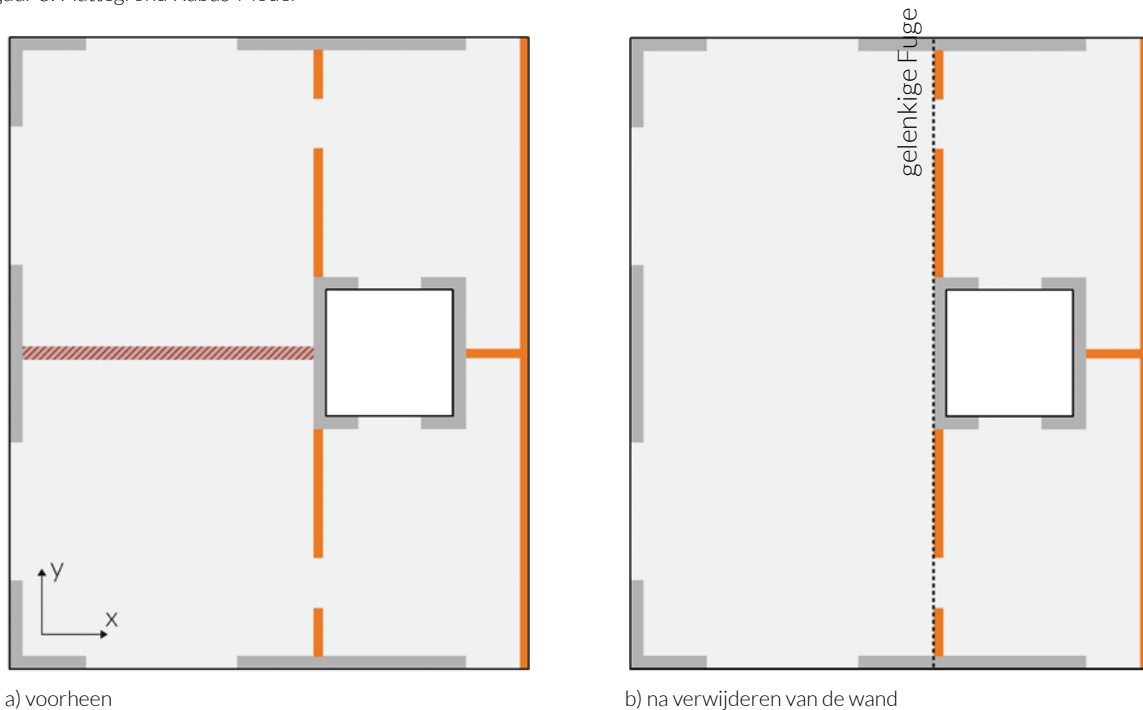
Indien een “hoog” versterkingsniveau moet worden bereikt, moet de versterkingsmaatregel ook belasting dragen in een brandscenario; een brandbeveiliging is dan noodzakelijk voor het versterkingsproduct. Voor memory®-steel aangebracht/toegepast in beton of cementmortel gelden voorschriften en normen overeenkomstig conventionele staalwapening. Voor re-plate wordt normaliter een gespoten brandwerende mortel op cementbasis gebruikt (SikaCem® Pyrocoat).

## Rekenvoorbeeld

### Buigversterking met re-plate

Op verzoek van de opdrachtgever moeten de constructieve wanden (rood gemarkeerd) worden verwijderd om twee bestaande kamers samen te voegen tot één grote woonkamer. Deze verandering in het statische systeem van de draagconstructie zou onvermijdelijk problemen veroorzaken in de vloerplaat t.a.v. het buigend moment. Het onderstaande voorbeeld toont de maatregel voor de buigversterking van de betonnen vloerplaat. Andere verificaties, zoals de belastingoverdracht naar de wanden en lager gelegen vloeren, dwarskrachten, ponsproblemen enz. worden niet beschouwd. De constructieve staat van de betonconstructie wordt niet onderzocht.

Figuur 3: Plattegrond Kubus-Model



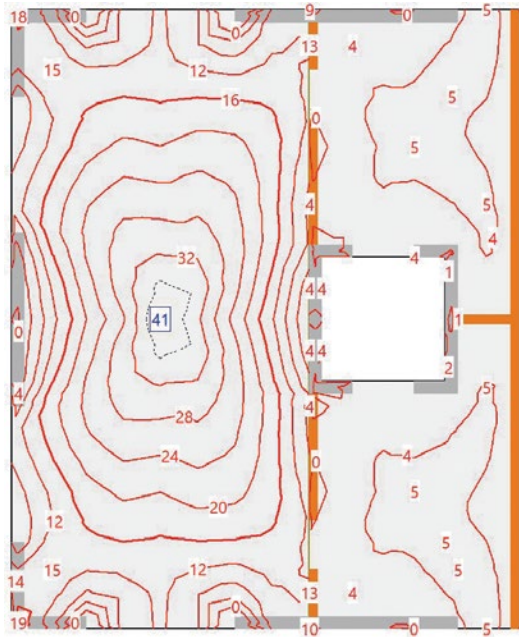
In de bestaande vloerplaat is wapening van  $\varnothing 10@150$  ( $a_s = 524 \text{ mm}^2/\text{m}'$ ) toegepast en geplaatst als onder- en bovenwapening. De dikte van de vloerplaat is  $h_c = 200 \text{ mm}$ , de betonkwaliteit bedraagt C30/37 en de dekking op de wapening bedraagt 30 mm. Voor de dragende constructie elementen is een brandwerendheid R60 vereist.

Met deze ontwerpgegevens wordt een buigweerstand van  $m_{Rd} = 36 \text{ kNm/m}'$  verkregen voor de bestaande 1<sup>ste/4<sup>de</sup></sup> lagen (x-richting). In de 2<sup>e/3<sup>e</sup></sup> laag is de buigweerstand 32 kNm/m'. Met de nieuwe plattegrond zal de bestaande bovenwapening (4<sup>e</sup> laag) bezwijken onder de nieuwe permanente belasting. Daarom wordt in deze gebieden een scharnierpunt gemodelleerd om dat moment op de overspanning over te brengen (zie figuur 3 b).

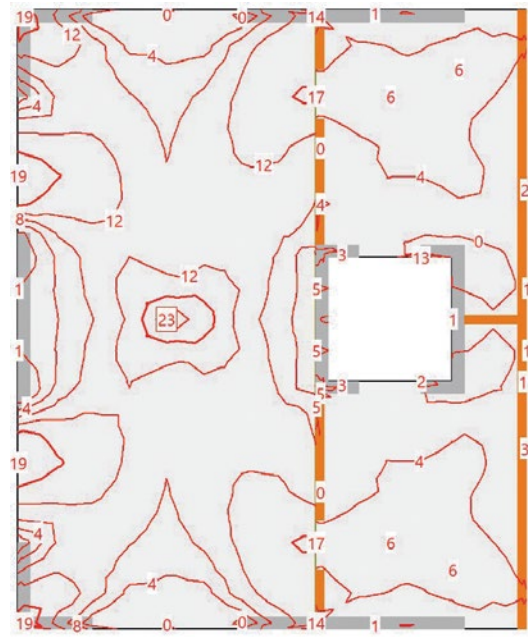
## Verificatie van de bruikbaarheidsgrenstoestand

In de bruikbaarheidsgrenstoestand treden in de nieuwe plattegrond de volgende buigmomenten in x- en y-richting op. Ter hoogte van de middenoverspanning in de hoofddraagricting wordt de buigweerstand van de bestaande wapening licht overschreden. Het versterkingsstelsel moet daarom tegen brand worden beschermd. Dit wordt beschreven in het gedeelte brandbeveiliging dat volgt.

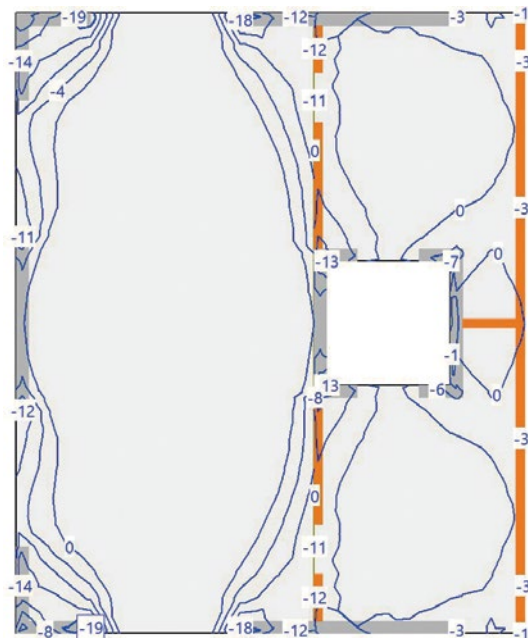
Figuur 4: Kubus-grafieken van de buigmomenten onder werkbelasting ("quasi-constant")



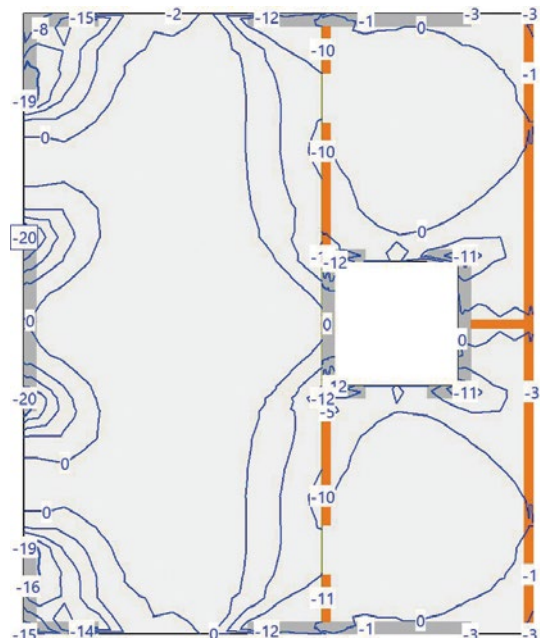
a) x-Richting onder (1. Laag)



b) y-Richting onder (2. Laag)



c) x-Richting boven (4e. Laag)



d) y-Richting boven (3e. Laag)



Een andere factor in bruikbaarheidsgrenstoestand is de doorbuiging. Hier heeft de gescheurde betondoorsnede in het voorbeeld een doorbuiging van 16,6 mm. De toelaatbare waarde:

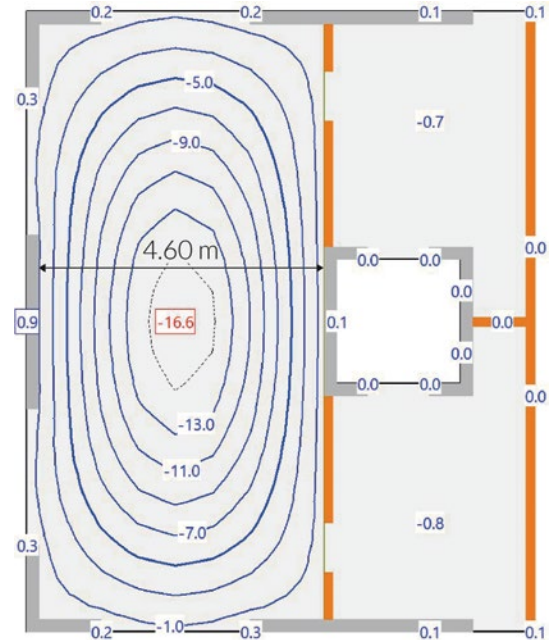
$$w_{zul} \leq l/300 = 4'600\text{mm}/300 = 15.3\text{mm}$$

Dor de voorspanning kan een constant moment over de 3.0m brede strook midden in het veld worden uitgeoefend. Hier wordt de huidige formule uit de literatuur voor een constant moment op een simpele balk gebruikt. Voor meer speciale gevallen (bijv. doorlopende balken) kan het ontwerp worden uitgevoerd met behulp van de werkvergelijking.

$$w = \frac{M * l^2}{8 * E_c I}$$

Daarnaast wordt er vereenvoudigd van uitgegaan dat de gehele betondoorsnede gescheurd is, waarbij afneemt  $E_c I$  zu  $E_c I/3$ . D effectieve formule is nu:

$$w = w_{eff} - w_{zul} = 16.6\text{mm} - 15.3\text{mm} = 1.3\text{mm} \leq \frac{M_{p,GZ} * l^2}{8 * \left(\frac{E_c I}{3}\right)}$$



Figuur 5: doorbuiging van de vloerplaat

De vergelijking wordt opgelost aan de hand van n (het aantal re-plate strippen per meter):

$$w = \frac{M_{p,GZ} * l^2}{8 * \left(\frac{E_c I}{3}\right)} = \frac{(\sigma_{p,i} * 0.85 * A_f * z * n) * l^2}{8 * \left(\frac{E_c * h_c^3 * b}{12 * 3}\right)}$$

$$\rightarrow n = \frac{w * 8 * E_c * h_c^3 * b}{12 * 3 * \sigma_{p,i} * 0.85 * A_f * z * l^2} = \frac{1.3\text{mm} * 8 * 33.6\text{GPa} * (200\text{mm})^3 * 1.0\text{m}}{12 * 3 * 380 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 0.85 * 120\text{mm} * 1.5\text{mm} * \frac{200\text{mm}}{2} * (4.6\text{m})^2} = 0.63$$

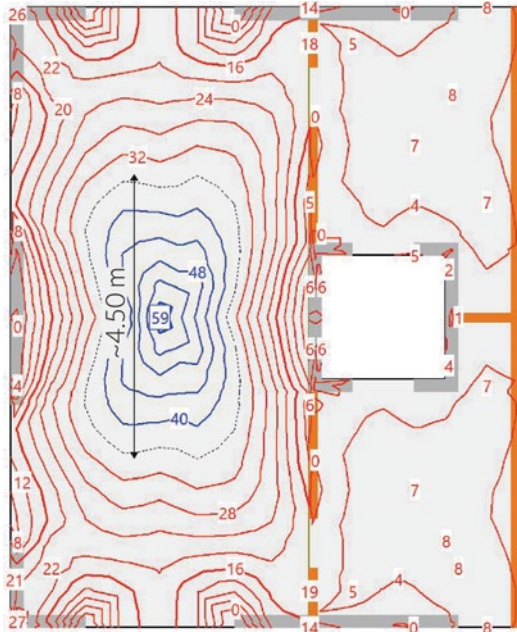
Minstens 0,63 re-plate strippen per strekkende meter zijn vereist bij de middenoverspanning. Tenzij de constructieve veiligheidscontrole een hoger cijfer aangeeft, worden de versterkingsplaten daarom om de ca. 1,6 m toegepast.



## Bewijs van de Constructieve veiligheid

Bewijs van de constructieve veiligheid wordt geleverd met de methode “Berekening met spanningsverhoging in de re-plate”. De af te dekken buigmomenten worden hieronder weergegeven:

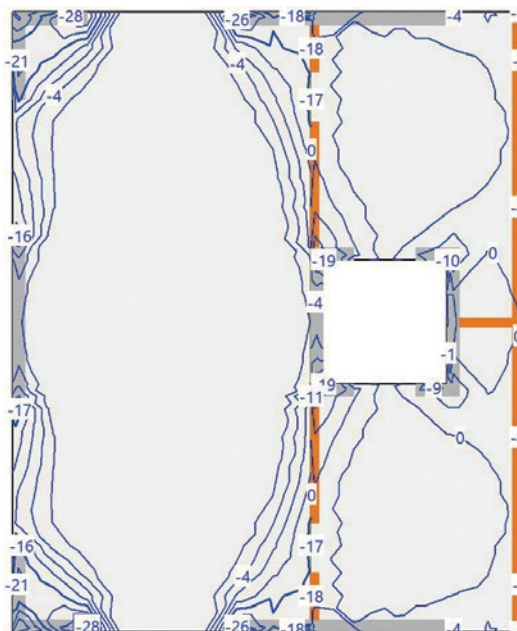
Figuur 6: Kubus-grafieken van de buigmomenten in de grenstoestand van constructieve veiligheid



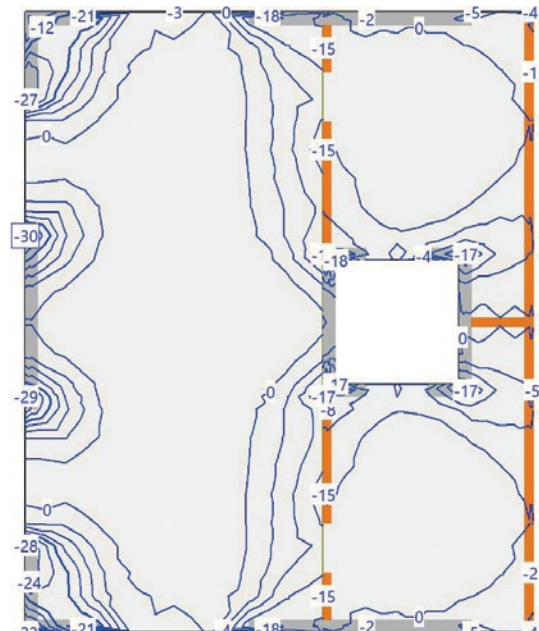
a) x-Richting onder (1. Lage)



b) y-Richting onder (2. Lage)



c) x-Richting boven (4. Lage)



d) y-Richting boven (3. Lage)

Hiervoor wordt de verlengingsrek in de re-plate berekend. De waarde voor  $L$  (vrije lengte van re-plate tussen de verankeringslengte aan beide zijden (40 cm) en een veiligheidsafstand (10 cm) te reduceren:

$$L = 4.6m - 2 * (400mm + 100mm) = 3.6m$$

$$f = 0.9 * d - e_v = 0.9 * (0.9 * 200mm) - 0 = 162mm < 0.02 * L = 72mm$$

$$\Delta \varepsilon_f = \frac{\Delta L}{L} = \frac{4 * f * z}{L^2} = \frac{4 * 72mm * (0.9 * 200mm)}{(3.6m)^2} = 0.4\%$$

Het buigend moment voor versterking wordt dus afgeleid met de eindkracht  $F_{ms,u}$  in  $n$  door een inwendige hefboomarm  $z$  van ongeveer  $0.9 * h_c$ :

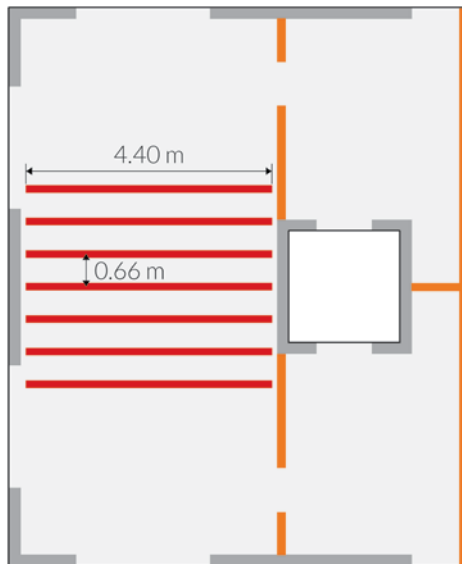
$$F_{ms,u} = (\sigma_{p,\infty} + \Delta \sigma) * A_f = (\sigma_{p,i} * 0.85 + \Delta \varepsilon_f * E_{SMA}) * A_f =$$

$$\left( 380 \frac{N}{mm^2} * 0.85 + 0.004 * 70GPa \right) * 120mm * 1.5 = 108.5kN < 83.1kN$$

$$M_{p,GZ} = n * F_{ms,u} * z = n * 83.1kN * 0.9 * 200mm \geq 58.6kNm - 36.0kNm = 22.6kNm$$

$$\rightarrow n = \frac{M_{p,GZ}}{F_{ms,u} * z} = \frac{22.6kNm}{83.1kN * 0.9 * 200mm} = 1.5$$

Om de dragende veiligheid af te dekken, zijn in de overbelaste zones (circa 4.5 m) 1.5 Stuks re-plate band per strekkende meter nodig – d.w.z. elke 0.66 m één Band (totaal 7 Stuks).



Figuur 7: Positie van de re-plate versterking

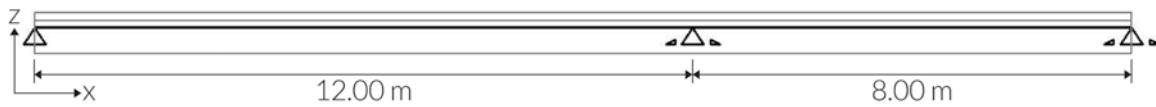
**7 x re-plate**  
 $l=4.40m$ , alle 80cm  
 met brandbescherming

## Brandsbescherming

In geval van brand moeten de quasi-permanente effecten worden afgedekt. Omdat het bestaande buigvermogen hiervoor niet voldoende is, moeten de wapeningsmaatregelen voor R60 worden aangehouden. Voor deze binnen toepassing wordt de brandwerende spuitpleister SikaCem® Pyrocoat aangebracht met een laagdikte overeenkomstig het thans geldende product gegevensblad van re-plate.

## Versterking van een T-balk met wapeningsstaven

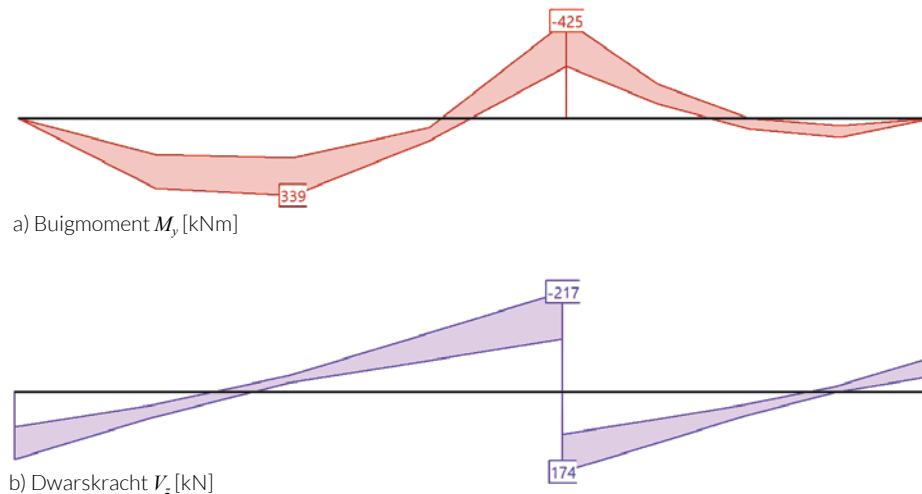
Als gevolg van een wijziging van gebruik en extra belastingen moeten verschillende T-balken in een fabrieksgebouw constructief worden versterkt. Dit rekenvoorbeeld illustreert de methode voor overmatige doorbuiging in de hoofdoverspanning en versterking voor buig- en dwarskrachtproblemen in een dergelijke individuele balk. Aanvullende verificaties zijn in dit voorbeeld achterwege gelaten. De liggers bestrijken twee overspanningen van 12,00 en 8,00 m en worden eenvoudig ondersteund.



Figuur 8: Balk met twee overspanningen in het fabrieksgebouw

De statische krachten (buigmomenten en dwarskrachten) zijn hieronder weergegeven; er zijn geen bijkomende normaal- of torsiekrachten.

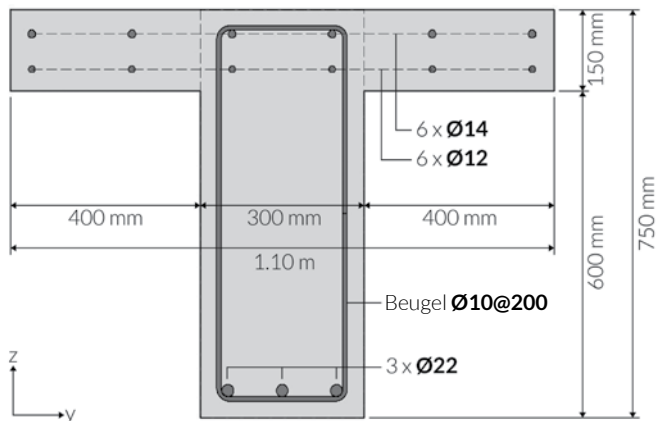
Figuur 9: Snijkrachten beperken de grenstoestand van de constructieve veiligheid



In overeenstemming met de oorspronkelijke belastingen werden de balken ontworpen en gewapend zoals aangegeven in afbeelding 10. De resulterende doorbuiging in de gescheurde betonddoorsnede voldeed aan de vereiste standaardspecificaties ( $w_{eff} = 32 \text{ mm}/w_{zul} = 34 \text{ mm}$ ).

Als gevolg van de nieuwe eisen van de opdrachtgever zijn de op te nemen belastingen verhoogd. Een hogere permanente belasting moet ook worden ondersteund als gevolg van de extra mortellaag die moet worden toegevoegd. De resulterende statische krachten in de uiterste grenstoestand zijn als volgt:

	Vorige interne krachten	Vorige weerstanden	Nieuwe interne krachten
<b>Buigmoment [kNm]</b>	$M_{Ed}$ +339 -425	$M_{Rd}$ +355 -440	$M_{Ed}$ +449 -550
<b>dwarskracht [kN]</b>	$V_{Ed}$ 217	$V_{Rd}$ 230	$V_{Ed}$ 285

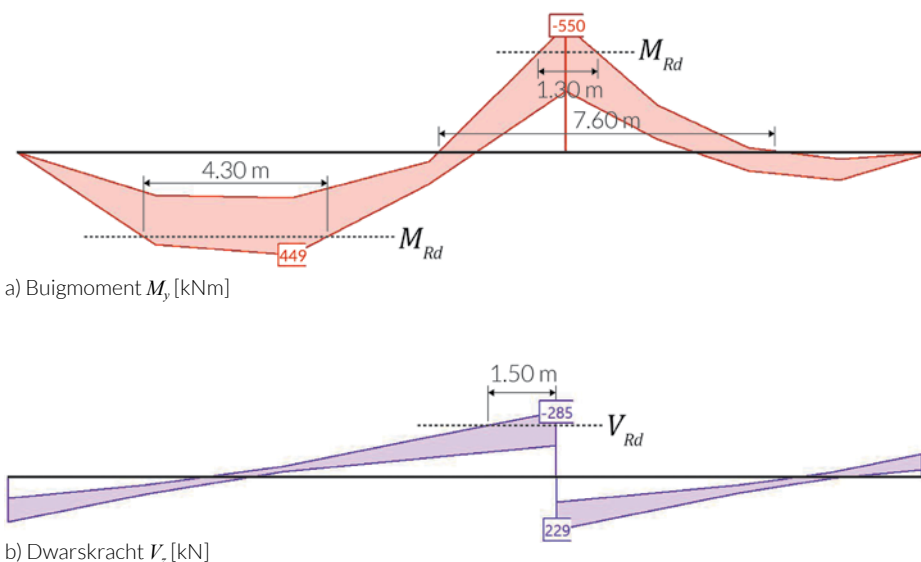


Figuur 10: Bestaande doorsnede van T-balken

### Controle van de constructieve veiligheid in de uiterste grenstoestand:

In de eerste plaats wordt de constructieve veiligheid in de uiterste grenstoestand van de onderzocht. De nieuwe interne krachten worden hieronder in detail weergegeven.

Figuur 11: Nieuwe Snijkrachten draagzekerheid grenstoestand



a) Buigmoment  $M_y$  [kNm]

b) Dwarskracht  $V_z$  [kN]

Als gevolg van de extra belastingen ontstaat er een dwarskrachtprobleem in een gebied van ongeveer 1,5 m breed naast het centrale steunpunt. De ontbrekende dwarskrachtsterkte van ca. 55 kN/m' wordt opgevangen met behulp van U-profielen. Eenvoudigheidshalve wordt alleen uitgegaan van de voorspankracht (geen spanningstoename tot dwarskracht bezwijken) op de dubbele afschuifbeugels.

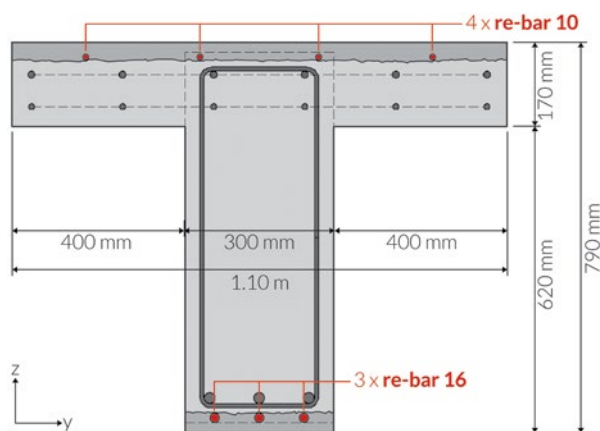
$$V_{Rd,s} = \frac{2 * \sigma_{p,\infty} * A_f}{s} * z * \cot(45^\circ) = \frac{2 * 350 \frac{N}{mm^2} * 0.85 * 89.9 mm^2}{0.5 m} * \sim 0.7 m * \cot(45^\circ) = 75 kN / m'$$

Dienovereenkomstig zijn in totaal drie U-profielen met een tussenafstand van 0,5 m nodig om het gebied te versterken. De stijlen worden rond het bestaande, geruwde betonoppervlak en over de extra langsligger geleid. Vervolgens worden ze ingebed in spuitmortel/gevoegd in de flens (verankering over de neutrale as). De ophangbeugels worden van bovenaf elektrisch verwarmd/geactiveerd.

Afstandhouders worden aangebracht om ervoor te zorgen dat er geen contact is met de bestaande wapening (elektrisch spanningsverlies tijdens het opwarmingsproces).

In de grootste deeloverspanning overtreft het nieuwe buigend moment het initiële moment met ongeveer 94 kNm. Over de gehele overspanning zijn aan de onderzijde van de ligger drie re-bar Ø16 aangebracht en ingebed in spuitmortel. Ter plaatse van het middensteunpunt overschrijdt het negatieve buigmoment het voor de originele wapening toelaatbare buigend moment over een lengte van ca. 1,3 met ca. 110 kNm. In die zone worden vier re-bar Ø 10 in verse betondekking gelegd (Opmerking: verankering van de versterking achter het momenten nulpunt). De re-bar worden in de verankeringszone bevestigd en na verharding verwarmd, bijv. met een gasbrander. Tenslotte worden ook de overige zones verankerd (d.m.v het overlagen met spuitmortel).

De verificatie doorsnedecontrole van de nieuwe doorsnede kan worden uitgevoerd met standaard ontwerpsoftware. De nieuwe weerstandsniveaus zijn vermeld in de onderstaande tabel.



Afbeelding 12: nieuwe dwarsdoorsnede van T-balk met versterking door re-bar

	oorspronkelijke interne krachten		initiële weerstand		Nieuwe interne krachten		Nieuwe weerstand	
<b>Buigmoment [kNm]</b>	$M_{Ed}$	+339	$M_{Rd}$	+355	$M_{Ed}$	+449	$M_{Rd}$	+569
		-425		-440		-550		-553
<b>dwarskracht [kN]</b>	$V_{Ed}$	217	$V_{Rd}$	230	$V_{Ed}$	285	$V_{Rd}$	315

Voor de dimensionering worden onder meer de volgende invoerparameters gebruikt:

#### re-bar invoerparameters::

- Voorspanning  $\epsilon_0 = 0.57\%$  pvoor re-bar Ø10 en  $0.46\%$  voor re-bar Ø16 (wat een theoretische voorspanning geeft van : Elastische modulus \*  $\epsilon_0 = 400 \text{ N/mm}^2$ , en respectievelijk  $320 \text{ N/mm}^2$ )
- Voorspannen met hechting
- Verliesfactor  $P_\infty/P_0 = 0.85$  (relaxatie)

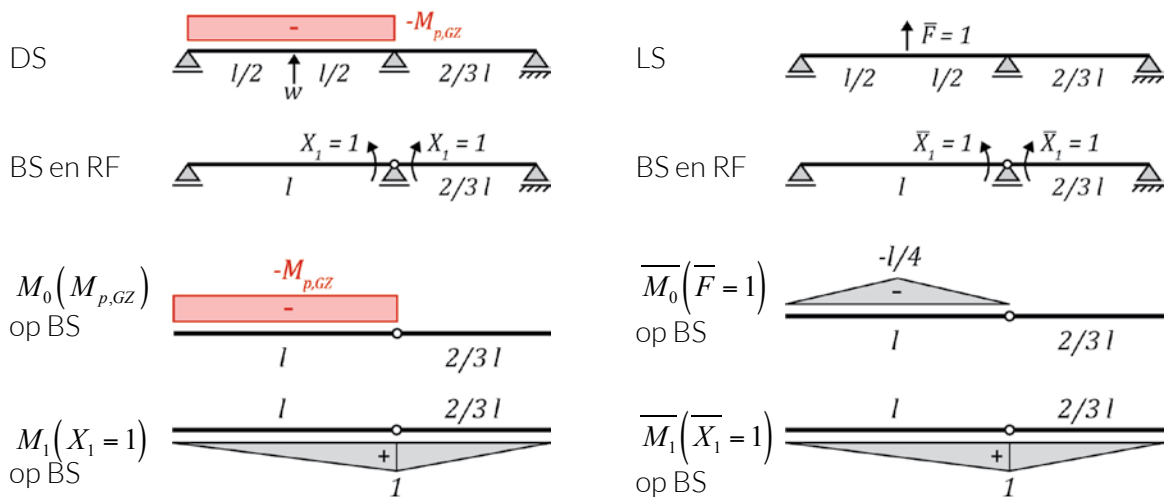
#### Materiaaleigenschappen:

- Elastische modulus =  $70 \text{ kN/mm}^2$  (elasticiteitsmodulus van de re-bar na activering)
- $f_{p0.1k} = 520 \text{ N/mm}^2$  (Ontwerpwaarde verminderd met veiligheidscoëfficiënt)
- $\epsilon_{ud} = 30\%$

## Verificatie op het niveau van de gebruiksgrenstoestand:

Door het aanbrengen van in mortel ingebedde voorgespannen re-bars worden scheurwijdtes aan het oppervlak beperkt, en wordt de belasting van de bestaande wapening afgevoerd. Naast de verbeterde duurzaamheid wordt in dit voorbeeld ook de doorbuiging onderzocht. Als gevolg van de nieuwe belastingen wordt de verticale doorbuiging in de grote overspanning bepaald op ongeveer 39 mm. Flexibele versterking met drie wapeningsstaven re-bar Ø16 impliceert een constant buigend moment dat de doorbuiging tegengaat. De resulterende 5 mm ( $w_{eff} = 39 \text{ mm}/w_{zul} = 34 \text{ mm}$ ) zou met deze maatregel moeten worden geëlimineerd.

De vervorming van het statisch onbepaalde systeem ten gevolge van de voorspanning kan op verschillende manieren worden berekend. Hier wordt het principe van virtuele arbeid voor het statisch onbepaalde systeem toegepast. Als basissysteem (BS) wordt bij de centrale steun een scharnierende verbinding ingevoerd. Omwille van de eenvoud wordt de voorspanning in het negatieve buiggebied niet meegerekend, hoewel deze ook een positief effect zou hebben



Figuur 13: Vereenvoudiging van het statisch onbepaalde systeem en het principe van virtuele arbeid

$$\delta_{10} = \int M_1 * \frac{M_0}{E_c I} dx = \frac{1}{2} * (+1) * (-M_{p,GZ}) * \frac{l}{E_c I} + 0 = -\frac{M_{p,GZ} * l}{2 * E_c I}$$

$$\delta_{11} = \int M_1 * \frac{M_1}{E_c I} dx = \frac{1}{3} * (+1)^2 * \left(1 + \frac{2}{3}\right) l = \frac{5 * l}{9 * E_c I}$$

$$\delta_{10} + X_1 * \delta_{11} = 0 \rightarrow X_1 = -\frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} = \frac{9}{10} M_{p,GZ}$$

De vervorming  $w$  kan hieruit als volgt worden afgeleid:

$$w = \int \overline{M}_0 * \frac{M_0}{E_c I} dx + X_1 * \int \overline{M}_0 * \frac{M_1}{E_c I} dx = \frac{1}{2} * \left(-\frac{l}{4}\right) * (-M_{p,GZ}) * \frac{l}{E_c I} + \left(\frac{9}{10} M_{p,GZ}\right) * \frac{1}{4} * \left(-\frac{l}{4}\right) * (+1) * \frac{l}{E_c I} =$$

$$\frac{M_{p,GZ} * l^2}{E_c I} * \left(\frac{1}{8} - \frac{9}{160}\right) = \frac{11 * M_{p,GZ} * l^2}{160 * E_c I}$$

Het constante buigmoment  $M_{p,GZ}$  over een overspanning van 12.00 m resulteert uit Formule(3):

$$M_{p,GZ} = F_{p,\infty} * z = \sigma_{p,\infty} * A_f * z = 3 * 320 \frac{N}{mm^2} * 0.85 * 211.2 mm^2 * \sim 0.66 m = 114 kNm$$

Bovendien wordt een gereduceerde, gescheurde buigstijfheid van de betondoorsnede geschat ( $E_c J_{Eclerac-ked} = E_c I / 3$ ) en in de vergelijking opgenomen.

$$w = \frac{11 * M_{p,GZ} * l^2}{160 * \left( \frac{E_c I}{3} \right)} = \frac{11 * 114 kNm * (12.00 m)^2}{160 * \frac{647'000 kNm^2}{3}} = 5.2 mm$$

De drie nieuwe re-bar die zijn aangebracht om de constructieve veiligheid te verhogen, dragen bij tot een vermindering van de doorbuiging met ongeveer 5 mm.

### Verificatie van de verankeringsgebieden:

De negatieve en positieve buigweerstand werd bepaald door dwarsdoorsnede-analyse. Voor de negatieve buigversterking worden vier re-bar  $\varnothing 10$  gebruikt. In dit voorbeeld worden de maximale trekkrachten van de re-bars over de nieuwe mortelbedekking (1,10m breedte) bepaald. Voor het ontwerp van de verankeringslengte  $l_b$  uitgegaan van een hechtsterkte van 1,5 N/mm<sup>2</sup> (hechtsterkte). De weerstand wordt tenslotte verminderd met een veiligheidsfactor van 1,5:

$$F_{p,i}(\text{negativ}) = 4 * \sigma_{p,i} * A_f = 4 * 520 \frac{N}{mm^2} * 89.9 mm^2 = 187 kN$$

$$F_{p,i} \leq \frac{l_b * 1.10 m * 1.5 \frac{N}{mm^2}}{1.5} \rightarrow l_b = 170 mm$$

Het gebied van de verankering is ontworpen met een volledige laag mortel over een lengte van ongeveer 300 mm en een breedte van 1,10 m

In geval van positieve buigversterking moeten drie stuks re-bar 16 aan de onderzijde van de baan worden bevestigd (breedte 30 cm). De maximale trekkracht moet ook gelijk worden verankerd.

$$F_{p,i}(\text{positiv}) = 3 * \sigma_{p,i} * A_f = 3 * 520 \frac{N}{mm^2} * 211.2 mm^2 = 329.5 kN$$

$$F_{p,i} \leq \frac{l_b * 300 mm * 1.5 \frac{N}{mm^2}}{1.5} \rightarrow l_b = 1'098 mm$$

Deze waarde kan worden verlaagd met verschillende verankeringsoplossingen. Als voorbeeld wordt het positieve effect van extra drukspanning op de deklaag door drie voorgespannen  $\varnothing 10$  U-profielen genoemd omdat er een voorgespannen dwarskrachtversterking wordt toegepast. De trekweerstand tussen beton en mortel (1,5 N/mm<sup>2</sup>) neemt toe door de voorgespannen dubbel-dwarskrachtbeugels (Ontspanning van voorspanning 0,85/veiligheidsfactor 1,5).

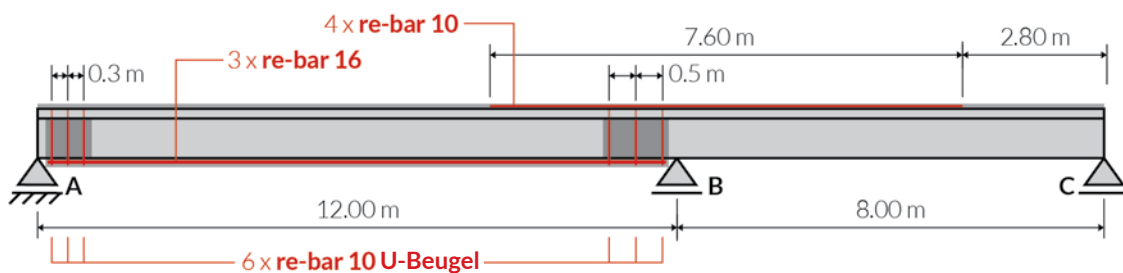


$$F_{p,i} = 329.5kN \leq \frac{l_b * b * \left( 1.5 \frac{N}{mm^2} + \frac{3 * 2 * \sigma_{p,\infty} * A_f}{l_b * b} \right)}{1.5} =$$

$$\frac{l_b * 300mm * \left( 1.5 \frac{N}{mm^2} + \frac{3 * 2 * 0.85 * 350N / mm^2 * 89.9mm^2}{l_b * 300mm} \right)}{1.5} \rightarrow l_b = 742mm$$

Voor de verankering aan de linkerzijde (steun A) worden drie U-profielen van re-bar Ø10 toegepast, analoog aan de middelste steun B. De lengte van de verankering bedraagt 750 mm.

### Schematische weergave van de versterkingsmaatregelen van de balken



Afbeelding 14: Schets van de versterkingsmaatregelen met staven in de langsrichting en staven in de dwarsrichting

Conventionele maatregelen met dwarskrachtbeugels ingebed in spuitbeton (staal B500B) kunnen eveneens worden gebruikt. Aangezien het een meer kosteneffectief alternatief welke voorkomt dat de verankeringslaag loslaat

### Referenties

[1] Bruggeling, A.S.G., Voorspanning zonder aanhechting, enkelstrengsystemen. 1976, TU Delft: Delft, The Netherlands