

# Structurele analyse van betonnen platen en wanden: Theorie en praktijk.

## Praktisch modelleren:

- Herhaling dag 2
- Praktisch wapenen, voorbeeldberekening
- Niet uitgevoerde controles
- Aankomende regelgeving

# Structurele analyse van betonnen platen en wanden: Theorie en Praktijk.

Praktisch wapenen en praktijkvoorbeelden  
*Tom Segers, Tom Molken & Francis Clemmens*



# Inhoud

- Herhaling belangrijkste punten dag 2
- Praktische wapenen: Voorbeeldberekening
- Vergelijking plaatmodel met buizen en schijfmodel naar vervormingen
- Niet uitgevoerde controles
- Aankomende regelgeving, bijlagen F en G; EN 1993-1-1 (2023→2027)
- Niet behandelde vragen

# Herhaling praktische aanbevelingen dag 2

Overzicht:

- Mesh- en lastverdeling
- Invoed lokale verzwakkingen/verstijvingen
- Kirchoff versus Mindlin en elementtype
- Modelleren van steunpunten
- Balken geconnecteerd met platen

# Mesh- en lastverdeling

## Praktische aanbevelingen:

- Grof voor lastendaling en om “gevoelige zones” te detecteren = minimaal 2 elementen, doch 4 om aanvaardbare nauwkeurigheid te bekomen. Maximaal aantal verdelingen = plaatdikte of zelfs  $2 \times$  plaatdikte.
- Eén plaat met fijne mesh en invoering correctiefactoren: voor meshverdeling: 1,1 voor gescheurde vervorming + kruip; 1,1 voor steunpuntwapening en 0,9 voor veldwapening. Met lichte herverdeling  $\rightarrow$  enkel 1,1 voor vervorming. Voor lastenpatronen: verwaarloosbaar met toepassing voorgaande factoren.
- Met 4 à 5 elementen tussen steunpunten/-lijnen in het algemeen voldoende nauwkeurigheid voor reacties, vervormingen en praktische wapening. Meer = tijdsverlies in ontwerp (moeilijkere integratie bovenwapening).

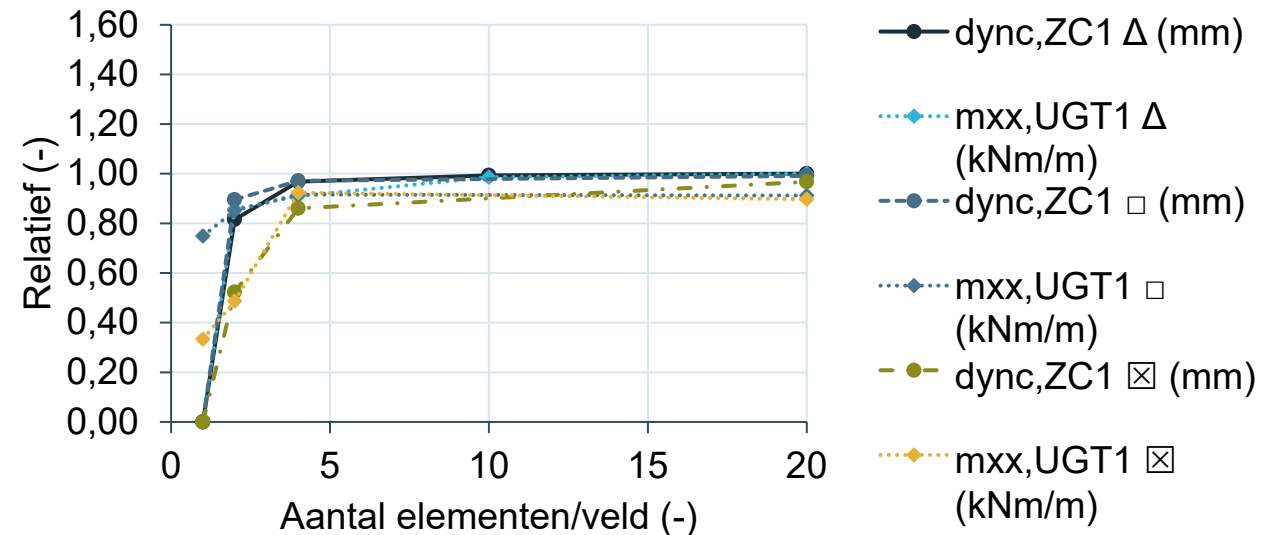
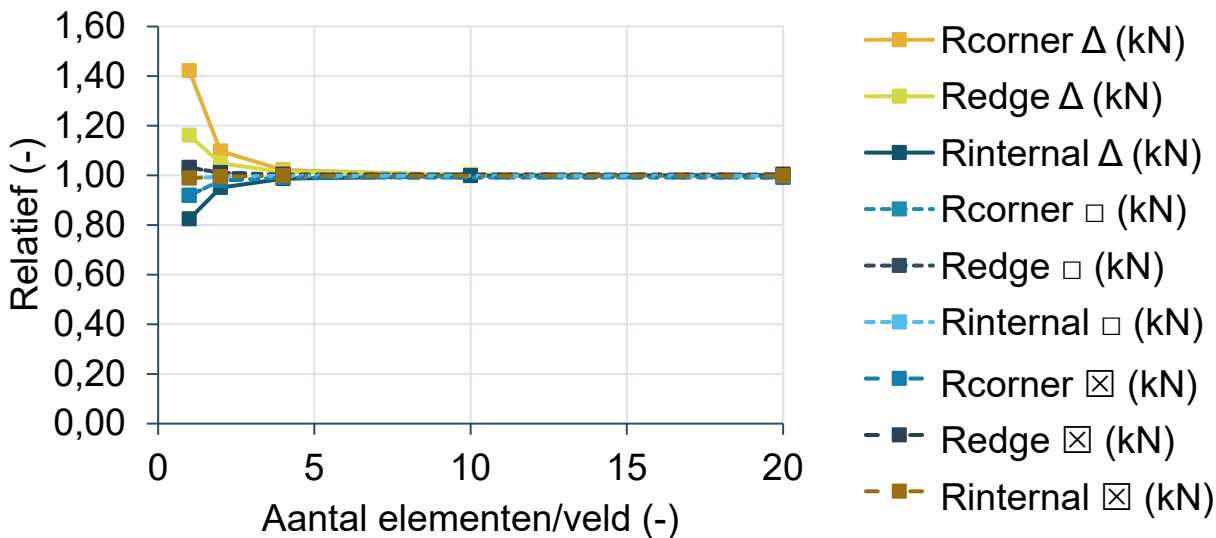
# Invloed lokale verzwakkingen/verstijvingen

## Praktische aanbevelingen:

- Voor vloeren met vulelementen omwille van krachtswerking: Kirchoff, naar vervormingen evenwel dwarskrachtcorrectie mogelijk nodig.
- Een enkele kleine (20% h) technische uitsparing heeft een verwaarloosbare invloed, een groep daarentegen van 1 tot 2 h breedte geeft 10% meer vervorming → noodzaak tot detailanalyse en toepassing correctiefactor.
- Cirkelvormige/conus kolomkopversterkingen geven minder verstoring in krachtswerking dan vierkantige/pyramide vormen. Beide geven voor de voorbeeldafmetingen ( $h_{kop} = 1,5 \times h_{plaat}$  en zijde =  $4h + \text{afm.kolom}$ ) 15% winst in vervorming en bovenwapening. Zie ook verder bij steunpunten.

# Kirchoff versus Mindlin en elementtype

- Vergelijking “Belgische” software m.b.v. voorgaand voorbeeld:
  - Diamonds van Buildsoft,  $\Delta$ , Kirchoff
  - SCIA,  $\square$ , Kirchoff
  - SCIA,  $\boxtimes$ , Mindlin



# Kirchoff versus Mindlin en elementtype

## Praktische aanbevelingen:

- Met vierhoekige elementen van regelmatige vorm kan eenzelfde nauwkeurigheid gehaald met de helft van het aantal elementen tussen de steunpunten als met driehoeken. Opletten evenwel met hybride overgangen.
- Voor grove verdelingen die vaak gebruikt worden voor totale gebouwsimulaties presteert Kirchoff eenvoudiger, beter, robuuster. Geen noodzaak tot verfijningen aan de randen.
- Mindlin is sowieso aangewezen voor dikke platen, al kan de overweging gemaakt worden of bij dit soort toepassingen i) vervormingscriteria wel maatgevend zijn en ii) of een stangenmechanisme niet meer aangewezen is. Wordt wel voldaan aan  $\sigma_z = \varepsilon_z = 0$  ?



# Modellering van steunpunten

## Praktische aanbevelingen:

- Ter plaatse van oplegpunten, beperking piekspanningen  $\sigma_{c, \text{piek}} \leq 1,6 \cdot f_{cd}$ .
- Om rekening te houden met fysische afmetingen en inklemmingsgraad in kolommen: Veerconstanten (gevoeligheidsanalyse) + spanningscontrole:
  - Axiale veerconstante  $K = Ebh/H$
  - Rotatie veerconstante, met constant moment:  $C = \frac{EI}{H}$
  - Met 0-moment onderaan in kolom = scharnier onderaan:  $C = \frac{2EI}{H}$
  - Met tekenwissel moment in kolom = inklemming onderaan:  $C = \frac{4EI}{H}$
  - De vis noch vleesoplossing:  $C = \frac{3EI}{H}$

# Balken geconnecteerd met platen

## Praktische aanbevelingen:

- Manuele berekening is te volgen voor balken die niet solidair (zonder overdracht schuifspanningen) verbonden zijn met de plaat.
- Aanbevolen om de automatische berekende waarden van de buigwapening te volgen voor de balken, samen met die van de platen (steeds beide).
- Ten gevolge van de Kirchhoff dwarskracht ontstaat er een zeer grote dwarskracht in de plaat, het is aanbevolen om die te someren bij de balk-dwarskrachtwapening. Ofwel de plaat voorzien van dwarskrachtwapening.
- Opletten met grote doorbuigingen, de horizontale reactiekrachten kunnen hoog oplopen → noodzaak randwapening.

# Praktisch wapenen: Voorbeeldberekening

Overzicht:

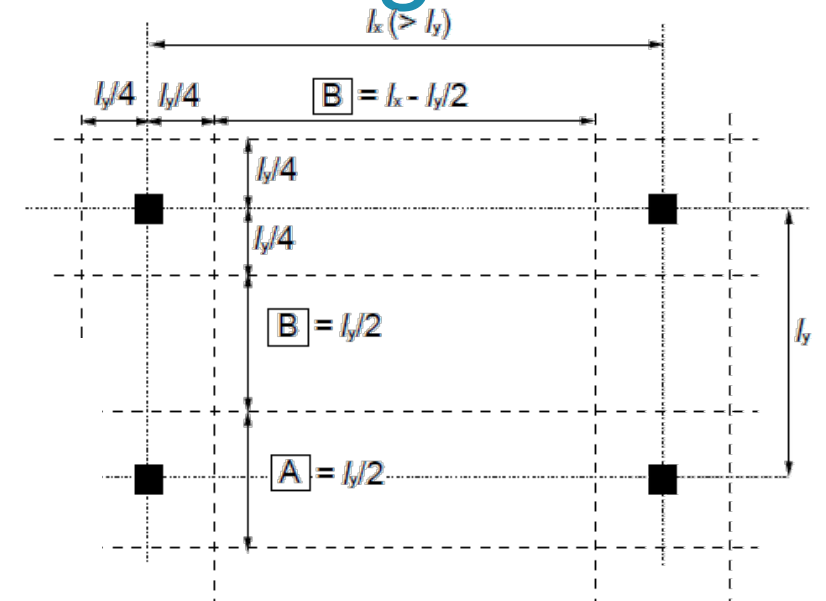
- Richtlijnen EN 1992-1-1
- Voorstel werkschema
- Argumentatie en kritische reflectie
- Voorbeeld eerste veld en middenkolom op basis van 4, 10 en 20 elementen met stappenplan
- Praktische aanbeveling

# Praktisch wapenen: Voorbeeldberekening

Richtlijnen EN 1992-1-1

- Bijlage I, vereenvoudigde evenredige verdeling

	Negatieve momenten	Positieve momenten
Kolomstrook	60 % – 80 %	50 % – 70 %
Middenstrook	40 % – 20 %	50 % – 30 %
OPMERKING De totale negatieve en positieve momenten, die door de kolom- en middenstroken samen moeten zijn opgenomen, behoren samen altijd 100 % te zijn.		

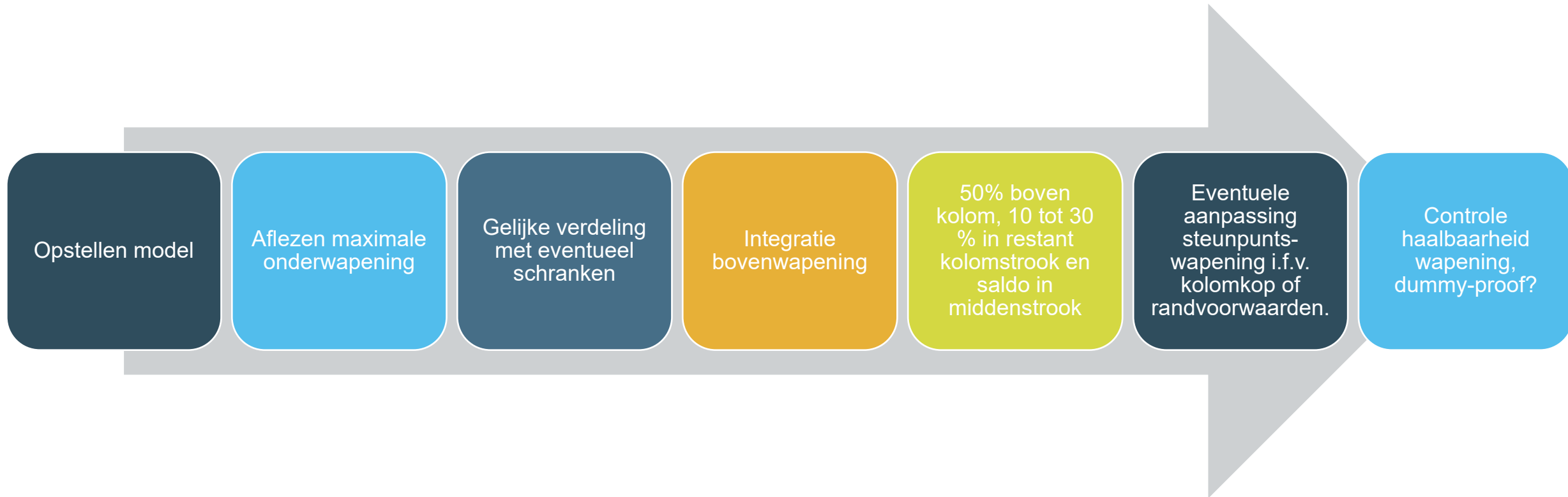


- Detailleringregels voor vlakke vloerplaten

(2) Tenzij zorgvuldige berekeningen in de bruikbaarheidsgrenstoestand zijn uitgevoerd behoort bij middenkolommen een bovenwapening met een oppervlakte van de doorsnede van  $0,5 A_t$  te zijn aangebracht met een breedte gelijk aan de som van  $0,125$  maal de veldbreedten aan beide zijden van de kolom.  $A_t$  geeft de oppervlakte van de wapeningsdoorsnede weer die vereist is om het volledige negatieve moment aangrijpend op de twee halve velden aan beide zijden van de kolom te kunnen opnemen.

# Praktisch wapenen: Voorbeeldberekening

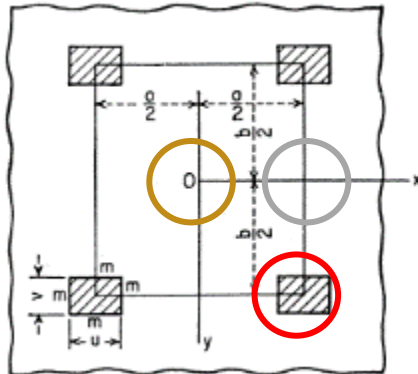
Voorstel werkschema, op basis van krachten evenwicht



# Praktisch wapenen: Voorbeeldberekening

Argumentatie voorgestelde werkwijze:

- Invloed kolomafmetingen op wapening Tabel 59 uit S. P. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill 2nd Ed. 1989



Grote invloed

Beperkte invloed

$u/a = k$	$(M)_{x=y=a/2} = \beta qa^2$	$(M)_{x=y=0} = \beta_1 qa^2$	$(M_x)_{x=0/2, y=0} = \beta_2 qa^2$	$(M_y)_{x=0/2, y=0} = \beta_3 qa^2$	$Q_{1max} = \gamma qa$
	$\beta$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\gamma$
0	$-\infty$	0.0331	0.0000	0.0000	$\infty$
0.1	-0.196	0.0329	-0.0182	0.0508	2.73
0.2	-0.131	0.0321	-0.0170	0.0458	0.842
0.3	-0.0933	0.0308	-0.0158	0.0415	
0.4	-0.0678	0.0289	-0.0140	0.0361	
0.5	-0.0487	0.0265			

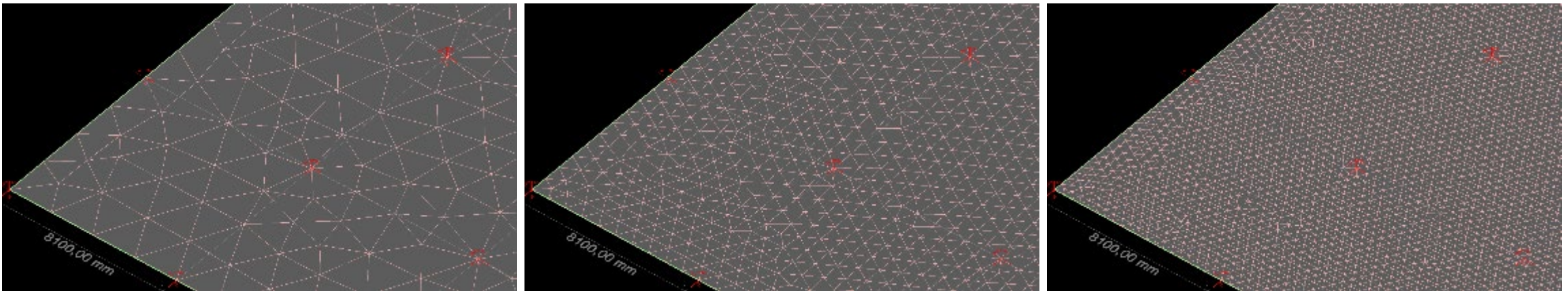
Hoe kan dit, terwijl er een (intern) krachtenevenwicht dient gerespecteerd?

- Ontwerpreek staal = 10‰, vloeigrens = 435/200000 = 2,2 ‰ → Gedragsfactor 4,6 of rekken (en daaruit afgeleide spanningen) toelaatbaar tot 4,6× de vloeigrens of ook wapeningspiek/4,6 = geen probleem voor piekwapening!

# Praktisch wapenen: Voorbeeldberekening

**Stap 1:** Opstellen model, tussenverdiep  $C = 4EI/H$  & 4, 10 of 20 elementen:

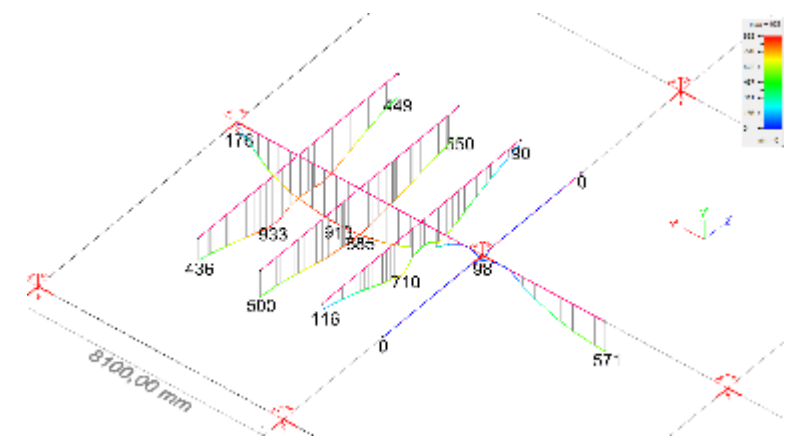
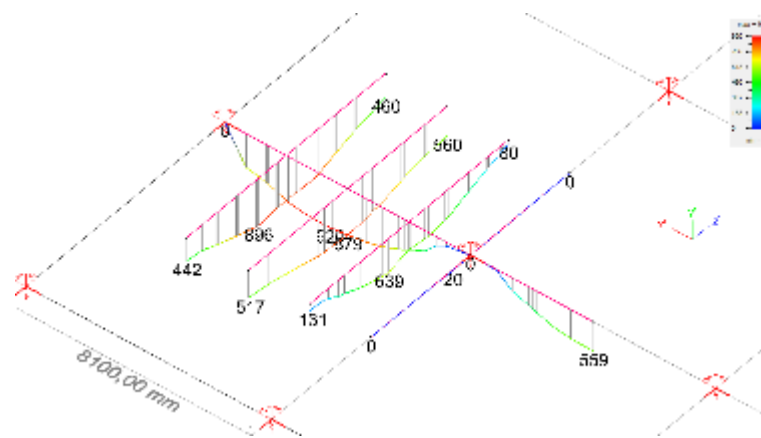
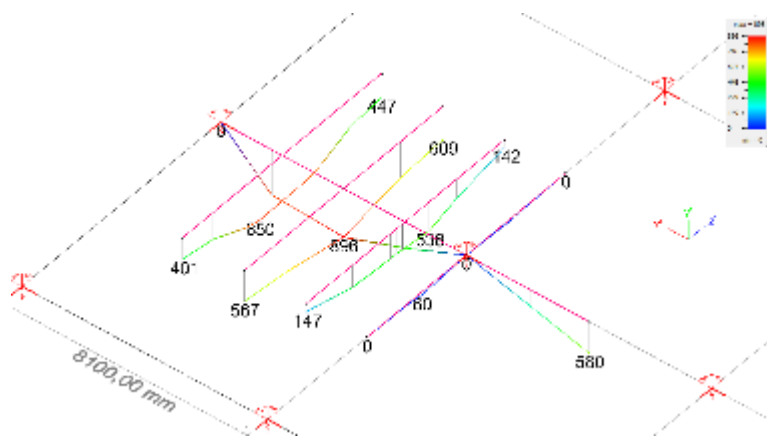
- Verticale veerconstante:  $K = 587 \text{ MN/m}$  (zie slide 73, dag 2)
- Rotatieveerconstante:  $C = 7,82 \text{ MN/rad}$  (zie slide 73, dag 2)



# Praktisch wapenen: Voorbeeldberekening

## Stap 2 & 3: Onderwapening, aflezen en vereenvoudigen

- Wapeningsbeelden, zie invloed wringmomenten bij 10 en 20 verdelingen:



Kolomstrookwapening  $896/567=1,58$   
 $\int A_{s,inf} = 5807 \text{ mm}^2$   
Geen drukwapening steunpunt

Kolomstrookwapening  $879/517=1,70$   
 $\int A_{s,inf} = 5789 \text{ mm}^2$   
Net drukwapening steunpunt

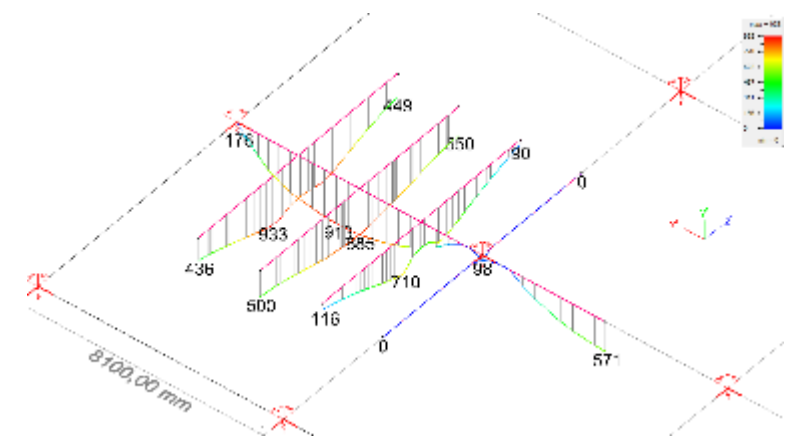
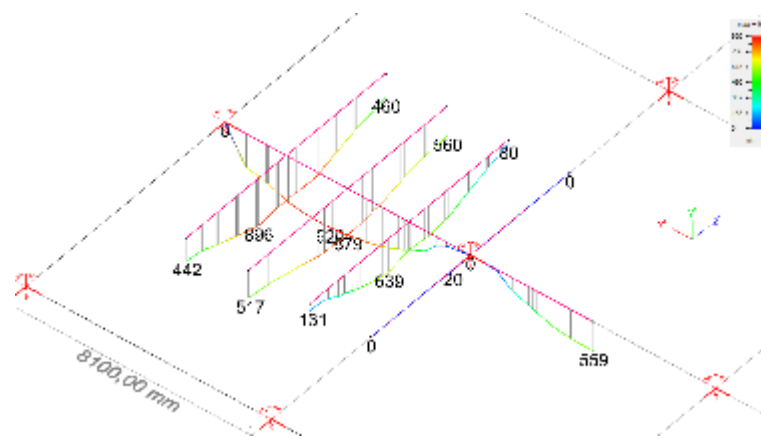
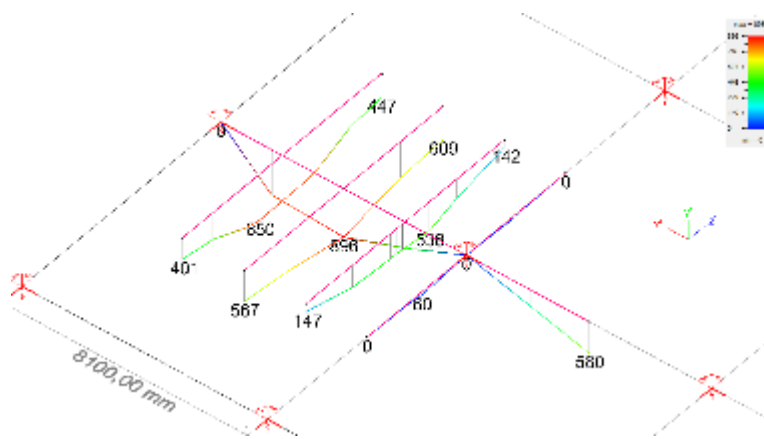
Kolomstrookwapening  $885/500=1,77$   
 $\int A_{s,inf} = 5848 \text{ mm}^2$   
Kleine drukwapening steunpunt



# Praktisch wapenen: Voorbeeldberekening

## Stap 2 & 3: Onderwapening, aflezen en vereenvoudigen

- Wapeningsbeelden, zie invloed wringmomenten bij 10 en 20 verdelingen:



Kolomstrookwapening  $896/567=1,58$   
 $\int A_{s,inf} = 5807 \text{ mm}^2$  ←  
Geen drukwapening steunpunt

Kolomstrookwapening  $879/517=1,70$   
 $\int A_{s,inf} = 5789 \text{ mm}^2$   
Net drukwapening steunpunt

Kolomstrookwapening  $885/500=1,77$   
 $\int A_{s,inf} = 5848 \text{ mm}^2$   
Kleine drukwapening steunpunt

# Praktisch wapenen: Voorbeeldberekening

## Stap 2 & 3: Onderwapening, aflezen en vereenvoudigen

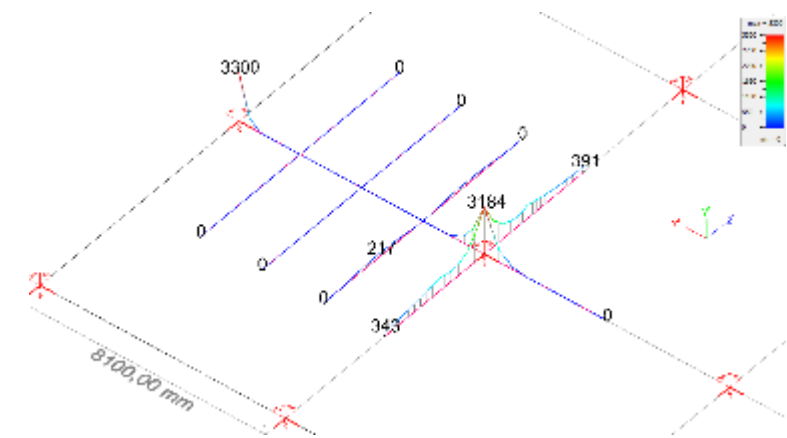
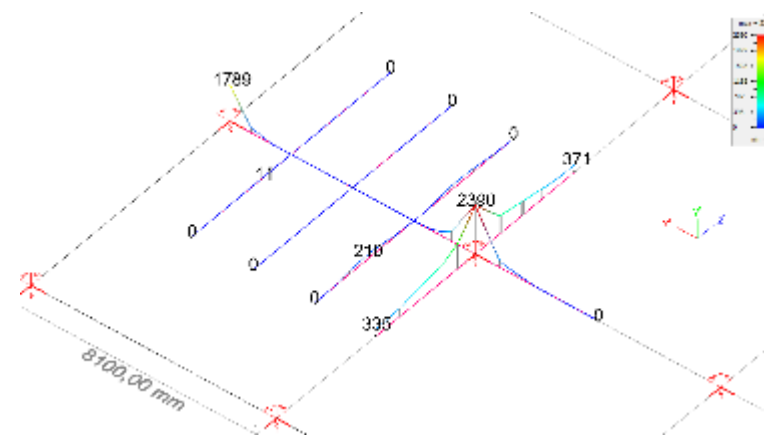
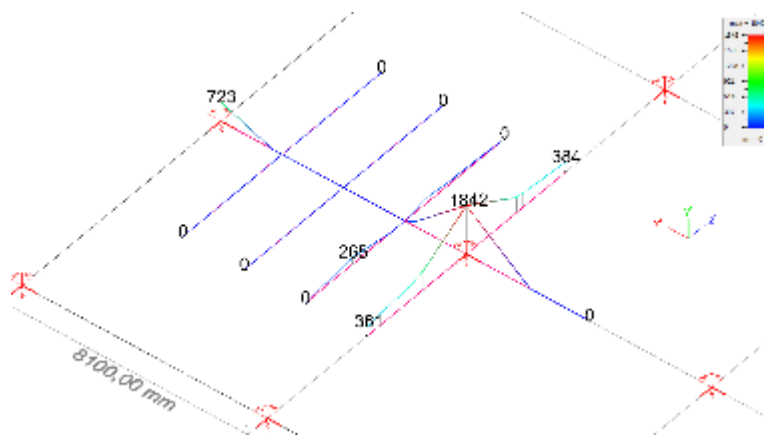
- Eerste mogelijkheid = midden en kolomstrook elk 50% ofwel basisnet  $5807/8,1 = 717 \text{ mm}^2/\text{m}$  (herinner factor 4,6 – slide 15 = 61, dag 2)  $\rightarrow \#150/12 = 754 \text{ mm}^2/\text{m}$  praktisch = 5 % teveel.
- Tweede mogelijkheid = 30% in middenstrook, bepaald een licht net  $5807 \times 0,30/4,05 = 430 \text{ mm}^2/\text{m}$  en 70% in kolomstrook of bijleg nodig:  $5807 \times 0,7/4,05 - 430 = 574 \text{ mm}^2/\text{m}$ .
- Derde mogelijkheid = praktische waarde van eerste net hoger dan minimum  $\rightarrow \#150/10 = 524 \text{ mm}^2/\text{m}$  en  $(5807 - 524 \times 8,1)/4,05 = +386 \text{ mm}^2/\text{m}$  in kolomstrook of ook + 14Ø12/0,29.

# Praktisch wapenen: Voorbeeld

Tip; indien geen wapening berekenbaar → integratie momenten per strook en die omzetten naar wapening

## Stap 4 & 5: Bovenwapening, aflezen en vereenvoudigen

- Wapeningsbeelden, zie vooral invloed mesh op lengte bovenwapening!



Kolomstrookwapening  $1842/361=5,10$

$$\int A_{s,sup} = 6840 \text{ mm}^2$$

Ook bovenwapening randkolom

Kolomstrookwapening  $2390/335=7,13$

$$\int A_{s,sup} = 6812 \text{ mm}^2$$

Ook bovenwapening randkolom

Kolomstrookwapening  $3184/343=9,28$

$$\int A_{s,sup} = 7093 \text{ mm}^2$$

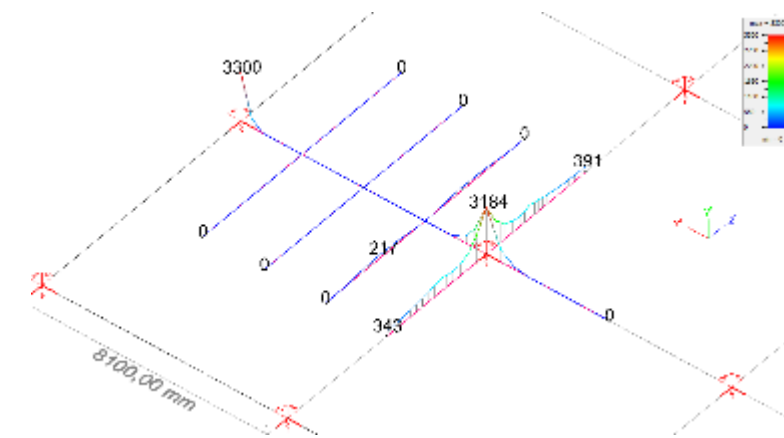
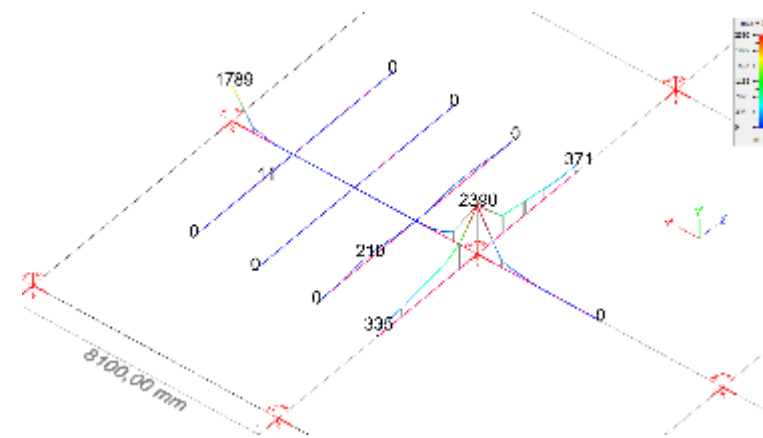
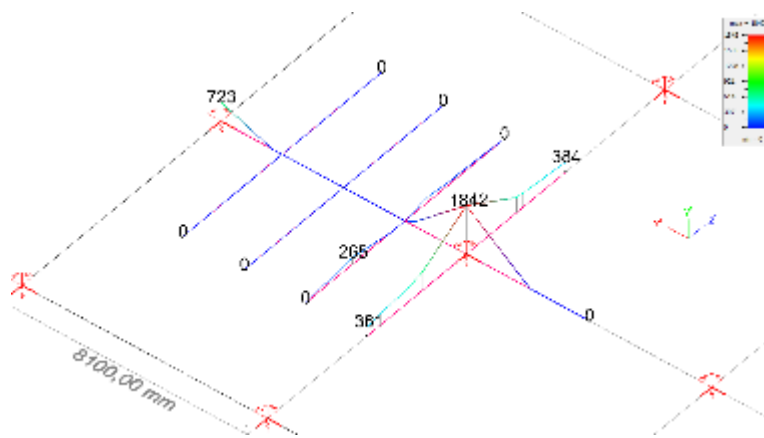
Ook bovenwapening randkolom

# Praktisch wapenen: Voorbeeld

Opmerking; het steunpunt is oneindig dun, hoe voor bovenwapening rekening met werkelijke afmetingen.

## Stap 4 & 5: Bovenwapening, aflezen en vereenvoudigen

- Wapeningsbeelden, zie vooral invloed mesh op **lengte bovenwapening!**



Kolomstrookwapening  $1842/361=5,10$

$$\int A_{s,sup} = 6840 \text{ mm}^2$$

Ook bovenwapening randkolom

Kolomstrookwapening  $2390/335=7,13$

$$\int A_{s,sup} = 6812 \text{ mm}^2$$

Ook bovenwapening randkolom

Kolomstrookwapening  $3184/343=9,28$

$$\int A_{s,sup} = 7093 \text{ mm}^2$$

Ook bovenwapening randkolom

# Praktisch wapenen: Voorbeeldberekening

## Stap 4 & 5: Bovenwapening, aflezen en vereenvoudigen

- Detailleringeis 50%  $A_t$  boven kolom:  $6840 \times 0,5 = 3420 \text{ mm}^2$  boven kolom in een zone van  $0,25L$  ofwel  $1689 \text{ mm}^2/\text{m}$ .
- Vervolgens in middenstrook 20%, kolomstrook 80% (-50% = 30%)
  - Middenstrook  $6840 \times 0,20/4,05 = 338 \text{ mm}^2/\text{m}$
  - Kolomstrook restant  $6840 \times 0,30/2,025 = 1013 \text{ mm}^2/\text{m}$
- Ofwel in middenstrook 40%, kolomstrook 60% (-50% = 10%)
  - Middenstrook  $6840 \times 0,40/4,05 = 675 \text{ mm}^2/\text{m}$
  - Kolomstrook restant  $6840 \times 0,10/2,025 = 338 \text{ mm}^2/\text{m}$
- Ofwel resterende 50% over  $0,75L = 3420/6075 = 563 \text{ mm}^2/\text{m}$ 
  - Middenstrook  $563 \times 4,05 = 2280 \text{ mm}^2 = 33\%$  of tussen 20% en 40%
  - Kolomstrook = 67% of tussen 60% en 80 %.

# Praktisch wapenen: Voorbeeldberekening

## Stap 6 & 7: Economische reflectie en praktische toets

- Onderwapening met basis #150/10:
  - Tussenmaat 0,29 m  $\neq$  praktisch, stemt niet overéén met maaswijdte.
  - Tussenmaat 0,30 m is verantwoordbaar door rekening te houden met werkelijke kolomafmetingen,  $14\text{Ø}12 = 13 \times 0,30 = 3,90 \text{ m} \approx L/2$
- Bovenwapening met 563 mm<sup>2</sup>/m:
  - De basiswapening wijkt slechts licht af van het basis ondernet  $\rightarrow$  #150/10
  - Middenstrook  $524 \times 4,05 = 2122 \text{ mm}^2 = 31\%$  of tussen 20% en 40%
  - Kolomstrook =  $1689 - 524 = +1165 \text{ mm}^2/\text{m} \rightarrow$  Bvb  $\text{Ø}16/150$ , om te voldoen aan evenwicht  $(6840 - 524 \times 8,1) / 201 = 13$  staven ( $12 \times 0,15 = 1,80 < 2,025 \text{ m}$ )

# Praktisch wapenen: Voorbeeldberekening

## Praktische aanbevelingen:

- Onderwapening: kies het typenet met stekeinden met een doorsnedesectie net groter dan het minimum + bijlegwapening en vergelijk kostprijs plaatsing met een zwaarder net zonder bijlegwapening.
- Bovennet: praktisch net dat voldoet aan de grenzen van de middenstrook wapening (20%-40%) en voorzie bijlegwapening boven de geconcentreerde kolomzone (breedte  $0,25L$  omwille van detailleringseis  $50\%A_t$ ).
- Opbinden van wapening kan noodzakelijk zijn ten behoeve van het respecteren van betondekkingen indien geen of scheurgevoelige afwerking!  
Stel  $35 \text{ mm dekking} + 2 \times \text{Ø}16 = 67 \text{ mm gemiddelde dekking op bovennet!}$

# Vergelijking plaat- en schijfmodel met openingen

Overzicht:

- Theoretische beschouwingen
- Experimentele resultaten



# Vergelijking plaat- en schijfmodel met openingen

- Voorbeeld met één uitsparing van  $\varnothing$  200 mm in een plaat van 390 mm:



$$M_A = 2 \frac{EJ}{l} \varphi_B; \quad M_B = -4 \frac{EJ}{l} \varphi_B$$

Buigstijfheid :  $EI/L \rightarrow$  Met boven- en onderdikte  $t$  is de equivalente dikte  $h_{eq}^3 = 2t^3$  of  $h_{eq} = \sqrt[3]{2} \cdot t$

- $D_x = 32837000 / (1 - 0,2^2) \times (0,20 \times 0,39^3 / 12 - 3,14 \times 0,20^4 / 64) / 0,20 = 155652 \text{ kNm}^2$ , zonder aandeel  $I_{sx}$ .
- $D_z$  (met een vierkante sparring, omwille van eenvoud) van 0,20 m of  $t = 0,095$  berekenen we:  
 $32837000 / (1 - 0,2^2) \times 1 \times (1,26 \times 0,095)^3 / 12 = 4889 \text{ kNm}^2$
- $D_1 = \nu_c \sqrt{D_x D_y} = 5517 \text{ kNm}^2$  en  $D_{xz} = \frac{1 - \nu_c}{2} \sqrt{D_x D_z} = 11034 \text{ kNm}^2$

- Isotrope  $\rightarrow$  orthotrope karakteristieken, voor een plaat van 0,39 m:

$$\begin{bmatrix} 169803 & 33817 & 0 \\ 33817 & 169803 & 0 \\ 0 & 0 & 67633 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 155652 & 5517 & 0 \\ 5517 & 4889 & 0 \\ 0 & 0 & 11034 \end{bmatrix}$$

- Voorwaarde: Beton tussen leidingen  $\gg$  restbeton boven en onder.

# Vergelijking plaat- en schijfmodel met openingen

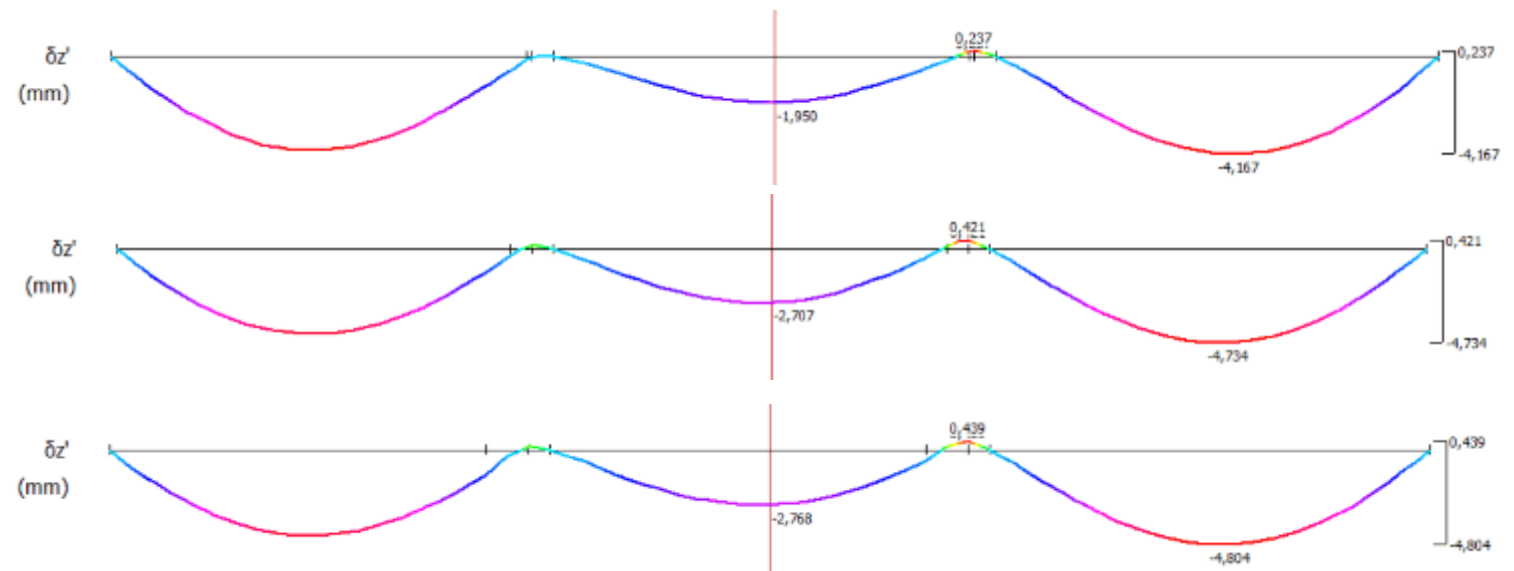
Theoretische beschouwingen

- Zie dag 2; slides 33-35 voor plaatbenadering
- Met  $b = 0,5, 1$  of  $2h \rightarrow dy_{nc,ZC1}/\text{Massief} = 1,14/1,29/1,31$

- Leiding Ø200 mm:

- Leiding 200×390 mm<sup>2</sup>

- Leiding 200×780 mm<sup>2</sup>

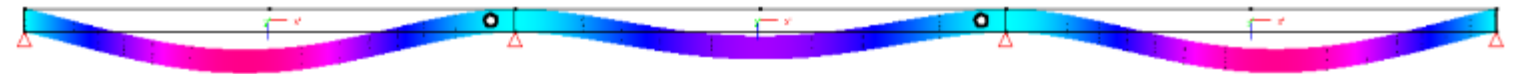


# Vergelijking plaat- en schijfmodel met openingen

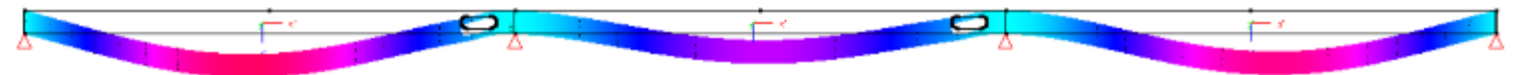
## Theoretische beschouwingen

- Zie dag 2; slides 66 met schijfbenadering (strook, geen wringstijfheid)
- Met  $b = 0,5, 1$  of  $2h \rightarrow dy_{nc,ZC1}/\text{Massief} = 1,02/1,07/1,24 \rightarrow$  voorgaande ?

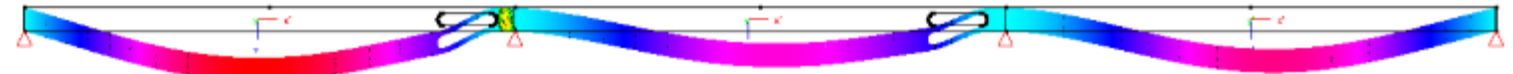
- Leiding  $\text{\O}200$  mm:



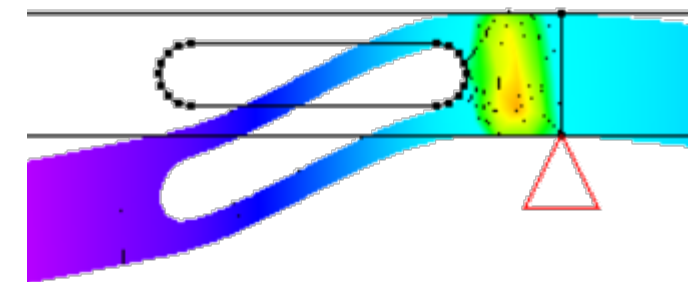
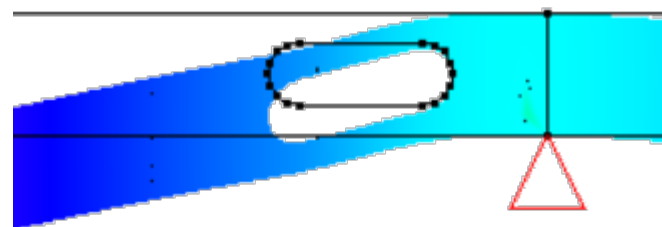
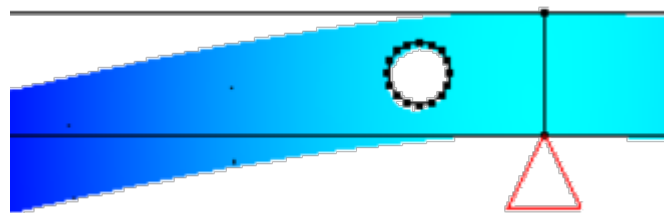
- Leiding  $200 \times 390$  mm<sup>2</sup>



- Leiding  $200 \times 780$  mm<sup>2</sup>



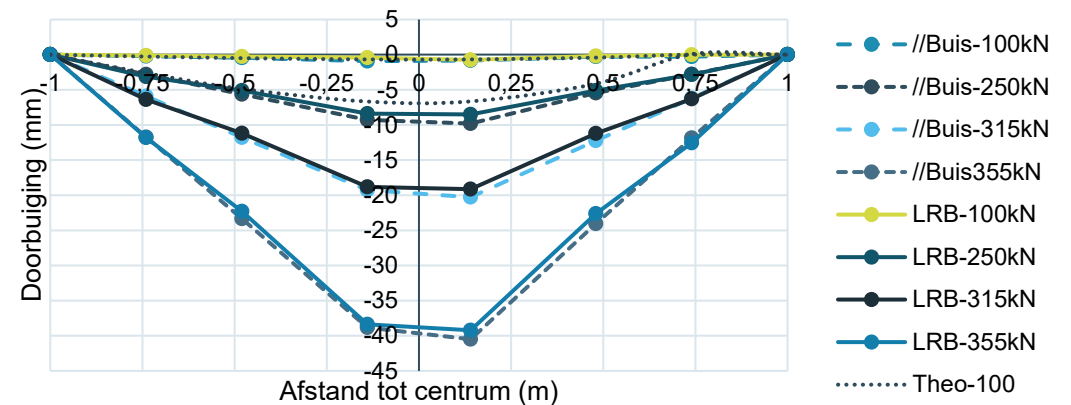
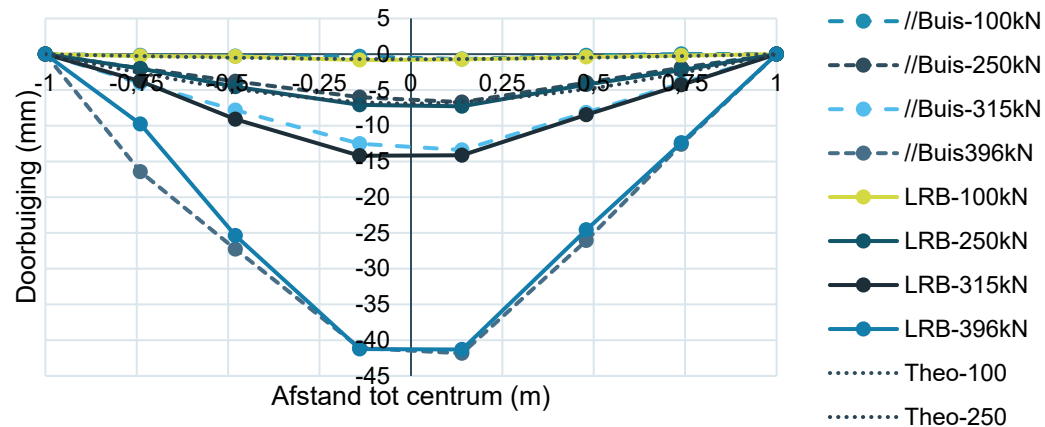
- Detail:



# Vergelijking plaat- en schijfmodel met openingen

Experimentele bevindingen, resultaten proef 200 mm met 4×leiding 90 mm ( $\approx h/2,2$ ), overspanning 2×2 m<sup>2</sup>, lastoppervlakte 300x300 mm<sup>2</sup>

- Ponskracht 396 kN, met buizen 355 kN (90%).
- Doorbuiging bij 250 kN; -6,4 versus -9,5mm (×1,50).
- Doorbuigingsfiguren zonder en met buizen:



# Vergelijking plaat- en schijfmodel met openingen

- Proef met uitsparingen van  $\varnothing 90$  mm in een plaat C25/30 van 200 mm:

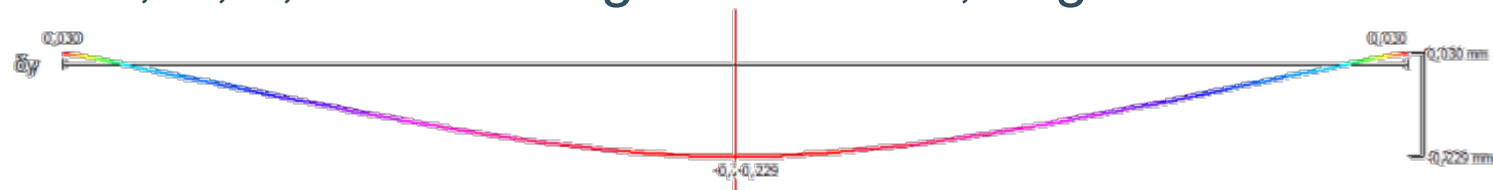
- $D_x = 31476000 / (1 - 0,2^2) \times (0,09 \times 0,20^3 / 12 - 3,14 \times 0,09^4 / 64) / 0,09 = 20685 \text{ kNm}^2$ , zonder aandeel  $I_{sx}$ .
- $D_z$  (met een vierkante sparing, omwille van eenvoud) van 0,09 m of  $t=0,05$  en  $0,06$ m berekenen we:  
 $31476000 / (1 - 0,2^2) \times 1 \times [(0,050)^3 / 12 + (0,060)^3 / 12] = 932 \text{ kNm}^2$
- $D_1 = \nu_c \sqrt{D_x D_y} = 878 \text{ kNm}^2$  en  $D_{xz} = \frac{1 - \nu_c}{2} \sqrt{D_x D_z} = 1756 \text{ kNm}^2$

- Isotrope  $\rightarrow$  orthotrope karakteristieken, voor een plaat van 0,20 m:

$$\begin{bmatrix} 21858 & 4372 & 0 \\ 4372 & 21858 & 0 \\ 0 & 0 & 8743 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 20685 & 878 & 0 \\ 878 & 932 & 0 \\ 0 & 0 & 1756 \end{bmatrix}$$

- Verhoudingen doorbuigingen t.o.v. zonder leiding, met 4 of 2 (brede): Niet-gescheurd; 1,10; 1,17 en gescheurd 1,11; 1,18 = ver weg van factor 1,40 gemeten

- Vervormingslijnen:  
100 kN.



# Vergelijking plaat- en schijfmodel met openingen

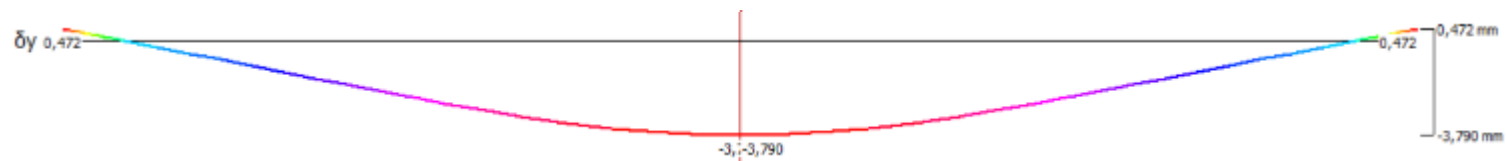
- Proef met uitsparingen van  $\varnothing 90$  mm in een plaat C25/30 van 200 mm:
  - $D_x = 31476000 / (1 - 0,2^2) \times (0,09 \times 0,20^3 / 12 - 3,14 \times 0,0,9^4 / 64) / 0,09 = 20685 \text{ kNm}^2$ , zonder aandeel  $I_{sx}$ .
  - $D_z$  (met een vierkante sparring, omwille van eenvoud) van 0,09 m of  $t=0,05$  en 0,06m berekenen we:  
 $31476000 / (1 - 0,2^2) \times 1 \times [(0,050)^3 / 12 + (0,060)^3 / 12] = 932 \text{ kNm}^2$
  - $D_1 = \nu_c \sqrt{D_x D_y} = 878 \text{ kNm}^2$  en  $D_{xz} = \frac{1 - \nu_c}{2} \sqrt{D_x D_z} = 1756 \text{ kNm}^2$

- Isotrope  $\rightarrow$  orthotrope karakteristieken, voor een plaat van 0,39 m:

$$\begin{bmatrix} 21858 & 4372 & 0 \\ 4372 & 21858 & 0 \\ 0 & 0 & 8743 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 20685 & 878 & 0 \\ 878 & 932 & 0 \\ 0 & 0 & 1756 \end{bmatrix}$$

- Verhoudingen doorbuigingen t.o.v. zonder leiding, met 4 of 2: Niet-gescheurd; 1,10; 1,17 en gescheurd 1,11; 1,18 = ver weg van factor 1,40 gemeten

- Vervormingslijnen:  
355 kN.



# Vergelijking plaat- en schijfmodel met openingen

## Praktische aanbevelingen:

- Wees voorzichtig met insluitels, zeker met brede omdat moeilijk kan voldaan worden aan de basishypothese van lineair elastisch gedrag. Enig conservatisme is hier op zijn plaats.
- De koppeling van vervormingen via  $D_I$  en wringstijfheid  $D_{xy}$  maken dat de invloed blijkbaar niet enkel zichtbaar is in de richting van uitsparingen maar algemeen meetbaar wordt.
- Hier is nog verder onderzoek naar nodig, en dat is al decennia zo.

# Niet uitgevoerde controles

Overzicht:

- Dwarskracht en pons
- Aansluitvlakken
- De 8 variaties van minimumwapening
- Maximumwapening



# Dwarskracht en pons

Opletten met automatische controles of de afwezigheid ervan:

- Dwarskracht wordt nooit gecontroleerd; bereken  $V_{Rd,c}$  en ook nazicht van  $V_{Rd,max}$  is vereist.
- Wees beduchtzaam met automatische ponscontroles, de  $\beta$ -reductiefactor op de omtrek dient vaak manueel ingegeven te worden. Berekening hiervan via de stijfheid van de ondersteunende constructie is evenwel aan te bevelen.

# Aansluitvlakken

Een eindig elementen model veronderstelt vaste verbindingen in aansluitvlakken tussen beton, eventueel te vermijden door contactelementen. Hierdoor ontstaan schuifspanningen:

- Op basis van elasticiteitsleer (Jourawski):

$$v_{Edi} = \frac{S \cdot V_{Ed}}{I \cdot b_i} \leq v_{Rdi} \leq 0,5v_{fcd}$$

- Op basis van art 6.2.5 = plastische benadering of vereist ductiliteit = aanwezigheid van isotrope wapening

$$v_{Edi} = \frac{\beta \cdot V_{Ed}}{z \cdot b_i} \leq v_{Rdi} \leq 0,5v_{fcd}$$

- Nooit gecontroleerd door software

# Minimumwapening

Waar te beschouwen, hoe te betrekken en welke criteria zijn er (P. Baekeland)?

- Wapening tegen brosse breuk (1)
- Scheurwijdte beperking veroorzaakt door buiging (2)
- Scheurwijdte beperking veroorzaakt door trek (3)
- Berekende scheurwijdte beperking veroorzaakt door buiging (4)
- Berekende scheurwijdte beperking veroorzaakt door trek (5)
- Scheurwijdte beperking ten gevolge van verhinderde vervorming (6)
- Scheurwijdte beperking ten gevolge van verhinderde vervorming (7)
- Scheurwijdte beperking t.g.v. verhinderde vervorming met factor (8)

# Minimumwapening

Waar te beschouwen, hoe te betrekken en welke criteria zijn er (P. Baekeland)?

- Wapening tegen brosse breuk (1): Aanvinken of manuele berekening.
- Scheurbeheersing omwille van buiging (2): Vergl. 7.1 met  $0,4 \leq k_c \leq 1$  &  $f_{yk}$ .
- Scheurbeheersing omwille van trek (3): Vergl. 7.1 met  $k_c \leq 1$  &  $f_{yk}$ .
- Scheurwijdte beperking veroorzaakt door buiging (4): Vergl. 7.1 met  $0,4 \leq k_c \leq 1$  &  $\sigma_s$ .
- Scheurwijdte beperking veroorzaakt door trek (5): Vergl. 7.1 met  $k_c = 1$  &  $\sigma_s$ .
- Scheurwijdte beperking ten gevolge van verhinderde vervorming (6): EN1992-3
- Scheurwijdte beperking ten gevolge van verhinderde vervorming (7): EN1992-3
- Scheurwijdte beperking t.g.v. verhinderde vervorming met factor (8): Temp. Eq

# Minimumwapening

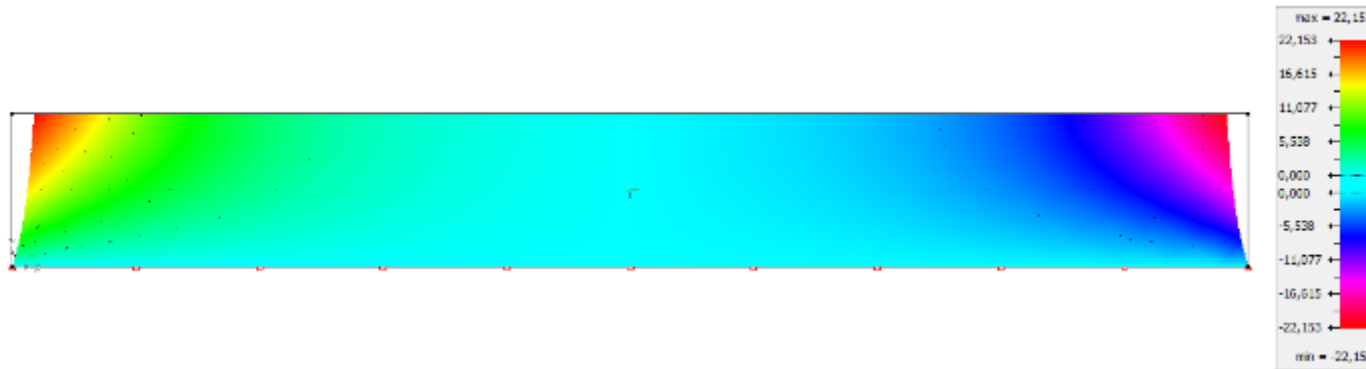
Wapeningsberekening ten gevolge van verhinderde/opgelegde vervormingen?

- Ten gevolge van steunpuntszetting:
  - Steunpuntszetting  $\Delta$  indien software dit toelaat
  - Equivalente veerconstante  $k'$  te berekenen in 2 stappen: Bereken reactie  $R$ , zetting =  $R/k + \Delta$  en  $k' = R/\text{zetting}$  en  $1/k' = (1/k + \Delta/R)$ .
- Ten gevolge van krimpverkorting:
  - Analytische berekening verkorting  $\epsilon_{cs}$  (of **verschil tussen fase i en i+1**).
  - Equivalente temperatuurlast  $\alpha_c \cdot \Delta T_{eq} = \epsilon_{cs}$  of  $\Delta T_{eq} = \epsilon_{cs}/\alpha_c$ . Typische waarde is bijvoorbeeld  $-0,0048/(10 \cdot 10^{-6}) = -480^\circ\text{K}$ ,
- FYI: Methode temperatuurverkorting kan ook voorspanningseffect benaderen.

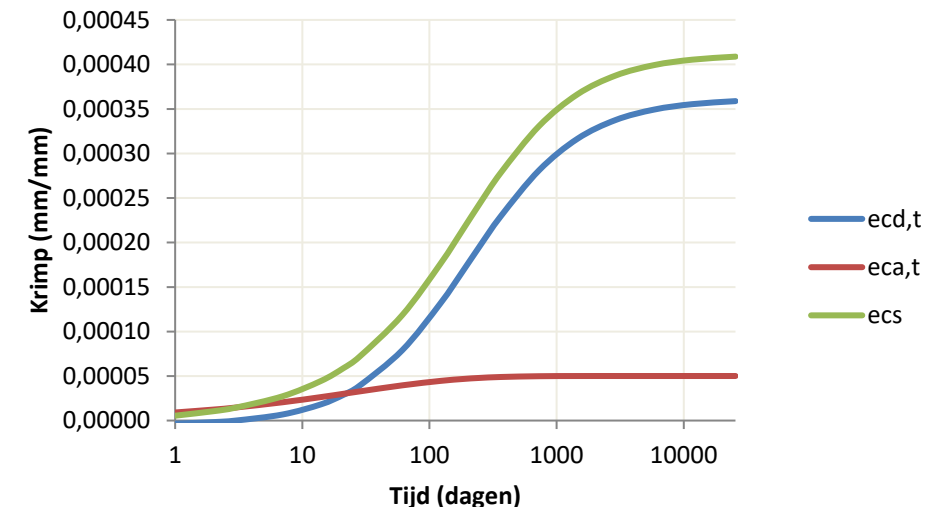
# Minimumwapening

Wapeningsberekening ten gevolge van opgelegde vervormingen?

- Ten gevolge van krimpverkorting: Wand (24,3 m) onderworpen aan  $-480^{\circ}\text{K}$ :



- Opletten met wanden tegen secanspalenwand = éézijdige volledige verandering.
- Krimpverschil = functie van uitvoeringstermijnen:



# Maximumwapening

Zijn er maxima van toepassing?

- Voor scheurbeheersing op basis van EN 1992-1-1 (met vb. voor C30/37), Vergl. 7.1:

$$A_{s,max}\sigma_s = k_c k f_{ct,eff} A_{ct} = 1 \cdot 1 \cdot 2,9 \cdot h \cdot 1000 = 2900h$$

- Op basis van maximale wrijvingsweerstand voor funderingsplaten, met  $L = 60$  m en  $\varphi = 30^\circ$ :

$$A_{s,max}\sigma_s = G \tan(\varphi) = \frac{L}{2} \cdot h \cdot 25 \cdot \tan(30^\circ) = 433h$$

- Met verzwaringen onder kolommen  $a \times a \times c$  in stramien  $b \times b$  (bvb  $2^2 \times 0,2/6^2$ ):

$$A_{s,max}\sigma_s = G \tan(\varphi) + K_0 \gamma \frac{a \cdot c^2}{b \cdot 2} = \frac{L}{2} \cdot h \cdot 25 \cdot \tan(30^\circ) + 0,5 \cdot 18 \cdot \frac{2 \cdot 0,2^2}{6 \cdot 0,2} = 433h + 0,06$$

of

$$A_{s,max}\sigma_s = G' \tan(\varphi) = \frac{L}{2} \cdot (h \cdot 25 + c \cdot 18) \cdot \tan(30^\circ) = 433h + 62 \text{ kN/m}$$

- Met palen in stramien  $b \times b$ , uitwijking  $f$  te bepalen i.f.v. krimp,  $l = 1$  m (?) en  $I = 0,049\varnothing^4$ :

$$A_{s,max}\sigma_s = G \tan(\varphi) + \frac{L}{b} \frac{3EI f}{l^3}$$

# Aankomende regelgeving

Overzicht:

- Bijlage F (informatief): Veiligheidsevaluatie voor niet-lineaire analyse
- Bijlage G (normatief): Ontwerp van membraan, schaal en plaa-telementen



# Veiligheidsevaluatie voor niet-lineaire analyse

## Toepassingsgebied

- Ontwerpen gemaakt m.b.v. niet-lineaire analyse methoden - een gescheurde berekening (materiaal) en een 2<sup>e</sup> orde berekening (geometrisch) zijn dit.
- Consistentie met veiligheidsfilosofie EN 1990 dient bewaard.
- Software dient getest met benchmark-proeven en een gevoeligheidsanalyse van de betrokken parameters dient uitgevoerd.
- Indien gebruikt voor weerstandsberekening: evaluatie op basis van ULS.
- Drie veiligheidsbeoordelingen zijn toegelaten:
  - PFM: Methode van de partiële veiligheidsfactoren:  $R_d = R\{X_d; a_d\} / \gamma_{Rd}$ .
  - GFM: Methode van de globale veiligheidsfactor:  $R_d \approx R\{X_m; a_{nom}\} / (\gamma_R^* \cdot \gamma_{Rd})$ .
  - Volledig probabilistische methoden, inclusief effect modelonzekerheden.

# Veiligheidsevaluatie voor niet-lineaire analyse

## Modelonzekerheid

- Pro memorie LEA: Veiligheid beton ( $\gamma_C = 1,50$ ) = product van drie factoren:

$$\gamma_C = \gamma_c \cdot \gamma_{Rd1} \cdot \gamma_{Rd2}$$

Waarbij:  $\gamma_c$  = onzekerheid materiaal (1,35),  $\gamma_{Rd1}$  = modelonzekerheden (1,05) en  $\gamma_{Rd2}$  = geometrische onzekerheden (1,05) referentie = *fib* 80.

- Algemene waarde voor  $\gamma_{Rd1}$  wordt 1,30, voor 1D balken met buiging als faalmechanisme wordt dit gereduceerd naar 1,06 ( $\approx 1,05$ ).
- Gevoeligheidsanalyse op basis van drie voorbereidende berekeningen:
  - Gemiddeld beton met ontwerp wapeningsparameters.
  - Ontwerp beton met gemiddelde wapeningsparameters.
  - Ontwerp beton met ontwerp wapeningsparameters.

# Ontwerp van membraan, schaal en plaa-telementen

Toepassingsgebied:

- Normatieve bijlage voor ontwerp van vlakke elementen zonder discontinuïteiten.
- Optimale wapening (zie dag 2, Peter Minne), betonspanning en schoorhoek:

Conditions	$\cot \theta^*$	$f_{tdx}^*$	$f_{tdy}^*$	$\sigma_{cd}^*$
$\sigma_{Edx} \geq - \tau_{Edxy} $ $\sigma_{Edy} \geq - \tau_{Edxy} $	1	$\sigma_{Edx} +  \tau_{Edxy} $	$\sigma_{Edy} +  \tau_{Edxy} $	$2 \tau_{Edxy} $
$\sigma_{Edx} \leq \sigma_{Edy}$ $\sigma_{Edx} < - \tau_{Edxy} $ $\sigma_{Edx}\sigma_{Edy} \leq \tau_{Edxy}^2$	$\frac{-\sigma_{Edx}}{ \tau_{Edxy} }$	0	$\sigma_{Edy} + \frac{\tau_{Edxy}^2}{ \sigma_{Edx} }$	$ \sigma_{Edx}  \left( 1 + \left( \frac{\tau_{Edxy}}{\sigma_{Edx}} \right)^2 \right)$
$\sigma_{Edx} \geq \sigma_{Edy}$ $\sigma_{Edy} < - \tau_{Edxy} $ $\sigma_{Edx}\sigma_{Edy} \leq \tau_{Edxy}^2$	$\frac{ \tau_{Edxy} }{-\sigma_{Edy}}$	$\sigma_{Edx} + \frac{\tau_{Edxy}^2}{ \sigma_{Edy} }$	0	$ \sigma_{Edy}  \left( 1 + \left( \frac{\tau_{Edxy}}{\sigma_{Edy}} \right)^2 \right)$

# Ontwerp van membraan, schaal en plaa-telementen

Toepassingsgebied:

- Optimale onderwapening (sagging) en bovenwapening (hogging)

Conditions	Required capacity $m_{Rdx}$	Required capacity $m_{Rdy}$
$m_{Edx} \geq - m_{Edxy} $ $m_{Edy} \geq - m_{Edxy} $	$m_{Rdx} \geq m_{Edx} +  m_{Edxy} $	$m_{Rdy} \geq m_{Edy} +  m_{Edxy} $
$m_{Edx} \leq m_{Edy}$ $m_{Edx} < - m_{Edxy} $ $m_{Edx}m_{Edy} \leq m_{Edxy}^2$	0	$m_{Rdy} \geq m_{Edy} + \frac{m_{Edxy}^2}{ m_{Edx} }$
$m_{Edx} \geq m_{Edy}$ $m_{Edy} < - m_{Edxy} $ $m_{Edx}m_{Edy} \leq m_{Edxy}^2$	$m_{Rdx} \geq m_{Edx} + \frac{m_{Edxy}^2}{ m_{Edy} }$	0
$m_{Edx} < 0$ $m_{Edy} < 0$ $m_{Edx}m_{Edy} > m_{Edxy}^2$	0	0

NOTE Hogging moments with negative sign.

Conditions	Required capacity $m'_{Rdx}$	Required capacity $m'_{Rdy}$
$m_{Edx} \leq  m_{Edxy} $ $m_{Edy} \leq  m_{Edxy} $	$m'_{Rdx} \geq -m_{Edx} +  m_{Edxy} $	$m'_{Rdy} \geq -m_{Edy} +  m_{Edxy} $
$m_{Edx} \geq m_{Edy}$ $m_{Edx} >  m_{Edxy} $ $m_{Edx}m_{Edy} \leq m_{Edxy}^2$	0	$m'_{Rdy} \geq -m_{Edy} + \frac{m_{Edxy}^2}{ m_{Edx} }$
$m_{Edx} \leq m_{Edy}$ $m_{Edy} >  m_{Edxy} $ $m_{Edx}m_{Edy} \leq m_{Edxy}^2$	$m'_{Rdx} \geq -m_{Edx} + \frac{m_{Edxy}^2}{ m_{Edy} }$	0
$m_{Edx} > 0$ $m_{Edy} > 0$ $m_{Edx}m_{Edy} > m_{Edxy}^2$	0	0

NOTE Hogging moments with negative sign.

# Niet behandelde vragen

Overzicht:

- Vraag 1, betonwand.
- Vraag 2, interactie.

# Vraag 1, betonwand

Een betonnen wand met een deuropening, dewelke achteraf werd gezaagd en versterkt met lijmwapening. Volgende vragen kwamen op bij ons bij het berekenen van deze wand:

- Als trekker onder de deuropening is een extra staaf gemodelleerd, in de dikte van de plaat. Hoe wordt deze staaf best gekoppeld met de wand? Nu zijn er extra knopen gedefinieerd op de rand van de plaat.
- Op de hoekpunten van de deuren zijn middelingstroken toegepast. Hoe groot mogen deze genomen worden, voor platen hanteren wij standaard “ $2*d$ ”, voor dit voorbeeld hebben we veiligheidshalve “ $1*d$ ” aangenomen, center tot wand.
- Hoe kan de contactspanning in het oplegpunt het best worden gemodelleerd om voor de contactspanningen in de knoop rekening te houden met het reële oplegoppervlak (vb: 15 x 30cm).
- Hoe kunnen de betonspanningen het gemakkelijkste gelezen worden?
- ...

# Vraag 1, betonwand

Een betonnen wand met een deuropening, dewelke achteraf werd gezaagd en versterkt met lijmwapening. Volgende vragen kwamen op bij ons bij het berekenen van deze wand:

- Koppeling trekker → Overdracht schuifspanningen garanderen, bedoeling van extra knopen is me niet duidelijk.
- Breedte middelingstroken, de meewerkende hoogte  $d_{eff}$  van een plaat (of wand) kan gelijk genomen worden aan  $(d_y + d_z)/2$ .
- Contactspanning in het oplegpunt → eenvoudigst via (rotatie)veren.
- Hoe kunnen de betonspanningen het gemakkelijkste gelezen worden → Door toepassing van Navier op basis van krachten uit de (rotatie)veren.
- Controleer ook maximale piekwapening, zie dag 2, slide 61 = factor 4,6.

# Vraag 2, interactie

Volgende zaken merken wij soms wat moeilijkheden mee:

- Interactie tussen stalen liggers en betonplaten indien volledig gemodelleerd. Soms werkt het geheel niet samen of merken we andere zaken die ons lijkt af te wijken van de 2D benadering die wij doen ter controle.
- Betonwandliggers met grote openingen (bvb deuren)
- Correcer benaderen van ventilatiekanalen die in de opstort voorzien worden van predallen of het dimensioneren van predallen met grote dikte waar isomo in voorzien wordt i.f.v. besparing in gewicht.



# Vraag 2, interactie

Volgende zaken merken wij soms wat moeilijkheden mee:

- Interactie tussen stalen liggers en betonplaten → Overdracht schuifspanningen betrouwbaar of niet?
  - Indien noodzakelijk: schuifspanningsoverdracht controleren en desnoods deuvelds aanbrengen.
  - Indien niet noodzakelijk en niet betrouwbaar: manuele berekening.
- Betonwandliggers met grote openingen → Zie voorgaande.
- Ventilatiekanalen in de opstort → Zie voorbeelden.

# Vragen en antwoorden

Voor verdere vragen, opmerkingen, suggesties:

Contact: [tom.molkens@kuleuven.be](mailto:tom.molkens@kuleuven.be)

Forumavond "Robuuste staalconstructies, (g)een evidentie"

<https://www.kuleuven.be/campussen/campus-de-nayer/formulieren/forumavond-aikul-april2024>