



Enkele specifieke toepassingen van Eurocode 2: minimum wapening en stortvoegen



Prof. Dr. ir. Luc Taerwe, Laboratorium Magnel voor Betononderzoek, Universiteit Gent

Deze voordracht is gebaseerd en afgestemd op



Retour d'expérience dans l'application de l'Eurocode 2

**Application des règles relatives à la vérification des surfaces de reprise
Application des règles relatives aux quantités minimales d'armatures**

Ir J.F. Cap, Expert Engineer SECO, Professeur UCL

Enkele specifieke toepassingen van Eurocode 2:

Deel 1 Minimum wapening

Minimum wapeningsdoorsnede

EN 1992-1-1, 9.1(3): *Minimale oppervlakten van wapeningsdoorsneden zijn gegeven om bros bezwijken en wijde scheuren te voorkomen en tevens om krachten als gevolg van verhinderde vervormingen op te nemen.*

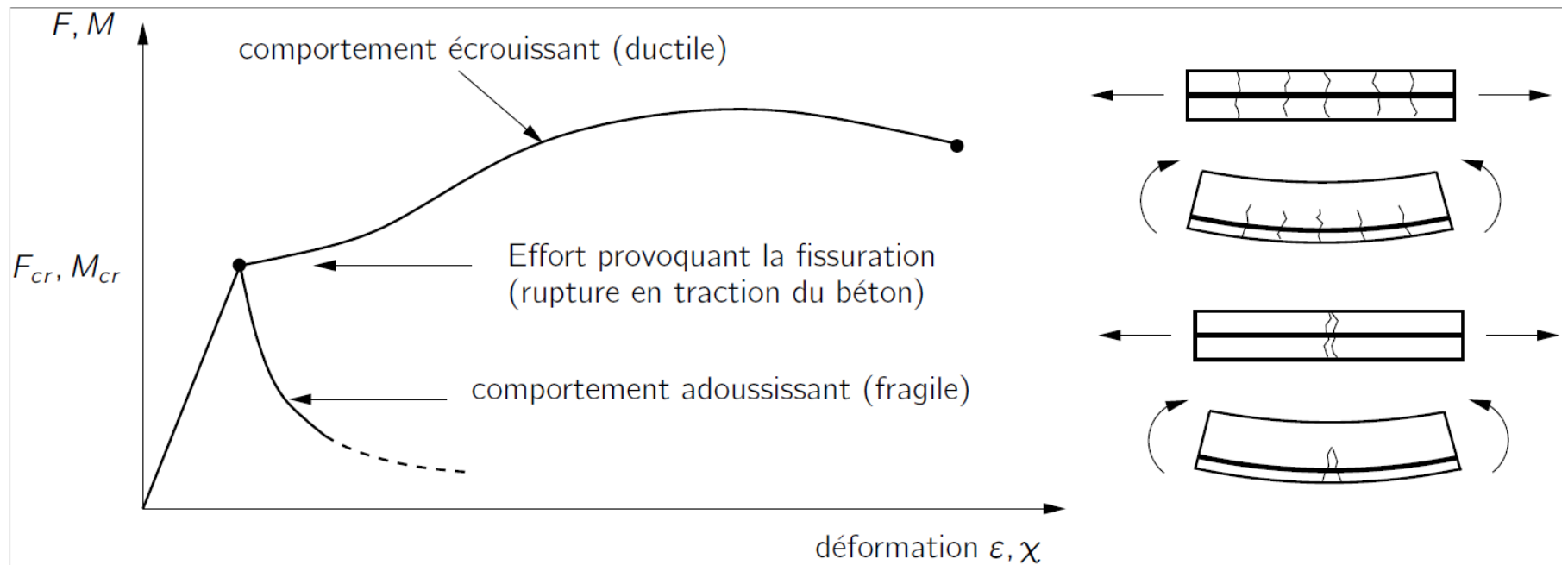
scheurvorming te wijten aan

- **inwendige of uitwendige verhindering van vervormingen** zoals ten gevolge van
 - niet-lineaire temperatuursgradiënten veroorzaakt door hydratatiewarmte of uitwendige opwarming of afkoeling,
 - niet-uniforme krimp over de dwarsdoorsnede,
 - verhinderde krimp door de verbinding van een nieuw gestort betonelement tegen een ouder en reeds verhard element (bv. een wand op een funderingsplaat),
 - krimp verhinderd door de bodemwrijving bij een plaat op volle grond,...
- **uitwendig opgelegde vervormingen** (bv. steunpuntszakkingen)

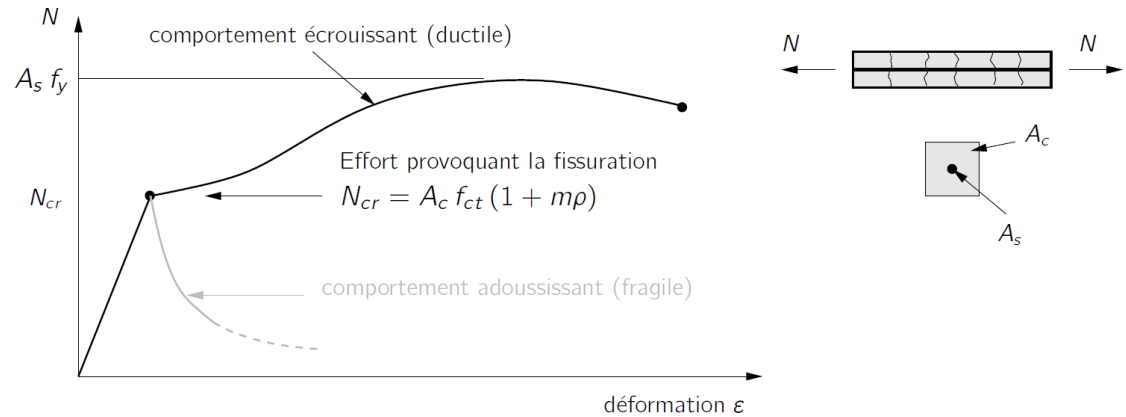




Niet-brosse breuk: vereist “verstevigingsgedrag” na scheurvorming



Axiale trek



De wapening $A_{s,min}$ moet bij scheurvorming de vrijkomende trekkracht kunnen opnemen zonder dat een vooropgestelde staalspanning σ_s wordt overschreden

$$N_{cr} = A_e \cdot f_{ct} = f_{ct} A_c (1 + \sigma_s \alpha_s) = A_{s,min} b_s$$

$$A_{s,min} b_s = A_c \cdot f_{ct} \rightarrow A_{s,min} = \frac{f_{ct} A_c}{b_s}$$

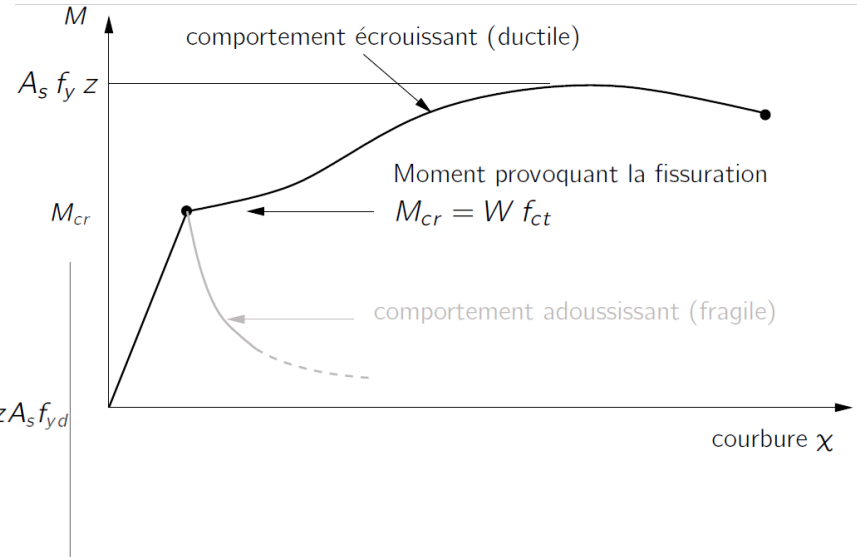
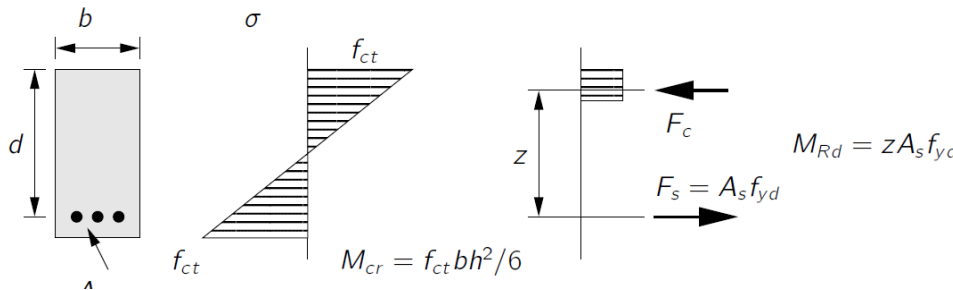
brosse breuk vermijden: $b_s = f_{yd} \rightarrow \alpha_{min} = \frac{A_{s,min}}{A_c} = \frac{f_{ct}}{f_{yd}}$

voor C25/30 en BE500S: $\alpha_{min} = \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} = \frac{2,6}{435} \cong 0,6\% \quad \text{vrij hoog!}$

Enkelvoudige buiging

$$M_{cr} = f_{ct} W_c = f_{ct} \frac{bh^2}{6}$$

$$M_{Rd} = f_{yd} A_s z \approx f_{yd} A_s 0,9 d$$



$$A_{s,min} = \frac{f_{ct} b h^2}{6 \times 0,9 d f_{yd}} \approx \frac{f_{ct}}{f_{yk}} \frac{b d^2 1,1^2 \times 1,15}{6 \times 0,9 d} \approx 0,26 b d \frac{f_{ct}}{f_{yk}}$$

Voorwaarde in EN 1992-1-1, 9.2.1.1(1):

Minimum trekwapening in een balk
$A_{s,min} \geq 0,26 b_t d f_{ctm} / f_{yk}$
$A_{s,min} \geq 0,0013 b_t d$

$$f_{ctm} = 2,5 \text{ N/mm}^2 \text{ en } f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

Specifieke gevallen

EN 1992-1-1: 9.2.1.1(4) Voor voorgespannen elementen met blijvend niet-hechtende spanelementen of met uitwendige voorspankabels moet worden getoetst of het uiterst opneembare moment groter is dan het scheurmoment. Een weerstandbiedend moment gelijk aan 1,15 maal het scheurmoment is voldoende.

EN 1992-1-1: 9.2.1.1(1) Opmerking 2: Als alternatief mag $A_{s,min}$ voor secondaire elementen, indien enig risico van bros bezwijken kan worden geaccepteerd, gelijk worden gekozen aan 1,2 maal de vereiste oppervlakte volgens de UGT-toetsing.

EN 1992-1-1: 9.3.1.1(1) Opmerking: In aanvulling op Opmerking 2 van 9.2.1.1 (1) mag, voor platen waarbij het risico van bros bezwijken klein is, $A_{s,min}$ gelijk worden gekozen aan 1,2 maal de benodigde oppervlakte volgens de UGT-toetsing.

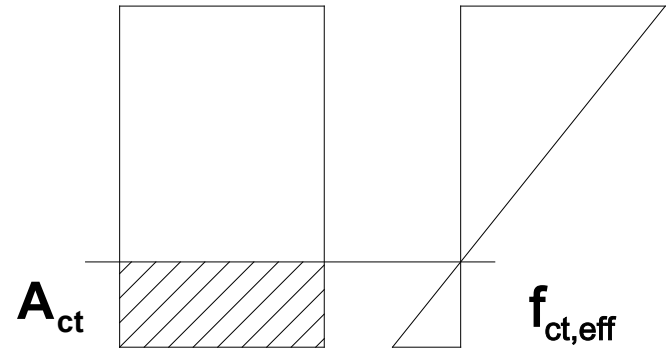
Veralgemening

Zie NBN EN1992-1-1: 7.3.2(2)

$$A_{s,min} \sigma_s = A_{ct} \cdot f_{ct}$$

$$A_{s,min} \sigma_s = k_c k f_{ct,eff} A_{ct}$$

$$A_{s,min} = \frac{k_c k f_{ct,eff} A_{ct}}{\sigma_s} \quad (*)$$



() indien niet voldaan:*

→ *Hoofdstuk 12 – Ongewapende en lichtgewapende betonconstructies*

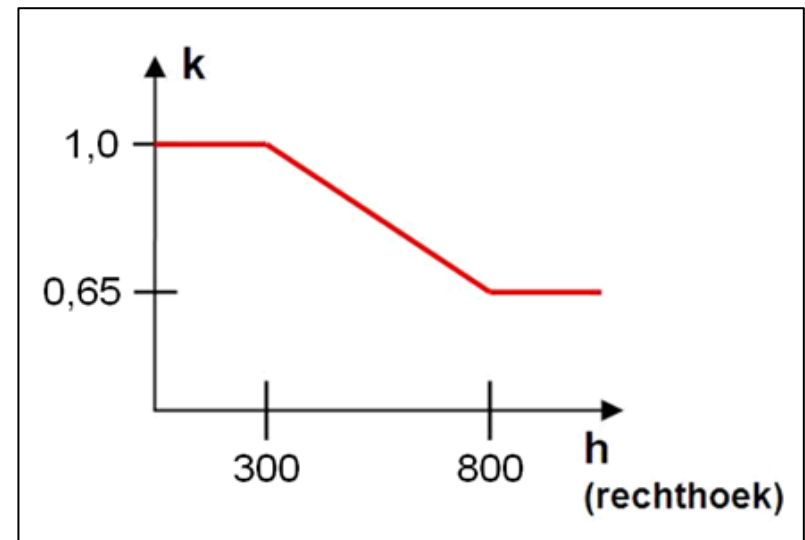
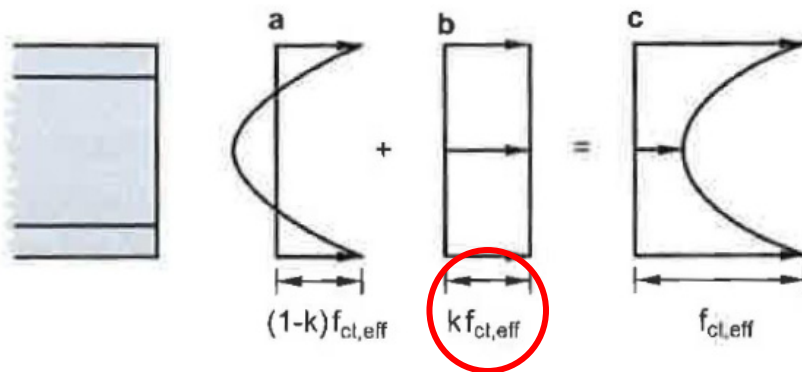
a) $f_{ct,eff}$: effectieve treksterkte op moment van scheurvorming

(f_{ctm} voor $t \geq 28d$; $f_{ctm}(t)$ met $t < 28d$)

b) A_{ct} : oppervlakte van het beton in de trekzone (uiterste vezel $f_{ct,eff}$)

c) σ_s : toelaatbare spanning in de wapening (f_{yk} indien enkel verhinderde vervormingen; tabellen voor beperking scheurwijdtes)

d) **k**: reductie van de effectieve treksterkte ten gevolge van een niet-lineaire verdeling van eigenspanningen veroorzaakt door verhinderde inwendige vervormingen (hydratatiewarmte, verhinderde krimp al dan niet ten gevolge van de aanwezige wapening, verschillend krimp- en kruipgedrag ten gevolge van verschillende uitdrogingsomstandigheden of dikte van aan elkaar grenzende zones, niet-lineair temperatuursverloop, ...).



Specifieke regels voor flenzen van T-doorsneden en kokerliggers en voor Elementen met voorspanwapening

$$A_{s,min} = \frac{k_c k f_{ct,eff} A_{ct}}{b_s}$$

e) k_c : reductiefactor i.f.v. spanningsverdeling bij scheurvorming

- zuivere trek: $k_c = 1$

- buiging zonder normaalkracht: $k_c = 0,4$

$$M_{cr} = A_{s,min} b_s z$$

$$\frac{f_{ct,eff} A_{ct}}{2} \frac{2h}{3} = A_{s,min} b_s 0,85 h \Rightarrow A_{s,min} = \frac{0,4 f_{ct,eff} A_{ct}}{b_s}$$

Minimum wapeningsdoorsnede bij buiging

$$f_{ct,eff} = f_{ctm}; A_{ct} = b_t h/2; h = 1,1d; \sigma_s = f_{yd} = f_{yk}/1,15$$

$$A_{s,min} \geq 0,26 b_t d f_{ctm} / f_{yk}$$

Beheersing van scheurwijdte na scheurvorming zonder directe berekening

$$A_{s,min} = \frac{k_c k_{f_{ct,eff}} A_{ct}}{b_s}$$

a) Scheurvorming ten gevolge van verhinderde vervormingen

Staalspanning σ_s [MPa]		160	200	240	280	320	360	400	450
ϕ_s^* [mm] maximum staafdiameter	$w_k = 0,4$ mm	40	32	20	16	12	10	8	6
	$w_k = 0,3$ mm	32	25	16	12	10	8	6	5
	$w_k = 0,2$ mm	25	16	12	8	6	5	4	

b) Scheurvorming ten gevolge van belastingen: voorgaande tabel of onderstaande tabel

Staalspanning σ_s [MPa]		160	200	240	280	320	360
maximum staafafstand [mm]	$w_k = 0,4$ mm	300	300	250	200	150	100
	$w_k = 0,3$ mm	300	250	200	150	100	50
	$w_k = 0,2$ mm	200	150	100	50		

Aangenomen waarden van de parameters:

$$f_{ct,eff} = 2,9 \text{ MPa} \quad h_{cr} = 0,5 h \quad c = 25 \text{ mm} \quad h-d = 0,1h$$

Aanpassing van de maximum staafdiameter voor andere waarden van de parameters:

- in geval van buiging

$$\phi_s = \phi_s^* \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \cdot \frac{k_c h_{cr}}{2(h-d)}$$

- in geval van centrische trek

$$\phi_s = \phi_s^* \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \cdot \frac{h_{cr}}{8(h-d)}$$

Indien de gehele doorsnede onder trek staat, is $h - d$ de minimum afstand vanaf het zwaartepunt van de wapeningslaag tot de rand van het beton (beschouw elke zijde wanneer de staven niet symmetrisch zijn geplaatst).

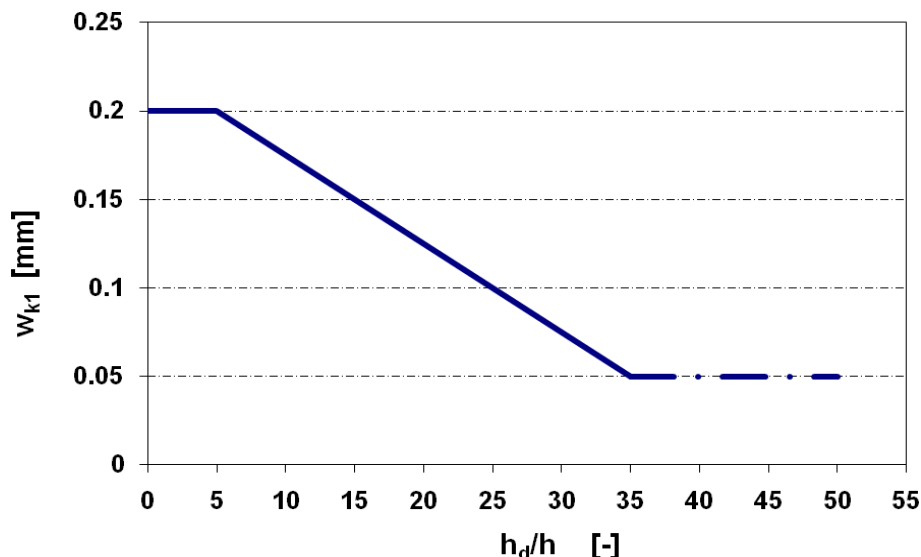
Waarom ook een tabel in functie van de staafafstand s ?

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{n \pi \phi^2}{4 bd} \quad \text{en} \quad s \cong b/n \quad \text{zodat} \quad \rho \cong \frac{\pi \phi^2}{4 s d}$$

EN 1992-3:2006 - “Constructies voor keren en opslaan van stoffen”

Classificatie i.f.v. beschermingsgraad tegen lekken

Water-dichtheidsklasse	Eisen met betrekking tot lekkage
0	Een zeker lekdebiet is toelaatbaar of de lekkage van vloeistof heeft geen gevolgen.
1	Lekkage moet beperkt worden tot een klein lekdebiet. Enkele oppervlakkige vochtplekken zijn toelaatbaar.
2	Minimaal lekdebiet. Vochtplekken doen geen afbreuk aan het uitzicht.
3	Geen lekdebiet toelaatbaar.



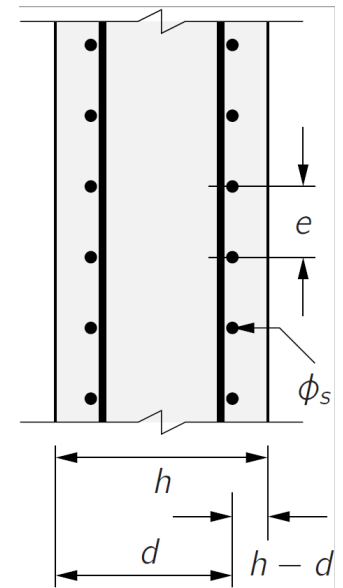
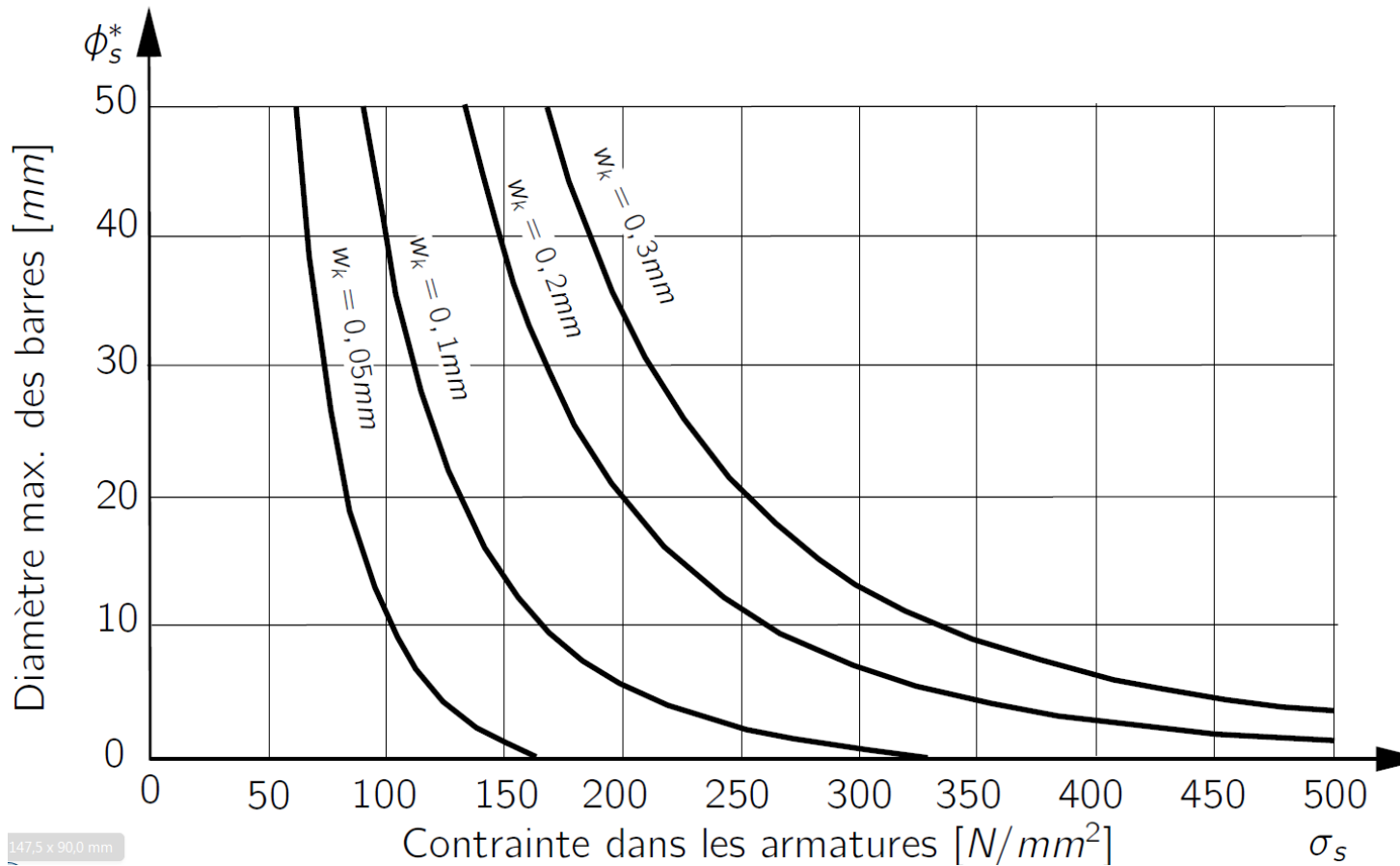
$$h_D/h \leq 5 \rightarrow w_{k1} = 0,2 \text{ mm}$$

$$h_D/h \geq 35 \rightarrow w_{k1} = 0,05 \text{ mm}$$

h_D = Hydrostatische druk

h = Dikte wand

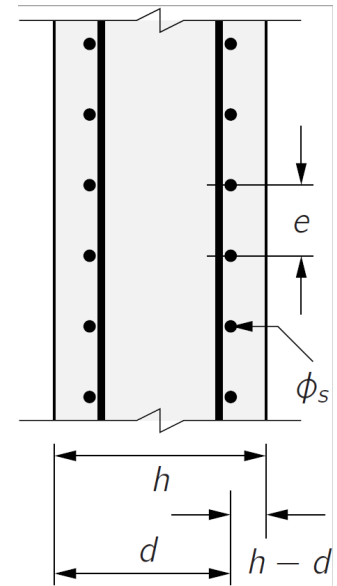
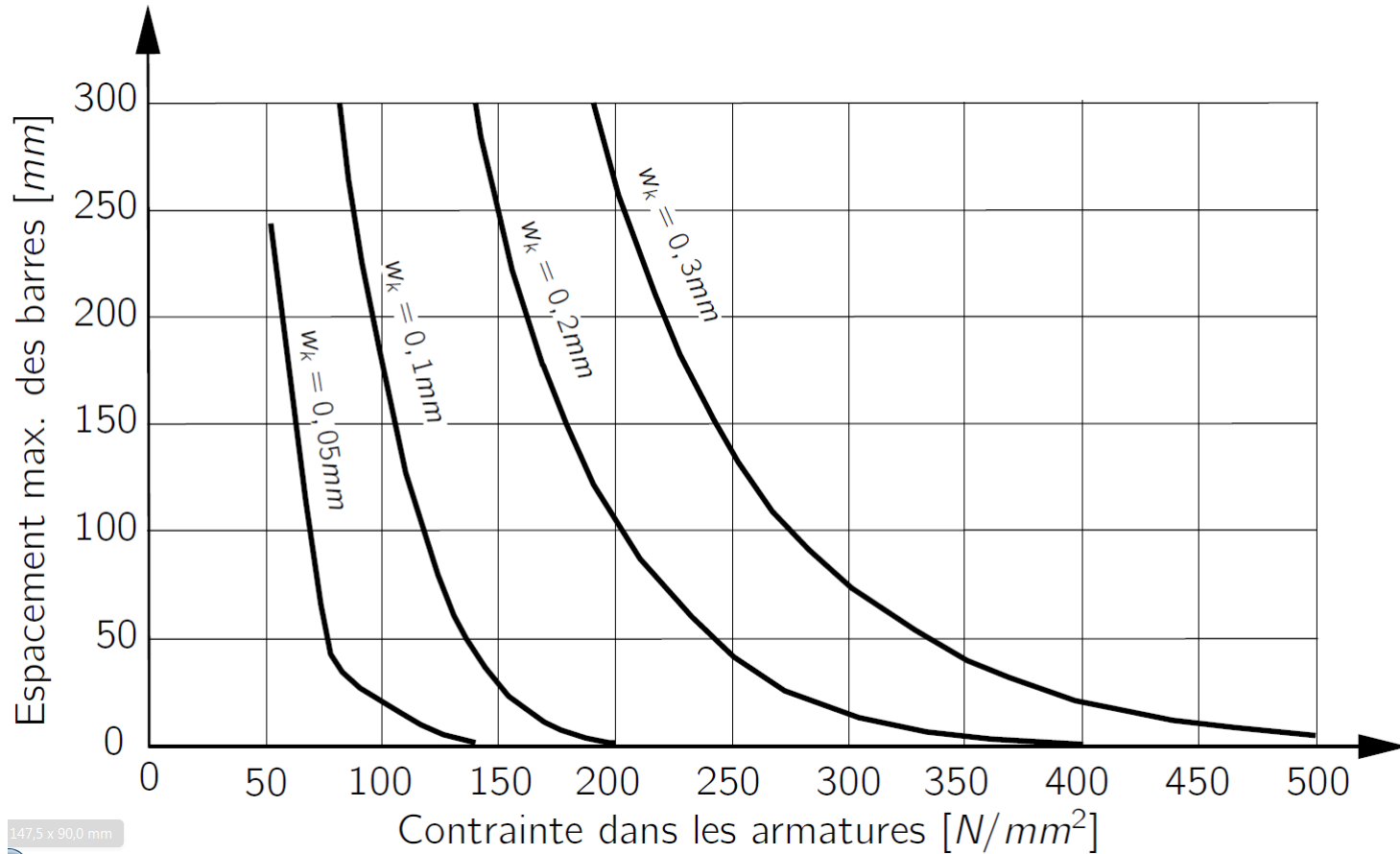
a) Scheurvorming ten gevolge van verhinderde vervormingen



aanpassing

$$\phi_s = \phi_s^* \frac{f_{ct,eff}}{2.9} \frac{h}{10(h-d)}$$

b) Scheurvorming ten gevolge van belastingen: voorgaande grafiek of onderstaande grafiek



Vaststellingen bij de praktische toepassing

Beton C30/37 ; $f_{ct,eff} = 2,9 \text{ MPa}$; $h = 300 \text{ mm}$; $c = 30 \text{ mm}$; $w_{k1} = 0,2 \text{ mm}$; $\phi = 12 \text{ mm}$

$$\phi_s^* = \phi_s \frac{2,9}{f_{ct,eff}} \frac{10(h-d)}{h} = 12 \times \frac{2,9}{2,9} \times \frac{10 \times 36}{300} = 14,4 \text{ mm}$$

diagram $(\phi_s; \sigma_s; w_k) \rightarrow \sigma_s \approx 230 \text{ MPa}$

$$A_{s,min} = \frac{k_c k_{f,eff} A_{ct}}{b_s} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 2,9 \cdot 300 \cdot 1000}{230} = 3783 \text{ mm}^2/\text{m} \quad (\sigma_s \approx 1,3\%) \text{ Veel!}$$

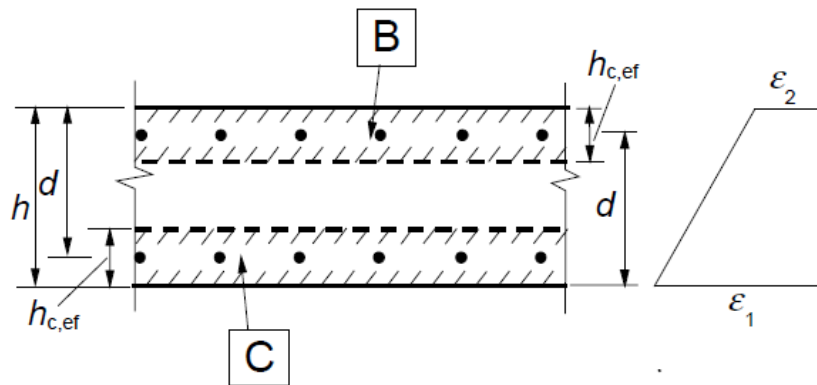
of $1892 \text{ mm}^2/\text{m}$ per kant

Minder wapening plaatsen om economische redenen

- Eventueel achteraf injecteren
- Verhinderde vervormingen beperken door goede nabehandeling, betonsamenstelling, betonneren in fasen, ...
- Steeds $A_{s,min}$ voor $\sigma_s = f_{yk}$ respecteren ($\rightarrow 870 \text{ mm}^2/\text{m}$ per kant)!

7.3.2(3) ... voorspanelementen met aanhechting in de trekzone ...

$A_{c,eff}$ is de effectieve oppervlakte van het beton onder trek met hoogte $h_{c,eff}$ die de wapening of voorspanelementen omgeeft, waarin $h_{c,eff}$ de kleinste waarde is van $2,5(h-d)$, $(h-x)/3$ en $h/2$



$$h_{c,eff} = 2,5 (h-d) = 2,5 \cdot 36\text{mm} = 90\text{mm}$$

vervang in

$$A_{s,min} = \frac{k_c k_f f_{ct,eff} A_{ct}}{\sigma_s} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 2,9 \cdot 300 \cdot 1000}{230} = 3783 \text{ mm}^2/\text{m} \quad (\rho = 1,3\%)$$

$$300 \text{ door } 2 \cdot 90 = 180 \text{ mm}$$

$$A_{s,min} = 3783 \cdot 180 / 300 = 2270 \text{ mm}^2 \text{ of } \rho = 0,76\%$$

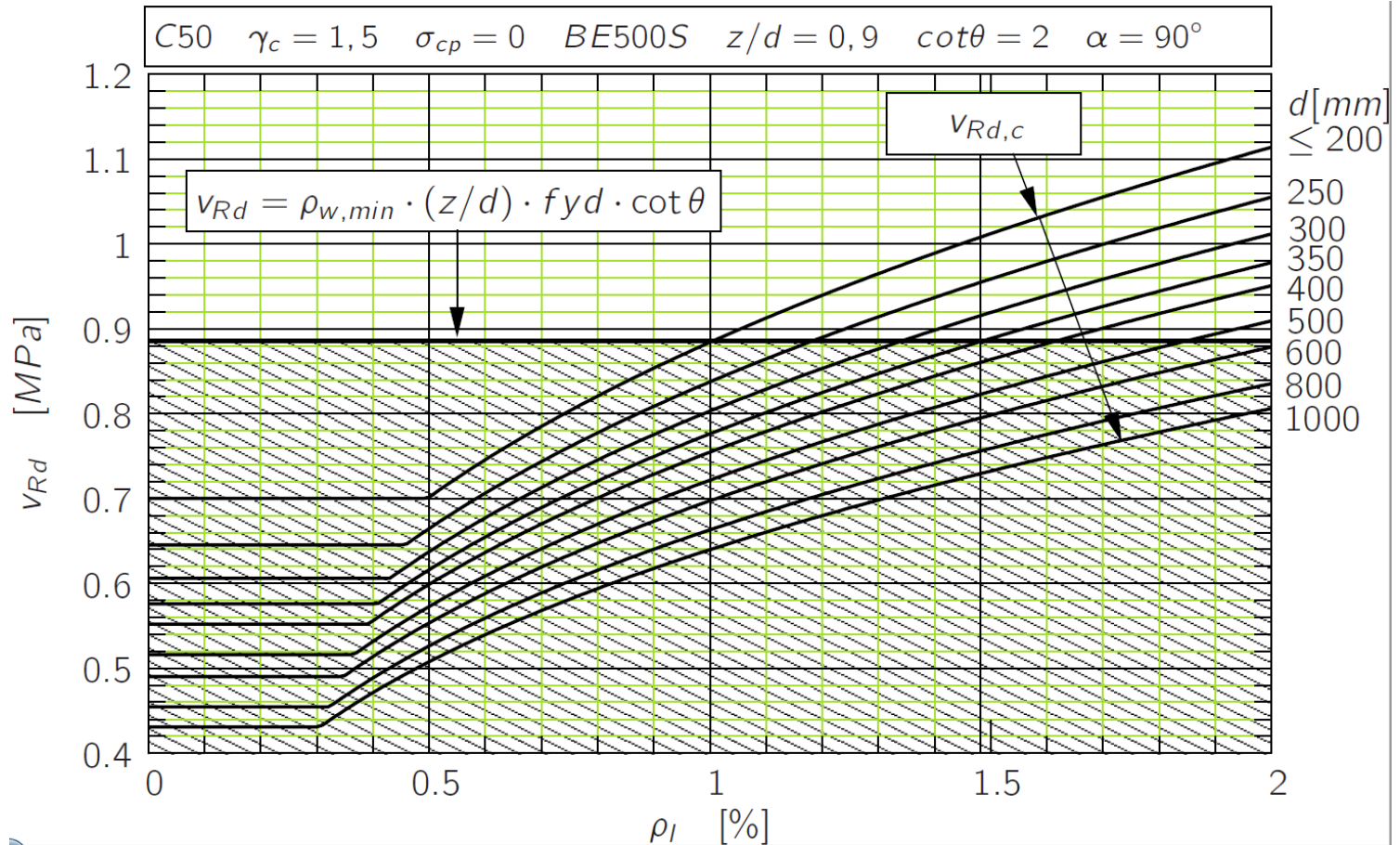
Recente ervaring met sluisvloeren en – muren (Lanaye, Ivoz Ramet, Antwerpen):

30 cm²/m tot 40 cm²/m per kant is over het algemeen voldoende om “ongecontroleerde” scheurwijdten te voorkomen, dit in het kader van een “globale” strategie (gepaste nabehandeling, betonsamenstelling op maat, betonneren in fasen, ...)

Minimum dwarskrachtwapening

$$\rho_{w,min} = 0,08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{ywk}}$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s b_w \sin \varphi}$$



$$\alpha_{w,min} = 0,08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{ywk}} = 0,08 \frac{f_{ck}^{1/2}}{f_{ywk}}$$

$$V_{Rd,c} = \left[\frac{0,18}{\gamma_c} k (100 \rho_{\ell} f_{ck})^{1/3} \right] b_w d = \tau_{Rd,c} b_w d$$

$$V_{Rd,c,min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} b_w d = \tau_{Rd,c,min} b_w d$$

Waarden van $\tau_{Rd,c}$ en $\tau_{Rd,c,min}$ voor $k = 1,8$

	ρ_{ℓ} (%)	f_{ck} (N/mm ²)				
		20	30	40	50	60
$\tau_{Rd,c}$	1,0	0,52	0,60	0,66	0,71	0,75
$\tau_{Rd,c,min}$		0,32	0,39	0,45	0,50	0,55

x 1,55

x 1,29

→ gem. 1,42

$$V_{Rd,c,min}^* = 1,42 \cdot 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} b_w d = 0,1208 f_{ck}^{1/2} b_w d$$

$$V_{Rd,c,min}^* = 0,1208 f_{ck}^{1/2} b_w d$$



$$V_{Rd,s,min} = \frac{2 z}{s} A_{sw,min} \frac{f_{ywk}}{1,15} \quad (\cotg \theta = 2)$$

$$0,1208 f_{ck}^{1/2} b_w d = \frac{2(0,9d)}{s} A_{sw,min} \frac{f_{ywk}}{1,15}$$

$$\rightarrow \rho_{w,min} = 0,0772 \frac{f_{ck}^{1/2}}{f_{ywk}}$$

$$\rho_{w,min} = 0,08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{ywk}}$$

Enkele specifieke toepassingen van Eurocode 2:

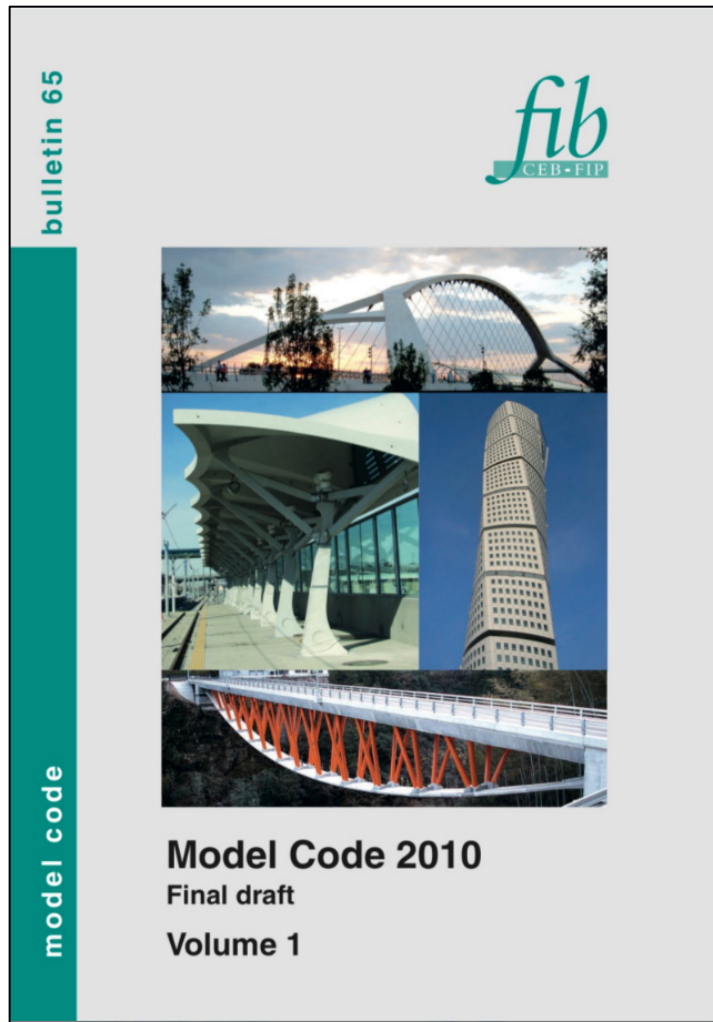
Deel 2

Afschuiving in het aansluitvlak tussen op verschillende
tijdstippen gestort beton (stortvoegen)

EN 1992-1-1 : 6.2.5 “Afschuiving in het aansluitvlak tussen op verschillende tijdstippen gestort beton”

Model Code 2010 : 7.3.3.6

“Shear at the interface between concrete cast at different times”



fib journal Structural Concrete

Technical Paper

Norbert Randl

DOI: 10.1002/suco.201300003

Design recommendations for interface shear transfer in *fib* Model Code 2010

Interface shear transfer between differently aged concretes is a topic that crops up frequently and in different situations in structural design. In the fib Model Code for Concrete Structures 2010 [1] the fundamental basics of concrete-to-concrete load transfer are given in section 6.3 and the corresponding design rules in 7.3.3.6. The different potential mechanisms contributing to the shear resistance along the interface, i.e. adhesive bond, aggregate interlock, friction and dowel action, are thus combined and their relationship taken into account by interaction factors. This article summarizes the most important results from past and ongoing studies and presents the background to the theory forming the design basis of fib Model Code 2010, the “extended shear friction theory” (ESF).

1 Relevance and field of application

Concrete-to-concrete load transfer becomes a relevant

– take into account the effect of external clamping forces or connectors (e.g. reinforcing bars) crossing the interface.

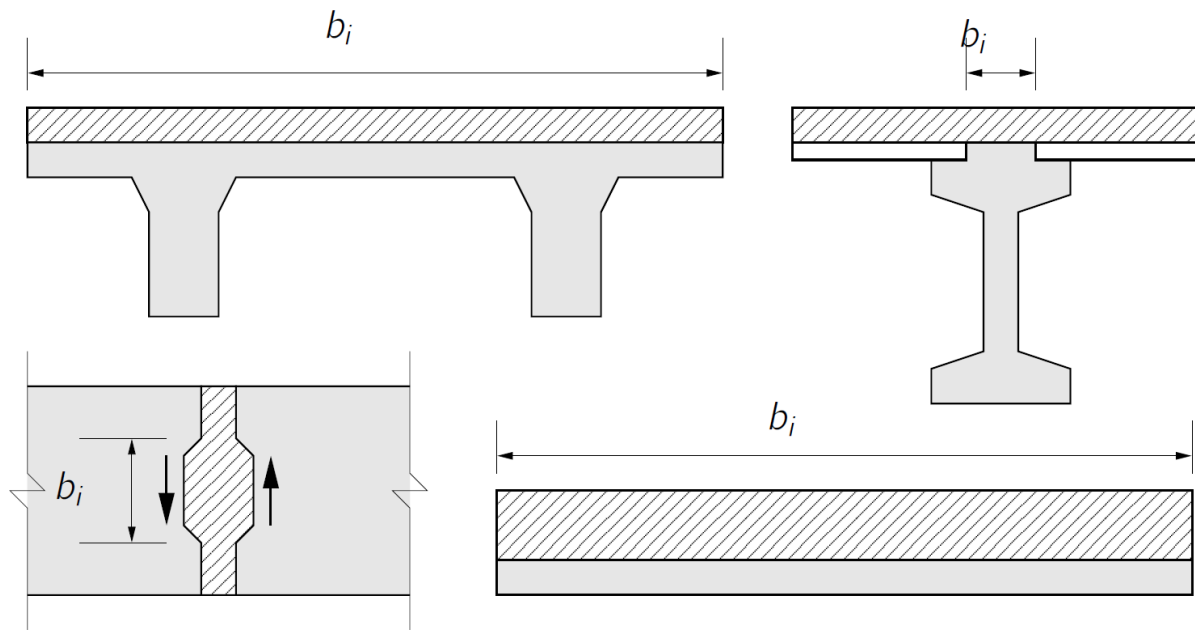
With the aim of obtaining a quasi-monolithic behaviour, the concrete-to-concrete interface is usually roughened by means of modern technologies such as high-pressure water-jetting (HPW), milling, shot-blasting or sand-blasting. Roughening an existing concrete deck as well as installing connectors where required are time-consuming and costly, so designers are forced to minimize the necessary roughening efforts and the designated number of connectors. The main questions for designers in this regard are:

- Which value of adhesive bond strength can realistically be taken into account?
- Which roughening method is required?

Een **aansluitvlak** komt onder meer voor als contactvlak tussen

- opeenvolgende fasen van ter plaatse gestort beton
- geprefabriceerde elementen en ter plaatse gestort beton
- naburige geprefabriceerde elementen
- een geprefabriceerd element en een voegopvulling

► geen monolithisch element ► lokaal geringere afschuifsterkte



$$V_{Edi} \leq V_{Rdi}$$

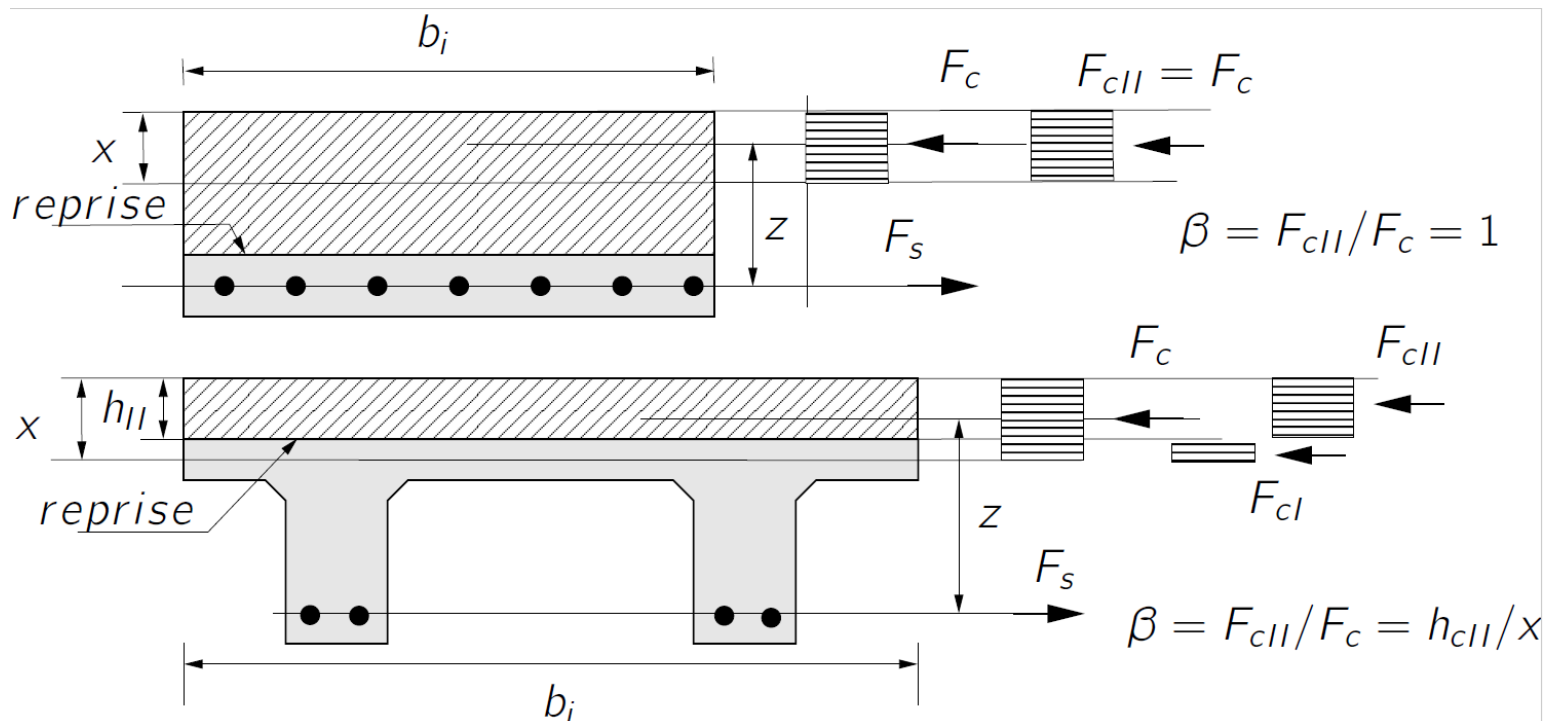
Rekenwaarde van de aangrijpende schuifspanning:

Langsevenwicht van de opgestorte laag: $F_{cll} - (F_{cll} + dF_{cll}) = v_{Edi} b_i dx$

$$v_{Edi} = \frac{dF_{cll}}{b_i dx} = \frac{d(\beta F_c)}{b_i dx} = \frac{\beta d(M_{Ed}/z)}{b_i dx} = \frac{\beta V_{Ed}}{z b_i}$$

$$v_{Edi} = \frac{V_{Ed}}{z b_i}$$

β : verhouding van de drukkracht in de opgestorte laag tot de totale drukkracht in de betreffende dwarsdoorsnede (analoog voor een stortvoeg in de trekzone)



Rekenwaarde van de weerstandbiedende schuifspanning:

$$V_{Rdi} = \underbrace{c f_{ctd}}_1 + \underbrace{\mu \sigma_n}_2 + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd}$$

1

2

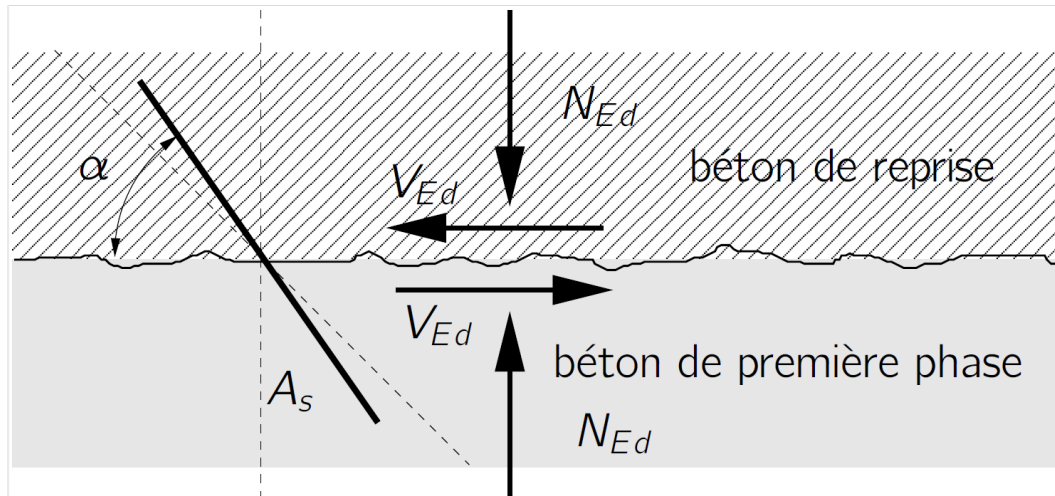
1

adhesie in de stortvoeg ; $f_{ctd} = \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c}$

$c = 0$ indien de voeg op trek belast is ($\sigma_n < 0$)

2

wrijving corresponderend met de normaalspanning waarbij σ_n correspondeert met de minimale N_{Ed} en waarbij $\sigma_n < 0,6 f_{cd}$



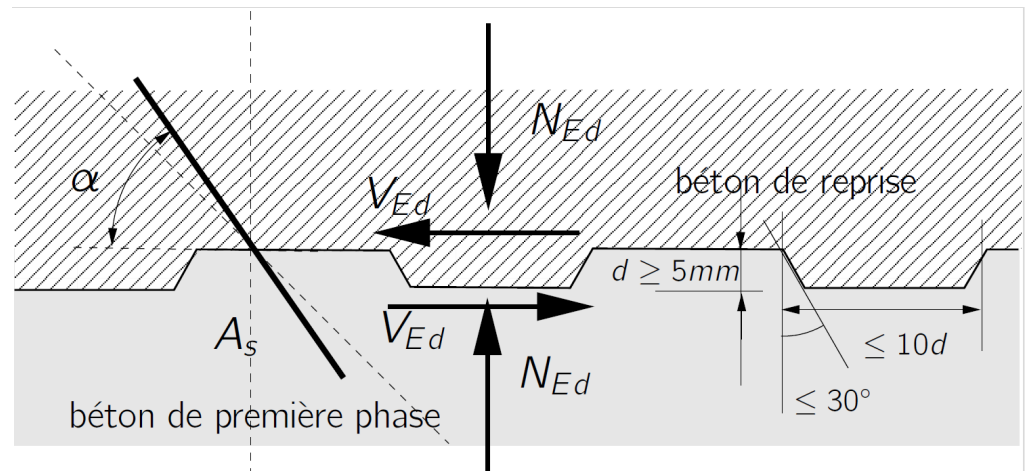
Ruwheid van het aanstortvlak	C	μ
Zeerglad (*)	0,025 – 0,1	0,5
Glad (**)	0,2	0,6
Ruw (***)	0,4	0,7
Geprofileerde voeg (zie figuur)	0,5	0,9

(*) bekisting in staal, kunststof of speciaal bewerkt hout

(**) door een glijbekisting of extrusie gevormd oppervlak of een vrij oppervlak zonder verdere behandeling na het trillen

(***) oppervlak ruw gelaten na het betonneren of ruw gemaakt door rakelen of en andere methode, waarbij oppervlakteruwheden bestaan van tenminste 3 mm hoog met een maximum tussenafstand van 40 mm

Opmerking: waarden van c halveren in het geval van vermoeiings- of dynamische belasting



Rekenwaarde van de weerstandbiedende schuifspanning:

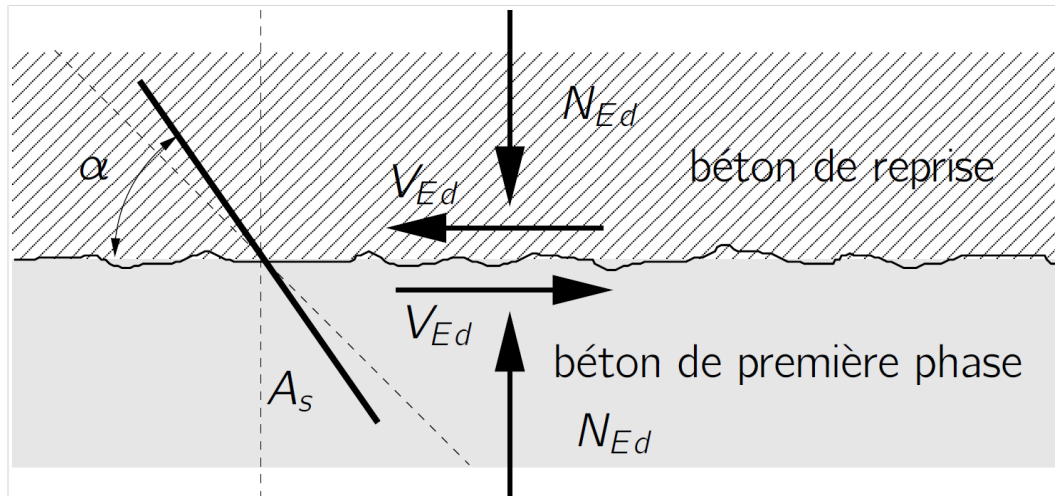
$$V_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd}$$

3 afschuivingswrijving

1 adhesie in de stortvoeg ; $f_{ctd} = \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c}$

c wordt nul gesteld indien de voeg op trek belast is ($\sigma_n < 0$)

2 wrijving corresponderend met de normaalspanning waarbij σ_n correspondeert met de minimale N_{ed} en waarbij $\sigma_n < 0,6 f_{cd}$

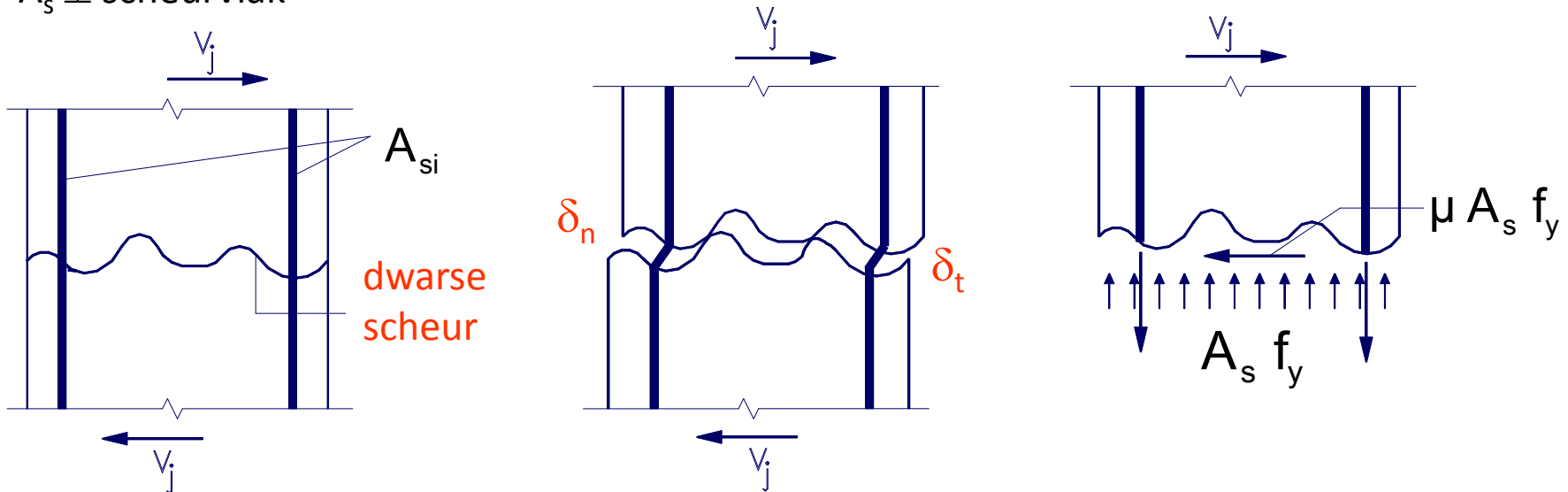


afschuivingswrijving (shear friction)

afschuifkrachten V_i op gescheurd betonprisma

► wrijving langsheen onregelmatig scheurvlak (gerelateerd aan haakweerstand)

$A_s \perp$ scheurvlak

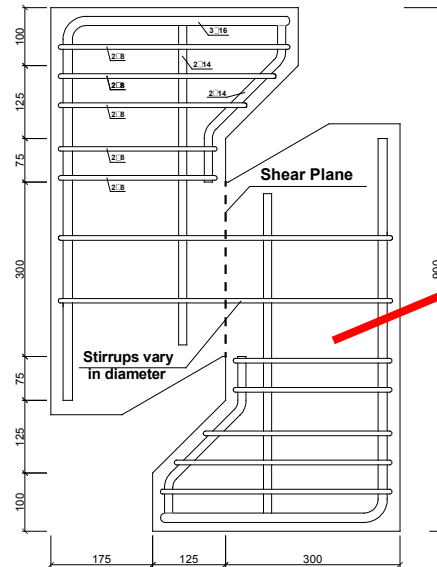
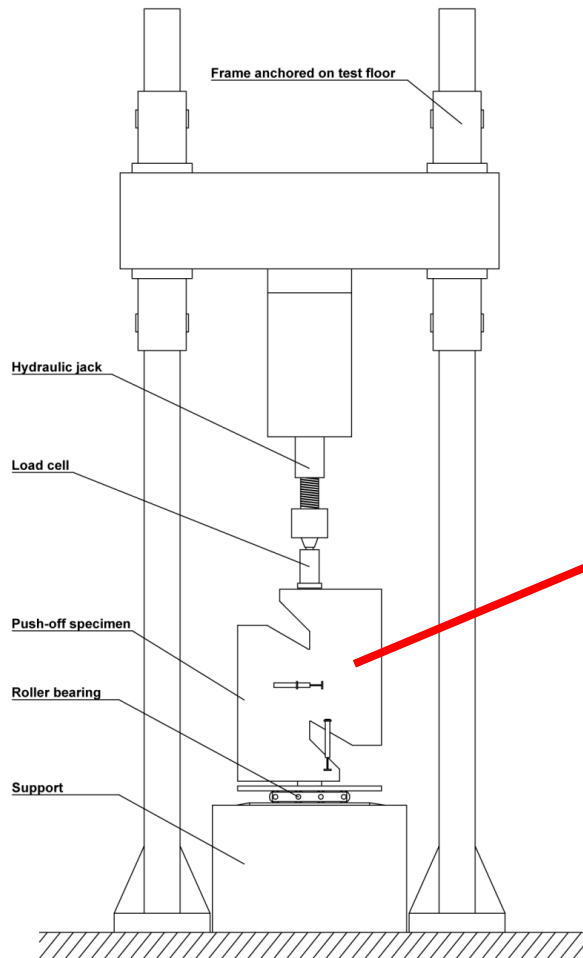


$V_j \rightarrow \delta_t \rightarrow \delta_n \rightarrow$ dwarsende wapeningsstaven onder trek

proeven: staven vloeien bij afschuivingsbreuk: $A_s f_y$

→ als tegenreactie dwarse druk op scheurvlak

Wrijvingsweerstand langsheen scheurvlak: $V_{Ri} = \mu A_s f_y$



Traditioneel beton $f_c = 60 \text{ N/mm}^2$

$\rho = 0,72\%$

$$V_{Ri} = \mu A_s f_y$$

gehelde staven (bv. tralieliggers):



$$45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

$$V_{Ri} = A_s f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \sigma \quad \rho = \frac{A_s}{A_i}$$

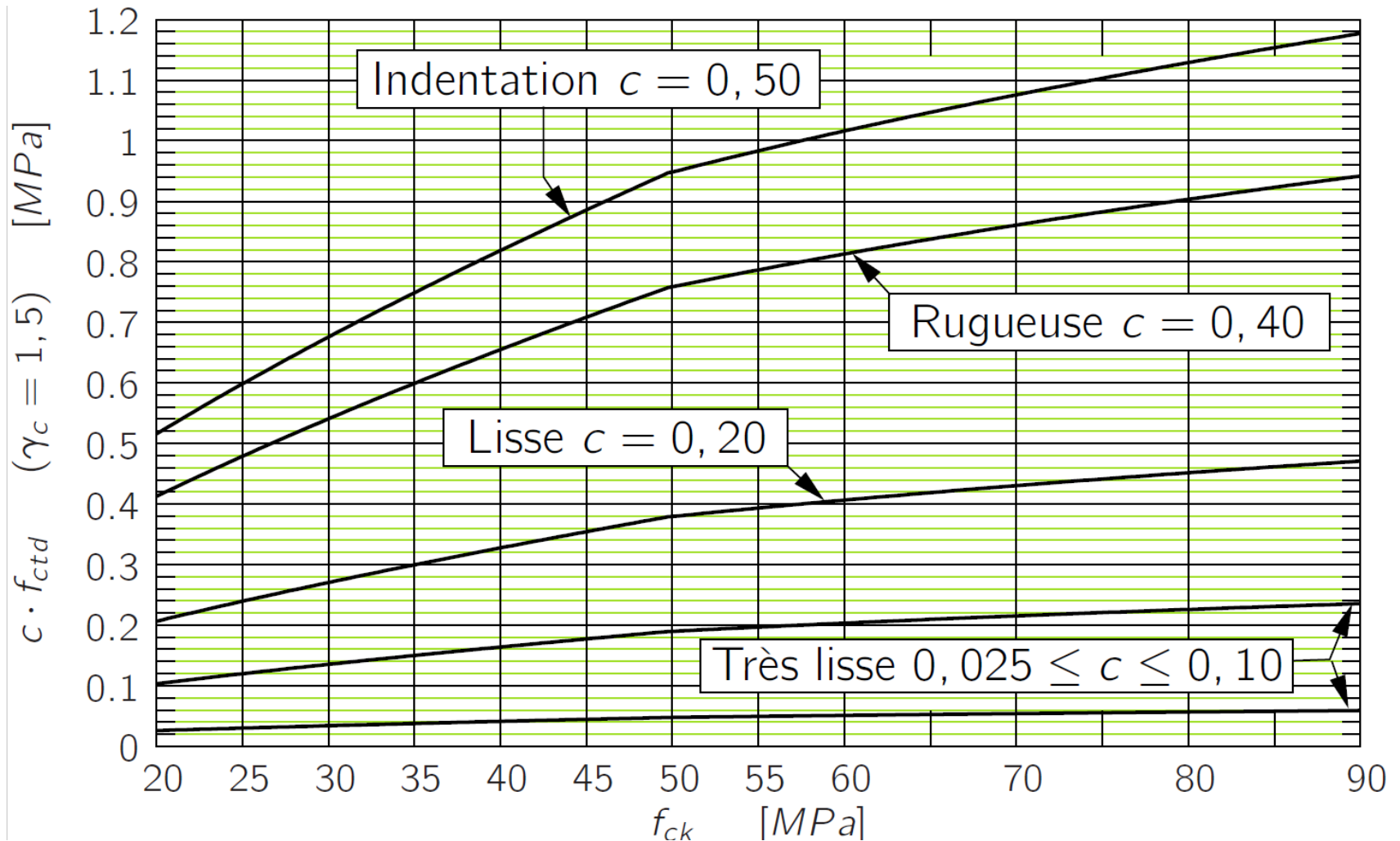
$$v_{Ri} = \frac{V_{Ri}}{A_i} = \frac{A_s f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \sigma}{A_i} = \rho f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \sigma$$

$$v_{Rdi} = \rho_{yd} f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \sigma$$

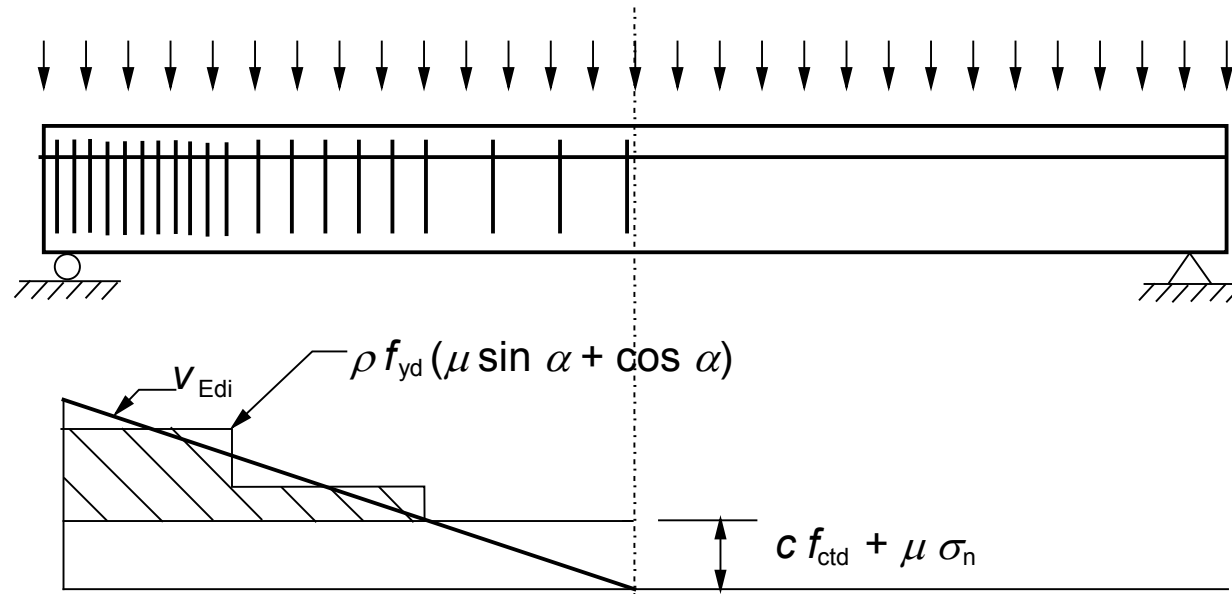
$$v_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd}$$

$$v_{Edi} \leq v_{Rdi}$$

Indien $v_{\text{Edi}} \leq c f_{\text{ctd}}$: geen “naadwapening” nodig



Naadwapening mag getrapt geplaatst worden (zones met constante beugelpas)



Meestal wordt de beugelwapening die nodig is voor een balkelement ook benut als naadwapening.

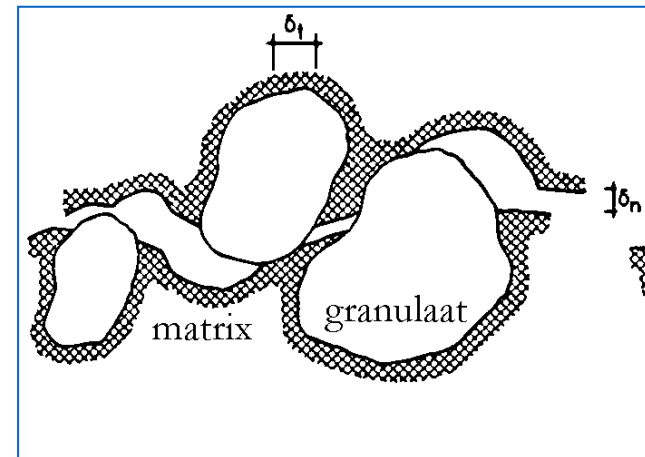


Onvolkomenheden van de formule

$$V_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd}$$

1. Er wordt verondersteld dat de naadwapening vloeit (f_{yd})
2. Er zijn geen eisen voor de verankering van de naadwapening (minimum verankeringslengtes in MC2010)
3. Minimum wapening voorzien om ductiliteit te verzekeren bij verlies van adhesie (cf. MC2010)?
4. Er wordt geen rekening gehouden met de haakweerstand (*aggregate interlock*; zie figuur)
5. Er wordt geen rekening gehouden met deuvelwerking
6. Er wordt uitgegaan van een zuivere superpositie van de verschillende mechanismen

MC2010: *fib* Model Code 2010



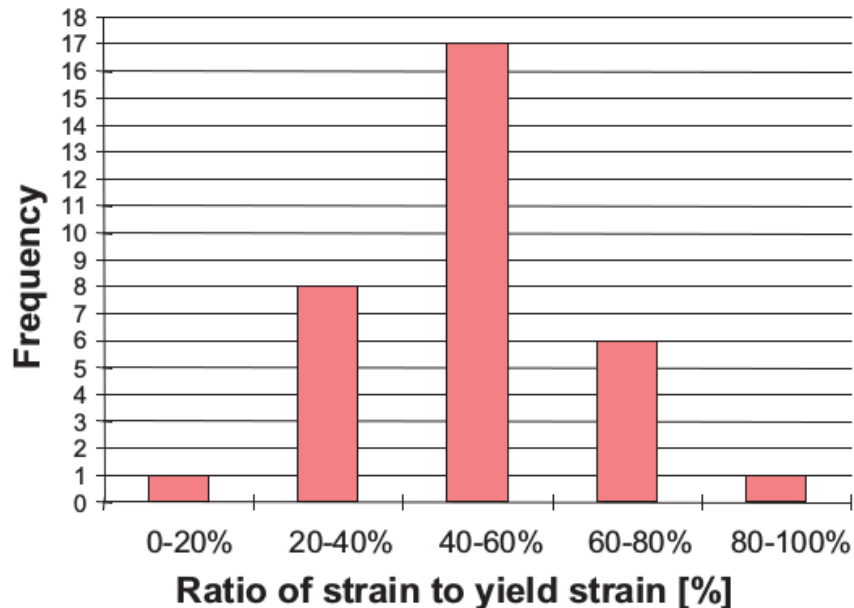
“Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010”

Prof. (FH) DI Dr. Norbert Randl

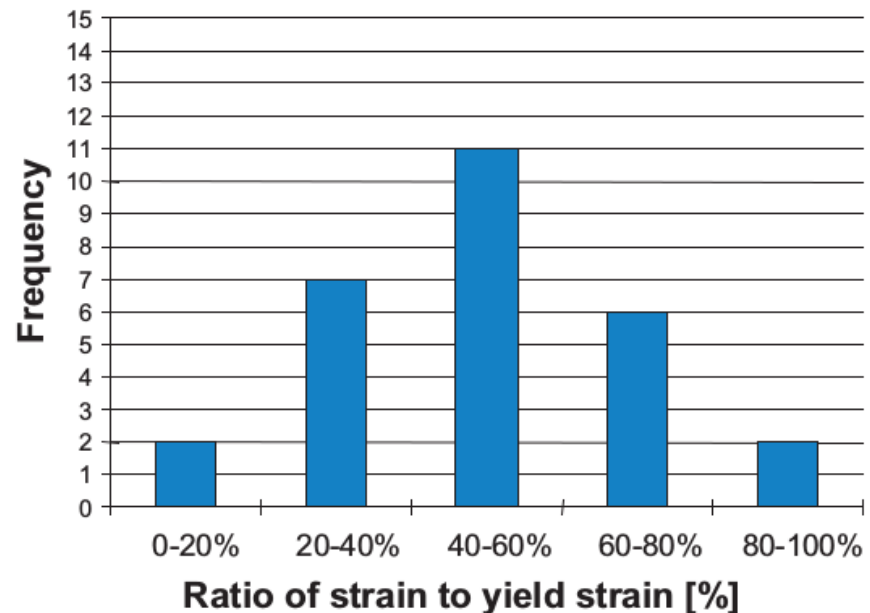
*(...) In tests with HPW- and sand-blasted interfaces with connectors it was found by the author that even though parallel displacements and distinct widening of the joints were observed by means of LVDTs, the strains recorded in the reinforcing bars remained clearly below the yield figure (about 0,25 % in that case). **The mean value of the strain, irrespective of whether the surface had been HPW- or sand-blasted, was about 50 % of the yield strain of the reinforcement** (Fig. 6). Similar observations were also made somewhat earlier by Mishima et al. [21]. (...)*

J.-

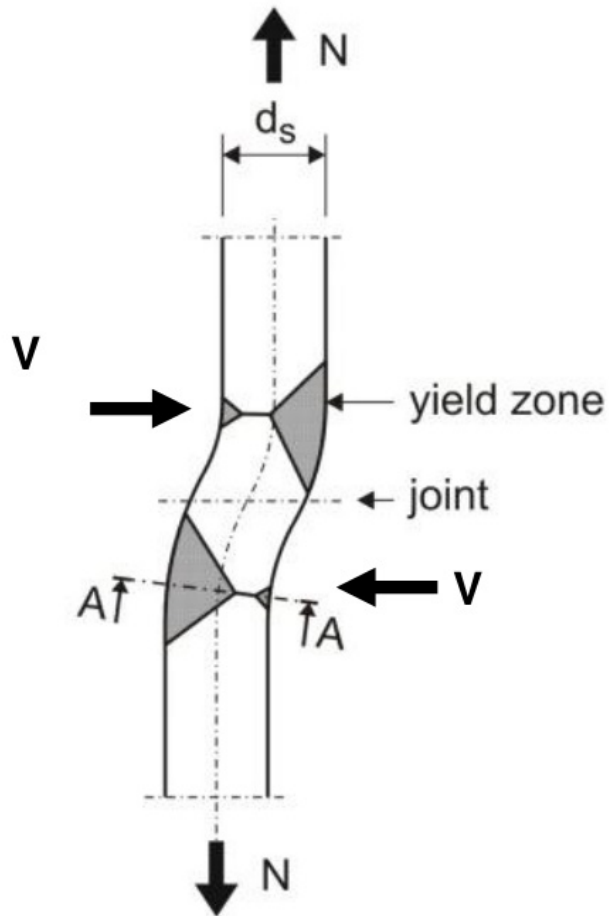
**Strain readings
(Sand-blasted surface)**



**Strain readings
(HPW-blasted surface)**



deuvelwerking

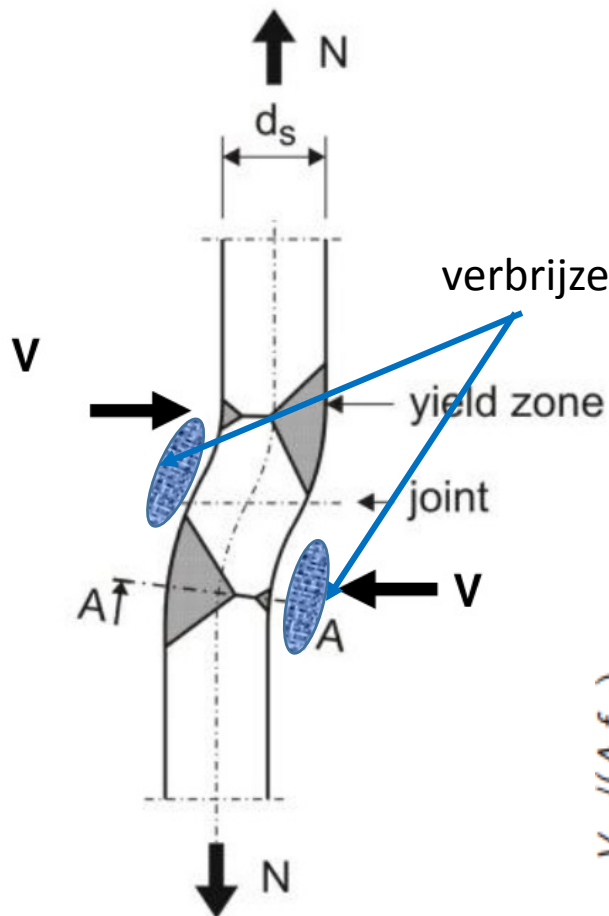


indien $N = 0$

$$V_{Rd} = k A_s \sqrt{f_{cd} f_{yd}} \leq A_s \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$$k \approx 1,3 - 1,5$$

deuvelwerking

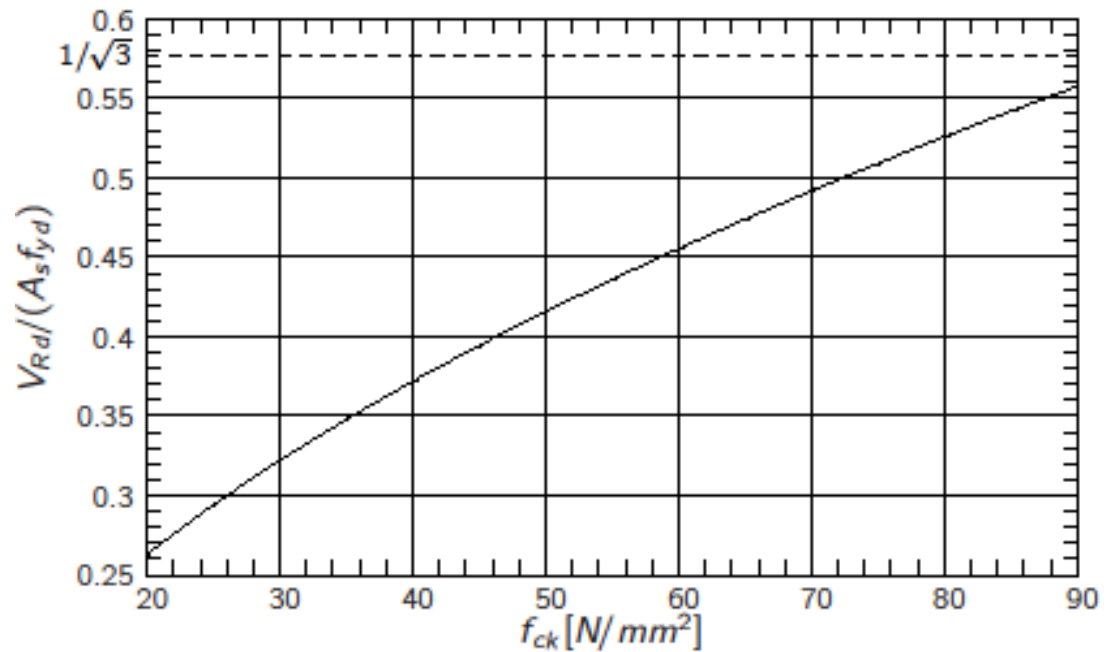


verbrijzeling beton!

indien $N = 0$

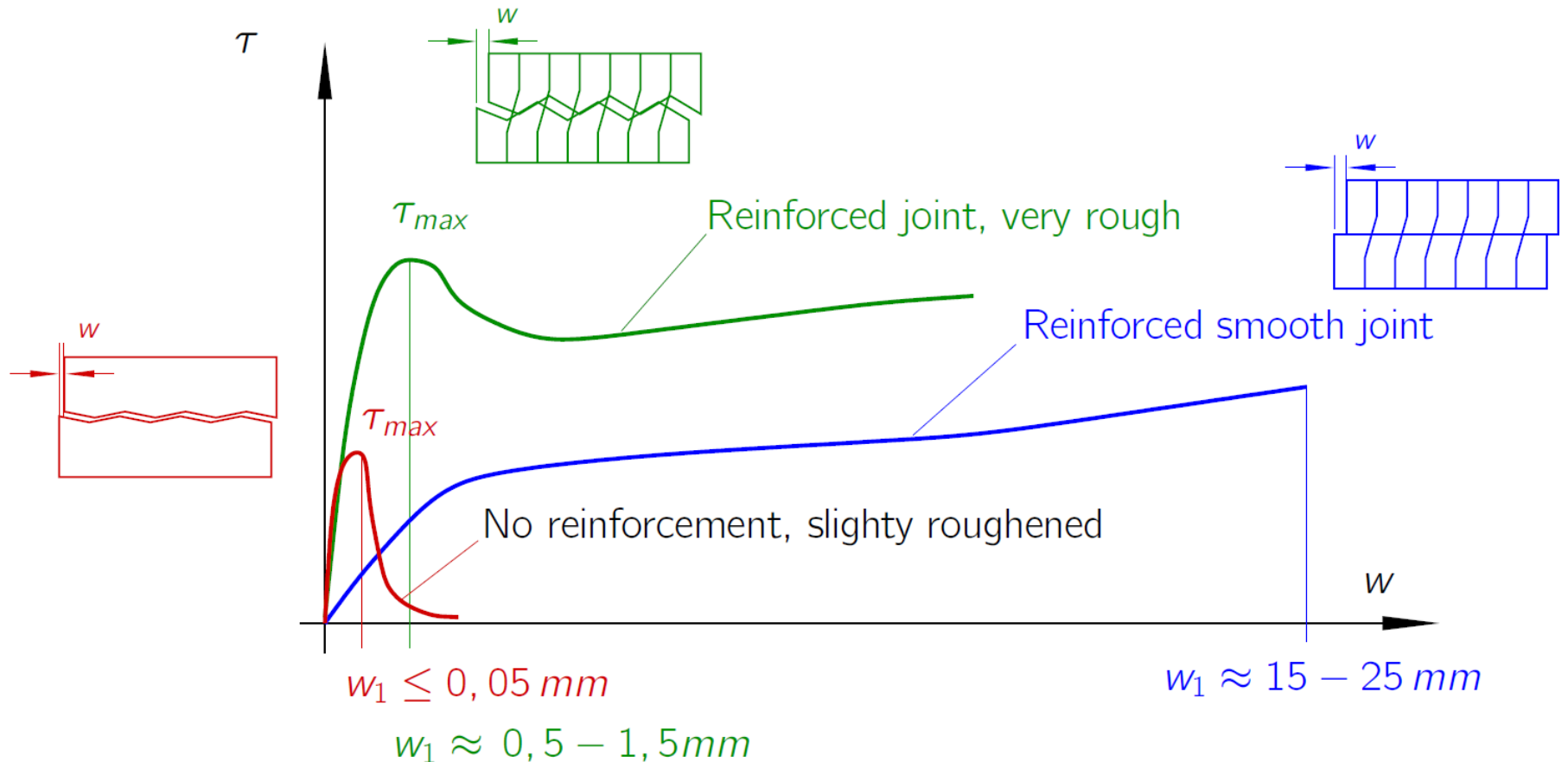
$$V_{Rd} = k A_s \sqrt{f_{cd} f_{yd}} \leq A_s \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$$k \approx 1,3 - 1,5$$



Het superpositieprincipe is een benadering:

- de maximum weerstand τ_{max} treedt op bij verschillende waarden van de verschuiving
- grote verschillen in ductiliteit



Formulering volgens de *fib* Model Code 2010

Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee fasen:

- een “star” gedrag zonder noemenswaardige glijding (enkel adhesie en wrijving):

$$V_{Rdi} = c_a f_{ctd} + \mu \sigma_n \leq 0,5 \nu f_{cd}$$

- een “ductiel” gedrag met voldoende glijding die toelaat om de naadwapening te activeren (haakweerstand + wrijving + afschuivingswrijving + deuvelwerking):

$$V_{Rdi} = c_r f_{ck}^{1/3} + \mu \sigma_n + \kappa_1 \rho f_{yd} (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) + \kappa_2 \rho \sqrt{f_{cd} f_{yd}} \leq \beta_c \nu f_{cd}$$

De coëfficiënten κ_1 en κ_2 weerspiegelen de relatieve bijdrage van de afschuivingswrijving en de deuvelwerking

Zonder bijdrage van de wapening:

$$V_{Rdi} = c_a f_{ctd} + \mu \sigma_n \leq 0,5 v f_{cd}$$

Met bijdrage van de wapening:

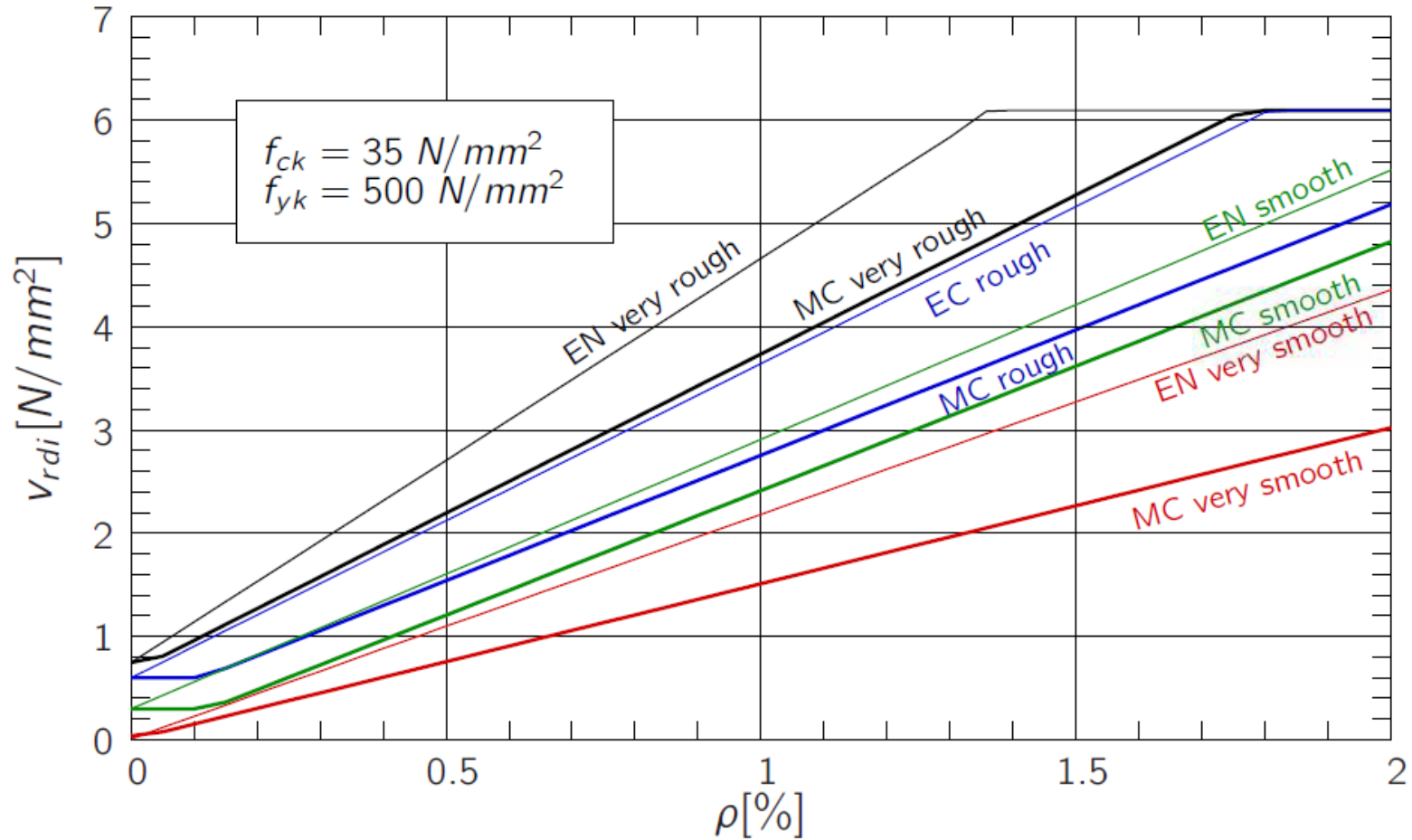
$$V_{Rdi} = c_r f_{ck}^{1/3} + \mu \sigma_n + \kappa_1 \rho f_{yd} (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) + \kappa_2 \rho \sqrt{f_{cd} f_{yd}} \leq \beta_c v f_{cd}$$

Roughness	c_a	c_r	κ_1	κ_2	β_c	μ	
Very smooth (steel, plastic, timber formwork)	0,025	0	0	1,5	0,3	0,5	
Smooth (concrete surface without treatment after vibration or slightly roughened when cast against formwork)	0,20	0	0,5	1,1	0,4	0,6	
Rough (strongly roughened surface) $R_t \geq 1,5mm$	0,40	0,1	0,5	0,9	0,5	0,7	
Very rough (including shear keys) $R_t \geq 3mm$	0,50	0,2	0,5	0,9	0,5	$f_{ck} \geq 25$	$f_{ck} \geq 35$
						0,8	1,0

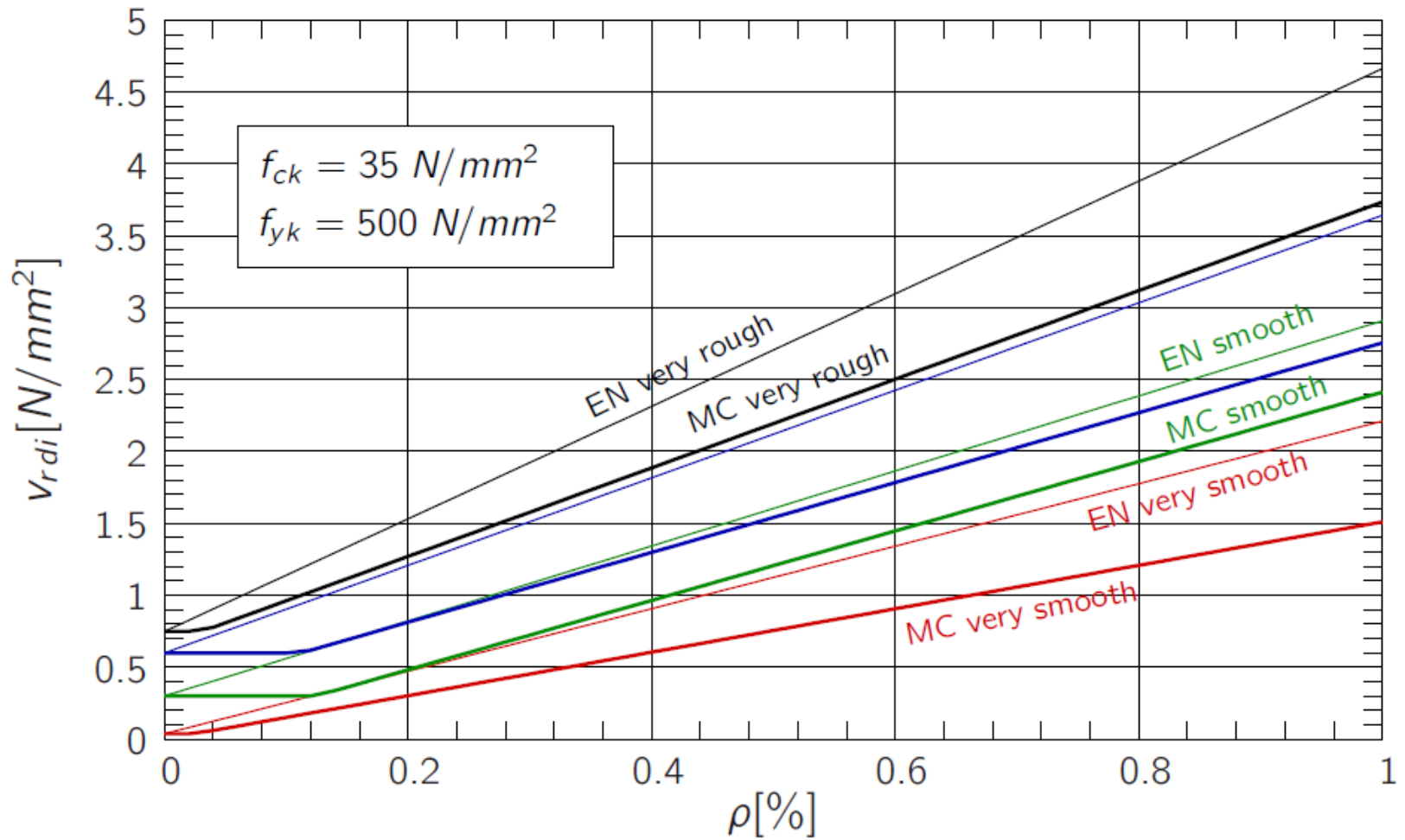
$$v = 0,55 \left(\frac{30}{f_{ck}} \right)^{1/3} < 0.55$$

R_t : ruwheid bepaald volgens de “sand patch method”

Vergelijking EC2 en MC2010

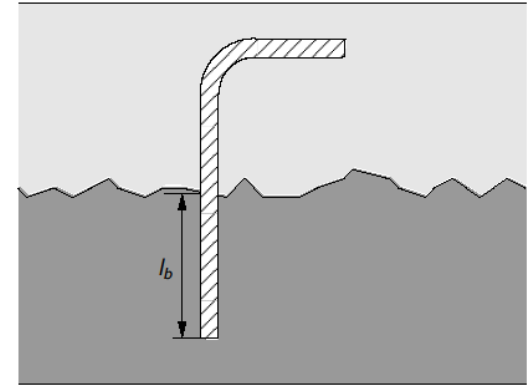


Vergelijking EC2 en MC2010 (detail)



Verankering van de naadwapening volgens MC2010

- Activeren deuveleffect: $l_b \geq 6\phi$ indien niet gelijktijdig onderworpen aan een trekkracht
- Activeren afschuivingswrijving: $l_b \geq 10\phi$ voor $k_1 \leq 0,5$;
voor $k_1 > 0,5$ grotere lengte nodig



Minimum wapening volgens MC2010

Indien $V_{Ed} > c_a f_{ctd} + \mu \sigma_n$

Voor balken $\rho_{min} = 0,20 f_{ctm} / f_{yk} \geq 0,10\%$

Voor platen $\rho_{min} = 0,12 f_{ctm} / f_{yk} \geq 0,05\%$

Afschuiving in het aansluitvlak tussen op
verschillende tijdstippen gestort beton (stortvoegen):
Vergelijking EC2 ↔ MC2010

- MC2010 geeft rekenregels die beter aansluiten bij de onderliggende betonmechanica
- Deze regels leiden over het algemeen niet tot een vermindering van naadwapening (lagere v_{Rdi})
- Door het deuveleffect in rekening te brengen komt men voor niet-standaard gevallen tot een realistischer en veiliger oplossing