

OVER DE SCHEURVORMING IN PLATEN EN BALKEN

U.D.C. 624.072.2:624.012.45:69.059.2

Een empirische formule wordt gegeven, gebaseerd op de uitkomsten van vele proeven, waarmede de scheurafstand in platen en balken met rechthoekige doorsnede en voorzien van één laag wapening kan worden bepaald in geval van zuivere buiging. Hieruit wordt een formule voor de op den duur onder invloed van blijvende en/of wisselende belasting te verwachten scheurbreedte afgeleid. Tenslotte wordt nagegaan in hoeverre door constructieve maatregelen deze scheurbreedte kan worden beperkt, hetgeen mogelijk van belang is in verband met de kans op het optreden van aanzienlijke corrosie van het wapeningsstaal.

0 Inleiding

De mate van veiligheid ten opzichte van bezwijken kan bij gewapend betonconstructies, behalve door b.v. onjuiste onderstellingen in de berekening, overbelasting en materiaalfouten, ook ongunstig worden beïnvloed door een vermindering van de staaldoorsnede ten gevolge van corrosie. Voorts kan deze corrosie aanleiding geven tot andere bezwaren zoals het bruin kleuren van het betonoppervlak en het afdrucken van de betondekking. Uit het in C.U.R.-rapport no. 10¹⁾ beschreven onderzoek naar de in ons land voorkomende corrosie van wapeningsstaal in tenminste 15 jaar oude gebouwen bleek dat deze in een aantal gevallen aanzienlijk was.

Ofschoon op grond van theoretische overwegingen bepaalde factoren kunnen worden onderkend die invloed kunnen uitoefenen op het corrosie-proces (zie blz. 8 en 12 l.c.) is het inzicht nog niet zodanig dat in een bepaald geval met zekerheid kan worden voorspeld of al dan niet aanzienlijke corrosie zal optreden. Wel kan b.v. worden gesteld dat een grotere dichtheid van het beton en een grotere dekking (zie ook blz. 28 l.c.) de kans op aanzienlijke corrosie zullen verminderen, terwijl daarentegen de aanwezigheid van scheuren deze kans zal vergroten.

Ten aanzien van de laatste factor menen sommige onderzoekers dat daarbij de breedte van de scheuren van weinig of geen belang is. Anderen zijn van mening dat bij toenemende scheurbreedte deze kans vermeerdert, welke opvatting door de uitkomst van het genoemde onderzoek wordt gesteund (zie de grafieken op blz. 27 l.c.). Deze onderzoekers bevelen dan ook aan de scheurbreedte te beperken tot een nog juist toelaatbare waarde, die soms nog afhankelijk wordt gesteld van de atmosferische omstandigheden, van de

¹⁾ C.U.R.-rapport no. 10: Onderzoek naar de toelaatbare scheurbreedte in gewapend betonconstructies. Betonvereniging, 's-Gravenhage, mei 1956.

omstandigheid of de constructie al dan niet aan de buitenlucht is blootgesteld en/of van de aard van de belasting (tijdelijk, blijvend, wisselend) – zie ook blz. 9 en 28 l.c.

Scheuren in een gewapend betonconstructie kunnen het gevolg zijn van verschillende mechanische, fysische en chemische oorzaken, al dan niet gecombineerd. In het geval dat scheuren optreden door een belasting die zuivere buiging in een ligger veroorzaakt, kan worden gesteld dat de bijbehorende scheurbreedte in hoofdzaak wordt bepaald door de scheurafstand en de werkelijke staalspanning. Naarmate deze toenemen zal ook de scheurbreedte groter worden.

Zoals vermeld blijkt het optreden van aanzienlijke corrosie niet denkbeeldig te zijn. Daar voorts één der mogelijkheden tot het verminderen van de kans op aanzienlijke corrosie wellicht is het beperken van de scheurbreedte, lijkt het nuttig om voor het genoemde, eenvoudige, belastingsgeval na te gaan in hoeverre door constructieve maatregelen de scheurbreedte kan worden verkleind. De beschouwing zal worden beperkt tot platen en tot balken met rechthoekige doorsnede en voorzien van één laag wapening.¹⁾

1 Berekening van de scheurbreedte

Als de scheurafstand (s) bekend is dan zal, indien de rek van het beton tussen twee scheuren wordt verwaarloosd, de scheurbreedte (Δs) kunnen worden berekend uit de gemiddelde rek van het staal ($\varepsilon_{y_{gem}}$) t.w.:

$$\Delta s = \beta \varepsilon_{y_{gem}} s = \beta \frac{\sigma_{y_{gem}}}{E_y} s \quad (1)$$

waarin $\sigma_{y_{gem}}$ de gemiddelde, werkelijke, staalspanning en E_y de elasticiteitsmodulus van het staal voorstelt, terwijl β een coëfficiënt is afhankelijk van de aard van de belasting, waarvoor geldt $\beta \leq 1$.

1.1 Scheurafstand s

Wanneer een ligger op zuivere buiging wordt belast dan ontstaat, indien de belasting voldoende hoog wordt opgevoerd, geleidelijk een aantal scheuren tot zich een min of meer regelmatig scheurenpatroon heeft gevormd (zie fig. 1). Bij een verdere toeneming van de belasting ontstaan geen nieuwe scheuren.²⁾ Uit dit scheurenpatroon is op redelijke wijze een gemiddelde scheurafstand (s_{gem}) te bepalen, waarvoor uiteraard het aantal scheurafstanden voldoende groot dient te zijn.

¹⁾ Vermeld zij dat voor het onderhavige belastingsgeval bij het I.B.B.C. ook onderzoeken gaande zijn met T-balken en met balken met meerdere lagen wapening.

²⁾ Bij staal met verhoogde aanhechting en een continu σ - ε -diagram neemt echter de scheurafstand bij staalspanningen gelegen tussen ongeveer de conventionele rekgrens en de breukspanning veelal af door het ontstaan van nieuwe scheuren. Dit stadium wordt in dit artikel buiten beschouwing gelaten als zijnde onbelangrijk voor het gebruiksstadium.

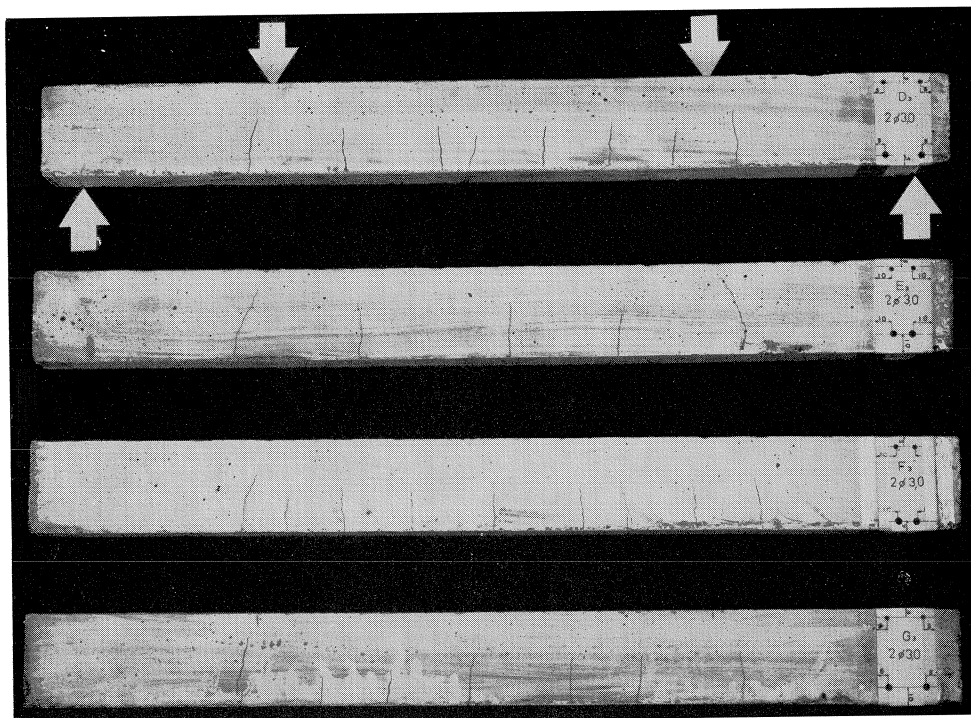


Fig. 1. Overzicht van de scheurvorming in enkele balken, belast op zuivere buiging (4-puntsbuigproef).

Uitgaande van theoretische overwegingen zijn door verschillende onderzoekers formules ontwikkeld om δ_{gem} te berekenen. In elk van deze formules komen één of meer coëfficiënten voor die door de betreffende onderzoeker zodanig zijn gekozen dat de uitkomsten van de theorie en van de door hem verrichte proeven zo goed mogelijk overeenstemmen. Door het betrekkelijk grote aantal onafhankelijke variabelen (liggerhoogte en -breedte, aantal staven en staafdiameter, ligging van de staven in de doorsnede, staalsoort, betonkwaliteit) en de gebruikelijke optredende spreiding in de proefresultaten dient het aantal proeven vrij groot te zijn om enigszins betrouwbare conclusies te kunnen trekken. Veelal worden echter de waarden van de coëfficiënten uit een te beperkt aantal proeven bepaald. Bij toetsing van een formule aan andere dan door de betreffende onderzoeker verrichte proeven wordt dan ook meestal weinig overeenstemming gevonden. In andere gevallen worden de coëfficiënten met een zodanige marge opgegeven dat vrijwel elk proefresultaat verklaard kan worden uit de ontwikkelde theorie.

Ook bij het I.B.B.C. zijn pogingen gedaan om op grond van theoretische overwegingen te komen tot een formule. Bij toetsing aan vele bij het instituut en door anderen verrichte proeven kon evenwel nimmer een bevredigend

resultaat worden bereikt. Om deze reden is getracht een empirische formule op te stellen die zo goed mogelijk aansluit bij de uitkomsten van de genoemde proeven. Dit heeft geleid tot de volgende formule, die geldig is voor de toestand waarin het scheurenpatroon zich volledig heeft ontwikkeld (zie ook fig. 2):

$$s_{\text{gem}} = c \left(1 + \frac{\sqrt{bh}}{\Sigma O} \right) = c \left(1 + \frac{\sqrt{bh}}{n\pi d} \right) \quad (2)$$

waarin: c = bij balken: de afstand van hart hoekstaaf tot de dichtstbij zijnde balkhoek;

bij platen: de afstand van hart staaf tot de dichtstbij zijnde plaatrand;

b = bij balken: de balkbreedte;

bij platen: de onderlinge staafafstand;

h = de hoogte van balk of plaat;

$\Sigma O = n\pi d$ = totale staafomtrek;

n = bij balken: het aantal staven;

bij platen geldt $n = 1$;

d = staafdiameter.

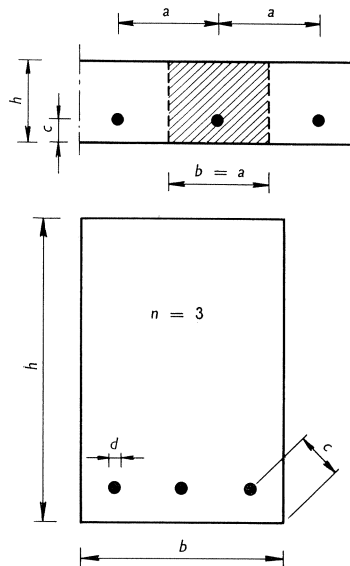


Fig. 2.

De formule is dus geldig voor balken zowel als platen, hetgeen bij andere formules meestal slechts door het invoeren van bepaalde coëfficiënten is te verwezenlijken. De beproevingsresultaten van de volgende 74 balken en 103 platen vormden de basis van de formule:

24 balken, op verkleinde schaal, gewapend met rondstaal;

32 balken, op ware grootte, gewapend met rondstaal;

18 balken, op ware grootte, gewapend met staal met verhoogde rekgrens en aanhechting;

77 platen, op verkleinde schaal, gewapend met rondstaal;

16 platen, op ware grootte, gewapend met rondstaal;

2 platen, op ware grootte, gewapend met staal met verhoogde rekgrens en aanhechting;

8 platen, op ware grootte, gewapend met staal met verhoogde rekgrens.

Van deze proefstukken werden 149 stuks bij het I.B.B.C. en 28 stuks door anderen beproefd. Proefresultaten van anderen werden alleen opgenomen als kon worden ondersteld dat het scheurenpatroon zich volledig had ontwikkeld en wanneer voldoende nauwkeurige gegevens ten aanzien van afmetingen e.d. waren vermeld.

Wanneer men voor elk proefstuk stelt:

$$\frac{s_{\text{gem gemeten}}}{s_{\text{gem berekend}}} = \alpha,$$

dan kunnen de aldus gevonden α -waarden in een histogram worden uitgezet (zie fig. 3). De gemiddelde waarde van α (α_{gem}) voor alle 177 proefstukken blijkt 0,998 te bedragen. De variatiecoëfficiënt v.c.

$$\left(= \frac{\text{standaardafwijking}}{\alpha_{\text{gem}}} \cdot 100\% \right)$$

is 21,2%. Een minimum-waarde van de variatiecoëfficiënt kan worden verwacht wanneer deze wordt bepaald uit de resultaten van een groep identieke liggers. Daartoe werd een extra-serie van 24 balken met gelijke afmetingen en samenstelling beproefd. Hiervoor bedroeg de variatiecoëfficiënt 14,1%, zodat de eerdergenoemde variatiecoëfficiënt van 21,2%, geldend voor de onderzochte platen en balken met diverse afmetingen en samenstellingen, alleszins bevredigend kan worden genoemd. Deze waarde is zodanig dat de nauwkeurigheid waarmede met deze formule s_{gem} kan worden berekend gunstig afsteekt bij die van andere formules.

De waarde van α_{gem} is tevens bepaald voor de volgende groepen:

platen (103 st.)	: $\alpha_{\text{gem}} = 1,06$
balken (74 st.)	: $= 0,91$
balken en platen gewapend met staal met verhoogde rekgrens en aanhechting (20 st.)	: $= 0,95$
platen, gewapend met staal met verhoogde rekgrens (8 st.)	: $= 1,02$
platen en balken bij het I.B.B.C. beproefd (149 st.)	: $= 0,99$
platen en balken door anderen beproefd (28 st.)	: $= 1,03$

De uitkomsten verkregen van proefstukken voorzien van staal met verhoogde aanhechting en/of rekgrens tonen een gemiddelde scheurafstand ongeveer gelijk aan die bij rondstaal. Het is echter de vraag of deze conclusie algemeen geldt daar zowel het aantal waarnemingen als het aantal onderzochte staal-soorten beperkt was. Tot slot zij vermeld dat de indruk werd verkregen dat de invloed van de betonkwaliteit op de gemiddelde scheurafstand gering was.

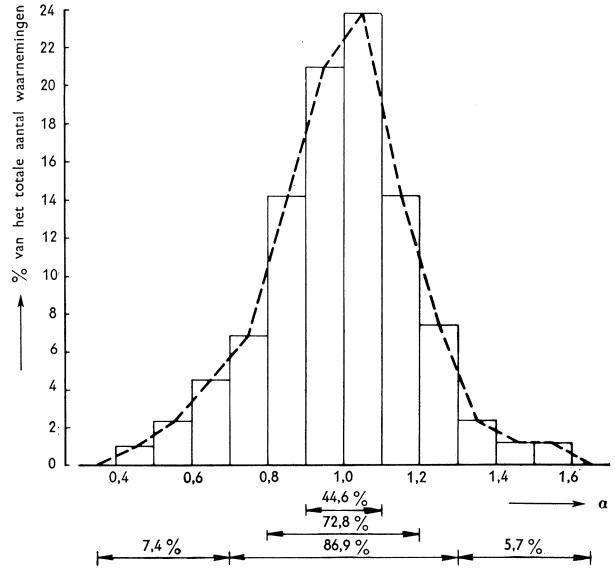


Fig. 3. Frequentie-verdeling van α . (177 waarnemingen)

$$\alpha = \frac{s_{\text{gemeten}}}{s_{\text{berekend}}} \quad \alpha_{\text{gem}} = 0,998 \quad \text{v.c.}(\alpha) = 21,2\%$$

Uiteraard treedt per ligger een zekere spreiding op in de scheurafstanden. Voor een aantal liggers is de verhouding (γ) tussen de grootste en de gemiddelde scheurafstand bepaald. Getracht is een correlatie tussen γ en de verschillende liggerafmetingen te vinden. Het beste resultaat dat kon worden verkregen is weergegeven in fig. 4 waarin γ is uitgezet als functie van $\frac{nd}{c}$. Hoewel de spreiding groot is blijkt wel dat γ groter wordt naarmate $\frac{nd}{c}$ toeneemt. De vergrotingsfactor γ kan worden benaderd met de formule:

$$\frac{s_{\max}}{s_{\text{gem}}} = \gamma = 1 + 0,2 \frac{n\pi d}{c} = 1 + 0,2 \frac{\Sigma O}{c}$$

De kans dat twee maximale scheurafstanden naast elkaar optreden is gering. Uit de proeven blijkt dat naast de grootste scheurafstand meestal een scheurafstand voorkomt ongeveer gelijk aan de gemiddelde scheurafstand (zie fig. 5).

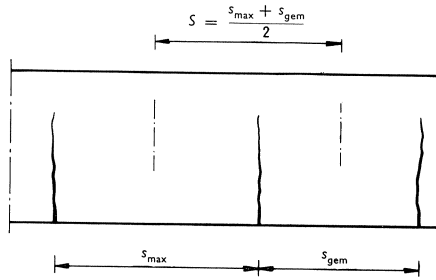


Fig. 5. Definitie van de scheurafstand s , die bepalend is voor de maximaal in een ligger optredende scheurbreedte.

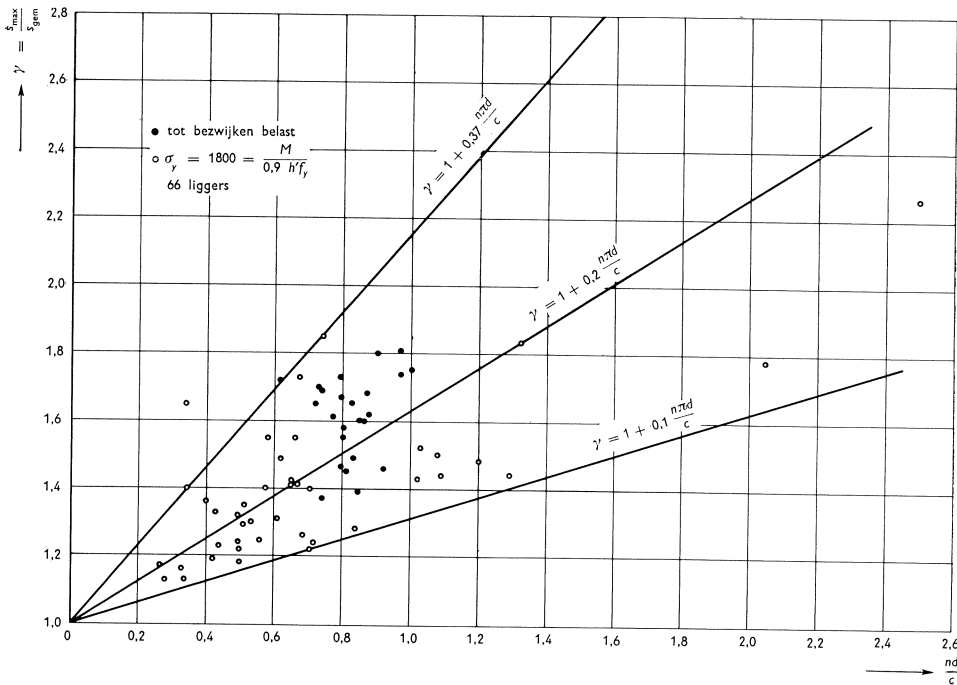


Fig. 4. De verhouding $\gamma = \frac{s_{\max}}{s_{\text{gem}}}$ als functie van $\frac{nd}{c}$.

Daar in een ligger rekening gehouden moet worden met de grootste optredende scheurbreedte dient in verg. (1) voor de scheurafstand (s) te worden ingevoerd:

$$s = \frac{s_{\max} + s_{\text{gem}}}{2} = \left(1 + 0,1 \frac{n\pi d}{c}\right) s_{\text{gem}} = \left(1 + 0,1 \frac{\Sigma O}{c}\right) s_{\text{gem}} \text{ of}$$

$$s = (c + 0,1 n\pi d) \left(1 + \frac{\sqrt{bh}}{n\pi d}\right) = (c + 0,1 \Sigma O) \left(1 + \frac{\sqrt{bh}}{\Sigma O}\right) \dots \dots (3)$$

Wanneer wordt gesteld:

$$f_y = n \frac{\pi}{4} d^2 = \mu bh' = \mu b \delta h$$

is:

$$bh = \frac{n\pi d^2}{4\mu\delta}$$

Als δ varieert van 0,8 tot 0,95 leidt de substitutie van deze vorm in verg. (3) tot de volgende goede benadering (met $\pi \approx 3$):

$$s = (c + 0,3nd) \left(1 + 0,3 \sqrt{\frac{1}{\mu n}}\right) \dots \dots \dots (3a)$$

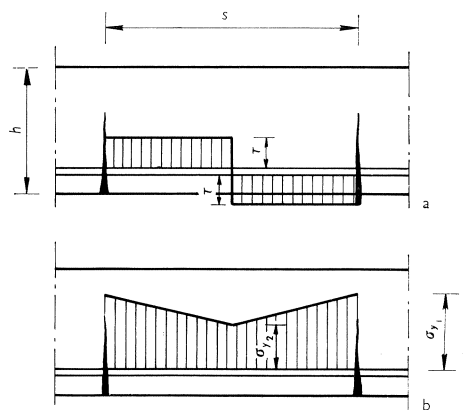
Opgemerkt wordt dat voor kleine waarden van μ het breukmoment weinig groter en soms zelfs kleiner is dan het scheurmoment, dat vrijwel onafhankelijk is van μ . In deze gevallen vormen zich slechts één of enkele scheuren, waarna zeer spoedig bezwijken optreedt. Een regelmatig scheurenpatroon is dan ook niet te verwachten.

1.2 Staalspanning $\sigma_{y_{\text{gem}}}$

De staalspanning ter plaatse van een scheur is groter dan die tussen de scheuren, waar de betontrekzone nog min of meer medewerkt. Dit laatste is afhankelijk van de grootte van de schuifspanning τ tussen het staal en het beton, die o.a. wordt bepaald door de aard van het staaloppervlak en de aard van de belasting. In fig. 6a is de schuifspanning eenvoudigheidshalve gelijkmatig verdeeld gedacht langs een staaf. De staalspanning zal in dit geval lineair afnemen van σ_{y_1} ter plaatse van de scheur tot σ_{y_2} halverwege twee scheuren (zie fig. 6b). Dan is:

$$\sigma_{y_{\text{gem}}} = \frac{\sigma_{y_1} + \sigma_{y_2}}{2}$$

Fig. 6. Onderstelling over het verloop van de schuifspanning τ langs een staaf en over het verloop van de staalspanning in een gescheurde ligger.



Voorts geldt de voorwaarde:

$$\frac{\pi}{4} d^2 (\sigma_{y_1} - \sigma_{y_2}) = \pi d \tau \cdot \frac{1}{2} s$$

Uit beide vergelijkingen volgt:

$$\sigma_{y_{\text{gem}}} = \sigma_{y_1} - \frac{\tau s}{d} \dots \dots \dots (4)$$

Ter plaatse van de scheur wordt voldaan aan de voorwaarde (zowel gesteld bij de *n*-methode als bij de breukmethode) dat de betontrekzone niet medewerkt. Gesteld kan dus worden $\sigma_{y_1} = \bar{\sigma}_y$ waarbij $\bar{\sigma}_y$ een staalspanning voorstelt te berekenen volgens de *n*-methode of de breukmethode, zodat verg. (4) wordt:

$$\sigma_{y_{\text{gem}}} = \bar{\sigma}_y - \frac{\tau s}{d} \dots \dots \dots (4a)$$

Deze waarde van $\sigma_{y_{\text{gem}}}$ zal bij de berekening van de scheurbreedte (Δs) in verg. (1) moeten worden gesubstitueerd.

1.3 Scheurbreedte Δs

De maximale in een ligger ter plaatse van de wapening optredende scheurbreedte $\Delta s'_{\text{max}}$ kan dus worden berekend door in de verg. (1) de verg. (3) of (3a) en (4a) te substitueren. Hierbij dient nog het volgende te worden opgemerkt:

- a. de scheurbreedte is uiteraard alleen redelijk te bepalen ter plaatse van het betonoppervlak. Ook de aanbevolen toelaatbare scheurbreedten hebben betrekking op deze scheurbreedte. De maximale scheurbreedte Δs_{max} ter plaatse van het betonoppervlak volgt uit:

$$\begin{aligned} \Delta s_{\text{max}} &= \Delta s'_{\text{max}} \frac{h-x}{h'-x} = \beta \frac{\sigma_{y_{\text{gem}}}}{E_y} s \frac{h-x}{h'-x} \approx \\ &\approx \beta \cdot 0,6 \sigma_{y_{\text{gem}}} s \cdot 10^{-6} \text{ cm} \end{aligned}$$

waarin $E_y = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2$, terwijl $\frac{h-x}{h'-x}$ varieert van ca. 1,1 tot 1,4 ($x \approx 0,4 h'$).

Substitutie van verg. (4a) leidt tot:

$$\Delta s_{\text{max}} = \beta \cdot 0,6 \bar{\sigma}_y s \left(1 - \frac{\tau s}{\bar{\sigma}_y d} \right) \cdot 10^{-6} \text{ cm} \dots \dots \dots (5)$$

De vergelijkingen gelden als het scheurenpatroon zich volledig heeft ontwikkeld. De scheurbreedte volgend uit verg. (5) is dan die welke optreedt bij een spanning $\bar{\sigma}_y$, die een toelaatbare spanning volgens de *n*-methode kan voorstellen of bij de breukmethode gelijk kan zijn aan

rekgrens
 veiligheidscoëfficiënt . Ten aanzien van de waarde van τ is bekend dat deze bij alle staalsoorten onder invloed van blijvende en/of wisselende belasting afneemt, d.w.z. dat na het aanbrenge van de (eerste) belasting de scheurbreedte in de loop van de tijd vermeerderd. Als de waarde van de schuifspanning vermindert tot τ_∞ , dan wordt de op den duur optredende scheurbreedte:

$$\Delta s_{\max} = \beta \cdot 0,6 \bar{\sigma}_y s \left(1 - \frac{\tau_\infty}{\bar{\sigma}_y} \frac{s}{d} \right) \cdot 10^{-6} \text{ cm} \quad \dots \dots \dots (5a)$$

Hoewel over de grootte van τ_∞ voor de verschillende staalsoorten weinig informaties ter beschikking staan, kan in geval van rondstaal worden gesteld dat de waarde van τ_∞ klein is. Als eenvoudigheidshalve wordt aangenomen $\tau_\infty = 0$, dan geldt voor rondstaal op den duur:

$$\Delta s_{\max} = \beta \cdot 0,6 \bar{\sigma}_y s \cdot 10^{-6} \text{ cm} \quad \dots \dots \dots (5b)$$

- b. het corrosie-proces verloopt veelal vrij langzaam. Slechts die scheurbreedte die vrijwel continu aanwezig is zou dus invloed kunnen uitoefenen. Bij een constructie, waarbij een duidelijke scheiding tussen enerzijds de blijvende en/of steeds wisselende belasting en anderzijds een af en toe optredende mobiele belasting optreedt, lijkt het dus aanvaardbaar de bepalende scheurbreedte alleen te betrekken op de eerstgenoemde belasting. De factor β in de verg. (1) en (5) stelt de verhouding van deze belasting tot de totale belasting voor, zodat geldt $\beta \leq 1$.

Over de maximale scheurbreedte optredend in rechthoekige balken en platen ten gevolge van blijvende en/of wisselende belasting is weinig bekend. Bij het I.B.B.C. zijn enkele proeven genomen met zulke liggers onderworpen

Vergelijking van gemeten en berekende waarden van Δs_{\max} voor enkele liggers onderworpen aan eigen gewicht en wisselende belasting

proefstuk	staal-soort	breedte in cm	hoogte in cm	$\bar{\sigma}_y$ in kgf/cm ²	aantal last-wisselingen	Δs_{\max} gemeten in mm	Δs_{\max} in mm berekend bij τ in kgf/cm ² gelijk aan:								
							0	10	20	30	40	50	60		
balk	1 QR 24	20,2	40,2	1330	40	0,13	0,15	0,13 ⁵	0,12						
	2 QR 24	24,0	37,7	1370	100	0,19	0,19 ⁵	0,17 ⁵							
	3 QR 24	16,0	25,2	1375	100	0,11	0,13 ⁵	0,12	0,10 ⁵						
	4 QR 24	8,0	12,8	1250	100	0,05	0,05 ⁵	0,05	0,04 ⁵						
plaat	5 staal I ¹⁾	100,0	10,3	3140	50	0,24	0,20 ⁵	0,19 ⁵							
balk	6 staal II ²⁾	20,0	40,0	2400	40	0,20	0,32	0,29	0,26	0,23	0,20	0,17			
	7 staal II ²⁾	20,0	40,0	2000	40	0,13	0,26	0,24	0,21 ⁵	0,19	0,16 ⁵	0,14 ⁵	0,12		

¹⁾ Staal I: staal met verhoogde rekgrens.
²⁾ Staal II: geprofileerd staal met verhoogde rekgrens.

aan eigen gewicht en een wisselende belasting tot een maximale staalspanning $\bar{\sigma}_y$. Met behulp van verg. (5) met $\beta = 1$, de in de tabel aangegeven waarden van $\bar{\sigma}_y$ en de overige gegevens van de liggers, zijn de waarden van Δs_{\max} berekend voor verschillende waarden van τ . Uit de tabel volgt dat verg. (5) aanleiding geeft tot waarden van Δs_{\max} die behoorlijk overeenstemmen met de gemeten waarden. Daarbij blijkt dat in geval van rondstaal de waarde van τ klein is, terwijl bij de balken 6 en 7 (gewapend met geprofileerd staal) van hogere, doch redelijk aanvaardbare, τ -waarden moet worden uitgegaan om tot overeenstemming te komen. In beide gevallen moet worden bedacht dat het aantal lastwisselingen beperkt was.

2 Enkele gevolgtrekkingen

Ter vermindering van s , dus van Δs_{\max} , zou men de waarde van c (zie verg. 3 of 3a) kunnen verkleinen en daarmee de dekking. In de inleiding is echter reeds vermeld dat dan de kans op aanzienlijke corrosie vermeerderd. Beter is het de wapening in zo klein mogelijke eenheden over de breedte van een ligger te verdelen. Deze tendentie zal aan de hand van enkele voorbeelden worden toegelicht, waarbij wordt uitgegaan van rondstaal ($\bar{\sigma}_y = 1400 \text{ kgf/cm}^2$) en een toelaatbare op den duur optredende scheurbreedte $\Delta \bar{s}_{\max} = 0,2 \text{ mm}$ (o.a. aanbevolen in C.U.R.-rapport no. 10 voor „buitenwerk”).

Ten aanzien van balken in buitenwerk bepaalt de G.B.V. een dekking op de beugels van 2,5 cm, waaruit een gemiddelde waarde van $c = 6 \text{ cm}$ volgt. Wordt gebruik gemaakt van verg. (5b) met $\beta = 1$ dan kunnen lijnen van gelijke waarden van n (aantal staven) worden bepaald die het verband aangeven tussen $\mu(f_y = \mu bh')$ en f_y in cm^2 (zie fig. 7). Dit betekent dat, als voor een balk de waarden van bh' en van f_y en dus ook van μ zijn bepaald (nodig voor het opnemen van het buigend moment), de hoeveelheid wapening tenminste over de uit de figuur volgende n staven dient te worden verdeeld opdat op den duur de toelaatbare scheurbreedte niet zal worden overschreden. Voor b.v. $\mu = 0,006$ en $f_y = 12 \text{ cm}^2$ volgt uit fig. 7 een minimum-aantal staven van 5,5, dus afgerond 6. Wordt de waarde van c groter dan zal het minimum-aantal staven snel toenemen (zie fig. 7 voor $c = 10 \text{ cm}$).

In verg. (3a) geldt voor platen $n = 1$. Wordt voorts gesteld $c = v + \frac{1}{2}d$, waarin v gelijk is aan de dekking op de wapening die, evenals μ , een gegeven waarde heeft, dan blijkt dat s , en dus ook Δs_{\max} , vermindert naarmate de staafdiameter d afneemt. Ook in dit geval blijkt dus het verdelen van de wapening in zo klein mogelijke eenheden gunstig te zijn. Omgekeerd zal een toelaatbare scheurbreedte beperkingen opleggen ten aanzien van de grootte van de staafdiameter. In fig. 8 is voor enkele waarden van v het verband tussen μ en de maximale toe te passen staafdiameter d_{\max} uitgezet. In dit voorbeeld zijn de waarden van d_{\max} in het algemeen vrij groot en is men alleen beperkt in de keuze van d bij grote waarden van v .

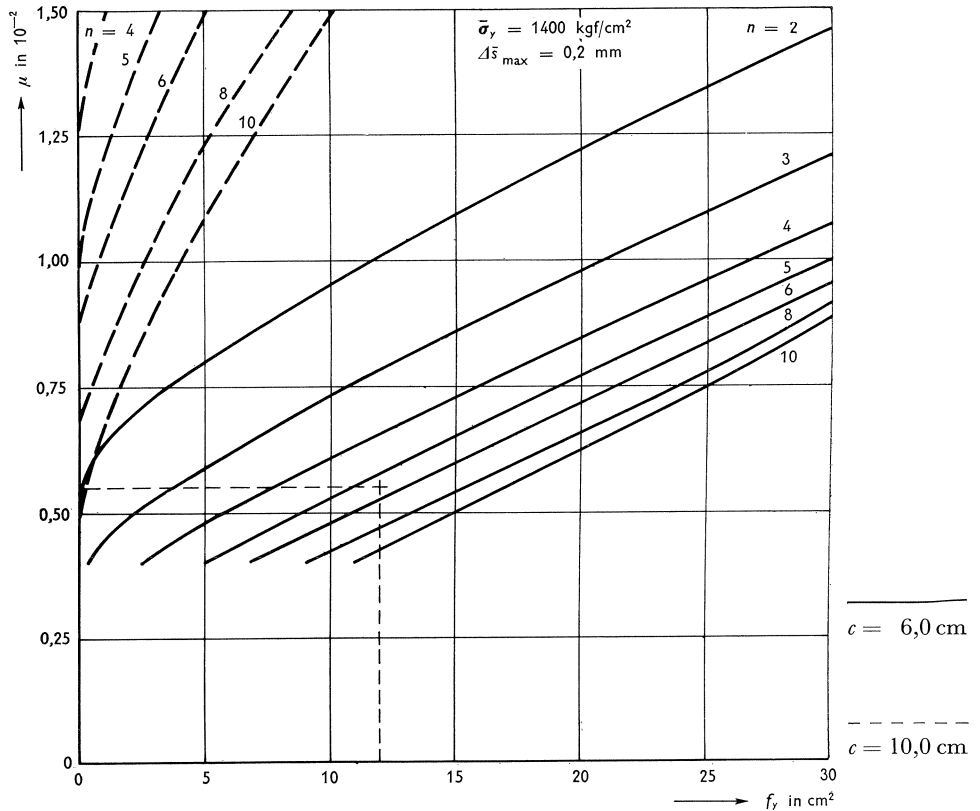


Fig. 7. Het aantal staven n als functie van μ en f_y dat minimaal nodig is in balken met resp. $c = 6,0$ en $10,0$ cm en bij $\bar{\sigma}_y = 1400$ kgf/cm², opdat op den duur een toelaatbare scheurbreedte van $0,2$ mm niet wordt overschreden.

Voor het opnemen van een gegeven buigend moment kan eenzelfde balk òf worden voorzien van rondstaal ($\bar{\sigma}_y = 1400$ kgf/cm²) òf van staal met een hogere toelaatbare spanning $\bar{\sigma}_y$ (hoogwaardig staal). Stelt men de hoeveelheid rondstaal $f_y = \mu_{1400} bh'$ dan kan met goede benadering worden gesteld:

$$\mu_{\bar{\sigma}_y} = \mu_{1400} \cdot \frac{1400}{\bar{\sigma}_y},$$

waarin $\mu_{\bar{\sigma}_y}$ het wapeningspercentage van het hoogwaardige staal voorstelt. Voor de balk, voorzien van rondstaal ($\tau_\infty = 0$), kan de waarde van Δs_{\max} worden bepaald met verg. (5b). Wordt van de balk, nu echter voorzien van hoogwaardig staal, dezelfde waarde van Δs_{\max} geëist dan zal $\tau_\infty > 0$ moeten zijn als wordt ondersteld dat het aantal staven in beide gevallen gelijk is en dat ook voor het hoogwaardige staal de scheurafstand wordt bepaald door de verg. (3) of (3a). In dit geval kan Δs_{\max} met behulp van verg. (5a) als functie van τ_∞ worden uitgedrukt. Met inachtneming van de eerder vermelde ver-

gelijking, een gegeven waarde van $\mu_{1400} = 0,01$, enkele gegeven waarden van de staafdiameter bij rondstaal t.w. $d_{1400} = 28$ en 14 mm, een gegeven aantal staven t.w. $n = 8$ resp. 4 en met $c = 6$ cm, zijn door gelijkstelling van de uitkomsten van de verg. (5a) en (5b) de vereiste waarden van τ_{∞} als functie van $\bar{\sigma}_y$ bepaald. In fig. 9 is dit verband met getrokken lijnen aangegeven.

Fig. 8. De maximale toe te passen staafdiameter in platen als functie van μ voor enkele waarden van de dekking v op de wapening bij $\bar{\sigma}_y = 1400$ kgf/cm², opdat op den duur een toelaatbare scheurbreedte van $0,2$ mm niet wordt overschreden.

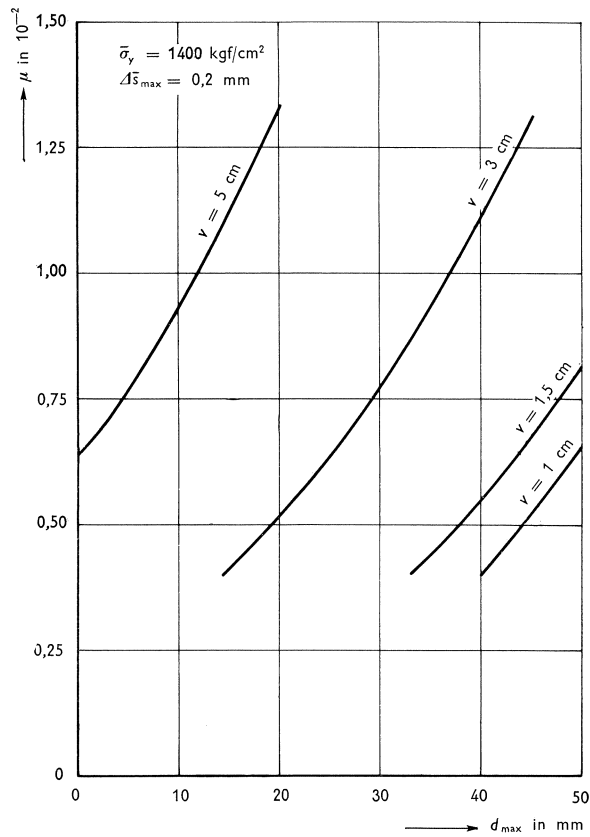
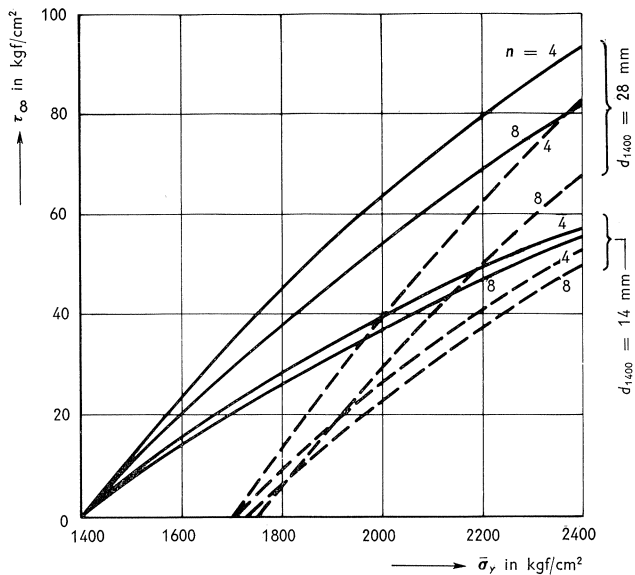


Fig. 9. De vereiste waarde van de schuifspanning τ_{∞} bij hoogwaardige staalsoorten als functie van de toelaatbare staalspanning $\bar{\sigma}_y$, opdat de maximale scheurbreedte in een balk, voorzien van hoogwaardig staal, niet groter is dan die in dezelfde balk, echter voorzien van rondstaal ($\bar{\sigma}_y = 1400$ kgf/cm²), waarbij is ondersteld dat in de beide gevallen hetzelfde buigend moment moet worden opgenomen. De getrokken lijnen hebben betrekking op de onderstelling dat de scheurafstand bij hoogwaardig staal eveneens kan worden bepaald met verg. (3) of (3a); de gestippelde lijnen geven het verband weer in het geval dat de scheurafstand slechts 80% bedraagt van die volgend uit deze vergelijking.



Voor het geval dat de waarde van de scheurafstand voor hoogwaardig staal 80% bedraagt van die volgend uit de verg. (3) of (3a) wordt het verband in fig. 9 aangegeven door de gestippelde lijnen.

Uit de figuur volgt dat de τ_{∞} -waarden voor hoogwaardig staal, vereist om geen grotere scheurbreedten te bereiken dan bij rondstaal, vrij groot kunnen zijn. Door de gelijkstelling van de verg. (5a) en (5b) komt echter de grootte van Δs_{\max} in fig. 9 niet tot uiting. In vele gevallen is de waarde van Δs_{\max} kleiner dan de toelaatbare waarde, zodat in geval van hoogwaardig staal de vereiste τ_{∞} -waarde lager kan zijn dan die, welke uit fig. 9 zou volgen. Ook door een verdeling van de wapening van hoogwaardig staal in kleinere eenheden kan de vereiste τ_{∞} -waarde nog worden verlaagd. Het één en ander zal aan de hand van het hierna volgende rekenvoorbeeld worden toegelicht.

Beschouw een balk met $c = 6,0$ cm, voorzien van een wapening van rondstaal van $4 \varnothing 28$ mm waarbij geldt $f_y = \mu b h' = 0,01 b h'$. De toelaatbare staalspanning $\bar{\sigma}_y$ is gelijk aan 1400 kgf/cm²; de toelaatbare scheurbreedte (op den duur) is $0,2$ mm. Met behulp van de verg. (3a) en (5b) kan voor $\beta = 1$ worden berekend dat:

$$\Delta s_{\max} = 0,19^5 \text{ mm} < 0,2 \text{ mm.}$$

Wordt dezelfde balk echter voorzien van hoogwaardig staal met $\bar{\sigma}_y = 1900$ kgf/cm², dan is met goede benadering $\mu = 0,01 \cdot \frac{1400}{1900} = 0,73^5 \cdot 10^{-2}$, zodat met $4 \varnothing 24$ mm kan worden volstaan. Uit de verg. (3a) en (5a) volgt dan:

$$\Delta s_{\max} = 0,278 (1 - 0,00535 \tau_{\infty}) \text{ mm} \dots \dots \dots (6)$$

Uit de gelijkstelling van (6) met de boven vermelde waarde van Δs_{\max} volgt de vereiste waarde $\tau_{\infty} = 55$ kgf/cm², welke waarde ook in fig. 9 bij $\bar{\sigma}_y = 1900$ kgf/cm² en $4 \varnothing 28$ mm is af te lezen. Wanneer (6) gelijk wordt gesteld aan de toelaatbare scheurbreedte, dan wordt de vereiste waarde $\tau_{\infty} = 52$ kgf/cm². Indien men echter slechts de beschikking heeft over een waarde van b.v. $\tau_{\infty} = 30$ kgf/cm², dan is de bijbehorende waarde van Δs_{\max} volgens (6):

$$\Delta s_{\max} = 0,23^5 \text{ mm} > 0,2 \text{ mm}$$

zodat de toelaatbare scheurbreedte wordt overschreden. De hoeveelheid wapening f_y ($4 \varnothing 24$ mm) kan echter ook worden verdeeld over b.v. $9 \varnothing 16$ mm. Met behulp van de verg. (3a) en (5b) en $\tau_{\infty} = 30$ kgf/cm² is dan te berekenen dat:

$$\Delta s_{\max} = 0,20 \text{ mm,}$$

dus juist gelijk aan de toelaatbare scheurbreedte, m.a.w. door het verdelen van de wapening in kleinere eenheden blijkt de vereiste waarde van τ_{∞} te zijn afgenomen van 52 tot 30 kgf/cm².