

# EIGEN SPANNINGEN EN SCHEURVORMING IN STALEN PROFIELEN

*In haar praktijk is de Werkgroep een enkele maal in aanraking gekomen met het verschijnsel van scheurvorming in gebogen stalen profielen. Op het eerste gezicht lijken de scheuren soms onverklaarbaar, daar ze schijnbaar in de drukzone voorkomen. In dergelijke zones kunnen echter hoge initiale trekspanningen aanwezig zijn. Wisselspanningen of het verouderingsverschijnsel bij hiervoor gevoelig materiaal kunnen dan tot een spoedig optreden van breuk leiden.*

## Inleiding

Onder eigen spanningen verstaan we de spanningen, die onafhankelijk zijn van de uitwendig op het constructie-element aangrijpende belastingen (met inbegrip van het eigen gewicht), die dus óf in het nog onbelaste element reeds aanwezig zijn, óf na het wegnemen van de belasting in het element achterblijven (lit. 1).

Eigen spanningen kunnen worden veroorzaakt door de wijze van vervaardigen van het materiaal (bijvoorbeeld gietspanningen bij gietijzer, krimpspanningen bij beton) of het bewerken daarvan (bijvoorbeeld koud walsen of elektrisch lassen bij staal), door temperatuurverschillen, of door een belasting (vervorming) van het element waarbij in een gedeelte de elasticiteitsgrens wordt overschreden, terwijl bij het ontlasten elastische terugvering optreedt, zodat resterende spanningen (c.q. vervormingen) overblijven.

Met deze laatste categorie willen we ons hier bezighouden en wel in het bijzonder met op buiging belaste elementen. We gaan dus na welke restspanningen (residu-spanningen) kunnen achterblijven wanneer stalen profielen koud worden gebogen.

## Buiging van een rechthoekige doorsnede

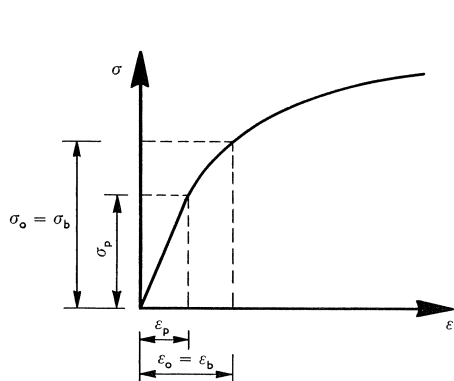


Fig. 1.  $\sigma$ - $\epsilon$  diagram (voor trek zowel als voor druk).

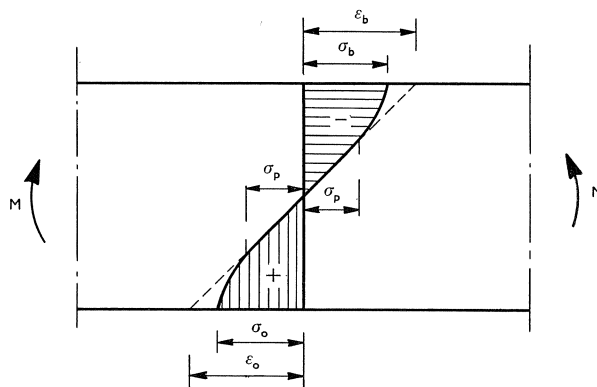


Fig. 2. Verloop van  $\sigma$  en  $\epsilon$  in een op buiging belaste balk van rechthoekige doorsnede bij overschrijding van de proportionaliteitsgrens ( $\sigma_p$ ).

Bij het veerkrachtsgeval van buiging gaat men uit van de hypothese van Bernoulli: vlakke doorsneden blijven na buiging vlak, ook indien in het materiaal de proportionaliteitsgrens, de elasticiteitsgrens of de vloeigrens wordt overschreden.

Het verloop van de vormveranderingen  $\varepsilon$  in een doorsnede van een op buiging belaste balk blijft dus lineair. Wanneer het materiaal zich bij trek en druk gelijk gedraagt (fig. 1), dan zijn de beide helften voor trek en druk van het spanningsverloop in een op buiging belaste balk van rechthoekige doorsnede ook gelijk (fig. 2). Bovendien is dit verloop gelijkvormig met het  $\sigma - \varepsilon$  diagram van het materiaal.

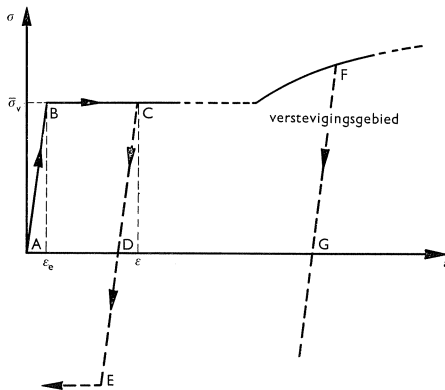


fig. 3. Geidealiseerd  $\sigma - \varepsilon$  diagram voor staal.

Voor staal kunnen we dit  $\sigma - \varepsilon$  diagram met voldoende nauwkeurigheid idealiseren tot het verloop zoals aangegeven is in fig. 3. Het verband tussen spanning en rek is lineair tot de vloeigrens van het materiaal wordt bereikt. De spanning blijft daarna constant, terwijl de rek enorm kan toenemen, bij vloeistaal bijvoorbeeld tot twintig maal de grootste elastische rek ( $\varepsilon_e$ ). Daarna komt men in het zogenaamde „verstevigingsgebied”, waar de spanning weer kan oplopen.

Het spanningsverloop in de rechthoekige doorsnede van een op buiging belaste balk neemt dus bij toenemend buigend moment achtereenvolgens de gedaanten van fig. 4 a, b en c aan.

In stadium (a) is in de uiterste vezels juist de vloeigrens  $\bar{\sigma}_v$  bereikt. Het moment dat door de doorsnede wordt overgebracht bedraagt:

$$M_e = W \cdot \bar{\sigma}_v = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 \cdot \bar{\sigma}_v.$$

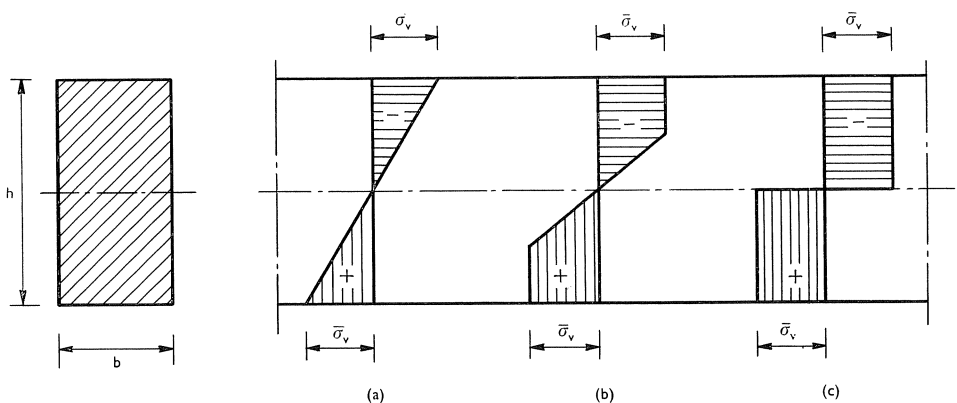


fig. 4. Spanningsverloop in rechthoekige doorsnede bij toenemend buigend moment.

In stadium (b) is de hoekverdraaiing van de doorsnede toegenomen. De spanning in de uiterste vezels is gelijk gebleven aan  $\bar{\sigma}_v$ . Meer naar binnen gelegen vezels hebben nu echter ook de vloeigrens bereikt.

In stadium (c) is de limietstand bereikt, waarbij zich het zgn. „volplastisch” moment heeft ontwikkeld. Dit moment dat gelijk is aan het product van de resultante van alle druk- of trekkrachtjes en hun inwendige hefboomsarm bedraagt dus:

$$M_{pl} = \frac{1}{2} b \cdot h \cdot \sigma_v \cdot \frac{1}{2} h = \frac{1}{4} b \cdot h^2 \cdot \sigma_v.$$

Het moment dat onder deze omstandigheden kan worden overgebracht bedraagt  $1,5 \times$  het moment dat in het elastisch stadium (a) nog juist kan worden overgebracht.

Wanneer nu de in stadium (c) gebogen staaf wordt losgelaten, dan zal deze zich ontspannen. Men superponeert a.h.w. een tegengesteld moment —  $M_{pl}$  op het bestaande. Het verband tussen de hierbij behorende spanningen en vormveranderingen is nu echter geheel lineair en wordt in het  $\sigma - \varepsilon$  diagram (fig. 3) weergegeven door de neergaande lijn  $CDE$ , die evenwijdig is aan  $AB$ , wanneer in de aanvang bij het volplastisch moment het verband tussen  $\sigma$  en  $\varepsilon$  in een vezel wordt aangegeven door het punt  $C$ . De bij het ontspannen optredende vormverandering  $\varepsilon$  is dus onafhankelijk van de reeds aanwezige plastische vormveranderingen wordt hierop eenvoudig gesuperponeerd.

Het verloop van de buigspanningen over de doorsnede t.g.v. dit tegengestelde moment is dus ook lineair (fig. 5) en de extreme spanningen in de uiterste vezels tengevolge hiervan bedragen dus  $\sigma = \pm 1,5 \bar{\sigma}_v$ . Deze spanningen worden dus gesuperponeerd op de reeds bestaande spanningen uit stadium (c).

Na loslaten van de staaf zien we dus dat, ofschoon de doorsnede geen buigend moment meer hoeft over te brengen, er toch spanningen zijn achtergebleven, zoals aangegeven in fig. 5 a, b. Deze inwendige spanningen vormen een evenwichtssysteem. De doorsnede brengt dus noch een kracht, noch een moment over. In de uiterste vezels bedragen de spanningen  $\sigma_e = \pm 0,5 \bar{\sigma}_v$ . Deze zijn precies andersom gericht als de vloeispanningen in stadium (c). Een te voren gestuikte zone bezit nu bv. een initiale trekspanning. Deze zone bezit na

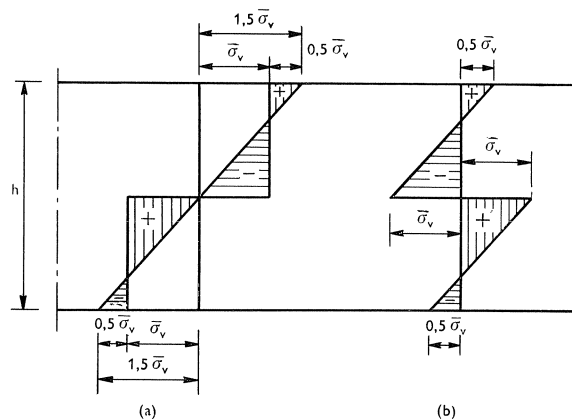


fig. 5. Spanningsverloop in rechthoekige doorsnede na wegnemen van het volplastisch moment  $M_{pl}$  (a=b).

afloop echter wel een blijvende verkorting omdat de plastische vormveranderingen bij het buigen in stadium (c) veel groter zijn geweest dan de elastische bij het ontspannen. De staaf is blijvend gebogen.

### Buiging van niet symmetrische profielen

Bij niet symmetrische profielen kunnen deze residu-spanningen nog veel grotere waarden aannemen.

We beschouwen bv. een U-profiel (fig. 6a), dat om de x-as wordt gebogen.

In het volplastisch stadium is de spanningsverdeling als aangegeven is in fig. 6b. De neutrale lijn gaat nu niet meer door het zwaartepunt van de doorsnede, maar is naar beneden verschoven. Als voorwaarde geldt dat de trek- en drukkkrachtjes in een doorsnede evenwicht moeten maken.

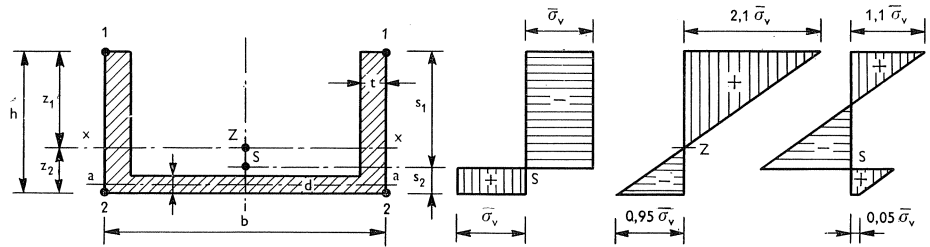
We hebben het profiel enigszins geschematiseerd, dus we verwaarlozen de afschuiningen van de flenzen en de afrondingen van de hoeken.

De afstand van de neutrale lijn tot de bovenkant van de flenzen  $s_1$ , volgt dan uit de volgende vergelijking (zie ook fig. 6):  $2 \cdot 0,85 \text{ cm} \cdot s_1 \cdot \bar{\sigma}_v = 10,0 \text{ cm} \cdot 0,60 \text{ cm} \cdot \bar{\sigma}_v + 2 \cdot 0,85 \text{ cm} \cdot (5,0 - 0,60 - s_1) \text{ cm} \cdot \bar{\sigma}_v$ .

Hieruit volgt:  $s_1 = 3,96 \text{ cm}$ ,  $s_2 = 1,04 \text{ cm}$

Het volplastisch moment bedraagt (momenten voorwaarde t.o.v. de hartlijn  $a - a$  van het lijf):

$$\begin{aligned} M_{pl} &= 2 \cdot 0,85 \text{ cm} \cdot 3,96 \text{ cm} \cdot \sigma_v \cdot \left[ \frac{3,96}{2} + 1,04 - 0,30 \right] \text{ cm} - \\ & 2 \cdot 0,85 \text{ cm} \cdot \left[ 1,04 - 0,60 \right] \text{ cm} \cdot \bar{\sigma}_v \cdot \left[ \frac{1,04 - 0,60}{2} + 0,30 \right] \text{ cm} = \\ & = \left[ 18,3 - 0,388 \right] \bar{\sigma}_v \text{ kgcm} = 17,9 \bar{\sigma}_v \text{ kgcm}. \end{aligned}$$



	(a)	(b)	(c)	(d)
Profiel U 10:	$b = 10,00 \text{ cm}$	$d = 0,60 \text{ cm}$		$I_x = 29,3 \text{ cm}^4$
	$h = 5,00 \text{ cm}$	$t = 0,85 \text{ cm}$		$W_{x,1} = 8,49 \text{ cm}^3$
	$z_1 = 3,45 \text{ cm}$			$W_{x,2} = 18,90 \text{ cm}^3$
	$z_2 = 1,55 \text{ cm}$			

Fig. 6. Spanningsverloop in profiel U 10 (Fig. a.) t.g.v.:

- 1° Het volplastisch moment  $M_{pl}$  (Fig. b.)
- 2° Hetzelfde moment elastisch opgenomen (Fig. c.)
- 3° Na wegnemen van het volplastisch moment  $M_{pl}$  (Fig. d.)

Bij het ontlasten van de staaf superponeren we dus een even groot moment in tegengestelde richting op het reeds aanwezige. Dit wordt nu echter elastisch opgenomen, zodat de spanningen in de uiterste vezels tengevolge daarvan bedragen (fig. 6c):

$$\text{In punt 1: } \sigma_1 = \frac{M_{pl}}{W_1} = \frac{17,9 \bar{\sigma}_v}{8,49} \text{ kg/cm}^2 = +2,11 \bar{\sigma}_v \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{In punt 2: } \sigma_2 = \frac{M_{pl}}{W_2} = \frac{17,9 \bar{\sigma}_v}{18,9} \text{ kg/cm}^2 = -0,95 \bar{\sigma}_v \text{ kg/cm}^2$$

De resulterende spanningen na ontlasten, die dus ontstaan uit superpositie van de spanningen in fig. 6b en 6c, zijn weergegeven in fig. 6d. Deze bedragen dus in de uiterste vezels respectievelijk:

$$\text{In punt 1: } \sigma_1 = -\sigma_v + 2,11 \bar{\sigma}_v = +1,11 \bar{\sigma}_v.$$

$$\text{In punt 2: } \sigma_2 = +\sigma_v - 0,95 \bar{\sigma}_v = +0,05 \bar{\sigma}_v.$$

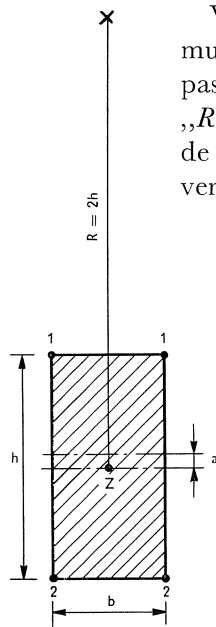
De spanningsverdeling wijkt nu sterk af van die uit fig. 5a, b. Door de lage ligging van het zwaartepunt ontbreekt de onderste negatieve zone geheel, zodat er slechts drie spanningsgebieden van afwisselend teken voorkomen. In dit geval wordt de gedrukte kern omsloten door twee trekzônes. Ook hier komen dus in de gestuikte flens na afloop trekspanningen voor. Was de staaf eerst in tegengestelde richting plastisch verbogen, dan verwisselen de tekens en zou een getrokken kern door gedrukte zônes zijn omgeven, wat gunstiger is.

Uiteraard vormen de resterende spanningskrachtjes weer een evenwichtssysteem. De extreme resterende trekspanning in de flens is hier zelfs groter dan de vloeispanning. Wanneer de vervormingen zo groot zijn geweest, dat zij in het verstevigingsgebied zijn gekomen (fig 3), dan kunnen deze spanningen ook inderdaad boven de vloeigrens uitgaan.

Zijn de vervormingen minder groot geweest, dan zullen de extreme spanningen gelijk zijn aan de vloeispanning en zullen de piekspanningen in het diagram van fig. 6d worden afgesneden op de wijze van fig. 4b. Het algemene beeld blijft echter als in fig. 6d is aangegeven. In ieder geval is het duidelijk dat zeer hoge residuspanningen kunnen ontstaan.

### **Sterk gekromde staven**

Wanneer de staaf na afloop van het koudbuigproces sterk gekromd blijft, worden de residuspanningen relatief nog groter. Dit blijkt wanneer we bij het ontspannen van de staaf de formules voor sterk gekromde staven toepassen i.p.v. die voor rechte staven. Dit ontspannen geschiedt elastisch en voor de in de formules voorkomende kromtestraal houden we de waarde van de na afloop blijvende kromtestraal aan. De neutrale lijn verplaatst naar binnen; het spanningsverloop is niet meer lineair, aan de binnenzijde wordt de spanning groter, aan de buitenzijde kleiner dan met de lineaire spanningsverdeling overeenkomt.



Voor een rechthoekige doorsnede (fig. 7) zijn de formules nog eenvoudig (men zie bv. J. Klopper: „Toegepaste Mechanica II bl. 93 ev.). Bedraagt de kromtestraal „ $R$ ” van de hartlijn van de balk na afloop bv.  $2 \times$  de hoogte „ $h$ ” van het profiel dan vinden we voor de verplaatsing „ $a$ ” van de neutrale lijn:  $a = 0,042 h$ .

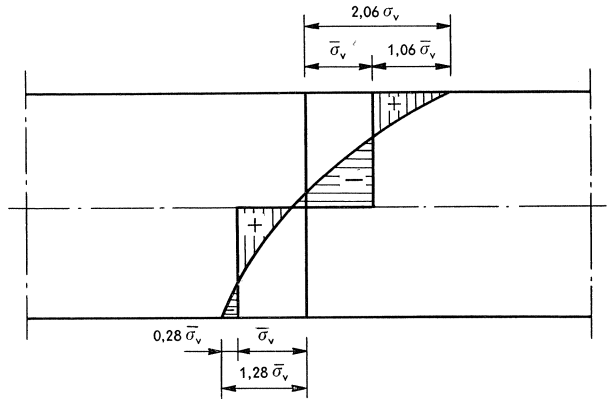


Fig. 7. Spanningsverloop in rechthoekige doorsnede na wegnemen van volplastisch moment  $M_{pl}$  bij blijvende sterke kromming:  $R = 2h$

Voor de extreme spanningen vinden we:

$$\sigma_1 = \frac{M}{R.bh} \cdot 16,46, \quad \sigma_2 = \frac{M}{R.bh} \cdot 10,27$$

Bij ontspannen van de staaf worden dus de extreme spanningen:

$$\sigma_1 = \frac{\frac{1}{4}.b.h^2 \cdot \bar{\sigma}_v}{2 h.b.h} \cdot 16,46 = 2,06 \bar{\sigma}_v$$

$$\sigma_v = \frac{\frac{1}{4}.b.h^2 \cdot \bar{\sigma}_v}{2 h.b.h} \cdot 10,27 = 1,28 \bar{\sigma}_v$$

Aan de binnenzijde blijft bv. een residuspanning achter:

$\sigma_1 = + 2,06 \bar{\sigma}_v - \bar{\sigma}_v = + 1,06 \bar{\sigma}_v$  (trek), wat dus aanmerkelijk meer is dan in fig. 5 is aangegeven.

Voor het U-profiel wordt de zaak gecompliceerder. Voor een uit rechthoeken samengesteld profiel vindt men formules voor sterke kromming bv. in F. Bleich: Stahlhochbauten Bd II. Het spanningsbeeld bij ontspannen verloopt analoog aan dat uit fig. 7 en ook hier is dus nog een vergroting van de residutrekspanning te verwachten.

### Consequenties

In verschillende gevallen kunnen deze residuspanningen onaangename gevolgen hebben, bv. indien men te maken heeft met verouderingsgevoelig ma-

teriaal of wanneer het constructie-element later aan dynamische belastingen c.q. trillingen wordt blootgesteld.

Spontane veroudering noemt men het verschijnsel, dat de slagwaarde van een materiaal, dat geruime tijd in gestrekte toestand heeft verkeerd, sterk is achteruitgegaan. Sommige materialen zijn hiervoor bijzonder gevoelig. Het is begrijpelijk dat initiale trekspanningen voor dergelijk materiaal aanleiding tot een versterkt verouderingsverschijnsel kunnen zijn. Zodoende kan een ruwe behandeling van de staven, bv. schokken dan wel botsen bij transport of montage, scheurvorming in de trekzônes doen ontstaan, zoals de ervaring heeft geleerd.

Wanneer een staaf aan dynamische belastingen c.q. trillingen is onderworpen, spelen de vermoeingssterkten van het materiaal een belangrijke rol. In fig. 8 zijn deze voor fijn bewerkte, echter niet gepolijste, proefstaven van St 37 aangegeven in het zgn. Smith-diagram. Op de horizontale as is uitgezet de gemiddelde spanning in een staaf, op de verticale as zijn uitgezet de benedenste en de bovenste grens van de verschillende vermoeingssterkten na  $10^7$  spanningswisselingen. De lijn onder  $45^\circ$  snijdt dus van de verticale ordinaten weer het gedeelte af, dat gelijk is aan de gemiddelde spanning en de wissel-

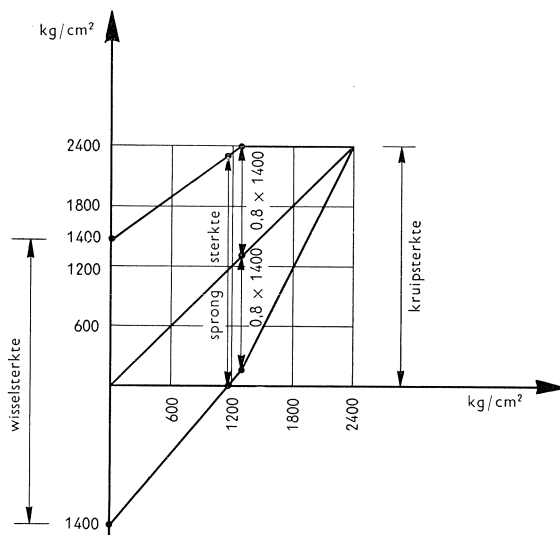


Fig. 8. Vermoeidheidsdiagram van Smith.

spanning schommelt dus om deze waarden heen en weer. We kennen de begrippen: wisselsterkte (gemiddelde spanning = 0), sprongsterkte (onderste grens = 0) en kruipsterkte = de grens van statische vermoeiing, d.i. de statische spanning waarbij nooit breuk zal optreden.

Het diagram is in het gebied van de kruipsterkte nog niet volledig bekend, maar het is wel duidelijk dat bij toenemende gemiddelde spanning, dus bv.

ook bij aanwezigheid van initiale spanningen, in een staaf de toelaatbare wisselspanning afneemt. Bij een gemiddelde spanning die de vloeigrens nadert is de toelaatbare wisselspanning zeer gering geworden. Een staaf met grote initiale spanningen is dus weinig geschikt om blijvend enigszins belangrijke wisselspanningen op te nemen en zal, indien deze toch voorkomen, spoedig tot breuk kunnen geraken.

#### LITERATUUR:

A. en L. Föppl: Drang und Zwang, Bd II 4e dr. 1944.  
J. Klopffer: Toegepaste Mechanica, Bd II 5e dr. 1951.  
F. Bleich: Stahlhochbauten, Bd II 1933.

---

### MEDEDELINGEN VAN DE REDACTIE

De ontwikkeling van het speurwerk in de laatste tijd leidt steeds meer in de richting van samenwerking, „teamwork”, zowel in groter als in kleiner verband. De naam Werkgroep duidt hier reeds op, voor zover dit het samenwerken van een groep mensen binnen een bepaald verband op een bepaald terrein inhoudt. De wetenschappelijke eenling neemt relatief in betekenis af.

De wetenschappelijke onderzoekingen als intern speurwerk, doch ook de adviezen aan de praktijk komen slechts tot stand door samenwerking, waarbij ieder zijn bijdrage levert.

Dit is de reden waarom besloten is de artikelen in deze W.G.S.-mededelingen zonder schrijversnaam te laten verschijnen.

Behalve van de redactie zullen zij van verschillende medewerkers zijn, waarbij ieder op zijn speciaal terrein naar voren treedt. Maar het zou onjuist zijn dan slechts de schrijver te vermelden omdat de neerslag van het onderzoek in het artikel het werk is geweest van velen, ook van degenen die er soms niet rechtstreeks bij waren betrokken.

\* \* \*

Bij de bespreking, in de W.G.S.-mededelingen no. 1, van de financiële middelen van de Werkgroep is ook de betekenis uiteengezet van het Fonds voor Experimenteel Beton-onderzoek (FEBO), waarvoor de middelen worden verkregen door de beschikbaarstelling van een bedrag, dat verband houdt met de hoeveelheid van de in Nederland verkochte cement en door een jaarlijkse gift van de Beton-aannemersbond. Naar aanleiding van enkele vragen van lezerszijde moge alsnog worden vermeld dat de afzondering van het eerstgenoemde bedrag geschiedt door de Stichting Cement Centrale voor Nederland (C.C.N.), waarin zowel binnen- als buitenlandse cementproducenten verenigd zijn. Dit beschikbaar stellen geschiedt dus zonder prijsverhoging van het cement.

De Stichting C.C.N. stelt voor elk onderzoek afzonderlijk gelden beschikbaar en laat zich over de noodzakelijkheid hiervan voorlichten door een Commissie van Advies voor Research, waarin naast vertegenwoordigers van de Nederlandse, Belgische en Duitse cementindustrie ook drie door de Betonvereniging aangewezen leden zitting hebben.

De verdere regeling, als het financieel beheer en de uitvoering, berust bij de Betonvereniging.

Voor het overige moge naar de in het eerste nummer vermelde uiteenzettingen over de organisatie en werkwijze van dit fonds worden verwezen.