

## $n$ -METHODE OF $n$ -VRIJE METHODE BIJ DE BEREKENING VAN OP BUIGING BELASTE LIGGERS?

*De probleemstelling, die in het algemeen geformuleerd wordt door de vraag „ $n$ -methode of  $n$ -vrije methode?” wordt aan een kritisch onderzoek onderworpen. Dit leidt tot een geheel andere omschrijving van het probleem.*

*Het probleem als zodanig blijkt dan veel omvangrijker en gecompliceerder te zijn, dan oorspronkelijk werd aangenomen.*

*Het resultaat, dat men door de invoering van een nieuwe berekeningswijze bereikt, blijkt daarentegen in eerste instantie hoofdzakelijk voor de bijzondere gevallen van praktisch belang te zijn. Het betere inzicht zal echter op den duur ook bij de toepassing van de gebruikelijke gewapende betonconstructies een gunstige invloed uitoefenen.*

*In aansluiting op het artikel in de W.G.S.-Mededelingen (1953 no. 3) „Enkele beschouwingen over de beoordeling van de betrouwbaarheid van op buiging belaste gewapend betonconstructies” worden de eisen, die men aan een constructie stelt in het licht van bovengenoemde nieuwe probleemstelling nader uitgewerkt.*

*Ter sprake komen o.a. de definitie en de berekening van het breukmoment — een berekeningswijze, volgens welke de scheurvorming in een balk bepaald zou kunnen worden — het begrip veiligheidscoëfficiënt — de invloed van de factor tijd — de wijze, waarop het experiment ingeschakeld kan worden — de wijze, waarop in Duitsland het experimentele onderzoek is opgezet.*

### Inleiding

In de laatste tijd komt het probleem  $n$ -methode of  $n$ -vrije methode steeds meer in het middelpunt van de belangstelling te staan. Zo houdt in Nederland de Commissie A<sub>2</sub> ressorterend onder de Commissie voor Uitvoering Research (C.U.R.) zich met dit probleem bezig, terwijl op internationaal niveau ter bestudering van deze materie het „Comité Européen du Béton” is opgericht, waarin ook Nederland door een drietal afgevaardigden is vertegenwoordigd.

In dit artikel zullen aan dit probleem enige algemene beschouwingen worden gewijd. Hiertoe zal eerst een kort overzicht worden gegeven van de principes van beide rekenmethoden.

Zoals bekend is de gebruikelijke  $n$ -methode gebaseerd op de volgende aannamen:

- 1e. Zowel voor staal als beton wordt een rechtlijnig verband tussen de spanningen en vervormingen aangehouden (Wet van Hooke).
- 2e. De vormveranderingen zijn recht evenredig met hun afstand tot de neutrale lijn (hypothese van Bernoulli).
- 3e. De trekzone wordt gescheurd verondersteld.

Met bovenstaande aannamen kan nu, gebruikmakend van de evenwichtsvoorwaarden en uitgaande van bepaalde *toelaatbare spanningen* voor het staal en het beton het *toelaatbare buigende moment*  $\bar{M}$  worden berekend.

In de formule voor dit toelaatbare moment komt de verhouding (elasticiteitsmodulus van het staal): (elasticiteitsmodulus van het beton) voor, welke verhouding in Nederland door de letter  $n$  wordt aangeduid en waaraan de berekeningswijze haar naam heeft te danken.

De grondslagen voor de  $n$ -vrije methode zijn de volgende:

- 1e. Zowel voor het staal als voor het beton wordt het werkelijk  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagram zo goed mogelijk ingevoerd.
- 2e. De hypothese van Bernoulli is geldig.
- 3e. De trekzone is gescheurd.

Toepassing van de evenwichtsvoorwaarden geeft bij gegeven  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagrammen van het staal en het beton een eenvoudige berekeningswijze voor het *breukmoment*. De factor  $n$  komt bij de meeste, op deze grondslagen gebaseerde berekeningswijzen niet voor, vandaar de naam  $n$ -vrije berekeningsmethode.

Behalve het feit of de factor  $n$  al of niet in de berekening is opgenomen, is er echter een veel belangrijker verschil tussen beide methoden n.l. het feit, dat de  $n$ -methode in zijn huidige toepassing is gebaseerd op het *toelaatbare stadium*, terwijl de  $n$ -vrije methode een berekeningswijze van het *breukstadium* is.

### **Probleemstelling**

Bij de  $n$ -methode wordt de keuze van de toelaatbare spanningen bepaald door veel factoren, zoals de materiaaleigenschappen, de scheurvorming, de veiligheid tegen breuk, de waarschuwing tegen breuk, de economie, de uitvoering enz. Hoewel de berekening leidt tot een toelaatbaar moment, is toch bij de opzet enigszins rekening gehouden met de waarschijnlijke breuktoestand (volledig gescheurde trekzone, lage waarde van de elasticiteitsmodulus van het beton). De lage waarde van deze elasticiteitsmodulus zou ook kunnen wijzen op het in rekening brengen van de kruip van het beton. Dit verwerken van veel factoren in enkele coëfficiënten heeft tot gevolg, dat men de bij de  $n$ -methode gebruikte grootheden meer als rekengrootheden dan als fysische grootheden moet opvatten. Dat deze  $n$ -methode, die dus meer een *rekencode* is, bij de normale gewapend betonbouw tot betrouwbare constructies

leidt, is door de jaren heen in de praktijk wel bewezen. Een beter bewijs kan men zich niet denken! Voor de *gebruikelijke* constructies is er dus uit oogpunt van betrouwbaarheid geen reden om de *n*-methode af te danken.

Ernstige moeilijkheden met de *n*-methode treden pas op bij de toepassing van nieuwe materialen en systemen (voorgespannen beton, hoogwaardige staalsoorten, licht beton enz.)

Doordat in de *n*-methode geen *meetbare grootheden* voorkomen, is het zeer moeilijk, zo niet onmogelijk, de langs experimentele weg bepaalde deugdelijkheid van nieuwere toepassingen uit te drukken in de bij de *n*-methode gebruikte *rekeninggrootheden* ( $\bar{\sigma}_b, \bar{\sigma}_y, n$ ). Dit bezwaar werkt belemmerend op de ontwikkeling van nieuwe materialen.

Een andere berekeningsmethode, die gezien moet worden als een aanvulling op de bestaande en waarbij gestreefd wordt naar de toepassing van fysieke, dus meetbare grootheden, zou dit bezwaar kunnen opheffen. Bij deze nieuwe methode zullen de eisen, die bij de *n*-methode op min of meer verkapt manier zijn verwerkt, zo veel mogelijk expliciet behandeld moeten worden.

Een van deze eisen is de eis omtrent de veiligheid t.o.v. breuk. Deze breuktoestand nu kan zonder gebruikmaking van *n* berekend worden. Het probleem is hiermee echter niet opgelost. Ook de scheurvorming, de grootte van de veiligheidscoëfficiënt, de economie e.d. zullen hierin betrokken moeten worden.

De genoemde aanvulling op de tegenwoordige voorschriften zal dus in de eerste plaats moeten bestaan uit een duidelijke omschrijving van de eisen die men aan een constructie stelt.

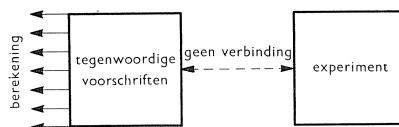
In de tweede plaats zal aangegeven moeten worden, op welke wijze men een experimenteel onderzoek kan uitvoeren voor die gevallen, die b.v. niet theoretisch toegankelijk zijn, of die betrekking hebben op nieuwe materialen of nieuwe systemen, of waarbij aan de juistheid van de berekeningsmethode wordt getwijfeld enz.

In de derde plaats zal men aan moeten geven, volgens welke grondslagen een berekening moet worden opgezet om een constructie aan de genoemde criteria te kunnen toetsen (contrôleberekening) of op welke wijze een constructie, die aan deze eisen voldoet, kan worden ontworpen (ontwerpberekening).

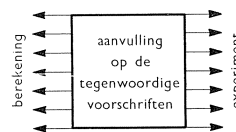
Bovenstaande gedachtengang kan op eenvoudige wijze worden gedemonstreerd door de schematische voorstelling van fig. 1.

Terwijl de tegenwoordige voorschriften de basis vormen voor alléén de berekening, terwijl het experiment hier min of meer los van staat (fig. 1a) zal de gewenste aanvulling dusdanig in opzet moeten zijn, dat het een uitgangs-

Fig. 1



a.



b.

punt vormt zowel voor de berekening als voor het experiment (fig. 1b).

Uit het bovenstaande moge blijken, dat de probleemstelling wel heel onvoldoende wordt weergegeven door de formulering:

„n-methode of n-vrije methode”.

Het probleem is veel omvangrijker en kan beter aldus weergegeven worden:

*„Hoe moeten eventuele nieuwe voorschriften worden opgebouwd, om een wetenschappelijk verantwoorde basis te vormen voor een berekeningsmethode, waarin fysieke grootheden op zodanige wijze worden verwerkt, dat, indien gewenst, op eenvoudige wijze de hulp van het experiment kan worden ingeroepen.”*

## **Formulering van de eisen, die aan de constructie worden gesteld**

### **Definitie van het breukmoment**

Aangezien de belangrijkste eis, die men aan een constructie stelt, die van de veiligheid t.o.v. breuk is, is het logisch, dat het invoeren van een berekeningsmethode, gebaseerd op de breuktoestand, aanbeveling verdient.

Aanvaarding van een breuktheorie zou bovendien het voordeel geven, dat een universele berekeningswijze ontstaat zowel voor normaal gewapend beton als voor voorgespannen beton. (Bij voorgespannen beton is men door de beperktheid van de *n*-methode reeds tot een breuktheorie overgegaan).

Gaat men over tot een breuktheorie, dan moet eerst het begrip breuk nauwkeurig worden gedefinieerd.

Om na te kunnen gaan, welke definitie van breuk of breuktoestand voor praktische toepassing het meest geschikt is, is het nodig de eisen, die men aan een constructie stelt en die in de W.G.S.-Mededelingen 1953— No. 3 reeds zijn behandeld, nader te onderzoeken.

Deze eisen kunnen op de volgende drie wijzen worden omschreven, t.w.:

- I. Bepaalde voorwaarden worden gesteld met betrekking tot
  - a. het bezwijken van de constructie;
  - b. de vervormingen, waarbij de constructie als onbruikbaar moet worden beschouwd;
  - c. de scheurvorming in het toelaatbare stadium;
  - d. de vervormingen in het toelaatbare stadium;
  - e. de waarschuwing tegen breuk.
- II. Als I met dit verschil, dat a en b zijn gecombineerd door het invoeren van een zgn. kritieke toestand (*A*). Hiertoe worden de specifieke lengteveranderingen van het staal en het beton aan bepaalde grenzen gebonden, wat een beperking van de specifieke hoekverandering  $d\varphi/dx$  inhoudt, waardoor men te grote vervormingen tracht te vermijden.
- III. Als I, met dit verschil, dat a, b en c zijn gecombineerd door het invoeren van een andere kritieke toestand (*B*). De specifieke lengteveranderingen van het staal en het beton worden weer aan bepaalde grenzen gebonden.

*Het uitgangspunt voor de definitie van breuk is bij omschrijving I dus de bezwijktoestand, bij omschrijving II en III een kritieke toestand.*

Ook aan de berekening moeten bepaalde eisen worden gesteld. Een berekening is slechts dan aanvaardbaar, indien aan de volgende voorwaarden wordt voldaan.

*Voorwaarde 1 De gestelde eisen waarop eventuele nieuwe voorschriften moeten worden gebaseerd moeten voor berekening toegankelijk zijn.*

*Voorwaarde 2 Deze eisen moeten proefondervindelijk op eenvoudige wijze zijn te bepalen.*

*Voorwaarde 3 De berekening moet zodanig zijn, dat deze met de proef overeenstemt.*

*Voorwaarde 4 De berekening moet eenvoudig zijn.*

*Ad voorwaarde 1.* Zowel de kritieke- als de bezwijktoestand is voor berekening toegankelijk.

*Ad voorwaarde 2.* Een kritieke toestand is proefondervindelijk moeilijker te bepalen dan de bezwijktoestand. De kritieke toestand, die vastgelegd wordt door bepaalde, specifieke vervormingen in het staal en het beton, zou slechts door middel van *rekmetingen* proefondervindelijk kunnen worden bepaald. Deze rekmetingen zijn echter niet eenvoudig uit te voeren.

De bezwijktoestand daarentegen kan zonder gecompliceerde rekmetingen proefondervindelijk bepaald worden.

Zoals bekend, verandert het gedrag van de constructie na verloop van tijd ten gevolge van kruip en krimp. Kruip- en krimpproeven zijn echter langdurig en kostbaar. Het is daarom beter, bij de formulering van de aan een constructie gestelde eisen, de toestand, die optreedt bij een *kortstondige* belasting als uitgangspunt te nemen. Eventuele invloeden van de factor tijd kunnen dan beter in de veiligheidscoëfficiënt worden verwerkt. Dit is niet zo onlogisch, als men bedenkt, dat de veiligheidscoëfficiënt voor een deel een onwetendheidscoëfficiënt is en dat over de invloed van de factor tijd nog zeer weinig bekend is.

Het volgende voorbeeld moge bovenstaande beschouwingen toelichten:

Men kan b.v. het bezwijkmoment definiëren als het grootste buigende moment, dat de doorsnede ononderbroken, 5 jaar lang kan overbrengen zonder te bezwijken, maar bij deze definitie zouden meerdere proeven genomen moeten worden, die elk ca. 5 jaar in beslag nemen. Het behoeft geen betoog, dat een dergelijke definitie de voortgang van de techniek zou belemmeren.

De volgende definitie zou b.v. beter zijn:

„Onder bezwijkmoment verstaat men het grootste buigende moment, dat een doorsnede zonder bezwijken kan overbrengen indien dit buigende moment in ca. 2 uur gelijkmatig van 0 tot aan zijn maximale waarde wordt opgevoerd.”

Het aldus gevonden bezwijkmoment zal waarschijnlijk iets groter zijn dan het eerstgenoemde, waarin ook eventuele kruipinvloeden zijn verwerkt.

Bij de keuze van de veiligheidscoëfficiënt kan men deze invloed echter enigszins in rekening brengen.

*Ad voorwaarde 3.* Aangezien de kritieke toestand moeilijk experimenteel te bepalen is kan de berekening moeilijk aan de proef worden getoetst.

Daar bij vrijwel alle uitgevoerde proeven de bezwijklast is bepaald, is bij de berekening van de bezwijktoestand toetsing aan het experiment zeer goed mogelijk. De gebruikelijke breuktheorieën blijken resultaten te geven welke over het algemeen redelijk overeen stemmen met de proefondervindelijk bepaalde bezwijktoestand.

Voor het toetsen van de berekening, gebaseerd op het kritieke stadium zouden waarschijnlijk nieuwe proeven moeten worden uitgevoerd, hetgeen een vlotte gang van zaken belemmert.

*Ad voorwaarde 4.* Zowel de berekening van de kritieke- als van de bezwijktoestand is vrij eenvoudig.

Bij een berekening volgens de kritieke toestand worden echter de punten a en b of de punten a, b en c gecombineerd. Indien enige correlatie tussen deze punten aanwezig is, of indien de invloed van één van deze punten gering is, dan zouden deze terwille van de eenvoud zoveel mogelijk kunnen worden teruggebracht tot één punt.

Een combinatie van de punten a en b is goed mogelijk, aangezien de bezwijktoestand over het algemeen niet erg veel zal afwijken van de toestand waarbij de constructie onbruikbaar wordt. Bij omschrijving I kan hiertoe het bezwijkmoment worden aangehouden, terwijl de eis van de grote vervormingen in de veiligheidscoëfficiënt wordt verwerkt. Bij omschrijving II zouden deze grote vervormingen in de kritieke toestand A worden verwerkt, zodat bij de veiligheidscoëfficiënt hiermee geen rekening meer behoeft te worden gehouden.

Aangezien tussen punt c en de overige punten geen correlatie bestaat, dient men, indien aan de scheurvorming bepaalde eisen worden gesteld, voor het bepalen van de scheurwijdte in het toelaatbare stadium een eenvoudige globale berekeningswijze op te stellen.

Punt d kan, voor zover hiervoor eisen worden gesteld worden berekend op de normale wijze.

Punt e kan waarschijnlijk op eenvoudige wijze verwerkt worden door het invoeren van grenswaapeningspercentages.

*Uit het bovenstaande volgt dat omschrijving I de voorkeur verdient, in het bijzonder, omdat voor de bezwijktoestand nu reeds voldoende gegevens beschikbaar zijn met betrekking tot het verband tussen theorie en proef. Het lijkt ons daarom wenselijk de bezwijktoestand als uitgangspunt te nemen en nader te definiëren.*

### *Algemene opmerking*

Op een bouwwerk zal breuk vrijwel steeds anders ontstaan dan in het laboratorium (meestal niet door overbelasting, doch door invloed van de factor tijd, grindnesten e.d.). De meest nauwkeurige definitie van breuk zou betrekking moeten hebben op de toestand, zoals deze zich op de bouwplaats voordoet. Aangezien deze toestand echter zeer moeilijk in het laboratorium te verwezenlijken is, zou een dergelijke definitie van breuk de voortzetting van het onderzoek in ongunstige zin beïnvloeden. Wij zijn daarom van mening, dat de definitie van breuk gekoppeld moet worden aan de laboratoriumproef, die wél op eenvoudige wijze te verwezenlijken is. Hierdoor ontstaat dus een *werkhypothese*, die voorlopig kan dienen als uitgangspunt voor het onderzoek. De mogelijke afwijkingen tussen laboratoriumproef en werkelijkheid dienen hierbij voorlopig, zowel in de berekening als bij de proef zo goed mogelijk te worden verdisconteerd in coëfficiënten. Uiteraard moet de proef hiertoe zo nauwkeurig mogelijk worden omschreven. Ook de wijze van bepalen van de materiaaleigenschappen van staal en beton moet nauwkeurig worden vastgelegd.

Op grond van het bovenstaande komt men tot de volgende definitie:

*„Onder het breukmoment wordt verstaan het grootste buigende moment, dat een doorsnede bij een kortstondige belasting en onder bepaalde (nog nader vast te leggen) omstandigheden kan overbrengen zonder te bezwijken.”*

Thans zullen de onder I genoemde eisen die men aan de constructie stelt afzonderlijk worden nagegaan (zie ook W.G.S.-Mededelingen 1953 — No. 3).

### **De eis met betrekking tot het bezwijken van de constructie**

Deze eis zal in de eerste plaats bestaan uit het voorschrijven van een voldoende veiligheid tegen bezwijken. Daartoe dient het begrip *veiligheidscoëfficiënt* nader te worden omschreven.

De veiligheidscoëfficiënt is in de eerste plaats een coëfficiënt, waarin de mate van onwetendheid wordt uitgedrukt.

In de tweede plaats geeft de veiligheidscoëfficiënt aan, in hoeverre het risico van een catastrofe wordt aanvaard.

De invoering van het begrip veiligheidscoëfficiënt biedt de mogelijkheid bepaalde onzekerheden op logische wijze te verwerken. Zo kan men zelfs verschillende coëfficiënten invoeren b.v. één voor de belastingen, één voor de materialen en één overkoepelende coëfficiënt.

Men vermenigvuldigt b.v. de *belastingen* met bepaalde coëfficiënten, afhankelijk van de kans op overbelasting en de nauwkeurigheid waarmee de belasting bekend is. Rustende belasting is meestal vrij nauwkeurig bekend en het is *niet* waarschijnlijk, dat deze belasting groter wordt. Hier kan de genoemde coëfficiënt dus klein zijn. Zo kan b.v. bij nuttige belasting verschil gemaakt worden tussen woonhuisvloeren en pakhuisvloeren. De kans op overbelasting is bij pakhuisvloeren namelijk *veel* groter.

Men kan de, in de berekening voorkomende *materiaaleigenschappen* van een coëfficiënt voorzien, die afhankelijk is van de nauwkeurigheid en van de spreiding in de beproevingsresultaten. Beton zal een grotere veiligheidscoëfficiënt behoeven dan het staal. Voorts zou men de veiligheidscoëfficiënt voor de materialen afhankelijk kunnen stellen van het toezicht en de uitvoering bij de bouw.

Voor de onzekerheden in de berekening, de kans op fouten bij de uitvoering enz. is het nodig een algemene *overkoepelende veiligheidscoëfficiënt* in te voeren.

Voor het bepalen van de grootte van de veiligheidscoëfficiënten zal de *waarschijnlijkheidsrekening* vermoedelijk belangrijke diensten kunnen bewijzen. Immers de grootte van het toelaatbaar moment is niet afhankelijk van de meest waarschijnlijke waarde van een bepaalde grootte, maar ook van de mate van de optredende spreiding. Voor een tweetal constructies worden b.v. voor het breukmoment de Gauszkrommen 1 en 2 bepaald (zie fig. 2). Uit deze krommen blijkt, dat het meest waarschijnlijke breukmoment  $M_2$  volgens kromme 2 veel hoger ligt dan voor kromme 1 ( $M_1$ ). Wordt het toelaatbare moment bepaald door de voorwaarde, dat hoogstens x% van het aantal waargenomen gevallen kleiner mag zijn dan dit moment (x correspondeert met de oppervlakken  $O_1$  en  $O_2$ ), dan kan het toelaatbare moment  $\bar{M}_2$  ondanks het feit, dat  $M_2$  groter is dan  $M_1$ , lager zijn dan  $\bar{M}_1$ .

Rest ons nog de *bezwijktoestand in formulevorm* uit te drukken. Hiervoor zijn een groot aantal theorieën opgesteld welke voor de normale gevallen alle tot vrijwel hetzelfde resultaat voeren. Voor lage en normale wapeningspercentages en staal met een uitgesproken vloeigrens wordt deze formule in de meest algemene vorm (zie fig. 3):

$$\frac{M_{br}}{bh'^2} = \sigma_{yv}\mu \left( 1 - \frac{\beta}{a} \cdot \frac{\sigma_{yv}\mu}{\sigma_{bmax}} \right)$$

- Hierin is  $M_{br}$  bezwijkmoment  
 $b$  breedte van de balk  
 $h'$  nuttige balkhoogte  
 $\sigma_{yv}$  vloeigrens staal  
 $\sigma_{bmax}$  max. betondruksp.  
 $\mu$  wapeningspercentage betrokken op  $b$  en  $h'$   
 $a$   $\frac{\text{Opp. ABC}}{\text{Opp. ABCD}}$  (fig.3)  
 $\beta$   $y/x$

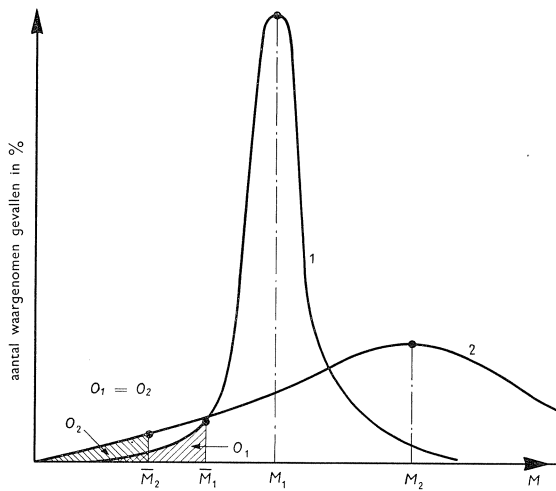


Fig. 2 Gauszkrommen, opgesteld voor de breukmomenten  $M_1$  en  $M_2$ . Het meest waarschijnlijke breukmoment  $M_2$  ligt volgens kromme 2 aanzienlijk hoger dan voor kromme 1 ( $M_1$ ). De vorm van de kromme, welke een maat is voor de spreiding in de beproevingsresultaten leidt er echter toe, dat  $\bar{M}_2 < \bar{M}_1$ .



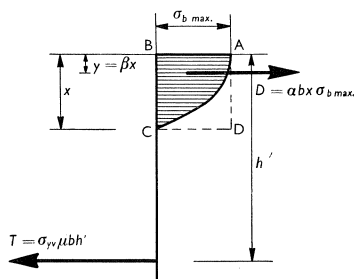


Fig. 3

Berekening bezwijkmoment

$$T = D \text{ geeft } x = \frac{\sigma_{yv} \mu h'}{\alpha \sigma_{b \max}}$$

$$M_{br} = \sigma_{yv} \mu b h' (h' - \beta x) \text{ of}$$

$$\frac{M_{br}}{bh'^2} = \sigma_{yv} \mu \left( 1 - \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{\sigma_{yv} \mu}{\sigma_{b \max}} \right)$$

De coëfficiënten  $\alpha$  en  $\beta$  geven van het drukspanningsverloop de grootte van het oppervlak en de plaats van het zwaartepunt. Zij blijken sterk afhankelijk te zijn van de betonkwaliteit en de snelheid van belasten.

Om deze coëfficiënten te bepalen zijn in München door prof. H. Rüsche proeven genomen met een grote serie betonprisma's, die in tegenstelling tot de gebruikelijke methode excentrisch belast werden.

De excentriciteit werd daarbij zo gekozen, dat de vormverandering aan één zijde van het prisma juist nul was, terwijl aan de andere zijde de stuik maximaal werd. Aldus werd op eenvoudige wijze een imitatie van de drukzone in een op buiging belaste gewapende betonbalk verkregen (zie fig. 4).

De excentriciteit bij de prismaproef was daarbij een maat voor de plaats van het drukmiddelpunt in de balk. Tevens kon op deze manier de grootte van de totale drukkracht  $D$  in de buigbalk (dus de inhoud van de drukfiguur) gevonden worden op het ogenblik van breuk.

Bij beton met een hoge druksterkte bleek de plaats van de drukkracht overeen te komen met een waarde van  $\beta$ , die iets groter was dan  $1/3$ , hetgeen wijst op een vrijwel driehoekig drukspanningsverloop.

Bij beton met een lage druksterkte naderde de coëfficiënt  $\beta$  tot  $1/2$ , wat op een vrijwel rechthoekig, dus een zeer plastisch verloop in de drukzone duidt.

Dat ook de belastingsnelheid grote invloed op het drukspanningsverloop heeft moge blijken uit het volgende:

Indien een prisma in een zeer snel tempo wordt gedrukt, dan vindt men een diagram als in fig. 5-I.

Wordt de proef langzamer uitgevoerd, dan buigt het bovenste deel van het diagram sterk af en krijgt men

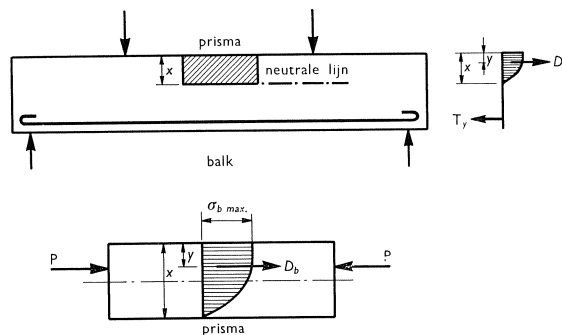


Fig. 4 Bepaling van het drukspanningsverloop bij een op buiging belaste balk door beproeving van een excentrisch gedrukt prisma.

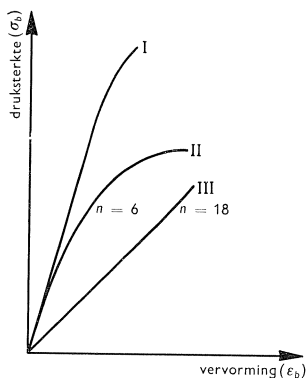


Fig. 5 Invloed van de snelheid van belasten bij de bepaling van het  $\sigma$ - $\epsilon$  diagram van beton onder druk.  
 I. Zeer hoge belastingssnelheid (enkele seconden)  
 II. Normale belastingssnelheid (enkele uren)  
 III. Zeer lage belastingssnelheid (enkele jaren)

het verloop II (grotere breukstuik en kleinere druksterkte). Bij zeer langdurige belasting en wisselbelasting nadert het  $\sigma$ - $\epsilon$  diagram volgens Glanville, Shank e.a. tot een vrijwel rechte lijn volgens verloop III.

De vraag rijst nu of de plastische vervormingen in wezen geen kruipverschijnselen zijn en of op het plastisch verloop op den duur wel gerekend mag worden. Stelt men de verhouding  $E_y/E_b$  voor de „snelle” proef op 6 en de kruipmaat op 3 dan zou de verhouding  $n$  behorende bij het  $\sigma$ - $\epsilon$  diagram volgens de lijn III (een rechte !) gelijk aan  $3 \times 6 = 18$  bedragen, hetgeen goed zou aansluiten op de bestaande  $n$ -methode. Aangezien het aantal beschikbare gegevens over dit verschijnsel uiterst gering is draagt genoemde beschouwing meer het karakter van een *hypothese*. Deze beschouwing motiveert echter wel voor een deel de te volgen gedragslijn n.l.:

- a. de  $n$ -methode niet zonder meer af te danken;
- b. bij de aanvulling van de voorschriften de invloed van de factor tijd, gezien de onbekendheid van deze materie in de veiligheidscoëfficiënt te verwerken. Zijn meerdere proeven uitgevoerd, dan kan men eventueel de veiligheidscoëfficiënt nauwkeuriger aanpassen.

Voor balken met een klein of normaal wapeningspercentage is de invloed van de factoren  $a$  en  $\beta$  gering. Immers in de formule voor het breukmoment komt het quotient  $\beta/a$  voor. Dit quotient kan variëren van 0,67 voor een driehoekig spanningsverloop tot 0,5 voor een rechthoekig spanningsverloop. Van meer belang zijn de coëfficiënten  $a$  en  $\beta$  en ook de breukstuik voor de bepaling van het grenswapeningspercentage, d.i. het percentage waarbij het beton en het staal gelijktijdig de druksterkte resp. de vloedgrens bereiken. Tevens zijn deze coëfficiënten van groot belang voor de constructies waarin buiging plus druk optreedt. Immers in dit laatste geval zal vrijwel steeds het beton de maatgevende factor zijn.

### **De eis met betrekking tot de vervorming, waarbij de constructie als onbruikbaar moet worden beschouwd**

Zoals reeds werd opgemerkt zal in het algemeen het ogenblik dat de constructie als onbruikbaar moet worden beschouwd gelijk zijn aan het tijdstip van bezwijken of hiervan betrekkelijk weinig afwijken. Het waardeloos worden

van een constructie kan daarom o.i. op eenvoudige wijze in de veiligheidscoëfficiënt worden verwerkt.

### De eis met betrekking tot de scheurvorming

Na vaststellen van de toelaatbare scheurwijdte is het noodzakelijk een berekeningsmethode beschikbaar te hebben waarmee de scheurwijdte met redelijke nauwkeurigheid in formulevorm kan worden uitgedrukt. De nauwkeurigheid van een dergelijke methode kan, gezien de vele (toevallige) factoren, die hierbij een rol spelen nooit groot zijn.

De gedachtengang van de voorgestelde *globale berekeningswijze* is als volgt:

Teneinde de waarschijnlijke scheurwijdte te berekenen moet de *werkelijke*, gemiddelde staalspanning  $\sigma_y$  en de scheurafstand  $s$  bekend zijn.

De rek van het staal zal zich grotendeels in de scheur concentreren, zodat de scheurwijdte  $\Delta s$  wordt

$$\Delta s = \frac{\sigma_y}{E_y} s$$

De werkelijke staalspanning  $\sigma_y$  verloopt, zoals uit diverse laboratoriumproeven (kortstondige belasting!) is gebleken als functie van het buigend moment  $M$  volgens de lijn OAB van fig. 6.

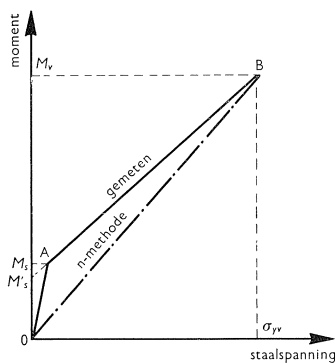


fig. 6 Verband tussen het moment en de staalspanning volgens de meting en de berekening (*n*-methode)

Punt B wordt bepaald door de bij het vloeimoment  $M_v$  optredende staalspanning, welke over het algemeen gelijk gesteld kan worden aan de vloeispanning  $\sigma_{yv}$ .

Punt A wordt bepaald door het scheurmoment en de daarbij optredende staalspanning.

Het scheurmoment  $M_s$  is bij benadering gelijk aan  $\sigma_{bt} \cdot W$  waarin  $\sigma_{bt}$  de buigtreksterkte en  $W$  het weerstandsmoment van de doorsnede voorstelt.

Gezien de vele onzekere factoren bij de berekening van de scheurvorming kan  $M_s$  gelijk gesteld worden aan  $M_s'$ .

De werkelijke staalspanning  $\sigma_y$  bij een moment  $M$  is dan:

$$\sigma_y = \frac{M - M_s'}{M_v - M_s'} \cdot \sigma_{yv}$$

Een berekening van de staalspanning volgens de *n*-methode geeft de lijn OB. Hierbij is dus vanaf  $M = 0$  al een gescheurde trekzone aangenomen. Het verschil tussen de lijn OAB en de lijn OB wordt veroorzaakt door het meewerken van de betontrekzone.

Uit proeven is tevens gebleken, dat door wisselbelasting en een blijvende be-

lastig de scheurwijdte 1,25 tot  $2 \times$  zo groot kan worden als bij enkelvoudige, kortstondige belasting. Dit zou kunnen wijzen op een overgang van het spanningsverloop van de lijn OAB naar de lijn OB. Door wisselende en langdurige belasting zal het scheurmoment lager komen te liggen en de betontrekzone zal waarschijnlijk steeds minder meewerken. De treksterkte van het beton blijkt namelijk bij dit soort belastingen te verminderen.

De *scheurafstand* blijkt afhankelijk te zijn van een groot aantal factoren zoals de balkhoogte, de dekking, de verdeling van de staven, de betonkwaliteit en de aanhechtingsweerstand van het staal. Voor rondstaal blijkt de scheurafstand bij normale dekking en normale beton ongeveer gelijk te zijn aan de halve balkhoogte.

Bij een verklaring van de scheurvorming kan het principe van de Saint-Venant een rol spelen. Indien een scheur ontstaan is, zal de volgende scheur in het algemeen ontstaan op een afstand, afhankelijk van het storingsgebied van de scheuren. Deze afstand blijkt ongeveer gelijk te zijn aan de balkhoogte.

Bij verdere toename van de belasting zullen in de meeste gevallen tussenscheuren ontstaan. Hierdoor zal de scheurafstand teruggebracht worden tot ongeveer de halve balkhoogte. Verdere vorming van tussenscheuren zal vrijwel nooit plaatsvinden, daar de scheuren bij deze belasting reeds tot een zodanige hoogte in de balk doorlopen, dat de trekzone tussen de scheuren vrijwel spanningsloos is. Slechts bij geprofileerde staalsoorten is vorming van tussenscheuren bij zeer hoge belastingen mogelijk; deze scheuren ontstaan waarschijnlijk door de kerfwerking, die het geprofileerde staal op het beton uitoeft en door de betere aanhechting.

Vorming van tussenscheuren bij een scheurafstand gelijk aan de balkhoogte blijkt niet steeds op te treden. Aangezien de grootste scheurwijdte in een balk maatgevend is, zal voor de berekening ook de grootste scheurafstand moeten worden ingevoerd. Voor een balkhoogte  $h$  wordt de maximale scheur  $\Delta s_{max}$  dus nu

$$\Delta s_{max} = \frac{\sigma_y \cdot h}{E_y}$$

Voor de invloed van de aanhechting bij geprofileerde staalsoorten, de verdeling der staven en de dekking kunnen alsnog te bepalen coëfficiënten worden ingevoerd.

Een uitgebreide studie zal deze gedachtengang in een bruikbaar rekenmiddel moeten omzetten. Evenals bij de definitie van een breukmoment verdient het aanbeveling, ter wille van de eenvoud van het experiment, de toelaatbare scheurbreedte te betrekken op een kortstondige belasting en bij de bepaling van de grootte van deze scheurbreedte de invloed van de factor tijd zo goed mogelijk te verwerken, b.v. in agressieve omgeving zal een scheur van 0,2 mm breedte *te allen tijde* vermeden moeten worden.

Bedenkt men, dat een scheur op de duur ca.  $2 \times$  zo groot kan worden, dan

moet men de toelaatbare scheurbreedte, behorend bij een kortstondige belasting op 0,1 mm stellen.

### **De eisen met betrekking tot de vervormingen in het toelaatbare stadium en de waarschuwing tegen breuk**

Voor deze criteria zij verwezen naar de W.G.S.-Mededelingen 1953 — No. 3.

#### **Samenvatting**

1. De  $n$ -methode, die de grondslag vormt voor de tegenwoordige G.B.V., heeft bewezen voor de gebruikelijke gewapend betonconstructies een betrouwbare berekeningswijze te zijn, zodat er geen reden is, deze methode af te danken.
2. In de  $n$ -methode zijn zeer veel factoren in slechts 3 grootheden, te weten  $n$ ,  $\bar{\sigma}_y$  en  $\bar{\sigma}_b$ , verwerkt, wat tot gevolg heeft, dat deze grootheden als *reken-grootheden* beschouwd moeten worden.
3. Daar deze in de  $n$ -methode voorkomende rekengrootheden vrijwel niet meetbaar zijn, is het zeer moeilijk de toepassing van nieuwe materialen en systemen *experimenteel* op hun deugdelijkheid te onderzoeken.
4. Dit bezwaar, dat op de ontwikkeling van nieuwe materialen belemmerend werkt, motiveert een *aanvulling* van de tegenwoordige voorschriften.
5. Deze aanvulling zou op de volgende wijze kunnen worden opgebouwd:
  - a. een duidelijke omschrijving van de eisen, die men aan de constructie stelt;
  - b. een opgave van de grondslagen, waarop ontwerp- en controleberekeningen, met betrekking tot de genoemde eisen, kunnen worden uitgevoerd;
  - c. een beschrijving van de wijze, waarop de gestelde eisen experimenteel kunnen worden gecontroleerd.
6. De eis omtrent de *veiligheid t.o.v. de breuk* kan het beste behandeld worden door uit te gaan van de *bezwijktoestand* (in tegenstelling tot een z.g. kritieke toestand), behorend bij een kortstondige belasting. De invloed van de factor tijd zal in de veiligheidscoëfficiënt moeten worden verwerkt.
7. Het bezwijkmoment kan, zonder gebruik te maken van de waarde  $n$ , berekend worden ( $n$ -vrije berekening).
8. De veiligheidscoëfficiënt kan gesplitst worden in meerdere coëfficiënten, b.v. één voor de belastingen, één voor de materialen en één overkoepelende coëfficiënt, waarin de overige onzekerheden worden verwerkt.

9. De eis omtrent de *vervormingen*, waarbij de constructie als waardeloos moet worden beschouwd, kan, ter wille van de eenvoud, in de veiligheidscoëfficiënt worden verwerkt.
10. De eis omtrent de *scheurvorming* kan voorlopig het beste betrokken worden op een kortstondige belasting. De invloed van de factor tijd kan dan verwerkt worden in de waarde van de toelaatbare scheurbreedte.
11. Een globale berekeningswijze voor de scheurvorming, optredend bij een kortstondige belasting, is, als suggestie, in het artikel opgenomen.
12. De eisen omtrent de *vervorming in het toelaatbare stadium* en de *waarschuwing tegen breuk*, zullen nog verder uitgewerkt moeten worden, hetgeen waarschijnlijk op eenvoudige wijze kan gebeuren.
13. Het probleem is veel omvangrijker dan de vraag „*n*-methode of *n*-vrije methode” zou doen vermoeden. De *n*-vrije methode is slechts een mogelijke berekeningswijze voor één van de vijf eisen, die gezamenlijk het ontwerp van een op buiging belaste gewapend betonconstructie beheersen. Veelal wordt het invoeren van de *n*-vrije methode voor de gewapend betonbouw van primair belang geacht. Brengt men het probleem tot zijn ware proporties terug, dan ziet men, dat voor het merendeel der gevallen de *n*-methode gehandhaafd kan blijven en dat de invoering van de *n*-vrije methode met de daarmee samenhangende problemen in eerste instantie alleen dient om de bijzondere gevallen oordeelkundig te kunnen behandelen.