

# DE BEOORDELING VAN DE BETROUWBAARHEID VAN OP BUIGING BELASTE GEWAPEND BETONBALKEN

Onder betrouwbaarheid wordt over het algemeen de veiligheid t.o.v. breuk verstaan. Deze formulering is grotendeels juist, indien men aan het begrip „breuk” een ruimere betekenis toekent dan alleen maar het *bezwijken* van de constructie. Men dient dan de *scheurvorming* en de grote (blijvende) *vervormingen*, waarbij de balk waardeloos wordt, ook onder het begrip breuk te rangschikken.

Voor een verantwoorde beoordeling van gewapend beton-constructies is het echter noodzakelijk deze veiligheid nauwkeuriger te formuleren. Dit is alleen dan mogelijk, als men de eisen, waaraan de constructie moet voldoen, door middel van duidelijk omschreven *criteria* vastlegt.

In het volgende zullen deze criteria en de daarmee samenhangende beoordeling van de constructie, aan een nader onderzoek onderworpen worden. In dit artikel zullen slechts de op buiging belaste doorsneden besproken worden, daarbij aannemende, dat de andere constructiedelen (opleggingen, lassen in wapeningsstaven, fundering enz.) een voldoende veiligheid hebben en het gedrag van de beschouwde doorsnede met betrekking tot de veiligheid niet in ongunstige zin beïnvloeden.

Bij de vaststelling van de criteria stuit men dikwijls op de moeilijkheid, dat geen wetenschappelijk verantwoorde gegevens beschikbaar zijn. Het is opvallend, dat, ondanks het vele spuurwerk, dat op het gebied van de beton-techniek verricht is en wordt, men omtrent de minimum eisen, die men aan een constructie moet stellen en ten opzichte waarvan men de betrouwbaarheid moet beoordelen, zo weinig onderzoeken heeft gedaan. Men denke bijvoorbeeld aan het feit, dat over de toelaatbare scheurbreedte nog veel onzekerheid bestaat. Bovendien zullen de eisen, die men moet stellen, voor elke constructie afzonderlijk bezien moeten worden, zodat het geven van algemene richtlijnen moeilijk te verwezenlijken is.

In het volgende zal daarom het probleem meestal omgekeerd worden door de criteria te bepalen aan de hand van bestaande, als betrouwbaar bekend staande constructies.

Vanzelfsprekend loopt men hierbij de kans, te hoge eisen te stellen. Vooralsnog is er echter geen andere oplossing, zonder het verrichten van uitgebreide onderzoeken, mogelijk.

Het is duidelijk, dat een normale constructie, die volgens de gebruikelijke

*n*-methode berekend is, als betrouwbaar aangenomen mag worden. In het volgende zullen daarom de criteria, voor zover mogelijk, aan de *n*-methode getoetst worden.

### **criterium 1**

*De constructie moet voldoende veiligheid t.o.v. bezwijken hebben*

Dit bezwijken kan bij gewapend beton ontstaan door het bereiken van de vloeigrens in de wapening, of door het verbrijzelen van de betondrukkzone. Bij staalsoorten, die geen uitgesproken vloeigrens hebben, wordt over het algemeen onder het breukmoment verstaan het buigende moment, waarbij de staalspanning de conventionele vloeigrens (0,2% blijvende rek) heeft bereikt. Bij grotere momenten worden de vervormingen n.l. zo groot, dat de balk waardeloos is geworden.

De breuk door verbrijzeling van de betondrukkzone moet, zoals later zal blijken, vermeden worden. Bovendien treedt dit breukgeval alleen op bij zeer hoge wapeningspercentages (2 à 4% voor normaal rondstaal en normale betonkwaliteit).

Alleen de breukgevallen, die ingeleid worden door het vloeien van het staal zullen daarom in beschouwing genomen worden.

Het is gebruikelijk de veiligheid t.o.v. bezwijken in een *veiligheidscoëfficiënt* uit te drukken. Men onderscheidt:

$$k_1 = \frac{M_{br}}{M} \text{ en } k_2 = \frac{M_{br} - M_{e.g.}}{M - M_{e.g.}}$$

Hierin is

- $M_{br}$  = breukmoment
- $M_{e.g.}$  = moment t.g.v. eigen gewicht
- $\bar{M}$  = het toelaatbare moment (inc.  $M_{e.g.}$ )

De waarden van de veiligheidscoëfficiënten worden bepaald door o.a. de volgende factoren:

- de kans op een overbelasting;
- de eventuele gevolgen bij instorten;
- de nauwkeurigheid van de berekeningen;
- de onzekerheden aangaande de materiaaleigenschappen;
- de aard van de belasting;
- de bodemgesteldheid;
- de aard van de constructie;
- de wijze van uitvoering.

Uitgaande van dergelijke factoren tracht men in Frankrijk m.b.v. de kansrekening de waarden van  $k_1$  en  $k_2$  te bepalen. Bij een berekening volgens de *n*-methode wordt in feite alleen rekening gehouden met de coëfficiënt  $k_1$ .

Bij een statisch bepaalde constructie is de waarde van  $k_1$  op eenvoudige wijze te bepalen.

Beschouwt men een constructie, die ontworpen is met de toelaatbare spanningen 1400-70 kg/cm<sup>2</sup>, dan is het toelaatbare moment gelijk aan:

$$M = 1400 \cdot f_y \cdot e$$

waarin  $f_y$  = totale doorsnede van de trekwapening

$e$  = inwendige hefboom d.w.z. de afstand tussen het hart van de wapening en het aangrijpingspunt van de resultante van de betondrukspanningen (drukmiddelpunt).

Het is over het algemeen verantwoord, de inwendige hefboom, die in het bezwijkstadium aanwezig is, gelijk te stellen aan de inwendige hefboom, die optreedt bij het toelaatbare moment.

Zodoende wordt het breukmoment, bij een vloeigrens van het staal van 2400 kg/cm<sup>2</sup>:

$$M_{br} = 2400 \cdot f_y \cdot e$$

Hieruit volgt dus voor een normale gewapend betonconstructie, ontworpen met de toelaatbare spanningen 1400-70 kg/cm<sup>2</sup> een waarde voor  $k_1$  van:

$$k_1 = \frac{M_{br}}{M} = \frac{2400}{1400} = 1,72$$

Veelal wordt aangenomen, dat de *werkelijke* veiligheidscoëfficiënt groter is dan de aldus bepaalde theoretische waarde.

Bij statisch onbepaalde constructies is dit, dank zij de momentverdelende werking als gevolg van de plastische vervormingen, ook meestal het geval. Maar ook bij statisch bepaalde constructies worden soms waarden voor het breukmoment gemeten die groter zijn dan  $2400 \cdot f_y \cdot e$ . Voor zover deze grotere waarden ontstaan, doordat bij het bezwijken van de balk de inwendige hefboom door de plastische vervormingen in de betondrukkzone iets groter wordt dan de uit de  $n$ -methode volgende hefboom, kan opgemerkt worden, dat dit groter worden over het algemeen gepaard gaat met grote vervormingen.

Bij de bepaling van de waarde van 1,72 is dus enigszins rekening gehouden met de breuktoestand, waarbij de balk door abnormaal grote (blijvende) vervormingen als waardeloos moet worden beschouwd.

Bij een berekening volgens een plasticiteitstheorie wordt de grotere waarde voor  $e$  in rekening gebracht. Men vindt dan een veiligheidscoëfficiënt  $k_1$  van ca 1,8 à 2,0.

Brengt men echter deze grotere inwendige hefboom in rekening, dan vinden sommige onderzoekers toch nog een duidelijk verschil tussen theorie en proef. Het opvallende feit, dat niet alle onderzoekers dit verschijnsel geconstateerd hebben, is de aanleiding geweest tot een, door de Werkgroep ontwikkelde, hypothese.

Onderzoekers als Emperger, Mörsch en Graf constateerden, dat beton, gelegen in de nabijheid van een wapeningsstaaf, zich plastischer gedroeg dan

het ongewapende beton. Dit is nu een algemeen bekend feit, waarvoor echter nog geen fysieke verklaring is gevonden.

Een staaf, omhuld met een dun laagje beton, kan tot de vloeigrens belast worden, voordat er scheurtjes in het beton optreden.

Bij hoge gewapend betonbalken, waar de wapening grotendeels aan de onderzijde is geconcentreerd, treedt de eerste scheur soms op, niet aan de onderzijde van de balk, maar op een punt, gelegen boven de wapening.

Het is dus waarschijnlijk, dat bij een op buiging belaste gewapend betonbalk, ook al zijn aan de oppervlakte scheuren zichtbaar, om de wapening een gedeelte beton aanwezig is, dat tot aan de breukbelasting actief meewerkt. Aangenomen kan worden, dat in dit betongedeelte de spanning gelijk wordt aan maximaal de zuivere beton-treksterkte.

Bij een nauwkeurige bestudering van het verloop van de breuk wordt dit bevestigd. In fig. 1 is dit verloop grafisch weergegeven.

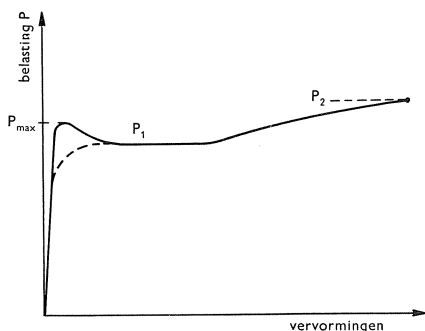


Fig. 1

Tot aan de belasting  $P_{max}$  nemen de vervormingen slechts weinig toe. Op het ogenblik, dat het staal de vloeigrens bereikt, scheurt de omhullende betonlaag, de belasting neemt af en er stelt zich een nieuwe, stabiele toestand  $P_1$  in. Vervolgens kan de belasting weer opgevoerd worden tot  $P_2$ . Dit is mogelijk, doordat het staal na het passeren van het vloeigebied, verstevigt. Vanzelfsprekend gaat dit opvoeren van de belasting gepaard met zeer grote vervormingen. In hoeverre deze verhoging van de belasting tot  $P_2$  mogelijk is, wordt

voor een groot deel bepaald door de betondruksterkte en de breukstuik van het beton in de drukkzone.

Bij een langzaam opvoeren van de belasting wordt de verhoogde waarde  $P_{max}$  soms niet bereikt, waarschijnlijk doordat de betonomhulling reeds bij een kleinere belasting scheurt, (zie stippellijn in fig. 1).

Dit verklaart het verschil van mening bij de verschillende onderzoekers. Voert men als breukbelasting  $P_1$  in, dan blijken theorie en proef zeer goed overeen te stemmen.

Bij de kleinere wapeningspercentages wordt een groter verschil tussen  $P_{max}$  en  $P_1$  gemeten dan bij de grotere. Voortbouwende op bovengenoemde hypothese wordt dit duidelijk, als men bedenkt, dat bij kleine wapeningspercentages het omhullende beton een relatief grotere invloed op het buigende moment heeft dan het staal.

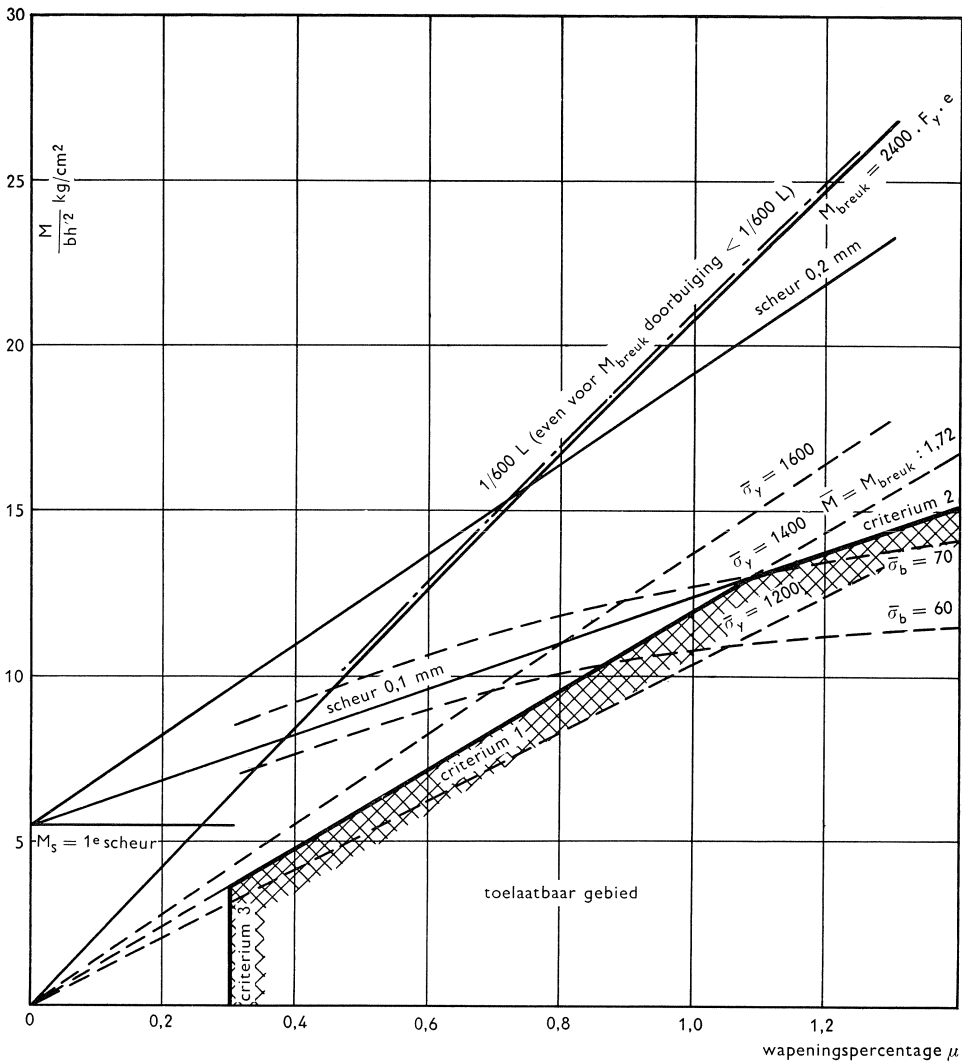
Uit het bovenstaande moge volgen, dat het vooralsnog niet verantwoord is, op het door sommige onderzoekers geconstateerde gunstiger gedrag van gewapend beton te rekenen.

In figuur 2 is criterium 1, de veiligheid t.o.v. breuk, grafisch weergegeven voor een normale toepassing van het gewapend beton. Op de verticale as is uitgezet  $M/bh'^2$ , op de horizontale as het wapeningspercentage  $\mu$  ( $M$  = buigend moment,  $b$  = breedte balk,  $h'$  = nuttige hoogte balk).

Als functie van het wapeningspercentage is zodoende aangegeven het breukmoment  $M_{br}$  ( $= 2400 \cdot f_y \cdot e$ ) en het, daaruit volgende, toelaatbare moment  $\bar{M}$  ( $= M_{br} : 1,72$ ).

Aangezien tot nu toe een berekening volgens de  $n$ -methode in Nederland gebruikelijk is, zijn ter wille van een eenvoudige interpretatie de lijnen gete-

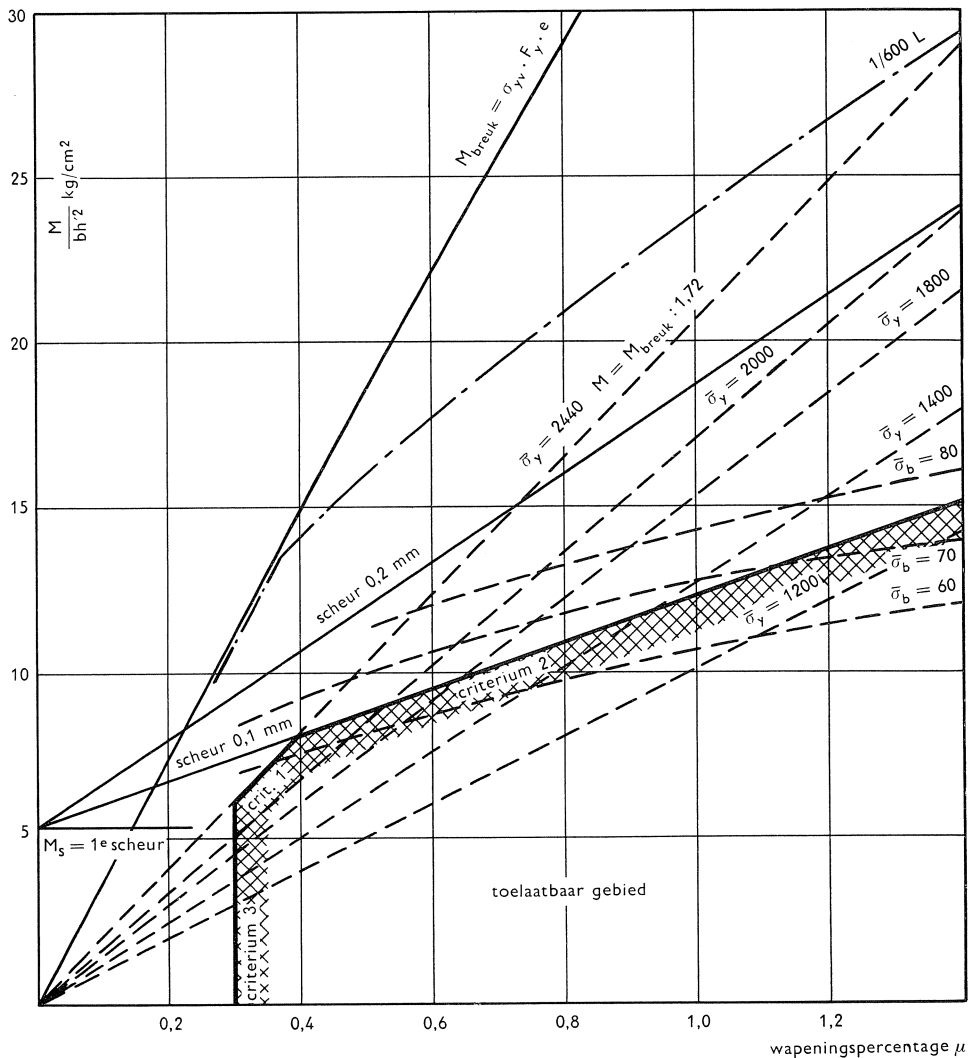
Fig. 2. Grafische voorstelling van de criteria. Balk, gewapend met normaal staal.



kend van de toelaatbare momenten, die behoren bij diverse toelaatbare spanningscombinaties  $\sigma_y/\sigma_b$  en die volgen uit een berekening volgens de  $n$ -methode ( $n = 15$ ).

Een punt in de grafiek, behorende bij bepaalde waarden van  $M/bh^2$  en  $\mu$ , dat gelegen is beneden de lijn  $\bar{M}$  ( $= M_{br} : 1,72$ ) komt dus overeen met een moment, dat volgens criterium 1 toelaatbaar is. Met behulp van de „ $n$ -methode lijnen” kan men nagaan, welke toelaatbare spanningscombinaties aan criterium 1 voldoen. In fig. 3 is het verloop van  $M_{br}$  en  $\bar{M}$  geschetst voor een balk, waarin hoogwaardig staal wordt toegepast.

Fig. 3. Grafische voorstelling van de criteria. Balk, gewapend met hoogwaardig staal.



## criterium 2

*Bij de toelaatbare belasting mogen de scheuren in het beton niet te groot zijn*

De toelaatbare scheurbreedte wordt o.a. bepaald door:

- de agressiviteit van de omgeving;
- de aard van de belasting (wisselende belasting b.v.);
- de gevolgen van eventuele corrosie van de wapening;
- de aesthetica;
- de gevolgen van eventuele lekkage door een scheur;
- de nauwkeurigheid van de berekeningen;
- de onzekerheden omtrent materiaaleigenschappen enz.

Voor de bepaling van de toelaatbare scheurbreedte werden over het algemeen alleen de zogenaamde versnelde corrosie-proeven uitgevoerd. De resultaten van enkele onderzoeken zijn in onderstaande tabel verenigd:

Toelaatbare scheurbreedten

Bron	Toelaatb. scheurbreedte in mm	Opmerkingen
Honingmann . . . . .	0,5	tijdelijke belasting
	0,3	permanente belasting
Rengers . . . . .	0,3	
Graf . . . . .	0,25	
EMPA . . . . .	0,33	
Saliger . . . . .	0,2	ter vermijding roestvorming
Chambaud. . . . .	0,3	
Valette . . . . .	0,5	
Lossier . . . . .	0,5 à 0,67	
	0,12 à 0,25	in agressieve omgeving
Probst. . . . .	0,3	ter vermijding roestvorming

Interpretatie van deze waarden voor de praktijk is, in verband met de versnelde proeven, niet zonder meer verantwoord.

Bij een normale balk van gewapend beton worden bij het, volgens de *n*-methode berekende, toelaatbare moment (toelaatbare spanningen 1400-70 kg/cm<sup>2</sup>) en een *enkelvoudige* belasting scheuren gemeten van ca 0,1 mm. Bedenkt men, dat door een wisselende belasting de scheurbreedten tot het dubbele kunnen toenemen, dan wordt door de *n*-methode voor een normale constructie de toelaatbare scheurbreedte op ca 0,2 mm vastgelegd.

De invloeden van kruip, krimp en temperatuur zijn hierbij buiten beschouwing gelaten.

In de figuren 2 en 3 zijn enkele proefondervindelijke lijnen van equivalente scheurbreedte geschetst, behorende bij een enkelvoudige belasting.

In het beschouwde gebied zijn deze lijnen bij benadering rechten, die alle door het punt gaan, dat vastgelegd wordt door het breukmoment, behorende

bij een ongewapende balk ( $\mu = 0$ ). Deze balk zal immers, bij het optreden van de eerste scheur, direct breken. De scheurbreedte varieert dan dus van 0 tot  $\infty$  mm.

Bij de hoogwaardige staalsoorten, ook al is de oppervlakte met het oog op een betere aanhechting, speciaal bewerkt (geprofileerd staal), zullen de lijnen van equivalente scheurbreedte ongeveer hetzelfde verlopen als bij normaal rondstaal, zolang op het meewerken van de reeds eerder genoemde omhulling van beton gerekend mag worden.

Uitgaande van de onder criterium 1 beschreven hypothese, moet bij de lagere belastingen de wapeningsstaaf niet als een afzonderlijk element beschouwd worden. De staaf zal met de daaraan hecht verbonden omhulling van beton, een eenheid vormen.

Een duidelijk verschil in gedrag tussen balken, gewapend met rondstaal en overeenkomstige balken, uitgevoerd met geprofileerd staal, kan pas tot uiting komen in het breukstadium, als bij rondstaal de omhulling verbroken wordt, terwijl bij geprofileerd staal, dank zij de betere aanhechting en het meestal niet aanwezig zijn van een natuurlijke vloeigrens, het omhullende beton langer aan de krachtswerking blijft deelnemen. Terwijl bij een balk, gewapend met rondstaal, dan een *gapende* scheur ontstaat, blijft bij gebruik van geprofileerd staal de scheurvorming regelmatig over de balk verdeeld.

Nemen we de toelaatbare scheurbreedte, behorende bij een enkelvoudige belasting, bijvoorbeeld aan op 0,1 mm, dan worden in de figuren 2 en 3 door de lijnen van 0,1 mm gebieden afgebakend, waarbinnen het punt ( $M/bh^2$ ,  $\mu$ ) gelegen moet zijn, wil aan criterium 2 voldaan zijn.

Opvallend is, dat de lijnen van constante scheurbreedte voor kleine waarden van de scheurbreedte en de lijnen, behorende bij een bepaalde toelaatbare betonspanning  $\bar{\sigma}_b$  ( $n$ -methode) dezelfde tendenz vertonen.

*Globaal kan men dus zeggen, dat bij toepassing van de  $n$ -methode de keuze van  $\bar{\sigma}_b$  bepalend is voor de scheurvorming, terwijl (zie criterium 1) door  $\bar{\sigma}_y$  de veiligheid t.o.v. breuk wordt aangegeven.*

Ondanks de vele bezwaren, die tegen de  $n$ -methode geopperd worden, volgt hieruit toch wel, dat deze methode, beschouwd als *rekencode*, aantrekkelijk is, aangezien twee criteria met één berekening verwerkt worden.

Zou men een, principieel betere, breuktheorie invoeren, dan wordt alleen criterium 1 verwerkt, terwijl voor criterium 2 nog een andere berekening dient te worden uitgevoerd. Eventueel zou de toepassingsmogelijkheid van een breuktheorie beperkt kunnen worden in verband met de scheurvorming (toelaatbare wapeningspercentages bijvoorbeeld).

Uit de figuren 2 en 3 blijkt bovendien het nut van het eventueel verhogen van de toelaatbare scheurbreedte.

Bij balken, gewapend met normaal rondstaal (fig. 2) ligt het economische wapeningspercentage bij ca 1%. Zou men de toelaatbare scheurbreedte van 0,1 op 0,2 mm brengen (enkelvoudige belasting), dan heeft dit weinig effect



op het toelaatbare moment, omdat dan criterium 1 maatgevend blijkt te zijn. Bij gebruik van de bijzondere staalsoorten ligt dit echter geheel anders:

Het economische wapeningspercentage ligt hier ongeveer bij 0,6 à 0,7%. Aangezien hierbij criterium 2 maatgevend is, zal een verhoging van de toelaatbare scheurbreedte tot veel hogere waarden van het toelaatbare moment leiden.

Het is nu duidelijk, waarom de landen, waar veelvuldig geprofileerde staalsoorten worden toegepast, zo'n behoefte hebben aan een grotere toelaatbare scheurbreedte, een behoefte, die bij gebruik van normaal rondstaal zich niet doet gelden.

Het is daarom ook niet onmogelijk, dat het criterium van 0,1 mm, ontleend aan de gebruikelijke constructies (*n*-methode) een te zware eis is en dat de toelaatbare scheurbreedte, indien gewenst, groter kan worden aangenomen.

Zonder een nauwgezet, wetenschappelijk onderzoek is het verhogen van de toelaatbare scheurbreedte echter vooralsnog niet verantwoord.

### **Criterion 3**

*Er moet voldoende waarschuwing tegen breuk zijn*

Bij zeer lage wapeningspercentages kan zich het geval voordoen, dat na het optreden van de eerste scheur de constructie direct bezwijkt. Dit is het geval, als het scheurmoment groter of gelijk is aan het breukmoment, berekend onder de aanname van een gescheurde trekzône.

In de figuren 2 en 3 wordt dit *minimum grenswapeningspercentage* dus bepaald door het snijpunt van de lijnen  $M_{br}$  en  $M_s$  (moment, waarbij de eerste scheur optreedt).

Over het algemeen zal men dus geen wapeningspercentages kleiner dan ca 0,3% moeten toepassen. De lijnen van dit criterium zijn dus ook bij dit wapeningspercentage gezet. Vanzelfsprekend geldt dit alleen voor de wapening, waaraan een primaire dragende functie moet worden toegekend.

Bij de zeer grote wapeningspercentages bezwijkt de constructie door het verbrijzelen van de betondrukzône op een ogenblik, dat in de trekwapening de spanning nog betrekkelijk laag is. Deze breuk kan zeer abrupt verlopen, doordat de betondrukzône als het ware uitknikt. Door het aanbrengen van een drukwapening kan deze plotselinge breuk vermeden worden. Anders dient een *maximum grenswapeningspercentage* niet overschreden te worden. Dit is echter over het algemeen zo groot, dat het, zijnde van geen praktisch belang, hier verder buiten beschouwing gelaten kan worden.

Een goede waarschuwing tegen breuk is het optreden van duidelijk zichtbare scheuren vóór het bezwijken. Bij een balk, gewapend met normaal rondstaal, nemen bij toenemende belasting, de scheurbreedten slechts weinig toe.

Even vóór het optreden van breuk bedragen bij een enkelvoudige belasting de grootste scheurbreedten ca 0,2 à 0,4 mm. Daarna gaat het staal vloeien en treedt vrij plotseling een gapende scheur op, terwijl de constructie bezwijkt.

Bij gebruik van hoogwaardige staalsoorten, die geen natuurlijke vloeigrens hebben en waarbij bovendien voor een betere aanhechting wordt zorg gedragen, verloopt de scheurvorming geleidelijker. Bij 70 à 80% van de werkelijke bezwijklast treden dan meestal al duidelijk zichtbare scheuren van ca 0,3 mm op. De laatstgenoemde staalsoorten geven dus een betere waarschuwing tegen breuk.

In de figuren 2 en 3 is het door criterium 3 bepaald minimum-grenswaapningspercentage aangegeven.

#### **Criterion 4**

*De constructie mag bij de toelaatbare belasting niet te veel doorbuigen.*

In de praktijk wordt voor de toelaatbare doorbuiging meestal 1/500 à 1/600 van de overspanning aangenomen.

Aangezien dit criterium voor de gebruikelijke gewapend betonconstructies zelden maatgevend is, wordt er mee volstaan het alleen volledigheidshalve te noemen.

In de figuren 2 en 3 is voor balken van ca 4 m lengte, 40 cm hoogte en 20 cm breedte de lijn van  $1/600 \times$  overspanning ter illustratie geschetst.

#### **Samenvatting**

In het algemeen moet de betrouwbaarheid van een op buiging belaste, statisch bepaalde, gewapend betonbalk getoetst worden aan 4 criteria n.l. de veiligheid t.o.v. breuk, de scheurvorming, de waarschuwing tegen breuk en de toelaatbare vervormingen.

In fig. 2 zijn deze criteria, zoals ze voor een normale gewapend betonbalk gelden, grafisch weergegeven. Ter illustratie zijn in fig. 3, geldende voor een balk, gewapend met hoogwaardig staal, deze zelfde criteria eveneens grafisch weergegeven.

Zodoende wordt een gebied afgebakend, waarbinnen een punt met de coördinaten  $\bar{M}/bh'^2$  en  $\mu$  gelegen moet zijn, wil aan de genoemde criteria voldaan zijn.

De gebruikelijke *n*-methode blijkt hier als *rekencode* zeer geschikt, daar de toelaatbare staalspanning de mate van veiligheid t.o.v. breuk bepaalt (criterium 1), terwijl de toelaatbare betonspanning een globale maat voor de scheurvorming is (criterium 2).

De vereiste waarschuwing tegen breuk kan over het algemeen verkregen worden door het hoofdwapeningspercentage groter dan ca 0,3% te nemen.

Een nader onderzoek naar de toelaatbare scheurvorming is, in het bijzonder voor een economischer toepassing van de hoogwaardige staalsoorten, gewenst.

In het bovenstaande is de veronderstelling geopperd, dat bij niet te hoge belastingen, een omhulling van beton om de trekwapening, ook al zijn aan de oppervlakte van de balk scheuren zichtbaar, blijft meewerken. Hiermede kunnen verschillende, aan gebouwen of bij proeven, geconstateerde verschijnselen verklaard worden.