

„l'Expérience est la source unique de la vérité”

H. Poincaré, La Science et l'Hypothèse.

Voor opdrachten of adviezen gelieve men zich te wenden tot het adres:
Instituut T.N.O. voor Bouwmaterialen en -constructies,
Lange Kleiweg 5, Rijswijk Z.-H., tel. Delft (01730) 26950*.
Correspondentie-adres uitsluitend: Postbus 49 te Delft.

Voor bijdragen voor dit blad, b.v. op het gebied van eigen waarnemingen en uitvoering van constructies, welke aanleiding zouden kunnen geven tot meer economische werkwijze of verbetering van inzicht houdt de redactie zich aanbevolen.

Rapporten over intern speurwerk kunnen tegen kostprijs worden verstrekt.

IBC MEDEDELINGEN

ORGAAN VAN HET
INSTITUUT T.N.O. VOOR BOUWMATERIALEN EN -CONSTRUCTIES

VOORTZETTING VAN DE W.G.S.-MEDEDELINGEN

Redacteur: Ir. A. L. Bouma — Postbus 49, Delft

JAARGANG 5

NO. 2/3

APRIL/JULI 1957

PROBLEMEN INZAKE HET VERBAND TUSSEN SPANNINGEN EN VERVORMINGEN IN BETON

In dit artikel wordt betoogd, dat het beter benutten van het materiaal beton in constructies niet alleen kan worden bereikt door het vervangen van de n-methode door de „n-vrije” methode, doch ook gebaseerd zal dienen te worden op een beter inzicht in het gedrag van beton onder invloed van een belasting. Dit inzicht zal zich niet kunnen beperken tot het verband tussen spanningen en specifieke vervormingen ten gevolge van een kortstondige belasting, doch zal zich moeten uitbreiden tot langdurige en herhaalde belasting. In deze laatste gevallen nemen de vervormingen aanzienlijk toe ten opzichte van die, bepaald bij kortstondige belasting, terwijl de druksterkte afneemt. Het op de gebruikelijke wijze, aan de hand van een beproeving van korte duur op betonprisma's, verkregen verband tussen spanningen en specifieke vervormingen en de daarbij bepaalde druksterkte en breukstuik kunnen dus niet altijd zonder meer in berekeningen ten behoeve van betonconstructies worden ingevoerd.

Voorts wordt betwijfeld of de op deze wijze verkregen resultaten mogen worden overgebracht naar constructies, die in het algemeen in vorm en afmetingen van de prisma's verschillen en meestal op andere wijze worden belast.

Tenslotte worden enkele onderzoeken besproken, die beogen een beter inzicht te verschaffen in de interne veranderingen, die in beton onder invloed van een belasting plaatsvinden.

Inleiding

Bij het ontwerpen en controleren van gewapend betonconstructies wordt bij toepassing van de gebruikelijke *n*-methode uitgegaan van een lineair verband tussen spanningen en specifieke vervormingen in het beton (wet van Hooke), waarbij een elasticiteitsmodulus van 140.000 kg/cm² (*n* = 15) wordt aangenomen. Teneinde een toelaatbare belasting op een constructie te kunnen bepalen, worden toelaatbare spanningen gekozen. Voor op buiging belaste constructies bedraagt de toelaatbare betonspanning in het algemeen 60 kg/cm²

en voor op druk belaste constructies 40 kg/cm². De toelaatbare staalspanning is meestal 1200 of 1400 kg/cm². Bij een vloeigrens van het staal van 2400 kg/cm² wordt de veiligheidscoëfficiënt 2 resp. 1,7. Voor het beton is de veiligheid ten opzichte van de druksterkte in vele gevallen aanzienlijk hoger; bij buiging meestal 3 en bij druk veelal 5. Deze grotere veiligheid vindt haar oorzaak in:

- a. onbekendheid met het gedrag van beton onder invloed van een belasting;
- b. de grotere spreiding in de eigenschappen van het beton.

De laatste tijd wordt getracht het materiaal beton beter te benutten door het toepassen van een andere berekeningsmethode, waarbij zo goed mogelijk de breukbelasting van een constructie wordt bepaald. De toelaatbare belasting wordt dan gevonden door de breukbelasting te delen door een veiligheidscoëfficiënt. Bij deze berekeningswijze wordt geen lineair verband tussen de betonspanningen en de specifieke vervormingen aangenomen; de „plastische” eigenschappen van het beton worden in de berekening betrokken. Deze „*n*-vrije” berekeningsmethode heeft het voordeel algemener van opzet te zijn dan de *n*-methode, welke meer het karakter van een rekencode bezit. In verschillende landen, o.a. Oostenrijk en Rusland, heeft de *n*-methode reeds plaats moeten maken voor de nieuwe berekeningswijze.

Het beter benutten van het beton kan echter niet alleen worden bereikt door het toepassen van een andere berekeningsmethode, doch zal ook dienen te worden gebaseerd op een beter inzicht in het verband tussen spanningen en specifieke vervormingen in het beton, niet slechts onder invloed van een kortstondige belasting, doch ook in geval van herhaalde en langdurige belasting. Voorts zal het duidelijk zijn, dat een vermindering van de spreiding in de betonkwaliteit van constructies dit streven ten zeerste zal kunnen bevorderen. Dit laatste valt evenwel buiten het bestek van dit artikel.

Beschouwing over het verband tussen spanningen en specifieke vervormingen in beton.

Het onderzoek naar de grondslagen, waarop het gedrag van beton onder invloed van een belasting is gebaseerd, ligt waarschijnlijk op fysisch gebied. Het arbeidsterrein van de betononderzoeker behoort dan daar aan te sluiten, waar dat van de fysicus eindigt. Helaas moet worden vastgesteld, dat de belangstelling van de fysici voor dit probleem tot nu toe gering is geweest. Echter, zowel in het buitenland als in ons land (in T.N.O.-verband) worden thans fysici in het betononderzoek betrokken, terwijl in enkele gevallen betonspeurwerkers zich gaan begeven op fysisch terrein.

Bij gebrek aan op de fysica gefundeerde grondslagen, bestaat het onderzoek naar het gedrag van beton uitsluitend uit het verrichten van metingen en observaties aan de hand van belaste betonproefstukken en -constructies. Zo is

het gebruikelijk het verband tussen spanningen en vervormingen, resulterend in een $\sigma - \epsilon$ diagram (zie fig. 1), te onderzoeken met behulp van centrisch tot breuk belaste prisma's of cilinders. De belastingssnelheid is daarbij zodanig, dat de duur van de proef twintig minuten tot een uur bedraagt. De maximaal bereikte spanning wordt de prismadruksterkte σ_{bp} resp. de cilinderdruksterkte genoemd en de bij deze spanning behorende specifieke vervorming de breukstuik ϵ_{bs} . Er zijn evenwel verschijnselen geconstateerd, die er op duiden, dat het op bovengenoemde wijze bepaalde verband tussen spanningen en vervormingen en de verkregen druksterkte niet altijd zonder meer kunnen worden betrokken in berekeningen ten behoeve van betonconstructies.

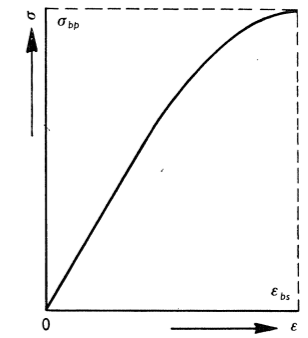


Fig. 1. Verband tussen spanningen en specifieke vervormingen.

Invloed van de factor tijd op vervormingen, spanningen, breukstuik en druksterkte.

Bij het bepalen van een $\sigma - \epsilon$ diagram zullen de gemeten vervormingen bestaan uit onmiddellijk optredende deformaties en uit vervormingen, die afhankelijk zijn van de factor tijd. Deze laatste worden aangeduid met het kruipen van beton en worden toegeschreven aan interne veranderingen in het beton, waarbij de gedachten van verschillende onderzoekers, o.a. van l'HERMITE, uitgaan naar het optreden van micro- en macroscheurvorming. Door de invloed van de factor tijd is het verband tussen spanningen en vervormingen afhankelijk van de belastingssnelheid, waarmede de beproevingen worden uitgevoerd; naarmate deze snelheid kleiner is, zal de vervorming behorende bij een bepaalde spanning groter zijn. Het op simpele wijze vastleggen van het genoemde verband door middel van een elasticiteitsmodulus is dus onvolgende. Langdurige proeven, ook wel kruipproeven genoemd, waren tot voor enkele jaren slechts verricht voor spanningen beneden ca. 100 kg/cm². In de laatste tijd zijn o.a. in Duitsland onderzoeken gaande, die tevens het gebied van de hogere spanningen bestrijken. Uit de resultaten van enkele proeven is reeds gebleken, dat naarmate de belastingssnelheid kleiner is, de breukstuik toeneemt. Ook in ons land zullen aan de Technische Hogeschool en bij het Instituut dergelijke proeven worden geëntameerd.

Ook bij herhaalde belasting zullen de vervormingen toenemen ten opzichte van die, gemeten bij de eerste belasting, zoals uit proeven van MEHMEL [1] blijkt (zie fig. 2). Bij een constructie, welke reeds aan een belasting onderworpen is geweest, zodat interne veranderingen in het beton hebben plaatsgevonden, zal bij elke volgende belasting een ander verband tussen spanningen en vervormingen optreden.

Bij staal, dat op hoge temperatuur is gebracht, is geconstateerd, dat bij con-

stant gehouden vervorming, de bijbehorende spanning in de loop van de tijd afneemt; bij staal voor voorgespannen beton is dit ook bij normale temperatuur waargenomen. Dit fenomeen wordt relaxatie genoemd. In Duitsland worden thans proeven uitgevoerd teneinde de relaxatie bij beton te onderzoeken.

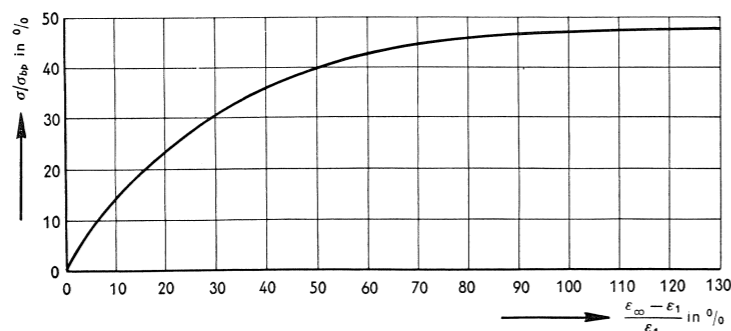


Fig. 2. Toeneming van de vervorming door herhaalde belasting.
 ϵ_1 = totale specifieke vervorming bij eerste belasting.
 ϵ_∞ = totale specifieke vervorming na herhaalde belasting.

De prismadruksterkte is eveneens afhankelijk van de duur van de proef, zoals is af te leiden uit onderzoeken van RÜSCH [1] (zie fig. 3). Naarmate de belastingssnelheid geringer is, zal de prismadruksterkte volgens deze onderzoeker tot ca. 70 % afnemen [4]. In het gebied van de hogere spanningen treedt een labiele toestand op in het beton, welke slechts gedurende een beperkte tijd kan worden gehandhaafd. Al naar gelang de spanning hoger is, zal deze tijd korter zijn. In dit verband zij tevens opgemerkt, dat volgens enkele proeven van RÜSCH de vermoeïingssterkte van beton ca. 40 à 50 % zou bedragen van de sterkte, bepaald bij kortstondige belasting. De reeds vermelde langdurige proeven zullen hopelijk omtrent dit probleem meer inzicht verschaffen.

Tenslotte dient te worden opgemerkt, dat het in de loop van de tijd voortschrijdende verhardingsproces het verband tussen spanningen en vervormingen en de druksterkte, zal beïnvloeden.

Samenvattend wordt de huidige kennis omtrent het verband tussen spanningen en vervormingen, de breukstreek en de druksterkte aangegeven door de getrokken lijnen in fig. 4 [4]. Over het gearceerde gebied is, zoals uit het bovenstaande blijkt, nog weinig bekend.

De kruip beïnvloedt de spanningsverdeling in constructies, waarvoor het superpositiebeginsel (lineariteit tussen de belasting enerzijds en de spanningen en vervormingen anderzijds) niet geldt. Dit is het geval bij excentrisch gedrukte staven of bogen. Tevens heeft de kruip invloed, wanneer de stijfheid tegen rek, buiging en wringing een rol speelt. De toeneming van de vervormingen ten gevolge van herhaalde belastingen zal in het algemeen bij gewa-

pend betonconstructies niet groot zijn, daar deze belastingen klein zijn ten opzichte van het eigen gewicht van de constructies. Bij voorgespannen constructies, die slanker zijn, kan deze toeneming echter wel van belang zijn.

Relaxatie treedt b.v. op, wanneer bij een ligger op meer dan twee steunpunten, ongelijke zetting van de steunpunten optreedt, waardoor secundaire vervormingen en daarmee gepaard gaande spanningen in de ligger worden geïntroduceerd. Tengevolge van de relaxatie zullen in de loop van de tijd deze spanningen afnemen [2].

De betekenis van het afnemen van de druksterkte van het beton bij langdurige en herhaalde belasting behoeft geen nader betoog.

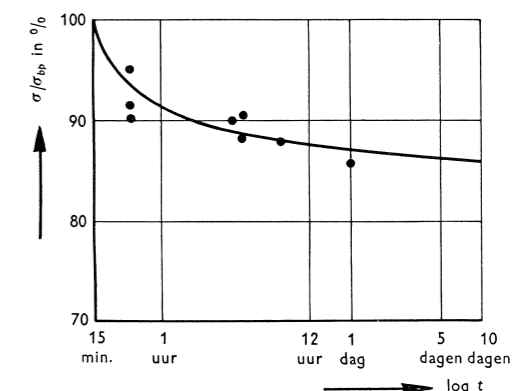


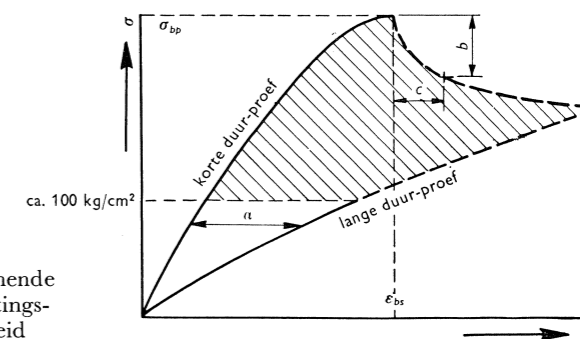
Fig. 3. Afname van de druksterkte ten gevolge van de afnemende belastingssnelheid.

Invloed van andere factoren

Het ontbreken van een juist inzicht in de criteria die de breuk van een betonlichaam bepalen, doet zich gevoelen bij de vraag of de op de gebruikelijke wijze bepaalde waarden voor de prisma- of cilindersterkte en de breukstreek mogen worden ingevoerd in berekeningen van constructies, die andere afmetingen en een andere vorm bezitten en die op andere, dan centrische wijze worden belast. De bestaande breukhypotesen gaan uit van een maatgevende trek- of drukspanning (LAMÉ), een maatgevende schuifspanning (COULOMB), een maatgevende vervorming (PONCELET), de vormveranderingsarbeid (HAIGH, HUBER-HENCKY) of zijn gebaseerd op een grensspanningstoestand (MOHR).

Fig. 4. Verband tussen spanningen en specifieke vervormingen, afhankelijk van de belastingssnelheid.

a = toeneming specifieke vervorming } t.g.v. afnemende belastingssnelheid
 b = afname druksterkte }
 c = toeneming breukstreek }



Ten aanzien van de invloed van de vorm is bekend, dat de kubusdruksterkte steeds groter is dan de prisma- of cilinderdruksterkte, doch de kennis omtrent de correlatie tussen deze laatste en de druksterkte in b.v. rechthoekige- en T-balken of platen ontbreekt. Voorts is herhaaldelijk geconstateerd, dat een op buiging belaste balk op geheel andere wijze bezwijkt, dan een centrisc belast prisma, terwijl de bij een balk gemeten waarde voor de breukstuik vrijwel altijd groter is dan die, bepaald aan een prisma. In Duitsland en bij het Instituut zijn onderzoeken gaande met behulp van excentrisch belaste prisma's, waarbij wordt getracht het gedrag van de betondrukkzone van op buiging belaste balken te benaderen.

Zoals blijkt uit „Het gedrag van betonconstructies onder invloed van kortstondige belastingen” (zie pag. 52) is het mogelijk, dat de breukstuik van beton niet alleen afhankelijk is van de kwaliteit van het beton, doch ook van de wijze van belasten, de vorm van het betonlichaam en bij gewapende constructies tevens van de kwaliteit en van de hoeveelheid wapening.

Onderzoeken naar de interne veranderingen in beton onder invloed van een belasting

Dat tijdens het belasten interne veranderingen in het beton optreden, moge uit het onderstaande blijken:

- a. Wanneer de specifieke volumeveranderingen van een betonproefstuk worden uitgezet als functie van de belasting, treedt in het gebied van de lagere spanningen een volumevermindering op (zie fig. 5). Bij 70 à 80 % van de prismadruksterkte wordt het volume echter weer groter volgens proeven van BRANDTZAEG [1]. Deze onderzoeker schreef dit feit toe aan het ontstaan van scheurtjes in het beton.
- b. Door RÜSCH [3] zijn dempingsmetingen verricht op belaste prisma's, waarbij aan één zijde van een proefstuk een ultrasonische geluidsgolf loodrecht op de richting van de belasting in het beton werd gevoerd. Een maat voor de demping is dan de intensiteit van de doorgelaten energie aan de andere zijde van het prisma. Bij het opvoeren van de belasting trad allereerst een vermindering van de demping op ten gevolge van de verdichting. Bij ca. 50 % van de breukbelasting werd deze vermindering geringer, terwijl bij 70 à 80 % van de belasting de demping groter werd om tot algehele demping bij breuk over te gaan.

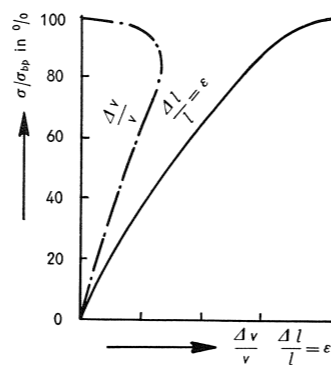


Fig. 5. Specifieke volumeverandering van beton als functie van de belasting.

- c. Soortgelijke onderzoeken zijn door l'HERMITE [3] verricht ten aanzien van de voortplantingssnelheid van een ultrasonische geluidsgolf. De snelheid bleef tot ca. 50 % van de breukbelasting constant om daarna langzaam af te nemen. Ook bij het Instituut zijn dergelijke proeven gedaan [5].
- d. Voorts zijn door RÜSCH [3] akoestische metingen verricht, waarbij tijdens het belasten door interne veranderingen ontstane geluiden met grote versterking werden geregistreerd. Reeds bij kleine belastingen traden zwakke geluidsverschijnselen op. Bij herhaling van de belasting konden eerst bij overschrijding van de vorige belasting geluidseffecten worden geconstateerd. Bij 50 à 60 % van de breukbelasting nam de geluidsintensiteit toe. Bij 70 à 80 % werd niet alleen bij het belasten, doch ook bij het ontlasten geluid waargenomen. Bij het Instituut zijn overeenkomstige inleidende onderzoeken verricht.

Slot

Hoewel thans reeds vele proeven inzake de genoemde problemen in binnen- en buitenland gaande zijn, moge uit het bovenstaande blijken, dat nog vele onderzoeken nodig zullen zijn om tot een beter inzicht in het gedrag van beton onder verschillende omstandigheden te komen, opdat de verkregen resultaten op de juiste wijze in berekeningen ten behoeve van betonconstructies kunnen worden ingevoerd.

Literatuur

- [1] Bericht über die Hauptversammlung des Deutschen Beton-Vereins, 1952.
- [2] I.B.C.-mededelingen 3 (1955) 3, p. 80...107.
- [3] Verslag van de vergadering van het Comité Permanent van het R.I.L.E.M. te München, 1956.
- [4] Verslag van de 3e zitting van het Comité Européen du Béton te Madrid, 1956.
- [5] I.B.C.-mededelingen 5 (1957) 1, p. 1...44.

Summary

In this article is argued that better utilizing of the material concrete in constructions can not be achieved only by replacing the elastic theory by the elastic-plastic theory but shall be based too on a better insight of the behaviour of concrete under the influence of a load. This insight can not be restricted to the stress-strain relation owing to short time loading but must comprehend longtime and repeated loading. In the latter cases the deformations will increase considerably with regard to those occurring during short time loading, whereas the compressive strength decreases. For this reason the stress-strain relation, the compressive strength and the ultimate strain under compression following from the usual short time tests of concrete prisms can not always be used simply in the calculation of concrete structures. Further it is called in question if the results obtained in this way may be applied to constructions which in general differ in shape and dimensions with the prisms and which are loaded mostly in another way. At last some investigations are dealt with which are carried out to obtain a better insight in the internal deformations occurring in concrete owing to loading.