

DE INVLOED VAN VOCHT OP VERSTEEND BETON

PROEVEN OP BETONTEGELS

Beton ondergaat niet slechts vormveranderingen door inwendige invloeden samenhangend met de verharding, doch is permanent onderhevig aan volumeveranderingen door uitwendige invloeden van mechanische of fysische aard. Aangetoond wordt uit literatuur en uit proeven op betontegels, zoals veelvuldig worden gebruikt voor voet- en fietspaden, dat de sterkte van beton bij een bepaalde leeftijd in hoge mate beïnvloed kan worden door plotselinge verstoringen van het bereikte evenwicht in de vochtuitwisseling van het beton met zijn omgeving. Tot dergelijke verstoringen moeten worden gerekend drogen in lucht en bevochtigen door onderdompeling, beide gedurende korte tijd.

Inleiding

Versteend beton wordt meestal aangezien voor een vaste stof. Het is evenwel een materiaal, dat blijvend gevoelig is voor veranderingen van fysische en mechanische aard in de uitwendige omstandigheden, waarin het verkeert ¹⁾. Deze gevoeligheid uit zich in geringe volumeveranderingen tengevolge van een samenwerking der volgende verschijnselen:

1. verhardingskrimp door de hydratatie van het cement;
2. zwelling bij bevochtiging en krimp bij uitdroging, als verschijnselen ook nog voorkomend in jarenlang versteend beton;
3. dilatatie en contractie door temperatuursverschillen;
4. elastische en plastische deformatie onder belasting.

In het volgende blijven de punten 3 en 4 buiten beschouwing. Omtrent de punten 1 en 2, de beïnvloeding door vocht, kan het volgende als vaststaand worden aangenomen.

De verharding, door de hydratatie van het cement, blijft, bij voldoende vochttoevoer, jarenlang doorgaan. Bij tijdelijke uitdroging wordt deze groei van de sterkte geremd of zelfs onderbroken en bij hernieuwde bevochtiging wordt het proces hervat. Bij beton onder water treedt een gewichtsvermeerdering op; aan de lucht een gewichtsvermindering, die groter is, naarmate de relatieve vochtigheid (% RV) lager is. Tenslotte stelt zich een evenwicht in met de omgeving. Dit is schematisch voorgesteld in figuur 1.

Ongeveer gelijklopend met de (geringe) gewichtsvermeerdering onder water ontstaat er een volumevergroting en bij gewichtsverlies door de uitdroging aan de lucht een volumeverkleining. Deze driedimensionale veranderingen worden voor één dimensie gemeten als lineaire verlenging resp.

¹⁾ R. L'HERMITE: Idées actuelles sur la technologie du béton. Documentation Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. Paris, 1955. Hieraan zijn ook de figuren 1 en 2 ontleend.

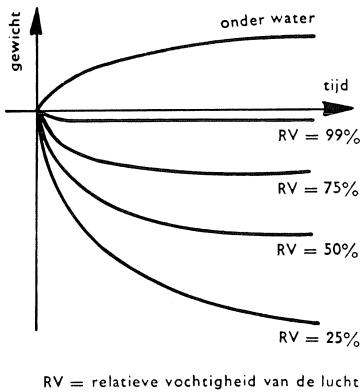


Fig. 1. Gewichtsverandering van beton, onder water en aan de lucht. Weight of concrete as affected by different hygrometric conditions.

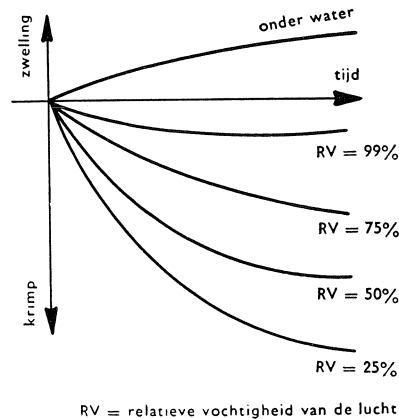


Fig. 2. Zwelling en krimp van beton tijdens de verharding afhankelijk van de vochtigheid van de omgeving. Change in length of concrete under different hygrometric conditions.

als verkorting (zwellung resp. krimp). Tenslotte stelt zich ook wat het volume betreft een evenwichtstoestand in, namelijk als er geen vochtuitwisseling met de omgeving meer plaats vindt. De krimp, bij uitdroging aan de lucht en de zwellung onder water zijn schematisch voorgesteld in figuur 2.

Gewichts- en volumeveranderingen komen tot rust als het beton zich heeft aangepast aan de omgeving. Deze toestandsveranderingen van het beton voltrekken zich uiterst langzaam, vooral als het beton enige maanden oud is. De toeneming in sterkte over een korte periode kan bij voldoende ouderdom van het beton verwaarloosd worden. Er blijft dan echter een meetbare zwellung bij plotselinge bevochtiging en een eveneens meetbare drogingskrimp bij uitdroging. Door de betrekkelijk kleine afmetingen van de gebruikelijke laboratoriumproefstukken, zoals de krimpprisma's voor beton ($10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$) en de nog kleinere prisma's voor mortel ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) kan binnen een redelijke tijdsduur het evenwicht worden bereikt met de kunstmatig in stand gehouden laboratoriumomstandigheden van constante temperatuur en relatieve vochtigheid. Het verkrijgen van deze evenwichtstoestand kan worden versneld door enige temperatuurverhoging en kunstmatige luchtcirculatie. Bij grotere massa's als kolommen en balken (ook niet te dunne vloeren), zoals die in de praktijk van het bouwen voorkomen, zal echter de normaal te verwachten uitdroging een langdurig proces zijn en wel van langere duur naarmate het beton dichter is en daardoor moeilijker water afstaat. Ook kan slechts globaal worden aangegeven naar welke evenwichtstoestand dit beton zal streven, omdat in de omgeving geen constante voorwaarden kunnen worden gehandhaafd. Men denke slechts aan het verschil in binnenhuiskli-

maat 's zomers en 's winters, overdag of des nachts, en aan de zeer wisselvallige weersomstandigheden waaraan beton in de buitenlucht blootstaat.

Verandering in sterkte door wisselend vochtgehalte

Overgaande tot ons eigenlijke onderwerp willen wij slechts op één gevolg van de uitdroging resp. bevochtiging van beton ingaan, nl. de verandering in buigsterkte met de tijdsduur, waarbij vooral kort na het wijzigen van een evenwichtstoestand aanmerkelijke sterkteverliezen optreden, waarvan het beton zich later herstelt, als een nieuw evenwicht met de omgeving zich instelt.

GRAF¹⁾ geeft hiervan voorbeelden. Uit grafische voorstellingen van het verloop van de buigsterkte met de tijd blijkt bijvoorbeeld, dat betonproefstukken, die gedurende 28 dagen na de vervaardiging onder water werden bewaard, door uitdroging aanvankelijk aan buigsterkte verliezen en dit verlies later, bij verder uitdrogen weer inhalen. Een beton van portlandcement met een sterkte van $79 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ vertoont een achteruitgang tot $64 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ na 2 dagen drogen en daarna een stijging tot $82 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ na 28 dagen drogen; beton van hoogovencement met een sterkte van $67 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ daalt tot $38 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ na 5 dagen drogen en stijgt daarna tot $69 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ na 28 dagen drogen. Het omgekeerde, sterkteverlies na bevochtigen, is ook aangetoond. Zo kwam, bij (andere) proefstukken – volgens een thans vrijwel verlaten Duitse gewoonte 7 dagen onder water en daarna 21 dagen aan de lucht verhard – de buigtreksterkte op de 28e dag uit op $64 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ zowel voor een beton met een bepaalde portlandcement als voor een ander beton met hoogovencement. Bij daarna onder water plaatsen daalde de buigtreksterkte aanvankelijk, met voor het portlandcementbeton een dieptepunt van $60 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ na 3 dagen, en voor het hoogovencementbeton van $45 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ na 2-3 dagen. Na 28 dagen verblijf onder water waren de waarden van de buigtreksterkte gestegen tot 71 à $72 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$, voor beide betonsoorten dus weer ongeveer gelijk. In deze laatstgenoemde voorbeelden is de naverharding door de herbevochtiging in de tweede periode van 28 dagen oorzaak, dat de buigtreksterktecijfers bij 56 dagen ouderdom hoger uitkomen dan die van 28 dagen.

Wij zijn van mening, dat de bij een herdruk in 1953 ingevoerde wijzigingen van N 499 „Trottoir- en Opsluitbanden van Beton”, waarbij wordt voorgeschreven dat de proefstukken vóór de buigproef 2×24 uur onder water bewaard moeten worden, niet voldoende rekening houden met het gesignaleerde effect van sterkteverlies door een aantasting van het hygrometrisch evenwicht door de onderdompeling. Een verklaring voor het plotseling afnemen van de sterkte is, dat dit waarschijnlijk veroorzaakt wordt door drukspanningen als gevolg van zwellen in de buitenste lagen van het beton, terwijl

¹⁾ GRAF, O., Die Eigenschaften des Betons pp. 15, 16, 152. Springer. Berlin, 1950.

de kern nog niet goed bevochtigd is en nog geen of een veel geringere volumeverandering heeft ondergaan. Het uitdrogen heeft in de eerste dagen een nog grotere invloed op de sterkte, omdat in de buitenschil van het beton dan extra trekspanningen worden veroorzaakt, die, bij benadering, in mindering van de buigtreksterkte moeten worden gebracht.

Eerste proevenserie

Aangezien trottoirbanden kostbaarder en minder gemakkelijk hanteerbaar zijn dan betontegels van $30 \times 30 \text{ cm}^2$, werden proeven op betontegels¹⁾ uitgevoerd, teneinde een indruk te verkrijgen omtrent de orde van grootte van het bevochtigingseffect en het verloop daarvan met de tijd. Tegelijkertijd werden

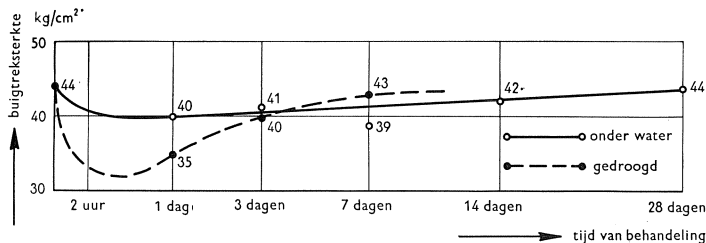


Fig. 3. Buigtreksterkte van betontegels afhankelijk van termijnen van drogen resp. bevochtigen. Flexural strength influenced by duration of treatment.

uitdrogingsproeven uitgevoerd om ook daardoor gegevens te verkrijgen ter vergelijking met de sterkteverandering door bevochtiging.

Een oriënterende proef werd uitgevoerd met een partij van 70 tegels, dik 4,5 cm, van handelskwaliteit, die reeds meer dan een jaar voor andere doeleinden in een loods waren bewaard. Alle buigproeven werden op één dag, dus bij gelijke ouderdom van de onderzochte tegels, uitgevoerd. De 70 tegels werden in 10 series van 7 verdeeld. Drie series werden resp. 1, 3 en 7 dagen vóór de beproeving in een droogstoof geplaatst en bij 80–100 °C gedroogd. Vijf series werden resp. 1, 3, 7, 14 en 28 dagen vóór het onderzoek onder water geplaatst. Naast deze 8 series werden 2 series van 7 onbehandeld op buigtreksterkte onderzocht. Na de breuk werd van alle tegels de gemiddelde werkelijke dikte gemeten en daaruit het weerstandsmoment berekend. Met de formule: buigspanning = moment : weerstandsmoment werd daarop de buigtreksterkte berekend. De verkregen cijfers zijn uitgezet in figuur 3. Zoals uit de figuur blijkt, verliezen de onder water geplaatste tegels aanvankelijk circa 10% in sterkte en komen pas na 28 dagen weer terug op de oorspronkelijke buigsterkte van $44 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$. De tegels die te drogen waren gezet, hebben na één dag 20% in buigsterkte verloren en een volledig herstel heeft meer dan zeven dagen nodig.

¹⁾ N 502: „Betontegels; keuringsproeven,” is bij herdruk in dezelfde geest als N 499 herzien.

Tweede proevenserie

De tweede serie proeven werd uitgevoerd op een partij van 150 tegels van $30 \times 30 \text{ cm}^2$, dik 4,5 cm, met een leeftijd van 6 maanden bij de levering en een gegarandeerde breeklast voor kwaliteit I van 1300 kg, overeenkomende met een buigtrekspanning van $64,2 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$. De 150 tegels werden verdeeld in 15 series van 10, waarvan 6 series bij 100°C werden gedroogd, gedurende resp. 2 uur, 1, 3, 7, 14 en 28 dagen en 6 series onder water van 20°C werden geplaatst gedurende dezelfde termijnen. Voorts bleef 1 serie als bij aflevering ($3\frac{1}{2}$ gew. % vocht), werd 1 serie 28 dagen in een droge ruimte bij 23°C en 50% RV en 1 serie 28 dagen in een vochtige ruimte bij 19°C en 95% RV geplaatst.

Het bleek bruikbare resultaten te leveren als de buigproeven op iedere tegel tweemaal werden uitgevoerd door, na de eerste buigproef, de tegel een kwartslag te draaien en de twee aaneen geschoven helften dan opnieuw te breken. Per serie werden aldus 20 buigtreksterktecijfers verkregen, waarvan de gemiddelden in figuur 4 grafisch zijn uitgezet. Voor de tijdas werd een schaalverdeling gekozen waarbij ook voor de periode van 2 uur een redelijke afstand op de Y-as werd verkregen. Tevens werd aan brokstukken van de onderzochte tegels het vochtgehalte bepaald door 14 dagen drogen bij 100°C . Deze vochtgehalten zijn uitgezet in het onderste deel van figuur 4.

Het drogen, waardoor de buitenste schil, die eerder water verliest dan de kern, krimpt ten opzichte van de kern, zodat trekspanningen worden opgewekt aan de buitenkant van de tegel, heeft een nadeliger invloed op de buigtrek-

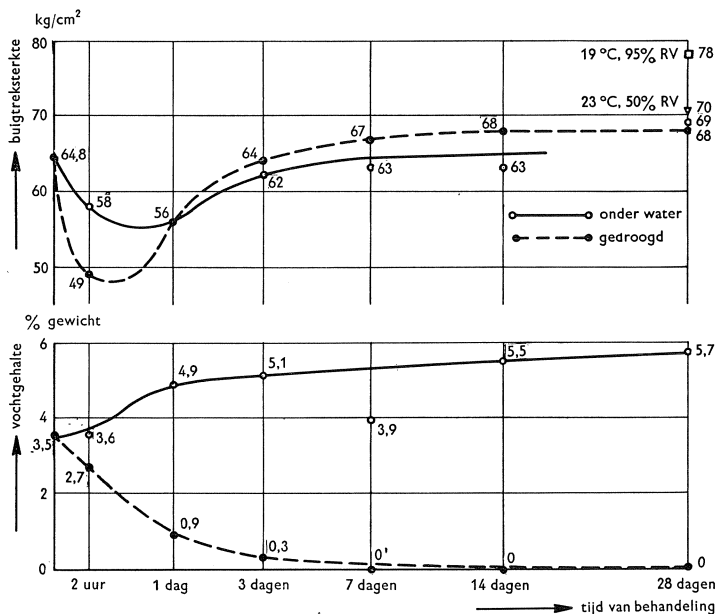


Fig. 4. Buigtreksterkte en vochtgehalte van betontegels, afhankelijk van termijnen van drogen, resp. bevochtigen. Flexural strength and % of moisture content influenced by duration of treatment.

sterkte dan het bevochtigen. De buigtreksterkte bij de levering bedroeg $64,8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ bij 3,5% vochtgehalte; deze sterkte is als 100% aangehouden. Na 2 uur drogen is de verlaging 24%, na 1 dag nog 13% en pas na 4 dagen drogen wordt de oorspronkelijke sterkte vrijwel bereikt, en daarna stijgt de buigtreksterkte asymptotisch naar 105% ($68 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$). Bij het bevochtigen is na 2 uur onderdompeling 10%, na 1 dag 13% en na 3 dagen nog 4% sterkteverlies vastgesteld.

Enige onregelmatigheid vertonen de buigtreksterkten van de bevochtigde tegels na 14 en 28 dagen. Het maakt de indruk dat via $62 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ na 3 dagen, een eindwaarde van $63 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ na 7 dagen wordt bereikt. Daarop volgt dan bij 28 dagen een sprong naar $69 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$. Het is waarschijnlijk dat dit een toevallig verschijnsel is; mogelijk veroorzaakt doordat de breeksterkte na 14 dagen toevallig wat laag is uitgevallen.

Merkwaardig is het hoge sterktecijfer, bereikt door 28 dagen drogen bij 23°C en 50% RV, nl. $70 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ (108%) niettegenstaande het vochtgehalte (1,6%) minder is afgenomen dan bij de 28 dagen bij 100°C gedroogde serie (0%).

Interessant is voorts, dat het gunstigste cijfer $78 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ (120%) wordt verkregen door de tegels 28 dagen te conditioneren bij 19°C en 95% RV, waardoor het vochtgehalte van 3,5% tot 4,4% stijgt.

Conclusie

De buigtreksterkte van beton wordt sterk beïnvloed door de hygrometrische omstandigheden waarin het beton de tijd voorafgaande aan de beproeving verkeert. Het is niet de bedoeling bij een onderzoek, ter beoordeling van de sterkte, het hoogst mogelijke of het laagst mogelijke cijfer vast te stellen, doch een *reproduceerbaar* cijfer te vinden. Te korte bevochtigingsduur van een aan de lucht verhard proefstuk leidt tot onregelmatige buigsterktecijfers.

Nabeschouwing omtrent de voorgeschreven keuring van betontegels volgens N 501/502

Er is veel voor te zeggen de tegels na bevochtiging te onderzoeken, zoals het normblad N 502 sinds juni 1956 voorschrijft, omdat zij bij het gebruik in trottoirs steeds, zij het aan één zijde, met vochtige grond in aanraking zijn. Op grond van de uitgevoerde proeven is evenwel een kortere onderdompelingstijd dan 7 dagen te verwerpen. Oude tegels, als van de eerste proevenserie (groot 70 stuks) bleken pas na onderdompeling gedurende 28 dagen weer op de aanvangsterkte terug te zijn gekomen.

In feite is echter, blijkens de resultaten van het onderzoek, de gestelde keuringseis voor de buigsterkte in N 501, als daaraan na 48 uur onderdompeling moet worden voldaan, een verlichting van de vroegere eis, waarbij de tegels vóór de beproeving 2 etmalen bij 60°C moesten worden gedroogd, omdat ze bij plotselinge bevochtiging aanvankelijk minder sterkteverlies lijden, dan kort na het begin van de droging.

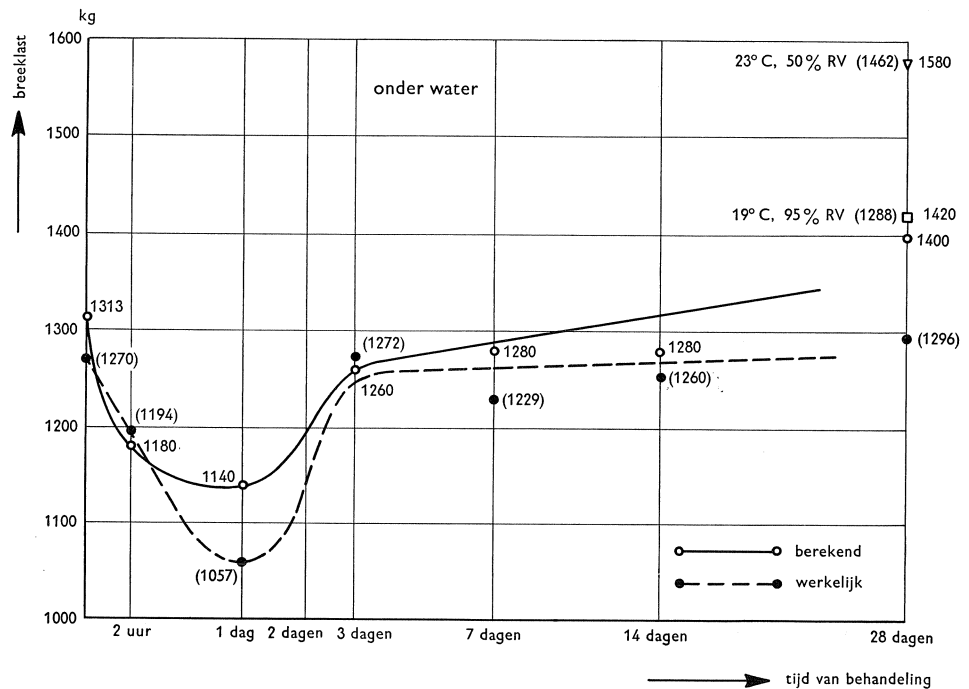
Met betrekking tot betonnen trottoirbanden kan het bovenstaande slechts tot nadenken stemmen. Analoge verschijnselen kunnen voor deze dikkere betonelementen aanleiding geven tot het in acht moeten nemen van een langere bevochtigingstermijn dan voor tegels nodig is.

In het voorgaande zijn buigtreksterktecijfers ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$) vermeld, in afwijking van N 501, waar sprake is van breeklasten (kg). De reden hiervan is, dat bij het onderzoek bleek dat er vrij grote dikteafwijkingen van de tegels voorkwamen, nl. van $\pm 0,3$ cm op een nominale dikte van 4,5 cm, met sporadisch een grotere afwijking, waardoor de breeklastcijfers geen zuiver beeld van de invloed van de vochtigheidsgraad geven zouden hebben.

Terwijl voor ons betoog het gedrag van de buigsterkte onder de genoemde veranderingen van vochtomstandigheden interessant was, stelt het normblad zich – naar het ons voorkomt terecht – op het standpunt, dat een bepaalde genormaliseerde tegeldikte een voorgeschreven breeklast moet hebben, zodat een partij te dunne tegels bij de bepaling van de buigsterkte in het nadeel is ten opzichte van tegels die wel aan de diktemaat zijn.

Wij hebben hieronder de verkregen gemiddelden voor de buigtrekspanning nog eens omgerekend op de breeklast voor tegels van de genormaliseerde nominale dikte van 45 mm en deze vergeleken met de gemiddelde breeklast

Fig. 5. Breeklasten van de bevochtigde tegels. Cijfers tussen haakjes zijn gemiddelden van aflezingen. De gewone cijfers zijn berekende gemiddelden. Transverse breakloads after wetting.



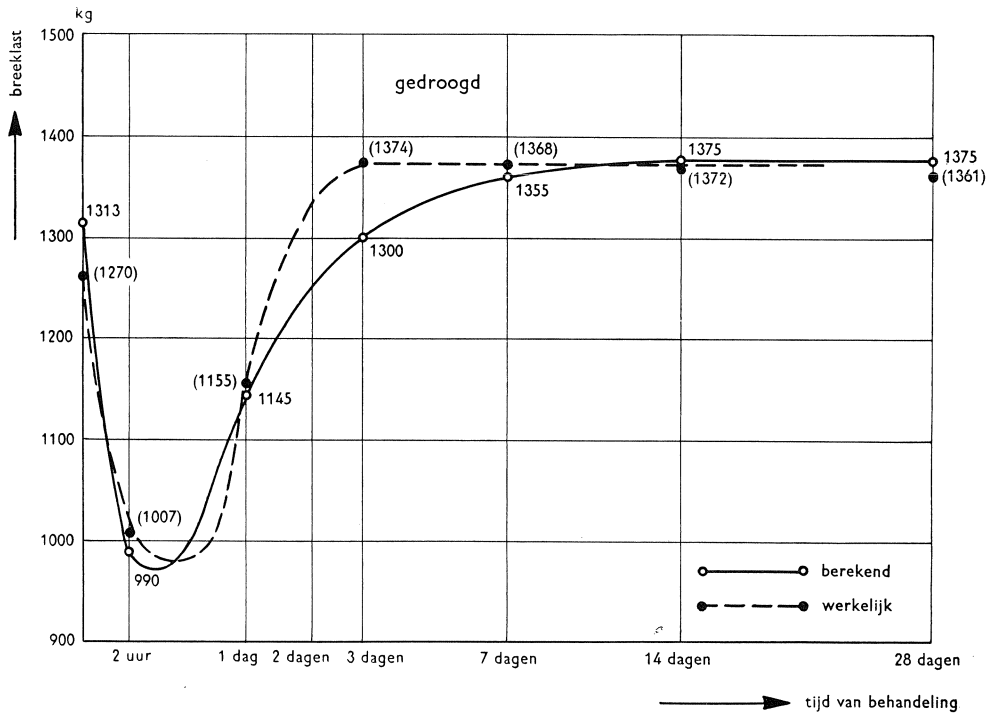
verkregen uit de proeven bij verschillende toestanden van uitdroging of bevochtiging en de resultaten verzameld in de figuren 5 en 6.

Als voorbeeld van de berekeningen worden van de tien „onbehandelde” tegels de volgende cijfers vermeld van de werkelijke breeklast, de buigtreksterkte en de breeklast, die uit de buigtreksterkte zou volgen als de tegels 45 mm dik waren geweest.

Tegels:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	gemiddelde
werkelijke breeklast, kg.	1180	1190	1190	1195	1220	1230	1255	1270	1425	1545	1270
buigtreksterkte, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$	57,0	64,3	67,4	63,3	60,0	65,3	65,1	65,9	65,9	72,8	64,8
berekende breeklast, kg.	1155	1305	1365	1280	1215	1325	1320	1355	1355	1475	1313

Er zijn dus geen tegels met een breeklast lager dan het toegestane individuele minimum van 1170 kg, doch het vereiste gemiddelde van 1300 kg wordt niet gehaald. Uit de reeks, die berekend is uit de buigtreksterkte onder aanname dat elke tegel 45 mm dik geweest zou zijn, blijkt, dat het gemiddelde

Fig. 6. Breeklasten van de gedroogde tegels. Cijfers tussen haakjes zijn gemiddelden van aflezingen. De gewone cijfers zijn berekende gemiddelden. Transverse breakloads after drying.



dan wel voldaan zou hebben aan de eis van het normblad N 501, doch dat één tegel (no. 1) de 1170 kg niet bereikt zou hebben. Drie cijfers in deze reeks zijn lager dan in de eerste reeks (no's 1, 9, 10), één is ongeveer gelijk (no. 5) en zes cijfers zijn hoger dan in de eerste opgave, m.a.w. zes van de tien tegels zijn te dun en drie te dik geweest.

In figuur 5, waarin aangegeven is het verloop van de breeklasten bij het gedurende verschillende termijnen *onder water zetten*, komen grote afwijkingen van de gemiddelden tussen de werkelijke en de berekende breeklasten voor: na 1 dag, na 7 dagen en na 28 dagen.

Blijkbaar waren toevalligerwijze gehele series van 10 tegels dunner resp. dikker dan de gewenste 45 mm. De op de nominale dikte van 45 mm omgerekende breeklasten zijn gewoon geschreven, de gemeten cijfers zijn tussen haakjes geplaatst.

In figuur 6 van het verloop van de breeklasten van de gedurende verschillende perioden gedroogde tegels komt de grootste – een het verloop storende – afwijking voor bij de serie van de 3 dagen gedroogde tegels. De gemeten cijfers zijn weer tussen haakjes geplaatst.

Het wordt betreurd, dat door een misverstand, geen series na 2 dagen bevochtigen resp. drogen op breeksterkte zijn onderzocht, zoals het normblad voorschrijft.

Flexural strength of concrete, as influenced by short time drying or wetting

Concrete, solid and stable as it appears to the casual observer, is nevertheless a material in perpetual evolution.

It is subject to volumetric changes from variations in exterior conditions of physical and mechanical origin, not only in the curing period, but also afterwards. The volume of concrete changes as a result of variations in temperature, of wetting or drying and of loading; the changes are partly permanent or non-resilient and partly temporary or elastic.

A recent alteration of the Netherlands' Standards for bending tests on concrete kerbs and pavingslabs (square flags 12×12 in.) which formerly had to be tested after drying, and now after being immersed in water for 48 hours prior to testing, suggested an investigation into the bending or flexural strength of concrete as influenced by change in hygrometric conditions and duration of same.

Disturbing the state of hygrometric equilibrium in which the concrete is sampled for testing, by either drying or wetting, causes initially a loss of part of the flexural strength attained at the age of sampling. In the first few hours and even days of drying this loss of strength is more pronounced than the decrease in strength after wetting the partially dry samples (3.5% by weight of moisture), as shown in figures 3 and 4.

After three to four days of either treatment the values for flexural strength started to reach the same level as those of the slabs tested in the original condition. After longer treatment the strength increased to a value higher than that of the untreated slabs.

The highest resistance to rupture has been observed with the series of testpieces conditioned for 28 days at 65 °F and 95% of relative humidity.

In the graphs 3 and 4 flexural strengths have been denoted in kgs.cm^{-2} , in order to eliminate the influence of the variation in thickness of the several slabs. The nominal thickness of the latter should have been 45 mm, but variations of ± 3 mm occurred.

To show the effect of these variations the actual breaking loads (in kgs.) have been given in the graphs 5 and 6, for comparison with calculated breaking loads (between brackets) computed from actual bending stresses at rupture and a theoretical modulus of section for a constant slab-thickness of 45.0 mm.