

# OPTISCHE METHODE TER BEPALING VAN ZEER KLEINE VERVORMINGEN

(TOEGEPAST VOOR DE METING VAN DE  
DWARSCONTRACTIE VAN BETON)

U.D.C. 624.012.3; 624.058.2

*Om een inzicht te verkrijgen in het verloop van de dwarscontractiecoëfficiënt van beton, onderworpen aan een variërende éénassige trekspanningstoestand, is het nodig zeer kleine rekken te kunnen meten. Teneinde een dienovereenkomstig grote meetgevoeligheid te kunnen realiseren is een optische rekmeter ontworpen, waarbij in afwijking van gangbare systemen gebruik wordt gemaakt van een tweetal spiegels die onderling een kleine hoek insluiten, welke onder de werking van de veranderende grootte der dwarscontractie zich evenredig wijzigt en waarbij de optredende hoekverandering (dank zij de tussen de spiegels meervoudig gereflecteerde stralengang) sterk optisch vergroot kan worden afgelezen. Hoewel de apparatuur gevoelig is voor temperatuursfluctuaties konden ook in een niet-geklimatiseerde ruimte redelijk goede resultaten bereikt worden. Het navolgende artikel geeft een samenvatting van het onderzoek, dat uitvoeriger in [1] is beschreven.*

## 0 Inleiding

In het algemeen worden bij het onderzoek van de mechanische eigenschappen van beton onder belasting weerstandsrekstrookjes gebruikt indien tijdens de beproeving waarnemingen geregistreerd moeten worden. Dit is bijvoorbeeld het geval als men de vervorming  $\varepsilon$  als functie van de spanning  $\sigma$ , óf de dwarscontractie  $\nu$  als functie van  $\varepsilon$  wil registreren. De metingen kunnen zich zowel over het druk- als over het trekgebied uitstrekken.

Een proefstukje als weergegeven in fig. 1 wordt onderworpen aan een variërende éénassige trekspanningstoestand, met het oogmerk een inzicht te verkrijgen in het daarbij optredende verloop van de dwarscontractiecoëfficiënt  $\nu$ . Experimenten op dit gebied zijn zeer schaars; zie bijv. [2].

Door meting met de rekstrookjes no. 1 en 3, resp. no. 2 en 4 wordt de gemiddelde rek in de  $z$ -, resp.  $x$ -richting als functie van de belasting verkregen. Met deze gegevens is zowel het  $\sigma$ - $\varepsilon$ - als het  $\nu$ - $\varepsilon$ -diagram te construeren. De uit de  $\sigma$ - $\varepsilon$ -curve te bepalen elasticiteitsmodulus  $E$  wordt als secans-, resp. tangentmodulus gedefinieerd. In fig. 2 worden deze moduli voorgesteld door  $n/b$ , resp.  $m/q$ . Op overeenkomstige wijze kan de dwarscontractiecoëfficiënt  $\nu$  op twee manieren gedefinieerd worden (zie fig. 2):  
1e als secansmodulus:

$$\nu_1 = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = \frac{a(\sigma)}{b(\sigma)} \dots \dots \dots (1a)$$

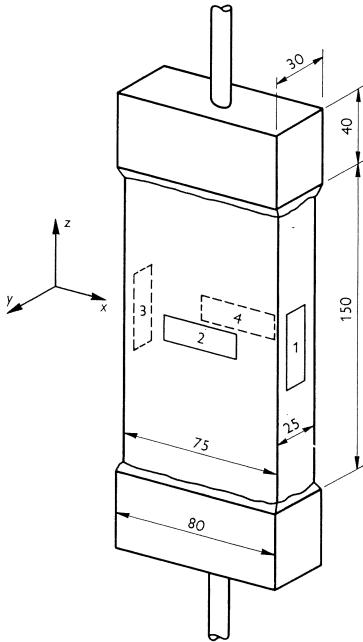


Fig. 1. Proefstukje met rekstrookjes.

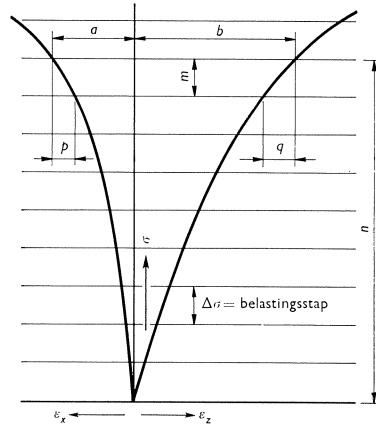


Fig. 2. Geschematiseerde  $\sigma$ - $\epsilon$ -diagrammen van beton.

2e als tangentmodulus:

$$v_2 = \frac{\Delta \epsilon_x}{\Delta \epsilon_z} = \frac{p(\sigma)}{q(\sigma)} \dots \dots \dots (1b)$$

Een analoge definitie vindt men bij ANTSON [3].

De meetresultaten verkregen volgens vorenstaande methode vertonen echter een te grote spreiding in de  $x$ -richting, hetgeen een gevolg is van een onvoldoende meetgevoeligheid der methode. Een getallenvoorbeeld toont dit aan: stel de breuktrekspanning van een bepaalde betonsoort op  $35 \text{ kgf/cm}^2$ . Wordt de belasting in 10 gelijke stappen opgevoerd, dan moet voor een spanningstoename van  $3,5 \text{ kgf/cm}^2$  telkens zowel  $\epsilon_z$  als  $\epsilon_x$  worden bepaald.

Stel  $E = 350\,000 \text{ kgf/cm}^2$  dan volgt  $\epsilon_z = 10^{-5} \text{ m/m}$ , of wel  $10 \text{ } \mu\text{rek}$ , wat per m lengte neerkomt op een rek ter grootte van  $10 \text{ } \mu\text{m}$  of  $0,01 \text{ mm}$ .

Is de dwarscontractiecoëfficiënt  $\nu = \frac{1}{8}$ , dan is de grootte van de dwarsrek in dit geval  $\epsilon_x = 10/8 \text{ } \mu\text{rek}$ , ofwel  $0,00125 \text{ mm}$ . Hierbij worden dus wel uiterst zware eisen gesteld aan de afleesnauwkeurigheid en de opneemapparatuur.

Het is mogelijk i.p.v.  $\epsilon_x$  de grootte der totale contractie  $\Delta b$  van het proefstuk te meten.

In voorgaand getallenvoorbeeld, met voorts  $b = 75 \text{ mm}$  bedraagt  $\Delta b$  per belastings-trap:

$$\Delta b = \frac{10}{8} \cdot 10^{-6} \cdot 75 \text{ mm} \approx 10^{-4} \text{ mm} = 0,1 \text{ } \mu\text{m}.$$

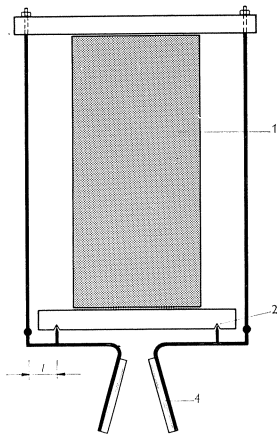


Fig. 3a.  
Principeschema van  
de optische rekmeter.  
 $l$  = hefboomsarm.

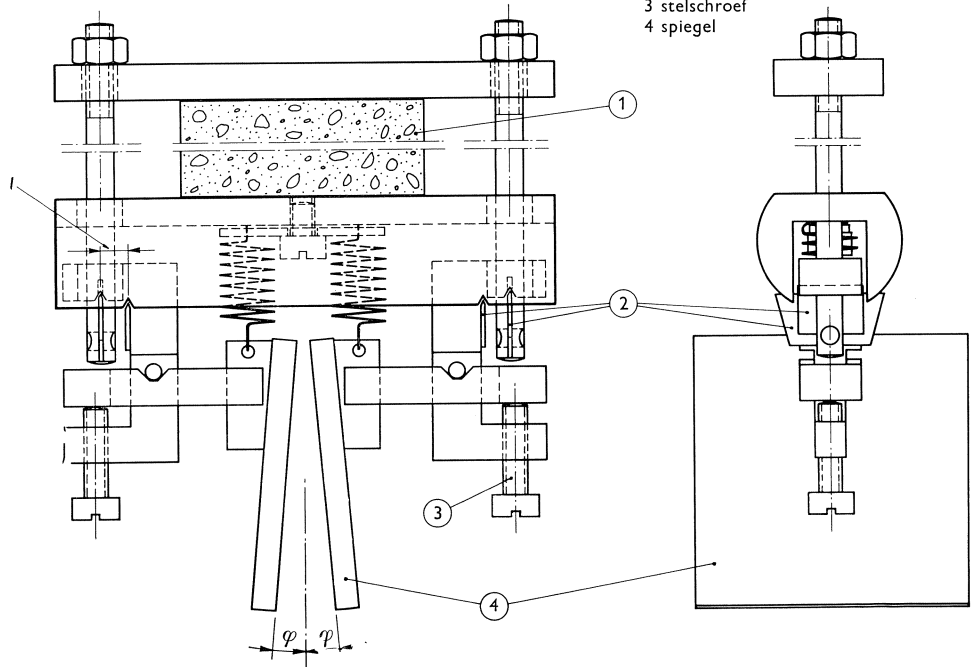
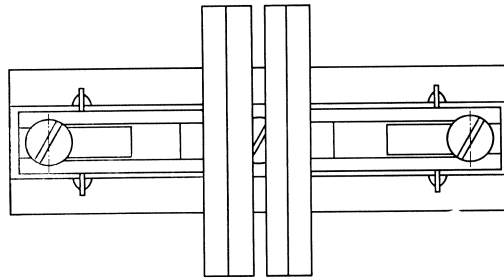
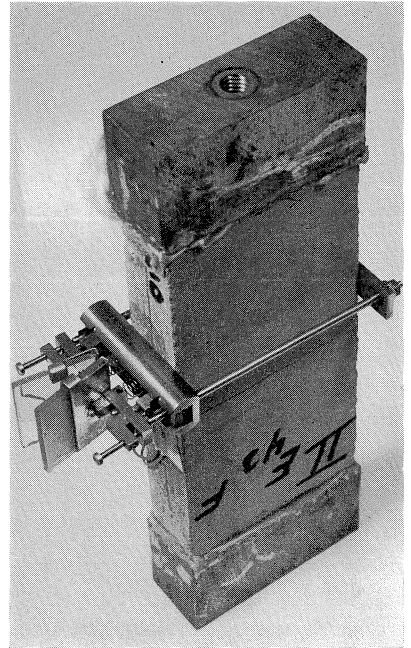


Fig. 3b. Werktekening van de optische rekmeter.

Ook dit is echter voor zeer nauwkeurige en gevoelige meetklokjes nog een te zware opgave.

Een en ander leidt tot de conclusie: *De te meten grootheid moet sterk lineair vergroot worden alvorens de meting met goed gevolg te kunnen uitvoeren.*

Om dit vergrotingsproces te bewerkstelligen is een optische methode toegepast, waarbij, in afwijking van gangbare systemen [4] [5], gebruik wordt gemaakt van twee spiegels die een kleine hoek insluiten.

## 1 Het optisch meten van de contractie

### 1.1 De optische rekmeter

Aan de hand van fig. 3a en 3b zij de werking van het apparaat uiteengezet (uitgevoerde vorm zie fig. 3c). De spiegels (4) zijn opgehangen in een frame dat om de dwarsdoorsnede van het proefstuk (1) geklemd wordt. Via een dubbel hefboomsysteem met mesopleggingen (2) wordt de optredende dwarscontractie omgezet in rotatie van elk der beide spiegels. De openingshoek  $2\varphi$  tussen de spiegels is regelbaar met stelschroeven (3) die aan beide zijden zijn aangebracht. Deze regeling gaat uiteraard vooraf aan de uitvoering van metingen.

### 1.2 De opstelling (fig. 4)

Een verlichte maatverdeling in mm (A) wordt via het spiegelsysteem (B) d.m.v. een eenvoudige kijker met kruisdraden (C) waargenomen.

Om gedurende de beproeving de uittredende lichtstraal te kunnen waarnemen in de kijker dient deze zo dicht mogelijk bij de opening van de spiegels opgesteld te worden.

De werkafstand  $L$  wordt anderzijds zo groot mogelijk genomen om een hoge gevoeligheidsgraad te bereiken, waarbij echter de eigenschappen van de kijker en verlies aan lichtintensiteit in dit opzicht begrenzingen opleggen.

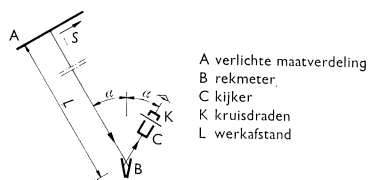


Fig. 4. Schema van de opstelling.

## 2 De meetgevoeligheid

De meetgevoeligheid van de apparatuur is van de volgende factoren afhankelijk:

- de contractie-rotatieverhouding;
- de werkafstand;
- de richtingsveranderingsfactor.

De punten a. en c. hebben betrekking op de optische rekmeter, punt b. op de opstelling.

### 2.1 De contractie-rotatieverhouding (zie fig. 3a en 3b)

De totale contractie  $\Delta b$  van het betonproefstuk wordt via een stel hefboomen omgezet in rotaties  $\Delta\varphi$  van elk der spiegels. De hefboomsarmen (welke in principe zo kort

mogelijk dienen te zijn) hebben een lengte  $l = 3,2$  mm. Wegens de symmetrie ondergaat elke spiegel dan een rotatie:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta b}{l} \dots \dots \dots (2)$$

Deze rotatie-aandelen zijn onderling tegengesteld van richting; de verandering van de openingshoek is dus  $2\Delta\varphi$ .

2.2 De werkaafstand (zie fig. 4)

De verplaatsing  $\Delta s$  van het beeld in de kijker is recht evenredig met de werkaafstand  $L$ , of in formule:

$$\Delta s = \theta_n L \dots \dots \dots (3)$$

2.3 De richtingsveranderingsfactor (zie fig. 5)

Doordat de spiegels een kleine hoek met elkaar maken zal een invallende lichtstraal enige malen ( $= n$ ) tussen de spiegelvlakken gereflecteerd worden en ten slotte het spiegelsysteem weer verlaten.

De ten gevolge van deze meervoudige reflectie optredende richtingsverandering  $\theta_n$  van de lichtstraal houdt op de volgende eenvoudige wijze verband met  $n$  en  $\Delta\varphi$  (zie fig. 5):

$$\theta_n = 2n \Delta\varphi \dots \dots \dots (4)$$

2.4 Grenzen der meetgevoeligheid

De vergrotingsfactor  $V$  volgt uit (2), (3) en (4):

$$V = \frac{\Delta s}{\Delta b} = 2n \frac{L}{l} \dots \dots \dots (5)$$

Stel  $L = 5$  m = 5000 mm  
 $n = 16$

Dit geeft als vergrotingsfactor

$$V = 2 \cdot 16 \cdot \frac{5000}{3,2} = 50\ 000.$$

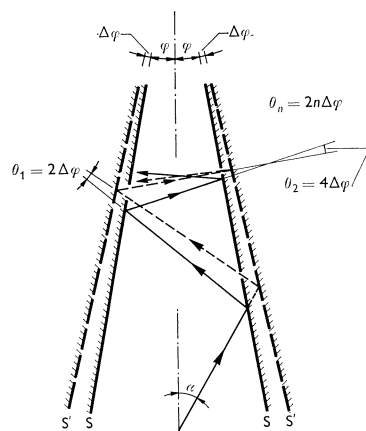


Fig. 5. Relatie tussen  $\theta_n$  en  $\varphi$ .

Hierbij resulteert een slechts  $0,1 \mu\text{m}$  grote contractie van het proefstukje per belastings-trap (zie Inleiding) in een goed waarneembare verschuiving op de maatverdeling, ter grootte  $\Delta s = 50\ 000 \times 0,1 \mu\text{m} = 5000 \mu\text{m} = 5$  mm.

Aangezien bij iedere reflectie de lichtsterkte wegens absorptie afneemt en de spiegels nooit ideaal vlak zijn zal de beeldkwaliteit achteruitgaan naarmate  $n$  toeneemt.

Voor een goede vergroting van het te meten verschijnsel is het evenwel zaak  $n$  zo groot mogelijk te maken. Dit bereikt men door aan de openingshoek  $2\varphi$  tussen de spiegels en de invalshoek  $\alpha$  van de inkomende lichtbundel elk een zo klein mogelijke waarde te geven.

Er moet daarom met het oog op de resulterende bruikbaarheid een compromis gezocht worden bij het vaststellen van  $n$ . De keuze  $n = 16$  is ten deze een praktische waarde gebleken. Aangezien  $\Delta s$  met een goede kijker tot op 0,1 mm te schatten is betekent dit voor  $\epsilon_x$  een meetgevoeligheid van ca. 0,025  $\mu\text{rek}$ , wat per m lengte neerkomt op een rek of contractie ter grootte van 0,025  $\mu\text{m}$  of  $25 \cdot 10^{-6}$  mm.

### 2.5 Storingen

De meting wordt door een rotatie of translatie van het meetsysteem als geheel (bijv. rotatie van het proefstukje tijdens belasten) niet beïnvloed.

De temperatuurgevoeligheid is echter groot; daarom zijn de metalen delen van invar vervaardigd.

Het is beter de beproeving in een geconditioneerde ruimte te doen plaatsvinden, omdat ook het proefmateriaal constant van temperatuur dient te zijn. Indien niet van een geconditioneerde ruimte wordt gebruik gemaakt dient een temperatuurscorrectie ingevoerd te worden. Het blijkt niet nodig om de rekmeter aan het beton te lijmen om verschuiving te voorkomen: de veren (in fig. 3b aangegeven) blijken zulks reeds door hun constante klemkracht te verzekeren.

## 3 De uitwerking

### 3.1 Bepaling van $\varphi$ en $\alpha$ voor de vaststelling van $n$

Het verband tussen de instelhoek  $\alpha$  (zie fig. 4), de openingshoek  $2\varphi$  en het totale aantal reflecties  $n$  is (zie fig. 6):

$$\alpha = 90^\circ - n\varphi \quad \dots \quad (6)$$

In verband met het genoemde compromis blijken  $n = 14, 16$  of  $18$  praktische waarden te zijn. Hierbij blijkt voor een gegeven waarde van  $n$  de hoogste lichtintensiteit op te treden, indien in (6)  $\alpha$  minimaal is en dus  $\varphi$  maximaal. De bovengrens van  $\varphi$  wordt gevormd door een van de gekozen  $n$  afhankelijke grenswaarde. Overschrijdt

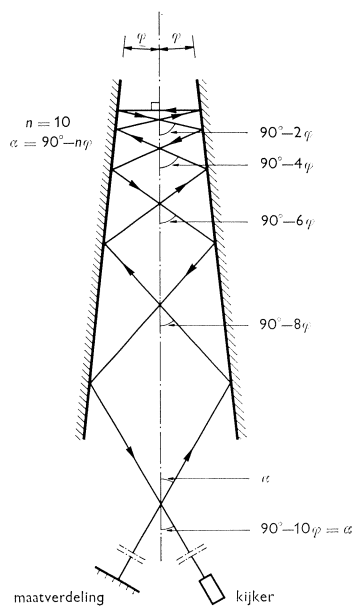


Fig. 6. Relatie tussen  $\alpha$  en  $\varphi$ .

$\varphi$  deze waarde dan vermindert het mogelijke aantal reflecties met twee. De grenswaarde volgt uit (6) als  $\alpha = 0$ .

Voor  $n = 14$  volgt:  $2\varphi \approx 13^\circ$

$n = 16$  volgt:  $2\varphi \approx 11,3^\circ$

$n = 18$  volgt:  $2\varphi \approx 10^\circ$

Uit deze dicht bijeen liggende grootten van  $2\varphi$  blijkt de noodzaak om  $\varphi$  nauwkeurig te meten. De waarde  $n = 16$  is rekentechnisch te verkiezen, omdat hierdoor de uitdrukking voor  $\varepsilon_x$  zeer eenvoudig wordt, nl. bij  $l = 3,2$  mm:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta b}{b} = \frac{l}{2nLb} \cdot \Delta s = \frac{\Delta s}{10bL} \dots \dots \dots (7)$$

waarin

$\Delta s$  = beeldverschuiving in mm;

$b$  = breedte proefstuk in  $x$ -richting in mm;

$L$  = werkafstand in mm;

$\varepsilon_x$  = rek in  $x$ -richting (dimensieloos)

Een praktische vorm voor formule (7) is:

$$bL\varepsilon_x^* = \Delta s \dots \dots \dots (7a)$$

waarin

$b$  in cm;

$L$  in m;

$\Delta s$  in 0,1 mm;

$\varepsilon_x^*$  in  $\mu$ rek.

Bij de geconstrueerde rekmeter is  $2\varphi \approx 10^\circ$ , zodat bij  $n = 16$  een instelhoek  $\alpha = 10^\circ$  behoort.

De uitgaande en de invallende lichtbundels maken onderling een hoek  $2\alpha$ , waarmee de richting en de stand van de meetverdeling bekend zijn. In het algemeen wordt  $n$  berekend voor één bepaalde opstelling. Uit (6) volgt

$$n = \left( \frac{90^\circ - \alpha}{2\varphi} \right).$$

Via de cosinusregel in de driehoek: *maatverdeling* – *rekmeter* – *kijker* is  $\alpha$  eenvoudig te bepalen; bovendien is de fout die hierbij gemaakt wordt van betrekkelijk kleine invloed op de vaststelling van  $n$ . Het meten van  $\varphi$  moet echter – zoals eerder opgemerkt – zeer nauwkeurig geschieden.

De volgende methode voldoet: Stel een kijker op enige afstand (bijv. 2 à 3 meter) van de rekmeter op. Plaats de kijker zodanig, dat de optische as ervan samenvalt met het spiegelend oppervlak van één der spiegels. Markeer de plaats van de kijker. Doe hetzelfde met betrekking tot de andere spiegel. Uit de zijdelengten van de aldus gevormde droehoek kan de tophoek ( $2\varphi$ ) door berekening worden afgeleid.

### 3.2 Toepassing

De tabel en de figuren 7 en 8 tonen de meetresultaten van een proefstukje van 14 weken oud beton.

De rek  $\varepsilon_z$  in de richting van de belastingskracht werd gemeten met 2 weerstandsrekstrookjes. De voordien geijkte rekmeter leverde de gegevens, waaruit  $\varepsilon_x$  berekend kon worden. Naast de berekening van de Poisson-'constante'  $\nu_1$  (def. 1a), wordt  $\nu_2$  (def. 1b) gegeven.

In de tabel op blz. 68 vermelden de kolommen 10, 11 en 12 achtereenvolgens:

1. de uit de meetgegevens *berekende* waarden van  $\nu_1$ ;
2. de *gemeten* ordinaten van de  $\nu_1$ - $\varepsilon$ -curve, ontstaan door de berekende waarden van 1. door een vloeiende lijn te vervangen (zie fig. 7);
3. de *gemeten* waarden van  $\nu_2$ .

$\nu_2$  is te bepalen door in één grafiek de bij elkaar behorende waarden van  $\varepsilon_x$  en  $\varepsilon_z$  tegen elkaar uit te zetten (zie fig. 8) en daarna de tangentmodulus te bepalen na iedere belastingsstap.

Het is eveneens mogelijk de waarden van  $\nu_2$  af te leiden uit die van  $\nu_1$ .

Immers door differentiatie van  $\nu_1$  naar  $\varepsilon$  ontstaat:

$$\varepsilon \frac{d\nu_1}{d\varepsilon} = \nu_2 - \nu_1$$

zodat  $\nu_2$  te berekenen is uit de waarden van  $\nu_1$  en de bijbehorende tangentwaarden van de  $\nu_1$ - $\varepsilon$ -curve.

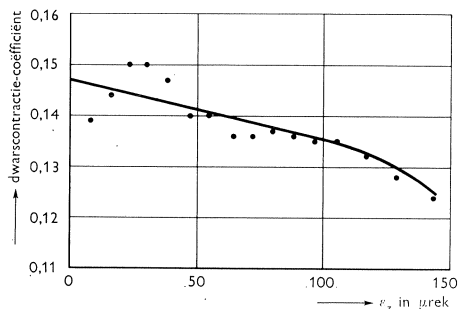


Fig. 7. De dwarscontractiecoëfficiënt  $\nu_1$  als functie van de rek  $\varepsilon_z$  in de belastingsrichting.

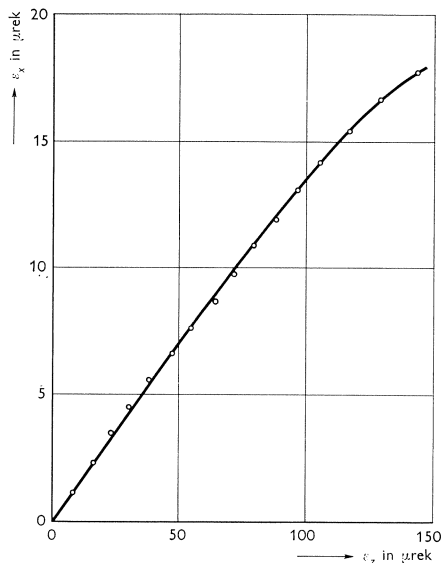


Fig. 8. De rek  $\varepsilon_x$  in dwarsrichting als functie van de rek  $\varepsilon_z$  in de belastingsrichting.



Tabel

| (1)          | (2)                                | (3)                                | (4)   | (5)             | (6)                    | (7) *                             | (8)                           | (9) **                                 | (10)                                 | (11)  | (12)  |
|--------------|------------------------------------|------------------------------------|---|-----------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------------------|-------|-------|
| $P$<br>(kgf) | $\varepsilon_{z1}$<br>( $\mu$ rek) | $\varepsilon_{z2}$<br>( $\mu$ rek) | $\Sigma \varepsilon_z$<br>gemidd.<br>( $\mu$ rek) | $S$<br>(0,1 mm) | $\Delta S$<br>(0,1 mm) | $\Delta S$<br>gecorr.<br>(0,1 mm) | $\Sigma \Delta S$<br>(0,1 mm) | $\Sigma \varepsilon_x$<br>( $\mu$ rek) | dwars-<br>contractie-<br>coëfficiënt |       |       |
| 0            | 6537                               | 5800                               | 8   | 1475            | 28                     | 31                                | 31                            | 1,11                                   | 0,139                                | 0,146 | 0,146 |
| 50           | 6529                               | 5792                               | 16  | 1503            | 30                     | 33                                | 64                            | 2,30                                   | 0,144                                | 0,145 | 0,145 |
| 100          | 6521                               | 5784                               | 23  | 1533            | 29                     | 32                                | 96                            | 3,46                                   | 0,150                                | 0,144 | 0,144 |
| 150          | 6513                               | 5778                               | 30  | 1562            | 26                     | 29                                | 125                           | 4,50                                   | 0,150                                | 0,143 | 0,141 |
| 200          | 6506                               | 5771                               | 38  | 1588            | 27                     | 30                                | 155                           | 5,58                                   | 0,147                                | 0,142 | 0,139 |
| 250          | 6499                               | 5762                               | 47  | 1615            | 25                     | 28                                | 183                           | 6,59                                   | 0,140                                | 0,141 | 0,137 |
| 300          | 6489                               | 5754                               | 54,5  | 1640            | 26                     | 29                                | 212                           | 7,63                                   | 0,140                                | 0,140 | 0,136 |
| 350          | 6481                               | 5747                               | 64  | 1666            | 26                     | 29                                | 241                           | 8,67                                   | 0,136                                | 0,139 | 0,135 |
| 400          | 6471                               | 5738                               | 71,5  | 1692            | 27                     | 30                                | 271                           | 9,76                                   | 0,136                                | 0,138 | 0,134 |
| 450          | 6463                               | 5731                               | 79,5  | 1719            | 29                     | 32                                | 303                           | 10,92                                  | 0,137                                | 0,137 | 0,132 |
| 500          | 6455                               | 5723                               | 88  | 1748            | 26                     | 29                                | 332                           | 11,95                                  | 0,136                                | 0,137 | 0,129 |
| 550          | 6445                               | 5716                               | 96,5  | 1774            | 28                     | 31                                | 363                           | 13,08                                  | 0,135                                | 0,136 | 0,124 |
| 600          | 6436                               | 5708                               | 105,5   | 1802            | 29                     | 32                                | 395                           | 14,22                                  | 0,135                                | 0,134 | 0,117 |
| 650          | 6426                               | 5700                               | 117   | 1831            | 29                     | 32                                | 427                           | 15,38                                  | 0,132                                | 0,132 | 0,107 |
| 700          | 6414                               | 5689                               | 129   | 1860            | 32                     | 35                                | 462                           | 16,65                                  | 0,128                                | 0,130 | 0,085 |
| 750          | 6402                               | 5677                               | 143,5   | 1892            | 28                     | 31                                | 493                           | 17,75                                  | 0,124                                | 0,125 | 0,072 |
| 800          | 6385                               | 5665                               |   | 1920            |                        |                                   |                               |  |                                      |       |       |
| 830          | breuk                              |                                    |   |                 |                        |                                   |                               |  |                                      |       |       |

\* temp. correctie per stap: 3

\*\*  $\varepsilon_x = 0,036 \Delta S$ 

#### 4 Conclusies

Bij het meten van laterale vervormingen van beton dat op trek is belast worden hoge eisen gesteld aan de meetgevoeligheid van de gebruikte apparatuur. Indien men het *verloop* van de dwarscontractiecoëfficiënt over het trekgebied bij variërende spanning wenst na te gaan kan men geen gebruik maken van de gangbare meetapparatuur op dit gebied, zoals weerstandsrekstrookjes, meetklokjes of mechanische rekmeters.

De in het voorgaande kort beschreven optische apparatuur bezit in dit licht gezien een aantal markante voordelen; het geheel is eenvoudig zowel wat bouw als werking betreft en vereist geen speciale vaardigheid. Dit in tegenstelling tot bijv. inductieve rekmeters.

Beschermkapjes van tempex reduceren de kwetsbaarheid van het meetapparaat tot een minimum. Zo wordt de bij breuk van het betonblokje optredende schok goed opgevangen. De opstelling is niet gecompliceerd en vraagt als extra voorziening slechts de beschikking over een kijker en een meetlat.

Een nadeel is de gevoeligheid voor variatie van de temperatuur der omgeving. De tempex-kapjes en het gebruik van invar onderdelen beperken dit bezwaar tot een minimum, doch zorgvuldigheid blijft geboden. Hoewel het werken in een geconditioneerde ruimte natuurlijk de voorkeur verdient is dit voor een routine-onderzoek bepaald geen eis.

Wel dient een temperatuurscorrectie te worden toegepast door een nulpuntscontrole tijdens het verloop der beproeving. Het is eveneens mogelijk, indien een dergelijke tussentijdse reductie van de belasting niet gewenst is (zie bijv. [6]), een extra stel rekstrookjes aan te brengen in de richting loodrecht op de belastingskracht. Door het vergelijken van twee ver uit elkaar gelegen waarnemingen (bijv. bij het genoemde voorbeeld bij de nulstand en ná het optreden van 100  $\mu$ rek in de  $z$ -richting) is een correctie op de waarnemingen van de optische rekmeter mogelijk.

De (eenvoudige) kijker en de afmetingen van de werkruimte stellen eisen aan de werkafstand; toch is het mogelijk bij een vrij geringe werkafstand en middelmatige reflectiefactor ( $n$ ) een grote meetgevoeligheid te bereiken, zoals in 2.4 besproken.

Door variatie van de werkafstand  $L$ , de openingshoek  $2\varphi$  en de instelhoek  $\alpha$  is de resulterende meetgevoeligheid aan de omstandigheden aan te passen.

Onder handhaving van het principe van de rekmeters als in het voorgaande beschreven (combinatie van een mechanische omzetting van rek in *rotatie* en optisch sterke vergroting hiervan door een spiegelsysteem met kleine openingshoek), is voor verwante doeleinden, onder hiertoe geëigende aanpassing in constructieve zin, een soortgelijk nauwkeurig werkend apparaat voor realisatie vatbaar te achten.

## Literatuur

1. STROEVEN, P. en H. VOORSLUIS, Optische methode ter bepaling van zeer kleine vervormingen. Stevin-rapport, nr. 5-67-9, juli 1967.
2. VILE, G. W. D., Behaviour of concrete under simple and combined stresses. Thesis submitted to the University of London for the degree of Ph.D. 1965.
3. ANTON, M. en K. NEWMAN, The effect of mix proportions and method of testing on Poisson's ratio for mortars and concretes.
4. NEWMAN, K. en L. LACHANCE, The testing of brittle materials under uniform uniaxial compressive stress. Am. Soc. for Testing and Materials V. 64, 1964.
5. PLOWMAN, J. M., Young's modulus and Poisson's ratio of concrete cured at various humidities. Mag. of Concrete Research V 15 no. 44, juli 1963.
6. HERMITE, R. P., What do we know about the plastic deformation and creep of concrete? RILEM-Bull. no. 1, maart 1959.