

WGS MEDEDELINGEN

ORGAAN VAN DE WERKGROEP GEWAPEND BETON- EN STAALCONSTRUCTIES

T.N.O.

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

JAARGANG 1

NO. 2

JULI 1953

HET EXPERIMENTELE ONDERZOEK VAN CONSTRUCTIES

Volgt men het ontstaan van een constructie van het begin tot het eind, dan kan men o.a. de volgende stadia onderscheiden:

1. het maken van een *schetsontwerp*, waarbij vooral het doel, waaraan de constructie moet beantwoorden, een belangrijke rol speelt,
2. het maken van de *berekeningen*, onderverdeeld in:
 - a. het *schematisch* weergeven van het schetsontwerp, opdat een berekening praktisch mogelijk is,
 - b. het uitvoeren van de eigenlijke *berekening* met behulp van de toegepaste mechanica, de theoretische mechanica en de wiskunde,
 - c. het interpreteren van de door de berekening verkregen resultaten voor de werkelijke constructie, de overgang dus van het schema naar de constructie,
3. het vaststellen van het *definitieve ontwerp*, eventueel aangevuld met contrôle-berekeningen en werktekeningen,
4. het commerciële gedeelte (begrotingen, aanbestedingen, enz.) buiten beschouwing latend, kan als 4e stadium de *bouw van de constructie*, de uitvoering, genoemd worden.

Vanzelfsprekend zal bij alle genoemde stadia de *economie* een belangrijke leiddraad zijn.

Beziet men het bovenstaande door de bril van een wiskundige, althans iemand die zich hoofdzakelijk met de exacte wetenschappen bezig houdt, dan is men al gauw geneigd, het zwaartepunt van het ontstaan van een constructie te leggen bij het exacte gedeelte, nl. de eigenlijke berekening (punt 2b) los

van de schematisering, de aannamen en de interpretatie. Het is bovendien eenvoudiger een weg te bewandelen, die vrij nauwkeurig uitgestippeld is, zoals bij de exacte wetenschappen het geval is. Dit in tegenstelling tot die stadia, die aan de eigenlijke berekening vooraf gaan en die er op volgen en waarbij het persoonlijke inzicht en de „feeling” een grote rol spelen. Daardoor zullen ook vaak de niet-wiskundigen deze weg bewandelen en de nadruk leggen op het zuiver theoretische gedeelte.

De verschillende stadia, die men moet doorlopen om tot de bouw van een constructie te komen, zou men kunnen vergelijken met een gebied, bestaande uit twee bossen met slecht begaanbare wegen, verbonden door een stukje auto-snelweg. Bij het doorkruisen van het eerste bos passeert men de stadia 1 en 2a, de auto-snelweg is te vergelijken met stadium 2b, terwijl het laatste bos voornamelijk stadium 2c en 4 weergeeft.

Het zou fout zijn, stadium 2b los van de voor- en nageschiedenis te bekijken. Een berekening volgens de methode Cross tot in 4 decimalen heeft weinig zin, als men bepaalde factoren, zoals de invloed van de zakkingen van het gebouw, verwaarloost. Een verbetering van de auto-snelweg is doelloos, zolang men deze weg nog niet met een auto bereiken kan.

Werpt men een blik in de toekomst, dan kan de taak, die we ons moeten opleggen, naar aanleiding van genoemde beeldspraak, gemakkelijk gedefinieerd worden. Onze taak moet zijn door de bossen een beter begaanbare en afgebakende weg aan te leggen.

En hier verschijnen het *experiment*, tezamen met de *theorie* en de *praktijk*, op het toneel. De theoreticus, de experimentator en de practicus zullen gezamenlijk moeten trachten de vele onzekere punten, die aan het ontstaan van een constructie voorafgaan, tot klaarheid te brengen.

De bedoeling is in de W.G.S. mededelingen het experimentele onderzoek in een serie artikelen te bespreken.

Alvorens echter hiertoe over te gaan is het goed, eerst de algemene lijn van het experimentele onderzoek nader te bezien.

1. Als eerste stadium geldt het vaststellen van de *methode van het onderzoek*, waarbij uit de aard der zaak het doel van het onderzoek van overwegend belang is. Bij *het gerichte speurwerk*, vanzelfsprekend gericht op de praktijk, is het primaire doel het onderzoek van de *betrouwbaarheid* en de *economie* van de constructies, waarbij onder „betrouwbaar” wordt verstaan:
 - a. voldoende veiligheid ten opzichte van breuk, dus een voldoende grote veiligheidscoëfficiënt en een duidelijke waarschuwing van de breuk (vgl. plotselinge breuk, zoals knik e.d.)
 - b. niet te grote scheurvorming bij gewapend betonconstructies bij de toelaatbare belasting,
 - c. niet te grote blijvende vormveranderingen.Bij *het fundamentele speurwerk* is het primaire doel, de *oorzaak* van de ge-

constateerde verschijnselen op te sporen. Het uiteindelijke doel is natuurlijk weer een betrouwbare en economische constructie.

Meestal zijn het gerichte en het fundamentele spuurwerk bij het experiment niet duidelijk gescheiden. Men zal immers altijd trachten bij de voor het gerichte spuurwerk uitgevoerde „routine-proeven” de oorzaak van de verschijnselen te bepalen, opdat men voor de toekomst hieruit lering kan trekken.

Als verschillende wijzen van beproeving kunnen genoemd worden: het laboratoriumonderzoek, (zoals bv. het modelonderzoek, het foto-elastisch onderzoek) en de meting op de bouwplaats.

2. In het tweede stadium wordt het *experiment* uitgevoerd. Vooral bij beton levert dit nogal moeilijkheden, want zoals bekend, wordt het gedrag van beton bepaald door een zeer groot aantal factoren.

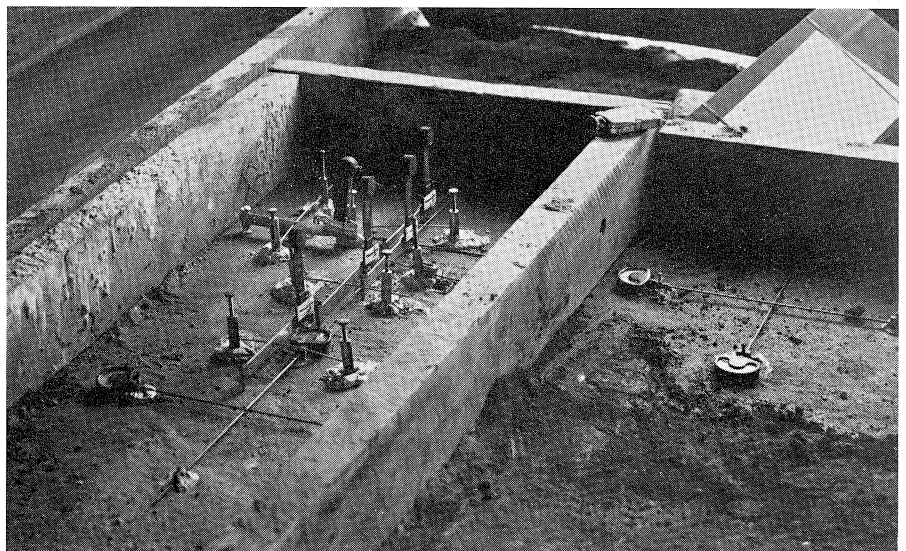
Om de proef mogelijk te maken, moet dus in de eerste plaats het probleem *geschematiseerd* worden (2a), men moet een keuze maken uit het grote aantal factoren. Kennis van de statistiek is vereist, maar voorlopig zal de intuïtie, de „feeling” van de onderzoeker wel maatgevend zijn voor de keuze van de factoren.

Vervolgens krijgt men de eigenlijke meting, waarbij de *meettechniek* de hoofdrol speelt (2b).

En tenslotte moeten de meetresultaten verwerkt en omgevormd worden tot de meest *waarschijnlijke waarden* (2c). Hierbij is natuurlijk de waarnemingsrekening een hulpmiddel, maar toch is, vooral bij een klein aantal waarnemingen, een persoonlijk inzicht van zeer groot belang.

3. Als derde stadium kan genoemd worden de *interpretatie* van de metingen. Dit levert over het algemeen de grootste moeilijkheden; moeilijkheden, die enerzijds veroorzaakt worden door gebrek aan kennis omtrent het gedrag van het materiaal (vooral bij beton is dit van grote invloed), anderzijds door de opbouw van de Nederlandse voorschriften, waarin de betrouwbaarheid van de constructie niet rechtstreeks, maar via rekenkundige grootheden, zoals de toelaatbare spanningen enz. geformuleerd wordt.

fig. 1. Rekmeting met Huggenbergerrek-meters en meethorloges op een betonnen plaatbrug.



Zoals bij het ontwerp van een constructie alleen stadium 2b (de eigenlijke berekening) eenvoudig in formules en wetten is vast te leggen, zo is ook bij het experiment, hoewel in mindere mate, stadium 2b (de meettechniek), nauwkeuriger te formuleren. De voor- en nageschiedenis bij het experimentele onderzoek is echter moeilijker te omschrijven en wordt hoofdzakelijk bepaald door het persoonlijke inzicht en de ervaring van de onderzoeker.

Toch moet men steeds het gehele beeld voor ogen houden, om fouten, zoals bijv. een zeer nauwkeurige meting bij een vrij vage interpretatie, te vermijden.

Evenals bij het onderwijs in de beginne de nadruk gelegd wordt op die leerstof, die duidelijk te formuleren is (b.v. de toegepaste mechanica en de wiskunde op de Technische Hogeschool) zal in deze artikelenserie ook begonnen worden met dat gedeelte, dat eenvoudig te beschrijven en te begrijpen is, nl. de meettechniek en de meetinstrumenten. Hierna zal getracht worden de lezer een indruk te geven van de moeilijkheden, die verbonden zijn aan de voor- en nageschiedenis van de eigenlijke meting.

Bij metingen, zowel aan constructies als aan modellen wordt zeer vaak mechanische apparatuur gebruikt. De belangrijkste mechanische meetinstrumenten, die toegepast worden bij het meten van vormveranderingen en die in dit artikel in het kort zullen worden beschreven, kunnen verdeeld worden in twee groepen, gekenmerkt door de wijze waarop de zeer kleine vormveranderingen worden vergroot. Tot de eerste groep behoren de meetinstrumenten, waarbij de vergroting bewerkstelligd wordt door tandwieloverdracht, bij de tweede groep vindt deze vergroting plaats door middel van hefboomstelsels.

Instrumenten met vergroting door tandwieloverdracht

Het belangrijkste instrument van deze groep is het meethorloge waarvan de meest gebruikte typen in fig. 2 en 3 zijn afgebeeld.

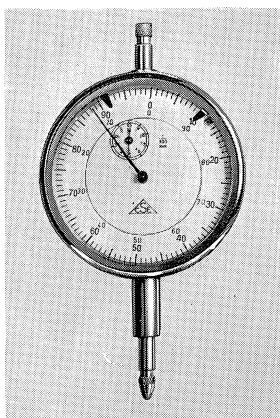


Fig. 2
meetbereik 1 cm
nauwkeurigheid
0,01 mm

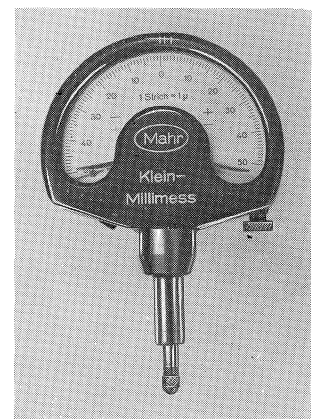


Fig. 3
meetbereik 0,1 mm
nauwkeurigheid
0,001 mm

De meethorloges vinden o.a. toepassing in:

- a. de doorbuigingsmeter
- b. de krommingsmeter
- c. de wringingsmeter
- d. de rekmeter

a. *Doorbuigingsmeter*

In het algemeen is het, in verband met de grootte van de doorbuigingen, noodzakelijk meethorloges met een meetbereik van 1 cm toe te passen. Deze meethorloges, die dus een nauwkeurigheid van 0,01 mm bezitten, worden dan veelal met een klem aan een „vast punt” bevestigd, terwijl de beweegbare stift tegen de doorbuigende constructie drukt (fig. 4).

Vaak wordt echter ook het meethorloge aan de doorbuigende constructie bevestigd, terwijl de stift tegen het „vaste punt” drukt.

In fig. 5 is een opstelling afgebeeld, die gebruikt wordt bij het meten van doorbuigingen van vloeren en daken, in het bijzonder schaaldaken. Hierbij wordt aan de constructie een staaf bevestigd, die bijna tot de onderliggende vloer of de begane grond reikt. De zakkings van het benedeneind van deze staaf wordt dan gemeten, waardoor het aflezen van de meethorloges, vooral bij een groot aantal, zeer wordt vereenvoudigd.

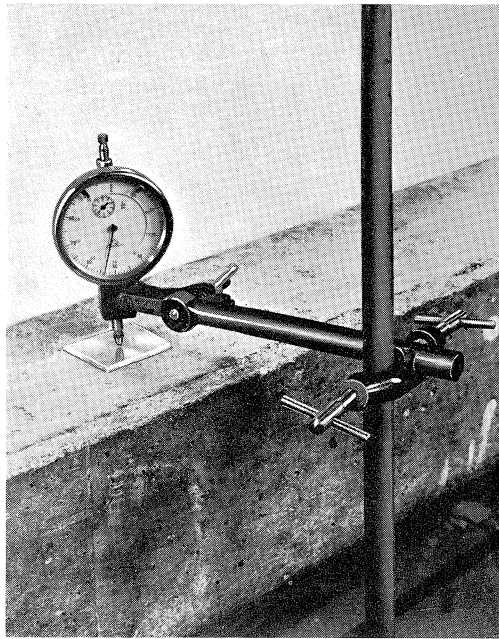


Fig. 4. Doorbuigingsmeting aan een balk.

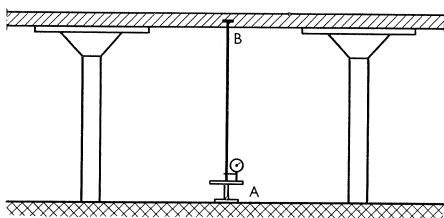
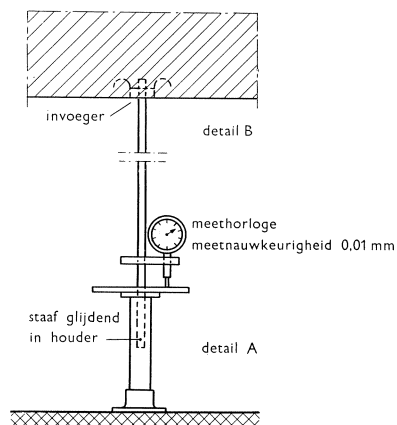


Fig. 5. Doorbuigingsmeting aan een vloer.



b. *Krommingsmeter*

Wanneer men op vele plaatsen de doorbuigingen heeft gemeten is het bv. met behulp van differentierekening mogelijk de krommingen en dus de momenten te bepalen.

Zijn bv. in drie op gelijke afstand Δx gelegen punten de doorbuigingen w_0, w_1 en w_2 gemeten (zie fig. 6), dan geldt bij benadering voor de helling van de elastische lijn in punt D :

$$\left[\frac{dw}{dx} \right]_D \approx \frac{w_0 - w_1}{\Delta x}. \text{ In punt } E \text{ is de helling}$$

$$\left[\frac{dw}{dx} \right]_E \approx \frac{w_2 - w_0}{\Delta x}. \text{ De kromming in } B \text{ bedraagt:}$$

$$\left[\frac{d^2w}{dx^2} \right]_B \approx \frac{\left[\frac{dw}{dx} \right]_E - \left[\frac{dw}{dx} \right]_D}{\Delta x} \approx \frac{w_1 - 2w_0 + w_2}{\Delta x^2}.$$

De nauwkeurigheid waarmee op deze wijze de kromming kan worden bepaald, is afhankelijk van twee factoren t.w. de grootte van de differentie Δx en de nauwkeurigheid, waarmee de doorbuigingen worden gemeten. Wat de grootte van de differentie betreft kan in het algemeen gezegd worden, dat de differentierekening de kromming nauwkeuriger weergeeft naarmate de differentie Δx kleiner wordt. Het kleiner worden van de differentie heeft echter tot gevolg dat ook de verschillen tussen w_0, w_1 en w_2 kleiner worden. Hieruit blijkt dus dat, wil men de krommingen met voldoende nauwkeurigheid bepalen, de differentie klein dient te zijn, terwijl de doorbuigingen zo nauwkeurig mogelijk gemeten moeten worden. Zoals bij de doorbuigingsmeter reeds is gezegd, is het in de meeste gevallen nood-

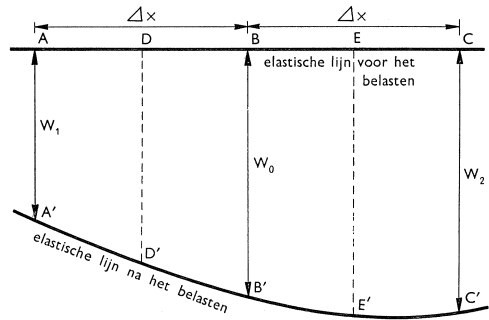


Fig. 6. Bepaling van de kromming van de elastische lijn m.b.v. differentierekening.

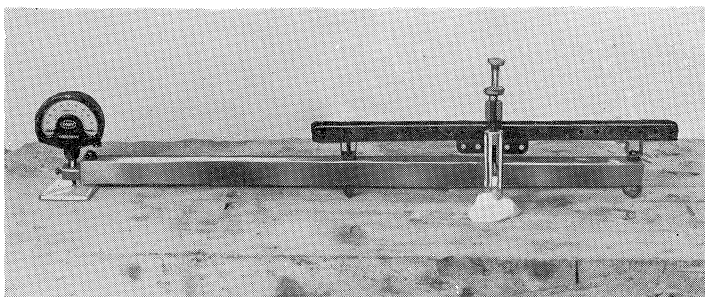


Fig. 7. Krommingsmeter.

zakelijk meethorloges toe te passen, die een nauwkeurigheid van 0,01 mm bezitten. Bij de veelal toegepaste differenties van 10 à 25 cm, is deze nauwkeurigheid onvoldoende voor het bepalen van de krommingen. Daar het bepalen van de krommingen uit de doorbuigingen dus bezwaren oplevert, is een meetinstrument ontworpen, waarmede rechtstreeks een maat voor de kromming verkregen kan worden. Dit instrument, de z.g. krommingsmeter is afgebeeld in fig. 7.

Zoals uit de foto blijkt, wordt de krommingsmeter opgelegd op twee vaste punten, nl. één mes- en één roloplegging. Aan een uiteinde bevindt zich een meethorloge met een nauwkeurigheid van 0,001 mm (= 1 μ). Wordt de constructie gebogen, dan is de aflezing van het meethorloge gelijk aan $2w_0 - w_1 - w_2$, zoals uit fig. 8 blijkt.

De kromming is in het punt B dus gelijk aan:

$$\left[\frac{d^2w}{dx^2} \right]_B \approx \frac{\text{aflezing meethorloge}}{\Delta x^2}$$

Bij een balk wordt het verband tussen het buigend moment M en de kromming gegeven door de formule $M = -EI \frac{d^2w}{dx^2}$, waarin E de elasticiteitsmodulus en I het traagheidsmoment van de balk voorstelt.

Bij een plaat bepaalt men het buigend moment in een richting x uit de krommingen in de twee onderling loodrechte richtingen x en y met behulp van de formule

$$M_x = -N \left[\frac{\delta^2 w}{\delta x^2} + \nu \frac{\delta^2 w}{\delta y^2} \right].$$

Fig. 9. Instrument voor het bepalen van de krommingen in 2 onderling loodrechte richtingen.

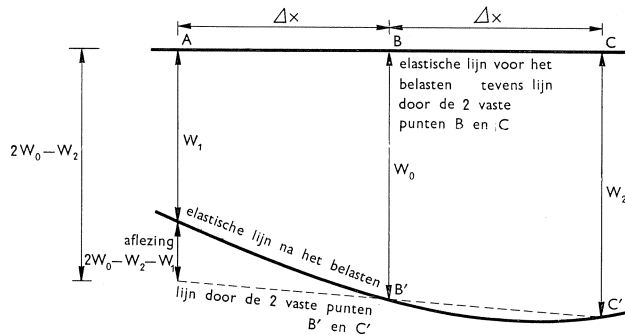


Fig. 8. Principe van de krommingsmeter.

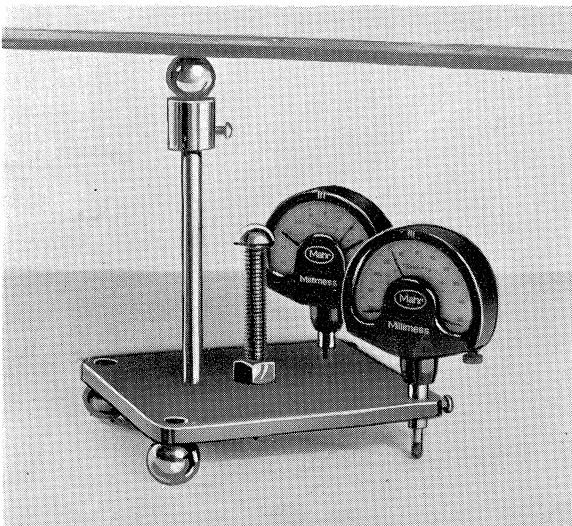
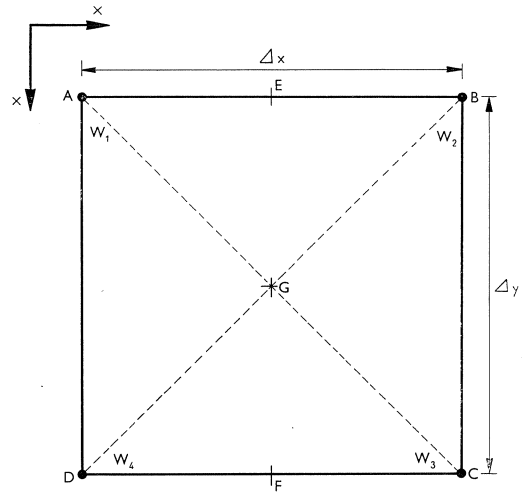


Fig. 10. Bepaling van de wringing uit de doorbuigingen van de punten A, B, C en D.



Hierin stelt $N = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$ de plaatstijfheid en ν de dwarscontractie-coëfficiënt voor, als de dikte van de plaat h bedraagt. Het meten van de krommingen in twee onderling loodrechte richtingen kan rechtstreeks geschieden met het instrument dat afgebeeld is in fig. 9.

c. *Wringingsmeter*

Op overeenkomstige wijze als bij de krommingen is beschreven, is het mogelijk de wringing in een punt van een plaat uit te drukken in de doorbuigingen van vier punten. De uitdrukking voor de wringing in een punt

van een plaat luidt $\frac{\delta^2 w}{\delta x \delta y}$. Zijn bv. in de vier punten A, B, C en D achter-

eenvolgens de doorbuigingen w_1 t/m w_4 gemeten (zie fig. 10) dan geldt weer bij benadering voor de helling in de x -richting in punt E:

$$\left[\frac{\delta w}{\delta x} \right]_E \approx \frac{w_2 - w_1}{\Delta x}. \text{ Voor het punt F is de helling in de } x\text{-richting:}$$

$$\left[\frac{\delta w}{\delta x} \right]_F \approx \frac{w_3 - w_4}{\Delta x}. \text{ De wringing in G is dan:}$$

$$\left[\frac{\delta^2 w}{\delta x \delta y} \right]_G \approx \frac{\left[\frac{\delta w}{\delta x} \right]_F - \left[\frac{\delta w}{\delta x} \right]_E}{\Delta y} \approx \frac{w_3 - w_4 - w_2 + w_1}{\Delta x \Delta y} = \frac{w_1 + w_3 - w_2 - w_4}{\Delta x \Delta y}$$

Het rechtstreeks bepalen van de wringing uit gemeten doorbuigingen stuit echter op dezelfde moeilijkheden als het bepalen van de krommingen uit de doorbuigingen. Daarom is een meetinstrument, de z.g. wringingsmeter (zie fig. 11) ontworpen, waarbij deze bezwaren niet aanwezig zijn.

In drie van de vier hoekpunten bevinden zich vaste punten, terwijl in het vierde hoekpunt een meethorloge met een meetnauwkeurigheid van 1μ is aangebracht. Uit fig. 12 waarin de vaste punten van de wringingsmeter in de punten A, B en C zijn gedacht, volgt voor de aflezing van het zich in D bevindende meethorloge: afl. = $w_1 + w_3 - w_2 - w_4$

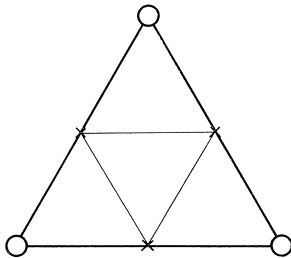
van het meetinstrument benaderd door een tweedegraads paraboloid, waarvan de formule luidt: $w = Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F$.

De vervanging van het werkelijke doorbuigingsvlak door een tweedegraads paraboloid is gerechtvaardigd, omdat bij deze benadering dezelfde fout wordt gemaakt als bij de overgang van differentiaaluitdrukkingen naar differentievormen, zoals bij krommings- en wringingsmeter is beschreven.

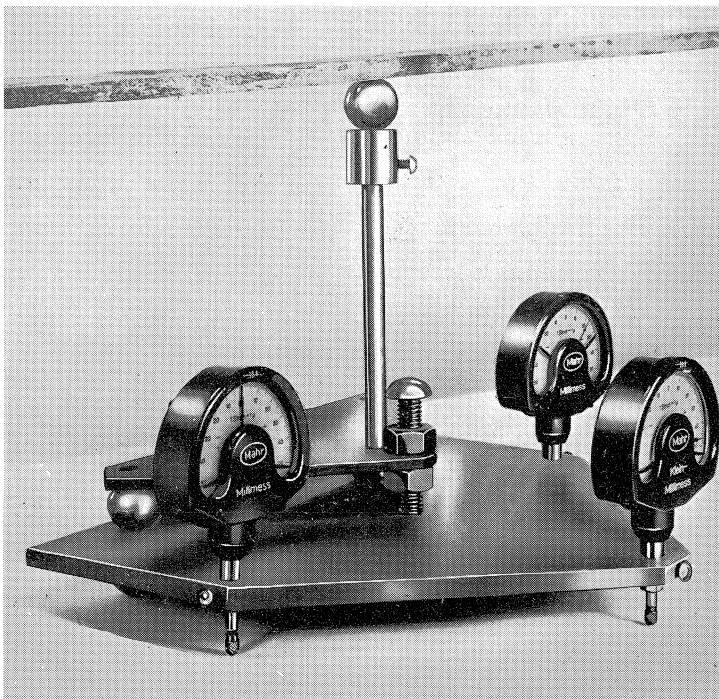
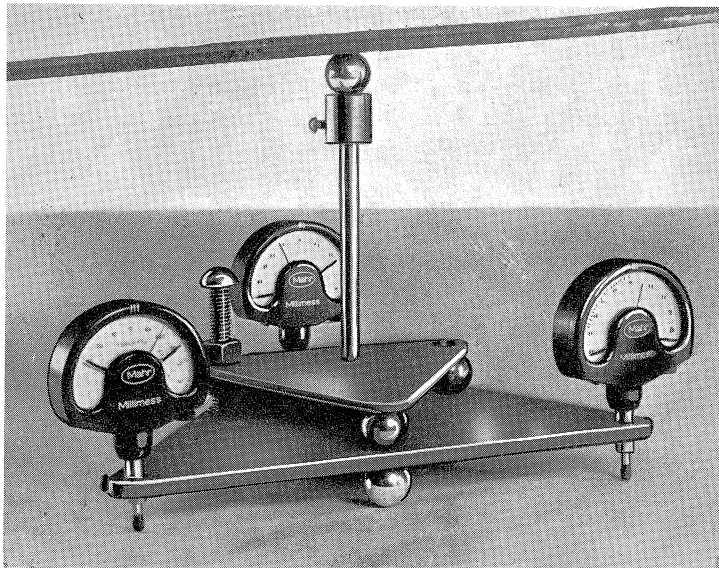
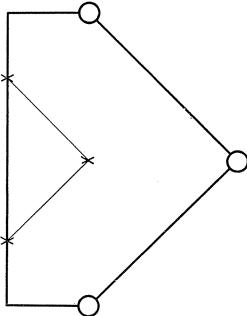
Als w de doorbuiging voorstelt t.o.v. het door de drie vaste punten aangebrachte platte vlak, dan kunnen uit de voorwaarden, dat w ter plaatse van de vaste punten gelijk nul is en uit de aflezings van de 3 meethorloges de zes constanten A t/m F worden bepaald. Door dubbele differentiatie van bovengenoemde formule kunnen de krommingen en wringingen in de aflezings der meethorloges worden uitgedrukt.

Fig. 13. Universele krommingsmeters.

Schema fig. 13a



Schema fig 13b



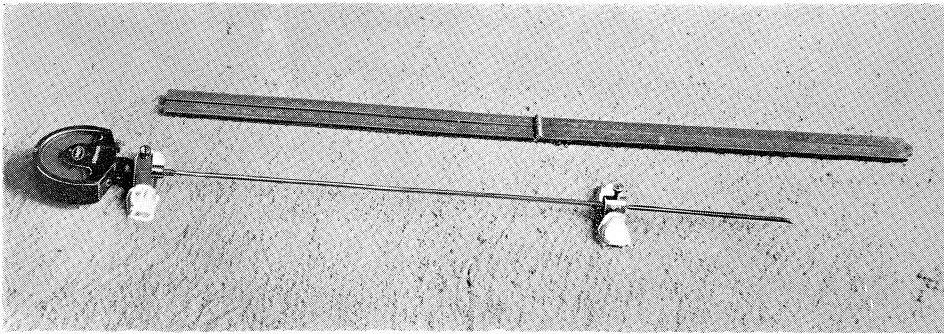


Fig. 14. Rekmeter op beton.

d. *Rekmeter*

Met behulp van rekmeters worden de tengevolge van een belasting ontstane afstandsveranderingen tussen punten van een constructie-element gemeten. Ook met behulp van meethorloges is het mogelijk zeer bruikbare rekmeters te construeren, die bij uitstek geschikt zijn voor het verrichten van metingen aan beton en wapeningsstaal.

Bij metingen aan beton worden twee metalen, doorboorde blokjes m. b. v. gips op de te onderzoeken constructie bevestigd. In het ene blokje wordt het meethorloge geklemd, terwijl de beweegbare stift van het meethorloge door middel van een staafje met het andere blokje verbonden wordt (zie fig. 14). Wordt voor de afstand l van de blokjes (de meetlengte) 30 cm gekozen, en verloopt de wijzer van het meethorloge één deelstreep (0,001 mm), dan is de specifieke lengteverandering ε gelijk aan $\frac{10^{-4}}{30}$. Is de elasticiteitsmodulus van het beton bv. $E = 3 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$, dan komt één deelstreep van het meethorloge overeen met een spanning

$$\sigma = E \varepsilon = \frac{10^{-4}}{30} \cdot 3 \cdot 10^5 = 1 \text{ kg/cm}^2.$$

Er zijn aan deze rekmeter echter twee bezwaren verbonden. In de eerste plaats is door het vastgipsen de meetlengte niet nauwkeurig bepaald, zodat bij een kleine meetlengte relatief grote fouten mogelijk zijn. Deze fout is echter verwaarloosbaar klein als een meetlengte van ca. 30 cm wordt toegepast, welke meetlengte bij betonconstructies in verband met het vereffenen van de invloeden van inhomogeniteiten meestal toch noodzakelijk is. Anderzijds mag de meetlengte ook niet te groot zijn omdat anders te grote spanningsvariëaties over deze afstand kunnen voorkomen. In de tweede plaats wordt bij een op buiging belaste constructie, in tegenstelling tot een constructie die alleen een normaalkracht overbrengt, door het meethorloge niet de lengteverandering van de uiterste vezel weergegeven, aangezien de blokjes stijf aan de constructie zijn verbonden en het meethorloge zich circa één cm buiten het betonoppervlak bevindt.

Een meetinstrument, zoals aangegeven in fig. 15 heeft beide bezwaren niet, maar de constructie van dit instrument is veel ingewikkelder, waardoor weer andere foutenbronnen kunnen ontstaan.

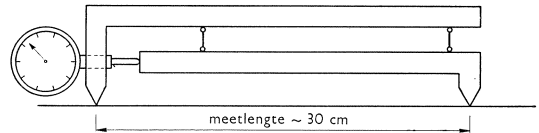


Fig. 15. Rekmeter.

Het principe van het meetinstrument, dat gebruikt wordt voor het bepalen van lengteveranderingen van wapeningsstaal (zie fig. 16) is geheel gelijk aan dat van de boven beschreven rekmeter. Bij dit soort metingen worden, als men alleen de normaalspanning wil weten, twee meetinstrumenten diametraal tegenover elkaar geplaatst, teneinde de invloed van de buiging te elimineren. Wenst men ook gegevens over de buigspanning, dan past men het instrument in 2 onderling loodrechte richtingen toe. Is de meetlengte 40 cm en bedraagt het gemiddelde van de aflezingen van de meethorloges 1 μ , dan is bij een elasticiteitsmodulus van $2 \cdot 10^6$ kg/cm² de

$$\text{spanning } \frac{10^{-4}}{40} \cdot 2 \cdot 10^6 = 5 \text{ kg/cm}^2.$$

Instrumenten met vergroting door hefboomstelsels

Van deze groep is de voornaamste vertegenwoordiger de Huggenberger-rekmeter. De constructie van deze rekmeter, die het eerst door de Nederlander Ir. D. Okhuizen werd toegepast, is schetsmatig weergegeven in fig. 17. Bij deze meetinstrumenten bedraagt de meetlengte, d.i. de afstand tussen het vaste punt *A* en het beweegbare punt *B* twee cm. Het punt *B* vormt het ene uiteinde van een hefboom *C*, welke in *D* scharnierend is bevestigd. Aan het andere uiteinde is een balans *E* aangebracht, waardoor de verplaatsing van dit uiteinde overgebracht wordt naar de wijzer *F*, welke eveneens als hefboomconstructie is uitgevoerd. Op deze wijze wordt een vergroting verkregen van 1000 à 1200,

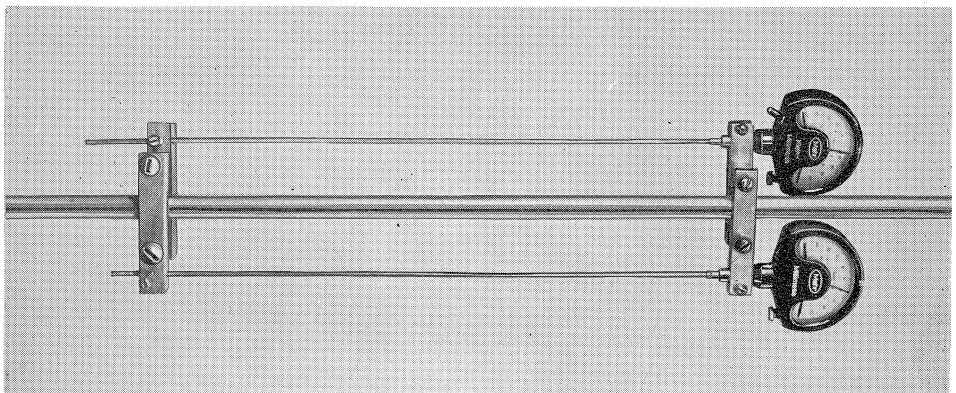


Fig. 16. Rekmeting aan stalen staaf.

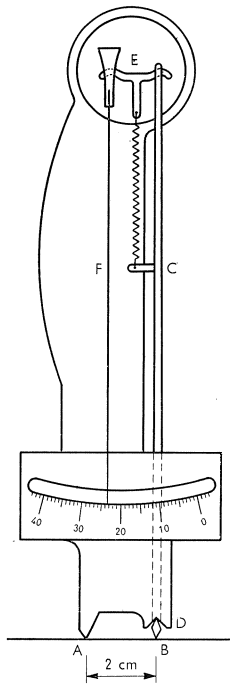


Fig. 17. Huggenberger rekmeter

worden verkregen. Zelfs bij metingen aan in aanbouw zijnde constructies, waarbij de omstandigheden waaronder de metingen plaats vonden, dikwijls zeer ongunstig waren, werden zeer goede resultaten verkregen. Door de eenvoud van de instrumenten zijn eventuele foutenbronnen gemakkelijk op te sporen en te verhelpen. Bovendien zijn de instrumenten zeer gemakkelijk en snel aan te brengen.

Een minder aangename eigenschap is, dat van de mechanische meetinstrumenten vooral de rekmeter temperatuurgevoelig is. Deze temperatuursinvloed kan echter geëlimineerd worden door het toepassen van rekmeters op een onbelast constructie-element, dat zoveel mogelijk onder dezelfde omstandigheden verkeert (z.g. dummies). Tenslotte zij opgemerkt dat de mechanische instrumenten niet geschikt zijn voor metingen aan dynamisch belaste constructies. Vooral de Huggenberger-rekmeter wordt door trillingen gemakkelijk ontregeld.

welke waarde door ijking bepaald moet worden. De schaalverdeling, welke bij de nieuwe typen uitgevoerd is met spiegelaflezing, is voorzien van 40 à 50 deelstrepen op onderlinge afstand van 1 mm. Bij een vergrotingsfactor van 1000, komt dus één deelstreep overeen met een lengteverandering van de meetlengte van 1μ . De meetlengte kan met behulp van speciaal daarvoor vervaardigde hulpstukken gevarieerd worden van 1 tot 100 cm, hetgeen het instrument zowel voor metingen op beton als op staal geschikt maakt. Verder behoort bij de rekmeter een groot aantal hulpstukken voor bevestiging van het instrument aan de te onderzoeken constructie. Speciale aandacht moet worden besteed aan het opspannen, en het elimineren van de loze gang.

Enkele toepassingsmogelijkheden zijn aangegeven in de figuren 1 en 18.

Uit de ervaring is gebleken, dat als de mechanische meetinstrumenten deskundig en met zorg behandeld worden, in het algemeen zeer betrouwbare meetresultaten

Fig. 18. Huggenbergerrekmeter op stalen staaf.

