

Een opnemer voor het meten van lokale trekkrachten

Citation for published version (APA):

Peters, G. W. M., & Sauren, A. A. H. J. (1988). Een opnemer voor het meten van lokale trekkrachten. *De constructeur*, 27(1), 36-39.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1988

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Een opnemer voor het meten van lokale trekkrachten

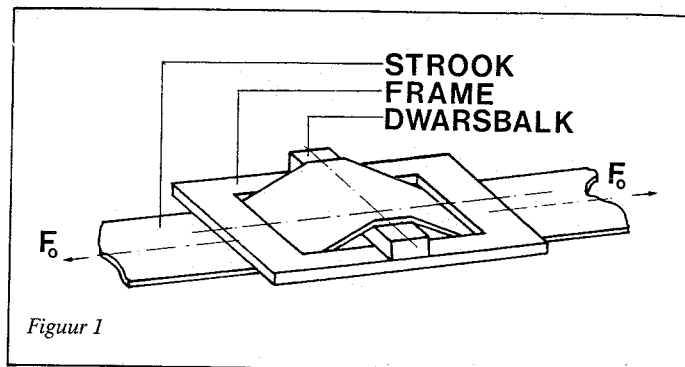
Bij biomechanisch onderzoek is men vaak geïnteresseerd in lokale trekkrachten in kabel- of membraanachtige biologische structuren. De gangbare meetmethoden, waarbij gebruik wordt gemaakt van op het meetobject geplakte rekstrookjes of een in het meetobject bevestigde, in serie geschakelde, conventionele krachtopnemer falen hier om meerdere redenen. Bij de rekstrook-meetmethode dienen een materiaalmodel en de bijbehorende materiaalparameters van het meetobject bekend te zijn teneinde het meetsignaal te vertalen in een kracht. Deze eigenschappen zijn bij biologische weefsels veelal niet of onvoldoende bekend. Bovendien worden de eigenschappen van het weefsel door de noodzakelijke lijmvorming op ingrijpende wijze beïnvloed. Bij het aanbrengen van een conventionele krachtopnemer in serie is een ontoelaatbare beschadiging van de structuur van het weefsel onvermijdelijk.

Toepassing van een zogenaamde gesp (Eng.: buckle transducer) biedt de mogelijkheid om lokale trekkrachten te meten in een structuur zonder dat kennis van de belasting-ervormingskarakteristieken van de bewuste structuur vereist is en zonder dat ontoelaatbare beschadigingen worden aangebracht. Een beperking van deze opnemer is dat hij alleen toepasbaar is in situaties waarin een structuur voornamelijk in één richting wordt belast.

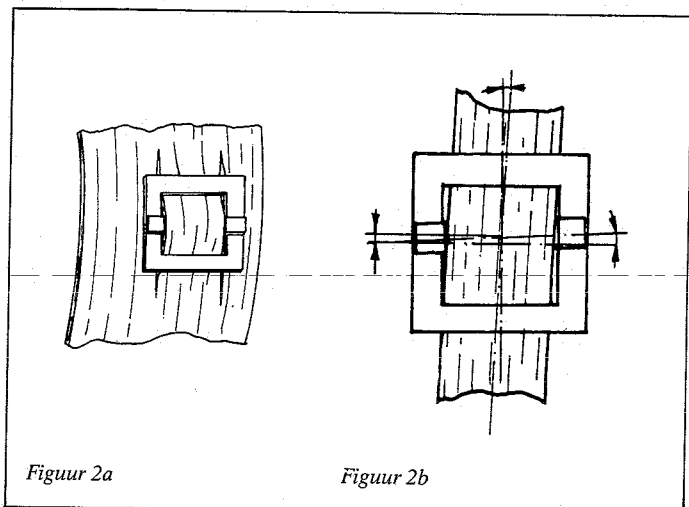
De gesp bestaat in essentie uit twee losse onderdelen: een frame en een dwarsbalk. De materiaalkeuze en de dimensionering van de delen is zodanig dat de buigstijfheid van de dwarsbalk aanzienlijk hoger is dan die van het frame. In figuur 1 is de situatie geschetst waarin met een gesp volgens het conventionele ontwerp de trekkracht gemeten wordt in een strook van een membraanachtige structuur. Uitoefening van een trekkracht (F_0) op de strook zal vervorming (doorbuiging) van het frame tot gevolg hebben. Deze vervorming wordt gemeten middels op het frame bevestigde rekstrookjes. De relatie tussen de op het frame uitgeoefende belasting en de daaruit resulterende vervorming van het frame hoeft slechts eenmaal in een ijkmeting bepaald te worden. Op deze wijze is het mogelijk om de trekkracht in de strook te bepalen zonder – zoals dat bij een conventionele rekstrookmeting wel noodzakelijk is – het verband tussen belasting op en vervorming van de strook te kennen.

Verbeterde versie van de gesp

Behalve de relatief grote afmetingen van de in de literatuur beschreven gespen bleek uit een aantal oriënterende experimenten dat aan deze ontwerpen een drietal andere nadelen kleven. Deze hebben een onbevredigende meetnauwkeurigheid en reproduceerbaarheid tot gevolg. Omdat het frame aanzienlijk breder is dan de doorgeleide strook (figuur 2a) zal de vervorming van het frame niet alleen bepaald worden door interactie tussen het frame en deze strook maar ook door een – onbekende – interactie tussen het frame en het aan de strook grenzende materiaal. Verder bleek de uitlijning van frame, dwarsbalk en strook vaak aanzienlijk af te wijken van de gewenste configuratie omdat hun onderlinge posities niet eenduidig vastliggen (figuur 2b). Als derde nadeel kwam naar



Figuur 1



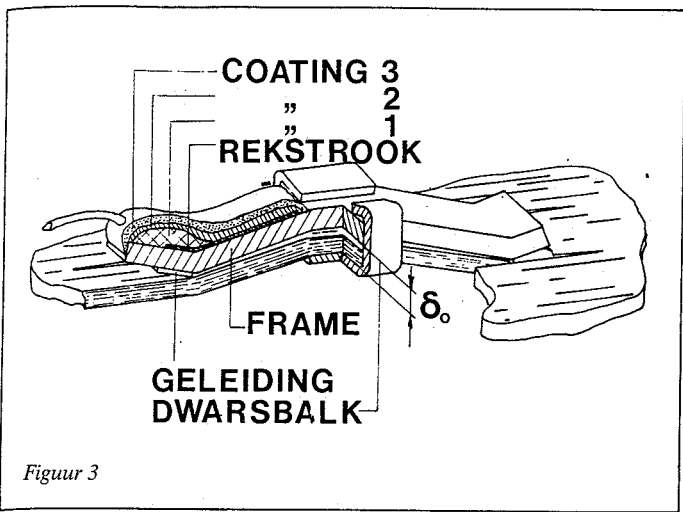
Figuur 2a

Figuur 2b

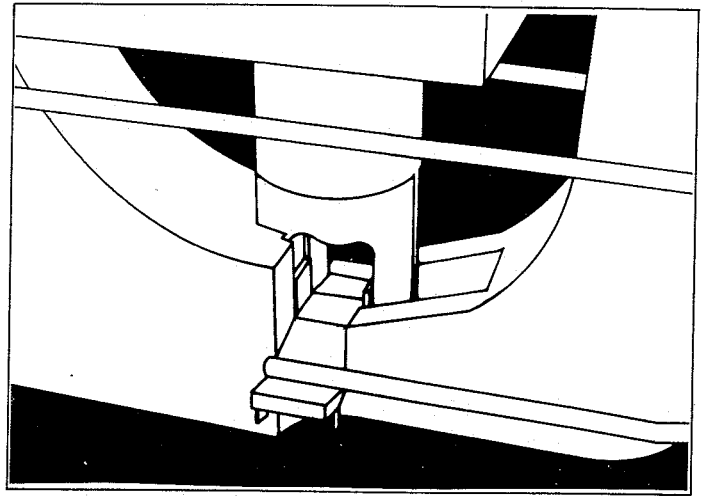
voren dat de karakteristieken van de opnemers aanzienlijke hysteresiseffecten vertoonden. Op basis van deze bevindingen en met behulp van een relatief eenvoudig mechanisch model werd een verbeterde versie van een gesp ontwikkeld.

Deze verbeterde versie is geschetst in figuur 3 (hoofdafmetingen: $b \times h \times l = 0,75 \times 1,5 \times 5$ mm). De breedte van het frame is gelijk aan de breedte van de doorgeleide strook zodat interactie met het omringende materiaal tot een minimum is beperkt. Vier geleidingen (dikte 0,05 mm) zorgen voor een goede positionering van het frame ten opzichte van de strook.

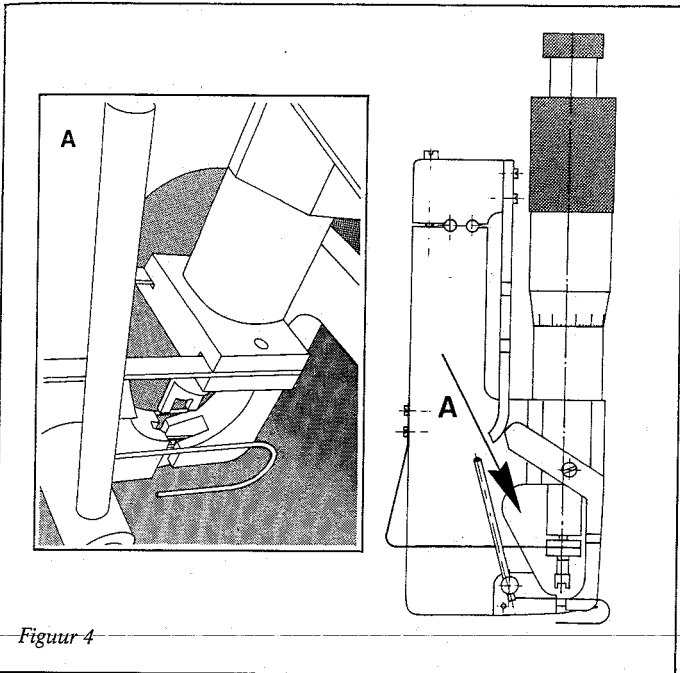
De ondergrens voor de afmetingen van het frame wordt opgelegd door de afmetingen van het gebruikte rekstrookje (Micro Measurements SA-09-030 CG-120) waarvan de drager tot de kleinst mogelijke afmetingen is teruggebracht (1,4 x 2,1 mm). Het rekstrookje wordt met speciaal hulpgereedschap op het gekromde oppervlak van het frame gelijmd. Voor de elektrische isolatie van het rekstrookje is een drievoudige coating toegepast (Ceta Bever twee-componenten epoxylijm en Micro Measurement M-Coat D en M-Coat G). Het frame en de geleidingen zijn vervaardigd uit roestvast staal terwijl voor de dwarsbalk molybdeen werd gebruikt.



Figuur 3



Figuur 5

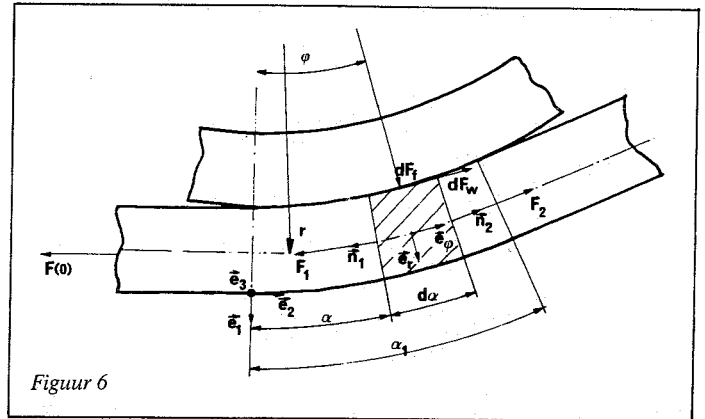


Figuur 4

Door de hoge E-modulus van molybdeen heeft de dwarsbalk, ondanks zijn kleine dwarsdoorsnede, toch een hoge stijfheid. Met de opnemer kunnen krachten tot 10 N gemeten worden. Bij montage van de opnemer worden de uiteinden van de (eenmalig bruikbare) U-vormige dwarsbalk over het frame gebogen met behulp van een speciaal ontworpen montagetang (figuur 4). In figuur 5 is de situatie weergegeven waarin het frame en de dwarsbalk zich in de montagetang bevinden. Door middel van de schroefspindel van een micrometer wordt de buigstempel naar beneden bewogen zodat de uiteinden van de dwarsbalk over het frame worden gebogen. De micrometer wordt ook gebruikt voor het instellen van de afstand δ_0 (figuur 3). Het belang van deze instelmogelijkheid zal in het volgende duidelijk worden.

Een mechanisch model van de gesp

Om een verband af te leiden tussen een trekkracht F_0 werkend op de materiaalstrook en de hierdoor veroorzaakte rek in het frame van de opnemer, beschouwen we het quasi-statisch evenwicht van een infinitesimaal stukje van de strook dat in contact is met het frame (figuur 6). Wanneer de strook belast wordt zal zij over het frame glijden. Om wrijvings-effecten tussen strook en frame in rekening te brengen wordt uitgegaan van het Coulombse wrijvingsmodel. Uit de eis van krachterevenwicht voor het infinitesimale stukje van de strook volgt dat moet gelden:



Figuur 6

$$\vec{F}(\alpha) + \vec{F}(\alpha + d\alpha) + d\vec{F}_w + d\vec{F}_n = \vec{0} \quad (1)$$

Met de veronderstelling dat er volledige slip optreedt volgt via integratie van $d\vec{F}_w + d\vec{F}_n$ voor de kracht \vec{F}_f die door de strook op het frame wordt uitgeoefend ($F(0) = F_0$):

$$\vec{F}_f = -F(0) [\exp(\mp\mu\alpha_1) \sin(\alpha_1) \vec{e}_1 + (\exp(\mp\mu\alpha_1) \cos(\alpha_1) + 1) \vec{e}_2] \quad (2)$$

waarin μ de wrijvingscoëfficiënt is en de plus- en mintekens voor de machten van de exponentiële functies gelden voor toenemende, respectievelijk afnemende kracht $F(0)$. De eenheidsvectoren \vec{e}_1 , \vec{e}_2 en \vec{e}_3 vormen een rechtsdraaiende, orthonormale vectorbasis. Vanwege de symmetrie van de opnemer kan volstaan worden met schematisering van een helft als een buigbalk (figuur 7). Onder verwaarlozing van afschuiving kan worden afgeleid dat voor de grootste hoofdrek in een dwarsdoorsnede ter plaatse \vec{x} geldt:

$$\epsilon_x = -F(0)/(AE) \{ [(6x/h) \sin(\alpha_1 - \beta) + \cos(\alpha_1 - \beta)] \exp(\mp\mu\alpha_1) + (6x/h) \sin(\beta_0) - \cos(\beta) \} \quad (3)$$

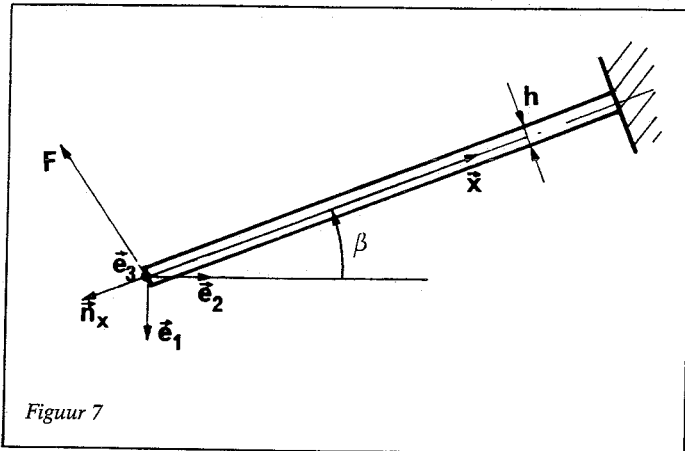
met E en A respectievelijk de E-modulus en het oppervlak van de dwarsdoorsnede. De hoek α_1 in vergelijking (3) is niet constant maar een functie van de kracht $F(0)$ en de momentane dikte d van de strook. Dit houdt in dat de relatie tussen de belasting en de rek niet-lineair is.

Voor de hoek α_1 geldt (figuur 8):

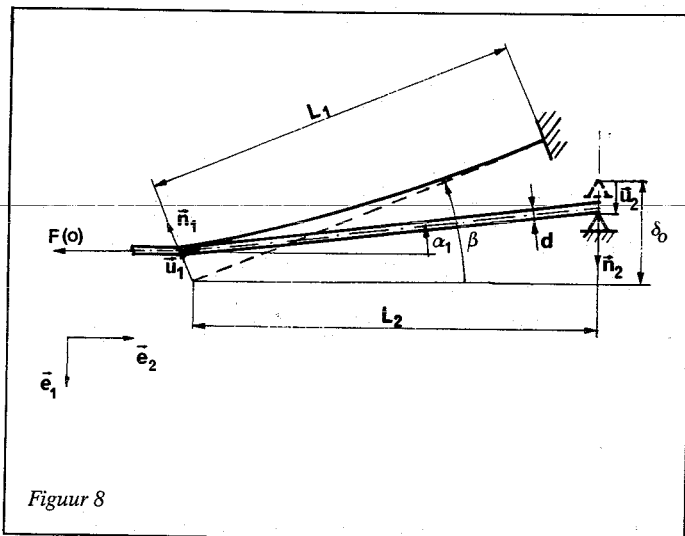
$$\tan(\alpha_1) = [\delta_0 + d - u_1 \cos(\beta) - u_2] / [L_2 + u_1 \sin(\beta)] \quad (4)$$

Aangetoond kan worden dat, voor deze configuratie van de gesp, de uitwijkingen u_1 en u_2 in uitdrukking (4) te verwaarlozen zijn. De dikte van de belaste materiaalstrook is in het algemeen een

Een opnemer voor het meten van lokale trekkrachten



Figuur 7



Figuur 8

functie van de kracht $F(0)$ welke functie voor elke materiaalsoort apart gespecificeerd moet worden. Uit het volgende zal echter blijken dat bij een zogenaamde optimaal geïnstalleerde gesp de invloed van dikte-reductie van de doorgeleide strook ten gevolge van belasten tot een niveau kan worden teruggebracht waarbij de invloed daarvan als een meetfout kan worden geaccepteerd. Het is niet mogelijk om uit de gegeven vergelijkingen een expliciete uitdrukking voor de hoek α_1 als functie van de kracht $F(0)$ af te leiden. Daarom moeten de kracht \bar{F}_f en de hoek α , bij bekende $F(0)$ langs numerieke weg bepaald worden. Vervolgens kan de rek ϵ_x berekend worden met uitdrukking (3).

Hysteresis en optimalisering

Uit vergelijking (3) blijkt dat een gedeelte van de rek in het frame, die een maat is voor de kracht $F(0)$ op de materiaalstrook, afhankelijk is van het feit of $F(0)$ toe- of afneemt. Dit betekent dat niet alleen de waarde van de gemeten rek bekend moet zijn voor de

bepaling van de kracht maar dat ook bekend moet zijn of de rek toe- of afneemt. Bovendien is uitdrukking (3) gebaseerd op de veronderstelling dat er volledige slip optreedt in het contactgebied tussen frame en materiaalstrook. Omkering van de belasting introduceert een traject waar geen of onvolledige slip optreedt (traject II in figuur 9). In dat geval is uitdrukking (3) niet langer geldig en is de kracht-rekrelatie onbekend.

Het is wenselijk dat de term in uitdrukking (3), die het effect van belastingtoe- of afname in rekening brengt, gelijk is aan nul of op zijn minst klein is vergeleken met de andere term (verondersteld wordt dat $\mu = 0$ niet mogelijk is; in dat geval zou het probleem niet aan de orde zijn). In de optimale situatie geldt:

$$6(x/h)\sin(\alpha_1 - \beta) + \cos(\alpha_1 - \beta) = 0 \quad (5)$$

Merk op dat in dit geval uitdrukking (3) overgaat in een lineaire relatie tussen kracht en rek. Uit vergelijking (5) volgt dat, bij bekende x , h en β , de hoek α_1 moet voldoen aan

$$\alpha_1 = \beta - \arctan\{h/(6x)\} \quad (6)$$

Aangezien β , h en x in vergelijking (6) vaste waarden hebben voor een gegeven gesp en omdat de hoek α_1 een functie is van de kracht $F(0)$, bestaat er slechts één bepaalde waarde van de kracht waarvoor aan vergelijking (6) voldaan wordt. Er zal dus altijd sprake zijn van enige hysteresis. Om de hysteresis te minimaliseren definiëren we een grootte H die gelijk is aan het quotiënt van het oppervlak van de hysteresis-lus en het oppervlak onder de kracht-rekcurve in de situatie zonder wrijving, dus:

$$H = A_h/A_0 \quad (7)$$

waarin

$$A_h = \int_0^{F(0)_{\max}} [\epsilon_x(\mu \neq 0, \dot{F}(0) > 0) - \epsilon_x(\mu \neq 0, \dot{F}(0) < 0)] dF(0) \quad (8)$$

$$A_0 = \int_0^{F(0)_{\max}} \epsilon_x(\mu = 0) dF(0) \quad (9)$$

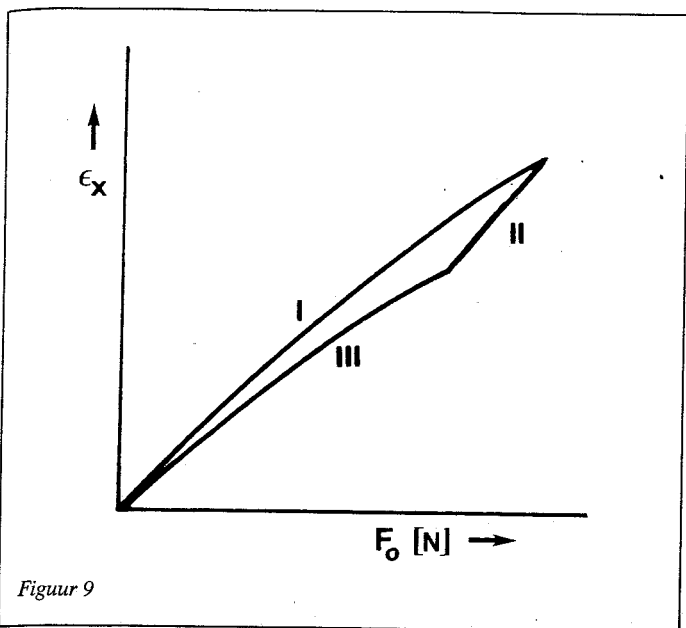
Een gesp wordt als optimaal geïnstalleerd beschouwd als H minimaal is. Bij gegeven initiële dikte van de materiaalstrook en bij een gegeven gesp mag een van de afmetingen δ_0 , L_2 of β (figuur 8) gevarieerd worden. Omwille van de eenvoud van de constructieve uitvoering is δ_0 als instelbare grootte gekozen. H is minimaal als:

$$\frac{dH}{d\delta_0} = 0 \quad (10)$$

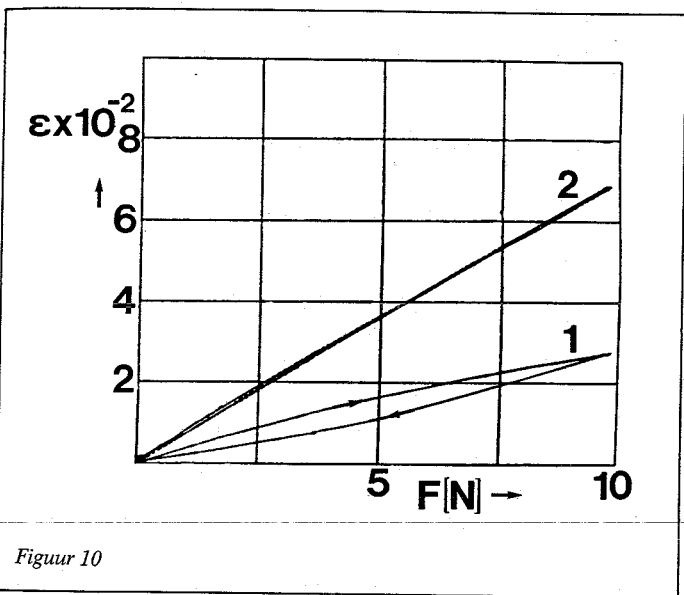
Het is niet mogelijk om een expliciete uitdrukking voor de optimale waarde van δ_0 af te leiden maar ook hier kan langs numerieke weg een benadering voor de waarde van δ_0 bepaald worden waarvoor H minimaal is. Bovendien kan met behulp van het beschreven model de invloed van de dikte-reductie ten gevolge van belasten van de doorgeleide strook worden onderzocht. Voor een materiaaldikte $d = 0,5$ mm en een maximale dikte-reductie van 5% (bij de maximale belasting) blijkt de maximale relatieve fout in de gemeten rek kleiner te zijn dan 2,8%. Dit wordt als acceptabel beschouwd. Een bijkomend voordeel van een zogenaamde optimale gesp is het lineaire verband tussen kracht en rek zoals dat volgt uit vergelijking (3) voor het geval dat aan vergelijking (5) wordt voldaan.

Resultaten en discussie

De nieuwe gesp is onderworpen aan drie typen testmetingen. Deze



Figuur 9



Figuur 10

testmetingen werden uitgevoerd aan een linnen draad ($d = 0,25$ mm).

Eerst werd de door het mechanisch model voorspelde mogelijkheid onderzocht om hysteresis-verschijnselen te minimaliseren door middel van het aanpassen van de afstand δ_0 (figuur 3). In figuur 10 zijn de gemeten kracht-rekcurven voor twee verschillende waarden van δ_0 weergegeven. Het bleek inderdaad mogelijk om de hysteresis die aanvankelijk optrad (curve 1) te minimaliseren door aanpassing van δ_0 . Men dient te bedenken dat voor $\delta_0 < (\delta_0)_{opt}$ de hysteresis-lus rechtsom doorlopen wordt en voor $\delta_0 > (\delta_0)_{opt}$ in tegengestelde richting.

Zoals eerder gezegd bestaat er slechts één specifieke waarde van de kracht waarvoor de hysteresis-term in uitdrukking (3) wegvalt. Er zal dus altijd een kleine hoeveelheid hysteresis aanwezig blijven zoals ook uit curve 2 in figuur 10 blijkt. Diezelfde curve illustreert ook het lineaire gedrag van de opnemer in de optimale situatie.

Temperatuureffecten werden op de gebruikelijke wijze gecompenseerd met een zogenaamde dummy-opnemer. Duurproeven (2000 samples over 8 uur) gaven een gemiddelde nulpuntdrift te zien van minder dan 0,3% van de volle schaalwaarde (10 N) met een standaarddeviatie beter dan 0,4% van de volle schaalwaarde.

Tenslotte werden de nauwkeurigheid en de gevoeligheid bepaald. Binnen het werkgebied (0-10 N) werden 500 random-waarden van de kracht genomen. De maximale afwijking van de corresponderende gemeten rekken (kleinste kwadraten aanpassing) was min-

der dan 2,5% van de volle schaalwaarde (vergelijk met de meetfout ten gevolge van de dikte-reductie).

Zoals uit de vergelijkingen (2) en (3) blijkt is de gevoeligheid van de opnemer afhankelijk van de afstand δ_0 tussen frame en dwarsbalk. De nauwkeurigheid bij de montage van de dwarsbalk bepaalt hoe nauwkeurig de gewenste gevoeligheid kan worden ingesteld. Een afwijking van deze gewenste gevoeligheid is een foutbron. Bij het uitvoeren van de metingen was de instelnaauwkeurigheid beter dan 0,03 mm. Uit het mechanisch model volgt dat de afwijking van de gevoeligheid die hiermee correspondeert minder is dan 4% ($= 2,6$ [$\mu\text{rek}/\text{N}$]) van de nominale gevoeligheid. In tabel 1 staan de gemeten gevoeligheden bij herhaalde montage van twee verschillende opnemers vermeld.

De tabel laat zien dat het grootste verschil tussen de gemeten gevoeligheden goed overeenkomt met de voorspelde maximale range.

	opnemer 1	opnemer 2
montage 1	64,5	60
montage 2	63,5	63,5
montage 3	67	58
montage 4	-	58

Tabel 1

Slotopmerkingen

Gebleken is dat de nieuw ontworpen gesp voldoet aan de verwachtingen die worden gewekt door het mechanisch model. Dit model geeft dus een goed inzicht in het gedrag van de opnemer en vormt een geschikt hulpmiddel voor het oplossen van ontwerp- en meetproblemen. Met de aanpassingen is het beschreven ontwerp een verbetering in vergelijking met eerdere versies (zie lit. [1] - [6]). Gezien de complexiteit van het meetprincipe en de kleine afmetingen van de opnemer is de bereikte nauwkeurigheid goed te noemen.

Literatuur

- [1] Salmons, S., *The 8th International Conference on Medical and Biological Engineering-Meeting Report*, Bio-medical Engineering, Vol. 4, 1969, pp. 467-474.
- [2] Barnes, G. R. G., Pinder, D. N., *In Vivo Tendon Tensions and Bone Strain Measurements and Correlation*, Journal of Biomechanics, Vol. 7, 1974, pp. 35-42.
- [3] Walmsley, B., Hodgson, J. A., Burke, R. E., *Force Produced by Medial Gastrocnemius and Soleus Muscles During Locomotion in Freely Moving Cats*, Journal of Neurophysiology, Vol. 41, 1978, pp. 1203-1216.
- [4] Lewis, J. L., Frasier, G., *On the Use of Buckle Transducers to Measure Knee Ligament Forces*, Proceedings of the 1979 ASME Biomechanics Symposium, 1979, pp. 71-74.
- [5] Lewis, J. L., Lew, W. D., Schmidt, J., *A Note on the Application and Evaluation of the Buckle Transducer for Knee Ligament Force Measurement*, Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 104, 1982, pp. 125-128.
- [6] Barry, D., Ahmed, A. M., *Design and performance of a modified buckle transducer for the measurement of ligament tension*, Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 108, 1986, pp. 149-152. □