

Tandheelkundige Materiaalkennis

door J. N. Tekenbroek.

(Vervolg)

HOOFDSTUK V

ELASTISCHE VORMVERANDERINGEN

§ 1. *Belasting, spanning en vormverandering*

Als er op een voorwerp, dus op een materiaal, een uitwendige kracht wordt uitgeoefend, dan kan dat zijn een aanhoudende, steeds in dezelfde richting werkende kracht, in welk geval men spreekt van een **statische belasting**.

Daarnaast kan een voorwerp plotseling belast worden b.v. door een slag, of het voorwerp kan onderhevig zijn aan een uitwendige kracht die steeds van richting en grootte verandert. Men heeft dan met een **dynamische belasting** te maken.

Eerst zullen de verschijnselen nader beschouwd worden die optreden, wanneer op een voorwerp een statische belasting wordt uitgeoefend. Hierbij doen zich twee mogelijkheden voor; de belasting kan zo groot zijn, dat het voorwerp daardoor een blijvende vormverandering krijgt, met daartegenover het geval dat na opheffing van de belasting de oorspronkelijke vorm zich volkomen herstelt. In het laatste geval heeft het materiaal gedurende de belasting een **zuiver elastische vormverandering** ondergaan. Een metalen draad, die onder invloed van een trekkracht uitgerekt wordt, veert weer volkomen tot zijn oorspronkelijke lengte terug als de belasting een bepaalde waarde niet heeft overschreden, evenals een massieve rubber bal, waarop men b.v. gaat staan, na opheffing van de belasting zijn oorspronkelijke vorm zal innemen.

Bij volkomen elastische vormveranderingen hetzij door trekken, samendrukken of wringen, geldt voor alle vaste stoffen de natuurwet, dat de grootte der vormverandering gedurende de belasting

recht-evenredig is met de belasting (**Wet van Hooke**). Een tweemaal zo grote trekkracht b.v. geeft aan een draad een tweemaal zo grote rek.

Beschouwt men hetgeen er in een materiaal gebeurt bij een nog zuiver elastische belasting nader, dan is in de eerste plaats op te merken, dat de uitwendige kracht in het materiaal een tegenwerkende kracht, **een spanning**, veroorzaakt, die de belasting tegenwerkt en in evenwicht houdt. Wordt er aan een staaf van een of ander materiaal getrokken, dan zal de uitwendige belasting de afstand tussen de atomen of moleculen van het materiaal trachten te vergroten en hiertegen verzetten zich de intramoleculaire bindingskrachten. In een willekeurige doorsnede van de belaste staaf zullen de bindingskrachten tussen alle atomen of moleculen, die aan beide zijden van het vlak dier doorsnede gelegen zijn, gezamenlijk de spanning opleveren die gelijk is aan de belasting en deze in evenwicht houdt. De wijze waarop een materiaal zich onder een dergelijke belasting gedraagt d.w.z. de mate waarop de afstand der atomen of moleculen zich laat vergroten, de rek dus, en de uiterste spanning die de bindingskracht kan opleveren voordat er een blijvende vormverandering in het materiaal optreedt, wordt bepaald door de inwendige structuur van het materiaal en door de aard en de grootte van die bindingskracht; het is een eigenschap van het materiaal.

Niet alleen **de grootte** van de uitwendige kracht, maar ook **de richting** van de belasting is van belang. Tegenover het op rek belasten van een materiaal staat het samendrukken. Een dergelijke belasting tracht de afstand tussen de moleculen of atomen te verkleinen, waartegen hun onderling afstotende krachten zich verzetten, die dan gezamenlijk in het materiaal **de drukspanning** leveren, die de belasting tegenwerkt.

Oefent men een zijdelingse kracht op een voorwerp uit, **een afschuifkracht**, dan zal deze de lagen van het materiaal langs elkaar trachten te schuiven. Ook hiertegen verzetten zich de bindingskrachten tussen de moleculen en atomen; zij veroorzaken gezamenlijk **een schuifspanning** in het materiaal, die de afschuiving belet.

Indien een afschuifbelasting zo groot is dat een blijvende vormverandering daarvan het gevolg is, dan glijden in het materiaal verschillende lagen langs elkaar. Het materiaal wordt dan **plastisch vervormd**, het gaat vloeien, tenminste als het materiaal niet bros is, in welk geval het direct breekt.

Tegen het plastisch vervormen, het vloeien, verzetten zich niet alleen de bindingskrachten, maar hierop hebben ook de vorm en de grootte der moleculen van het materiaal invloed. De optredende verschijnselen worden dan vrij ingewikkeld; de tegenwoordig in de tandheelkunde veel gebruikte kunstharsen, waarvan vele de eigenschap hebben om onder invloed van een belasting te kunnen vloeien, noodzaken deze verschijnselen in een later hoofdstuk wat nader te bespreken.

§ 2. *Trekproeven*

Wordt aan een staaf, die L cm. lang is en een doorsnede heeft, waarvan het oppervlak O mm² is, getrokken met een kracht van G kg., dan zal de staaf onder invloed van die belasting uitgerekt worden, welke rek op r cm gesteld wordt. Om de uitkomsten, verkregen bij verschillende proefomstandigheden en bij verschillende materialen, met elkaar te kunnen vergelijken, ligt het voor de hand om de gevonden rek steeds per cm staaf lengte op te geven dus r/L , **de specifieke rek**, (of in procenten, $r/L \times 100\%$) en de belasting, evenals de daardoor opgewekte inwendige spanning per oppervlakte-eenheid van de staafdoorsnede, per cm² of per mm², op te geven dus G/O kg/mm² of G/O kg/cm².

Zolang de belasting nog niet te hoog is, zodat de rek nog zuiver elastisch is, geldt de *Wet van Hooke*, die zegt dat de belasting en de daarbij behorende rek recht-evenredig met elkaar zijn, m.a.w. de verhouding tussen de belasting en rek is constant

$$\frac{\text{belasting}}{\text{rek}} = \frac{G/O}{r/L} = \frac{G \times L}{O \times r} = \text{constant.}$$

Bij een staaf vervaardigd uit ijzer zal een bepaalde belasting een aanzienlijk kleinere rek geven dan bij een staaf van dezelfde afmetingen maar vervaardigd uit rubber. Dit verschil in gedrag van ijzer en rubber wordt veroorzaakt door het verschil in structuur en bindingskracht bij deze twee materialen.

Ieder materiaal heeft een voor dat materiaal kenmerkende constante verhouding tussen de belasting en de rek.

Deze verhouding is een belangrijke materiaalconstante, waarin een maat gevonden wordt voor de elastische eigenschappen van het materiaal.

Om een ijzeren staaf tot een bepaalde lengte uit te rekken is meer kracht nodig, waardoor in het materiaal een grotere spanning opgewekt wordt, dan wanneer men eenzelfde staaf, vervaardigd uit

rubber, even ver uitrekt. De constante verhouding $\frac{\text{belasting}}{\text{rek}}$ is bij ijzer daarom hoger dan bij rubber. Men noemt de verhouding $\frac{\text{belasting}}{\text{rek}}$ **de elasticiteitsmodulus** van een materiaal en duidt deze

constante aan met de letter E.

De elasticiteitsmodulus is te definiëren als de constante verhouding die er bij een materiaal bestaat tussen de belasting en de daardoor veroorzaakte rek, zolang deze rek zuiver elastisch is.

$$E = \frac{\text{belasting}}{\text{rek}} = \frac{G/O}{r/L} = \frac{G \times L}{O \times r} \text{ kg/mm}^2.$$

E = elasticiteitsmodulus

G = belasting in kg

O = oppervlak der staafdoorsnede in mm²

L = lengte van de staaf (voor de belasting) in cm

r = rek in cm

De elasticiteitsmodulus wordt opgegeven in kg/mm² of in kg/cm². In de Angelsaksische literatuur in pounds per square inches (lb/inch²).

$$1 \text{ lb/inch}^2 = 7.03 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}^2 = 7.03 \times 10^{-4} \text{ kg/mm}^2.$$

$$1 \text{ kg/cm}^2 = 10^{-2} \text{ kg/mm}^2 = 14,223 \text{ lb/inch}^2.$$

De elasticiteitsmodulus van enkele materialen vindt men in de volgende tabel:

gietijzer	14.000 kg/mm ²
staal	21.000 „
koper	2.500 „
messing	9.000 „
protheserubber	300 „
prothesekunsthars	300 „

De elasticiteitsmodulus kan bepaald worden door het nemen van trekproeven met staven van genormaliseerde lengte, vorm en doorsnede, die uit de te onderzoeken materialen worden vervaardigd. Bij het uitvoeren van de trekproef laat men de belasting regelmatig toenemen en registreert daarbij continu de optredende rek van de staaf. Zet men dan grafisch tegenover elkaar uit de belasting in kg/mm² en de rek in %, dan krijgt men de **trekkromme** van een materiaal. Hieronder volgt een voorbeeld van een dergelijke trekkromme. (fig. 20).

Het eerste deel van de trekkromme en wel van de oorsprong O tot het punt P is zuiver rechtlijnig, hetgeen betekent dat de verhouding tussen de belasting en de rek constant is. Bij belastingen tot het punt P geldt de Wet van H o o k e, waarbij belasting en rek recht-evenredig met elkaar zijn. Men noemt dit rechte gedeelte van de trekkromme de **moduluslijn**. Het punt P geeft de grensspanning van dit recht-evenredige verloop tussen spanning en rek, en wordt de **proportionaliteitsgrens** van het materiaal genoemd.

De **proportionaliteitsgrens** is de hoogste spanning in een materiaal, waarbij de rek nog juist recht-evenredig is met de spanning.

De elasticiteitsmodulus E vindt men in de grafiek door van een willekeurig punt op dit gedeelte der trekkromme, de spanning te delen door de daarbij behorende rek, zoals in fig. 20 is aangegeven;

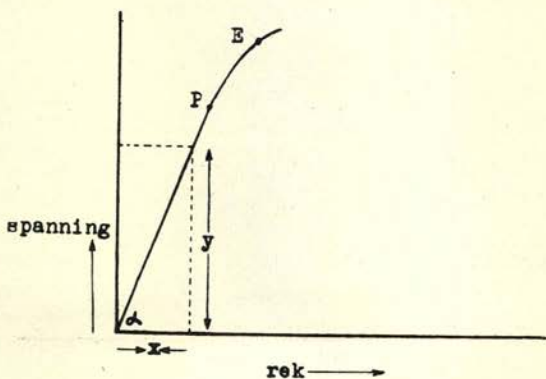


Fig. 20

$E = y/x$. Hieruit blijkt dat de elasticiteitsmodulus gelijk is aan de tangens van de hoek α , die het rechte stuk der trekkromme, de moduluslijn, met de horizontale as maakt. Bij een meer elastisch materiaal, waarvan de elasticiteitsmodulus, zoals uit de definitie van deze constante direct volgt, kleiner is, zal de hoek α kleiner zijn; de moduluslijn loopt minder steil. De gestippelde moduluslijn in fig. 21 betreft een meer elastische stof.

Even verder dan de proportionaliteitsgrens P wordt op de trekkromme het punt E bereikt, de **elasticiteitsgrens** (fig. 20). Van het punt P tot E geldt de Wet van H o o k e **niet** meer, de trekkromme wijkt van de rechte lijn af. Tot het punt E blijft de rek echter nog **wel volkomen elastisch**; wordt de belasting opgeheven, dan herstelt ook op dit gedeelte der trekkromme de oorspronkelijke lengte zich nog volkomen.

De elasticiteitsgrens is de hoogste spanning in een materiaal, waarbij de vormverandering nog juist volkomen elastisch is.

Het bepalen van de elasticiteitsgrens is niet altijd gemakkelijk; voor praktische doeleinden neemt men bij afspraak daarvoor vaak de spanning waarbij het materiaal een kleine blijvende rek gaat vertonen b.v. van 0,001 % of ook wel een rek van 0,1 en 0,2 %. Men spreekt dan van de 0,001 rekgrens (resp. 0,1 en 0,2 rekgrens).

Deze spanningen worden aangeduid door $\delta 0.001$ of $\delta 0.1$ en $\delta 0.2$.

Voor het overgrote deel der materialen vallen de elasticiteitsgrens en de proportionaliteitsgrens praktisch samen. In het verdere betoog zal dan ook, als niet nadrukkelijk het tegendeel gesteld is, dit samenvallen van beide aangenomen worden en uitsluitend van de elasticiteitsgrens gesproken worden.

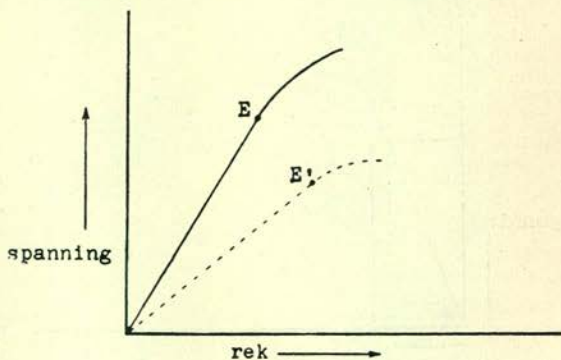


Fig. 21

De bespreking van het verdere verloop van de trekkromme, waarbij de belasting de elasticiteitsgrens overschrijdt en blijvende vormveranderingen optreden, zal later geschieden.

§ 3. *Buigzaamheid en veerkracht*

De elasticiteitsgrens van een materiaal is een belangrijk gegeven. Het geeft in kg/mm^2 de uiterste belasting aan, waaraan een materiaal kan worden onderworpen zonder dat er blijvende vormveranderingen optreden. Het behoeft geen betoog, dat vooral voor tandheelkundige materialen, waarmede nauwgezet passende prothesen, bruggen, kronen, vullingen en orthodontische apparaten vervaardigd worden, de vorm-bestendigheid een voorname eis is. Oriënteert de elasticiteitsmodulus met een cijfer omtrent de elastische eigenschappen, in de elasticiteitsgrens vindt men

een maat voor de vormbestendigheid van een materiaal. Een combinatie van deze beide gegevens licht in omtrent de soepelheid of buigzaamheid en de veerkracht van een materiaal.

Rubber, (althans weinig ge vulcaniseerde rubber), is een zeer elastisch maar niet sterk materiaal, de elasticiteitsgrens is laag vergeleken b.v. met die van staal, welk materiaal op zijn beurt echter minder elastisch is. Rubber is soepeler, buigzamer, slapper dan staal, maar staal is veerkrachtiger. Men zal er niet aan denken om, niettegenstaande de goede elastische eigenschappen van rubber, een veertje aan een orthodontisch apparaat b.v. uit rubber te vervaardigen. Buigzaamheid en veerkracht zijn begrippen die elkaar niet dekken.

Buigzaamheid heeft betrekking op de mate van een mogelijke (zuiver elastische) vormverandering; **veerkracht** richt zich op de hoeveelheid kracht, de energie, die nodig is om een bepaalde (wederom zuiver elastische) vormverandering te bereiken.

Van een materiaal worden gewoonlijk de elasticiteitsmodulus en de elasticiteitsgrens opgegeven en uit deze beide gegevens is zowel een maat voor de buigzaamheid als voor de veerkracht te berekenen.

Hoe groter de **rek** is welke een materiaal maximaal kan verdragen zonder blijvend van vorm te veranderen, des te groter zal de **buigzaamheid**, de slapheid van het materiaal zijn. In de maximale rek heeft men dan ook een goede maat voor de buigzaamheid. Deze maximale rek is gelijk aan de rek die een materiaal heeft, wanneer het materiaal tot zijn elasticiteitsgrens is uitgerekt. (Zie fig. 22).

Zij P kg/mm^2 de elasticiteitsgrens van een materiaal en e , de daarbij behorende rek (de maximale rek dus) en E de elasticiteitsmodulus, dan volgt uit de definitie van deze laatste constante:

$$E = \frac{\text{belasting}}{\text{rek}} = \frac{P}{e}$$

De maximale rek of buigzaamheid $e = \frac{P}{E}$

e = buigzaamheid (maximale rek)

P = elasticiteitsgrens (kg/mm^2)

E = elasticiteitsmodulus

De **veerkracht** van een materiaal kan men technisch het beste definiëren als de hoeveelheid energie die nodig is om een materiaal tot zijn elasticiteitsgrens uit te rekken.

Deze energie laat zich uit de gegevens P , de elasticiteitsgrens en E de elasticiteitsmodulus, eenvoudig berekenen. Wordt een staaf tot zijn elasticiteitspunt belast, dan neemt de belasting geleidelijk van nul tot P toe en zal dus gemiddeld $\frac{0 + P}{2} = \frac{P}{2}$ bedragen.

De afgelegde weg is de maximale rek e , waarvoor bij de buigzaamheid de waarde $\frac{P}{E}$ is aangegeven.

De veerkracht R , dat is bij definitie de verrichte arbeid, is dus het product van kracht \times weg:

$$R = \frac{P}{2} \times \frac{P}{E} = \frac{P^2}{2E} \quad \text{waarin} \quad \begin{array}{l} R = \text{veerkracht} \\ P = \text{elasticiteitsgrens} \\ E = \text{elasticiteitsmodulus} \end{array}$$

Waren het tot nu toe statische belastingen die beschouwd werden, de materialen van de in de mond aangebrachte apparaten echter staan veelal aan een dynamische belasting gedurende de kauwfunctie bloot. De onderkaak komt bij het kauwen met een zekere snelheid tegen de spijsbrok, terwijl zodra de spijsbrok geraakt wordt, de kauwspieren zich met een plotselinge ruk sterk samentrekken. Ook bij een dergelijke belasting verlangt men van de materialen dat zij zich niet blijvend vervormen.

Hoe groter de veerkracht R van een materiaal is, des te beter zal het apparaat, dat uit dit materiaal vervaardigd is, de energie-stoot van een plotselinge belasting kunnen opvangen. De weerstand tegen een plotselinge belasting is dus recht-evenredig met de veerkracht R .

Hoe groter het materiaalvolume is, dat de energie-stoot opvangt, hoe sterker de weerstand zal zijn. De weerstand die een bepaald voorwerp of een apparaat tegen een plotselinge belasting kan stellen is daarom eveneens evenredig met het volume V van het materiaal, dat in het betreffende voorwerp verwerkt is.

En tenslotte moet deze weerstand mede afhankelijk zijn van de structuur van het belaste voorwerp en wel de structuur in deze te beschouwen in verband met de belasting waaraan het voorwerp onderhevig is. In een structuurfactor K is dus zowel de aard van de belasting als de vorm van het voorwerp te verdisconteren. Dat deze factor K een zeer onbestemde en ook moeilijk nader te bepalen grootheid is, behoeft geen verder betoog. Het komt er hier echter op aan, om twee of meer materialen met elkaar te vergelijken wat betreft hun geschiktheid om voor een bepaald apparaat, dat aan een

bepaalde belasting blootstaat, gebruikt te worden en bij deze vergelijking valt deze structuur-factor dan weg.

De weerstand van een materiaal, waaruit een willekeurig voorwerp is vervaardigd, tegen een daarop uitgeoefende willekeurige plotselinge belasting kan door de volgende formule worden aangegeven:

$$\text{weerstand} = K \times V \times R = K \times V \times \frac{P^2}{2E}, \text{ waarin}$$

K = structuurfactor voorwerp

V = volume van het materiaal in het voorwerp verwerkt

R = veerkracht van het materiaal

P = elasticiteitsgrens

E = elasticiteitsmodulus

§ 4. *Verloop van de trekkromme boven de elasticiteitsgrens*

Het gedrag van een materiaal bij belastingen boven de elasticiteitsgrens is verschillend naar gelang men met een bros materiaal, b.v.

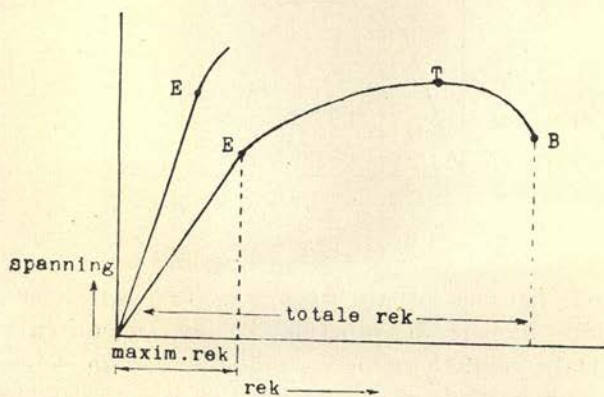


Fig. 22

gietijzer te maken heeft, of met een taai materiaal, dat over een korter of langer traject plastisch vervormd kan worden, b.v. smeedijzer.

In fig. 22 zijn naast elkaar de trekkromme van een taai en een bros materiaal afgebeeld.

Bij een bros materiaal treedt na het bereiken van de elasticiteitsgrens bij verder toenemende belasting, practisch direct breuk op. Interessanter is het gedrag van niet-brosse materialen; na het overschrijden van de elasticiteitsgrens blijft de spanning bij het toenemen van de belasting steeds stijgen, maar de rek neemt thans veel sneller toe; de trekkromme buigt naar de horizontale as en bereikt in het punt

T tenslotte een maximum. Dit punt geeft de hoogste spanning aan, die het materiaal kan verdragen, en deze spanning wordt de **treksterkte** van het materiaal genoemd. Tot het punt T heeft de staaf zich onder stijgende spanning aanmerkelijk plastisch uitgerekt. Na het punt T neemt de spanning voor het eerst niet meer toe. Zonder toename van de uitwendige belasting rekt de staaf dan van zelf verder, het materiaal gaat vloeien. De spanning (berekend op de oorspronkelijke diameter), neemt af, de staaf gaat een insnoering vertonen en breekt tenslotte in het punt B van de trekkromme, **het breukpunt**.

De totale lengte, waarover een staaf bij het breken gerekt is, noemt men **de totale rek** of kortweg **de rek** van een materiaal. (Zie fig. 22).

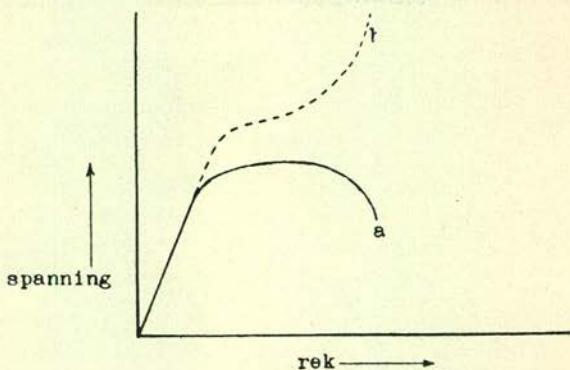


Fig. 23

Gedurende het zich plastisch vervormen en het vloeien van de staaf wordt de diameter der proefstaaf kleiner. **De contractie ϕ** van een materiaal is bij definitie de vermindering van de doorsnede der proefstaaf gedurende de proef, uitgedrukt in % of in een breuk van de oorspronkelijke diameter.

De insnoering ψ , is de grootste vermindering in doorsnede gemeten bij de gebroken proefstaaf, eveneens in % of in breuken van de oorspronkelijke diameter uitgedrukt (de insnoering is dus de maximaal opgetreden contractie).

De contractie, de insnoering, de vloeigrens en de totale rek, geven gezamenlijk een indruk omtrent de rekbaarheid van een materiaal met het oog op het trekken van draad uit een metaal, en omtrent de pletbaarheid, de smeedbaarheid, welke plastische eigenschap voor de tandtechniek eveneens van veel belang is.

Het is nodig er op te wijzen, dat bij het trekdiagram de spanning

steeds berekend is op de oorspronkelijke doorsnede. Door het uitrekken gedurende de trekproef wordt deze doorsnede voortdurend kleiner, vooral als de proefstaaf gaat vloeien. De werkelijk in het materiaal optredende spanningen gedurende een trekproef vindt men als men op ieder moment de uitwendige belasting zou delen door de kleinste diameter van de proefstaaf. Vooral als het materiaal gaat vloeien neemt die spanning aanzienlijk toe. In fig. 23 geeft de stippellijn b het verloop van die werkelijke spanning weer terwijl de lijn a de gebruikelijke trekkromme aangeeft, waarin de spanning steeds als uitwendige belasting wordt opgegeven en wel als totale belasting gedeeld door de oorspronkelijke diameter van de proefstaaf.

Samenvattend geven de vier bij de trekproef bepaalde materiaalggegevens de volgende inlichtingen omtrent het mechanische gedrag van een materiaal:

Elasticiteits-modulus	<	hoog	→	stijf materiaal
		laag	→	slap materiaal
Elasticiteits-grens	<	hoog	→	stug materiaal
		laag	→	week materiaal
Treksterkte	<	hoog	→	sterk materiaal
		laag	→	zwak materiaal
Totale rek	<	groot	→	taai materiaal
		klein	→	bros materiaal

In fig. 24 is dit schematisch bij een trekkromme aangegeven.

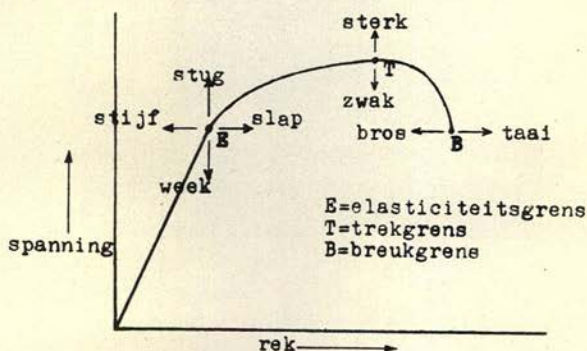


Fig. 24

Voor het uitvoeren van trekproeven zijn verschillende toestellen in gebruik. Ten einde een indruk te geven van deze apparaten wordt in fig. 25 een afbeelding gegeven van het toestel volgens **A m s t l e r**.

§ 5. *Drukproeven*

Om het gedrag van een materiaal bij een belasting op druk na te gaan, wordt een blokje van bepaalde afmeting onder toenemende belasting samengedrukt, waarbij dan regelmatig de verkorting wordt bepaald.

Het gedrag van het materiaal is analoog als bij een trekproef. Eerst zal het proefblokje zuiver elastisch verkort worden, voor welk

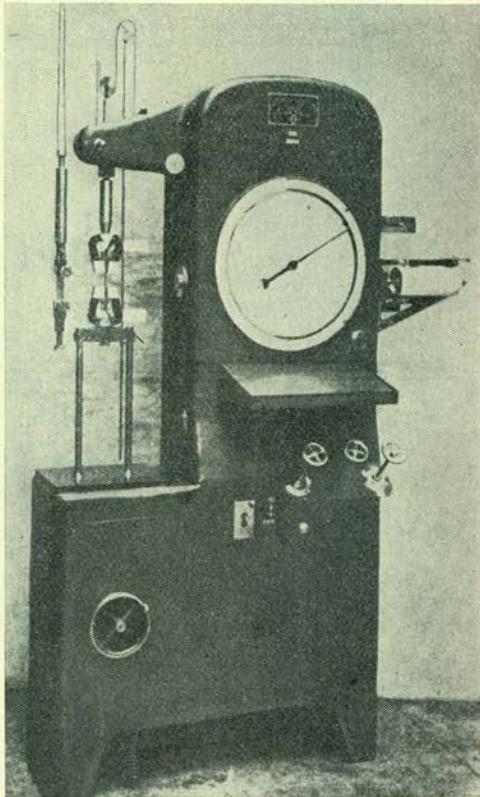


Fig. 25

gebied de Wet van Hooke geldt, waarbij de verschillende materialen uiteenlopende evenredigheidsconstanten hebben. (Bij volkomen homogene isotrope stoffen is deze evenredigheidsconstante practisch gelijk aan de elasticiteits-modulus, die men bij trekproeven vindt).

Wordt bij toenemende druk het gebied, waarvoor de Wet van Hooke geldt, overschreden, treden er blijvende vormver-

anderingen op; inplaats van elasticiteitsgrens spreekt men hier van **stuikgrens**. De **stuik** is de vermindering in lengte van het proefblokje; het staat tegenover de rek.

In analogie met de rek van een materiaal (de totale rek na breuk) noemt men **de stuik van een materiaal** de vermindering in lengte, uitgedrukt in % der oorspronkelijke lengte, wanneer het proefblokje bij belasting onder druk de eerste zichtbare scheur vertoont.

De belasting (gedeeld door de oorspronkelijke diameter) waarbij deze eerste zichtbare barst ontstaat, noemt men de **druksterkte** van een materiaal. Deze komt dus overeen met de treksterkte bij trekproeven. Vooral voor brosse materialen, die bij hun toepassing

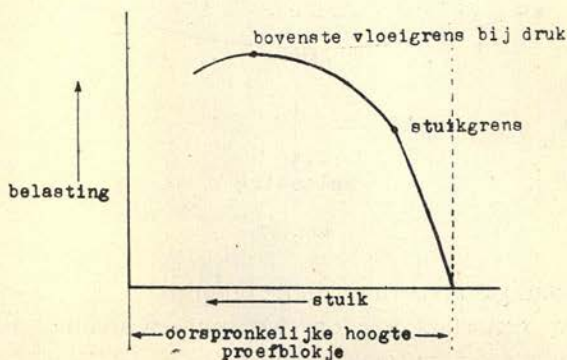


Fig. 26

op druk belast worden, b.v. tandcementen is de druksterkte een belangrijk materiaalgegeven. Uitgesproken plastische materialen zullen bij toeneming van de uitwendige belasting niet vergruizen maar steeds verder vervloeien.

De bovenste **vloeigrens bij druk** is bij definitie de belasting (gedeeld door de oorspronkelijke diameter), waarbij voor het eerst het materiaal verder vloeit, zonder dat de uitwendige belasting toeneemt.

Het vloeien van een materiaal, is afhankelijk van de temperatuur en van de tijdsduur, gedurende welke de belasting inwerkt. Dit is zowel het geval bij kristallijne stoffen (b.v. metalen) als bij amorfe stoffen (b.v. kunstharsen). De invloed van de tijd en de temperatuur op het plastisch deformereren van materialen wordt in een later hoofdstuk uitvoeriger besproken.

§ 6. Buig- en Wringproeven

Bij brosse materialen, zoals glas, sommige kunststoffen, gehard staal, gietijzer, komt het voor, dat over het gebied van de zuiver elastische rek de Wet van H o o k e niet gevolgd wordt. Met stijgende belasting verandert de elasticiteitsmodulus, zodat daarvoor feitelijk geen goede waarde te vinden is. Inplaats van trekproeven neemt men bij dergelijke materialen bij voorkeur buigproeven om een indruk van het elastische gedrag bij deze brosse materialen te krijgen. De mate van doorbuiging op het moment van breken, als maat voor dit gedrag, is gemakkelijker te bepalen dan de rek bij breuk.

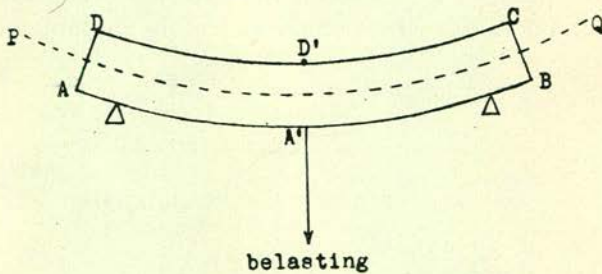


Fig. 27

Een eenvoudige uitvoering van de buigproef is, het in het midden belasten van een staaf, die op twee punten steunt, zoals in de bijgaande schets is aangegeven. (fig. 27).

Bij buiging van de staaf ABCD zal het materiaal beneden de lijn PQ (**de neutrale laag**) gerekt worden, en boven deze lijn zal het materiaal op druk belast worden. In de buitenste lagen van het materiaal, die zover mogelijk van de neutrale laag verwijderd zijn, treden daarbij de grootste trek- en drukspanningen op (resp. bij A' en bij D').

Het is voor het hier gestelde doel niet nodig in te gaan op de formules, die het verband aangeven tussen de bij drukproeven gevonden gegevens en de daarbij gebruikelijke materiaalconstanten. Volstaan wordt met op te merken, dat men de **buigsterkte** van een materiaal noemt, de belasting op het moment van breken, en de **doorbuiging** het aantal cm dat de proefstaaf op het moment van breken doorgebogen is.

Bij **wringproeven** ontstaan schuifspanningen in een materiaal, die met de Griekse letter τ (tau) worden aangeduid. Evenals bij trek- en drukproeven wordt ook bij wringproeven eerst een gebied doorlopen, waarbij de vormverandering zuiver elastisch is en waarbij

de Wet van Hooke geldt. Tussen de afschuiving en de belasting bestaat dan een constante verhouding en deze verhouding, die wederom een voor ieder materiaal typische constante is, heet de **glijdings-modulus** van een materiaal. Men duidt deze materiaalconstante met G aan. (Tussen de glijdingsmodulus en de elasticiteitsmodulus bestaat een verband, waarin mede een hier niet besproken materiaalconstante betrokken is, die in verband staat met de zijdelingse contractie, welke optreedt als een materiaal op rek belast wordt).

In analogie met de trekgrens en de drukgrens, met de treksterkte, en de druksterkte en met de rek en de verkorting of stuik, bepaalt men bij wringproeven **de wringgrens, de wringsterkte en de wrong**.

§ 7. *Hardheid*

Voor tandheelkundige materialen is de hardheid een belangrijk gegeven. Het is moeilijk het begrip **hardheid** scherp te definiëren; mogelijk kan dit nog het beste, door te spreken van „de weerstand, die een materiaal biedt tegen blijvende vervorming door indrukking, waarbij een kleinere blijvende indrukking op een grotere hardheid wijst”.

Op deze blijvende indrukking hebben invloed de vorm van het indruklichaam en de grootte zowel als de duur van de belasting op dit indruklichaam.

Vroeger, en ook thans nog wel eens voor het verkrijgen van een oppervlakkige indruk omtrent de hardheid, bepaalde men deze grootte met behulp van de **hardheidsschaal volgens Mohs**. Deze schaal bestaat uit een tiental, van één tot tien genummerde, mineralen, met opklimmende hardheid, d.w.z. het lager genummerde mineraal is niet in staat om een hoger genummerd te krassen. Men ging na met welk mineraal de te onderzoeken stof nog te krassen was en het nummer van dit mineraal geeft dan de Mohs'se hardheid aan.

Met opklimmende hardheid zijn deze tien mineralen: 1. talk, 2. gips, 3. calciet, 4. fluoriet, 5. apatiet, 6. veldspaat, 7. kwarts, 8. topaas, 9. korund, 10. diamant.

Tegen de hardheidsbepaling volgens Mohs zijn meerdere bezwaren in te brengen o.a. reeds dat de daarbij gebruikte mineralen, afkomstig van verschillende vindplaatsen, verschillen in hardheid vertonen.

Voor de bepaling van de hardheid volgt men tegenwoordig verschillende andere methoden.

De meest bekende zijn die van Brinell, Vickers, Rockwell en Knoop. De hardheidsmeter van Brinell en die van Knoop worden het meest bij de tandheelkundige onderzoeken gebruikt, en deze zullen hier wat nader besproken worden.

Bij de Brinell-proef wordt een gehard stalen kogel met een bepaalde kracht in het materiaal gedrukt, waarna de diameter van de ontstane indruk gemeten wordt. De Brinell-hardheid is dan de belasting in kg gedeeld door het oppervlak van de bolvormige indruk. Als D de diameter van de gebruikte kogel is en d de gemeten diameter van de indruk (beide in mm) is, dan is

$$H_B = \frac{P}{\frac{1}{2}\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ kg./mm}^2$$

Worden bij deze bepalingen kogels van verschillende diameter gebruikt of lopen de grootte en de tijdsduur der aangewende belasting uiteen, dan vindt men bij hetzelfde materiaal niet dezelfde hardheid. Daarom moet men, om de hardheid van verschillende materialen onderling te kunnen vergelijken, de diameter van de kogel, de duur en de grootte der belasting vermelden bij het opgeven van de gevonden hardheid. De keuze van deze grootheden hangt af van de aard van het te onderzoeken materiaal en wel of dit bros, elastisch, taai enz. is.

De Brinell-hardheid wordt als volgt opgegeven $H_B 10/300/30 = 300 \text{ kg/mm}^2$, hetgeen betekent, dat de bepaling is verricht met een kogel, waarvan de diameter 10 mm was, de belasting 300 kg en de duur der belasting 30 seconden was.

Bij de onderzoeken van tandheelkundige materialen worden meestal gebruikt een kogel van 1,6 mm (1/16 inch), een belasting van 12,61 kg (27,7 pound) of 6,3 kg (13,9 pound) en een belastings-tijd van 30 seconden, dus $H_B 1,6/12,61/30$.

Het is gebleken, dat er tussen de Brinell-hardheid en de treksterkte van materiaal een verband bestaat, waarbij ruwweg voor een bepaalde groep van metalen geldt, dat de Brinell-hardheid $\pm 3 \times$ de treksterkte is.

Aan de Brinell-bepaling zijn enige bezwaren verbonden; bij brossen materialen krijgt men vaak indrukken met scheuren en barsten, zodat de diameter van de indruk niet zuiver te bepalen is.

Bij plastische materialen kunnen de randen van de indruk gaan opstaan, waardoor het bepalen van de diameter eveneens moeilijk wordt.

Verder worden bij zeer harde materialen de stalen kogels zelf bij wat grotere belastingen ingedrukt, zodat de bolvorm niet zuiver blijft bestaan en de daarop gebaseerde berekeningen niet meer juist kunnen zijn. Dit heeft aanleiding gegeven tot het volgen van andere methoden.

De hardheidsmeter van Rockwell bezit een kegelvormig indruklichaam vervaardigd uit diamant, het Vickers' toestel gebruikt een pyramide van diamant (fig. 28).

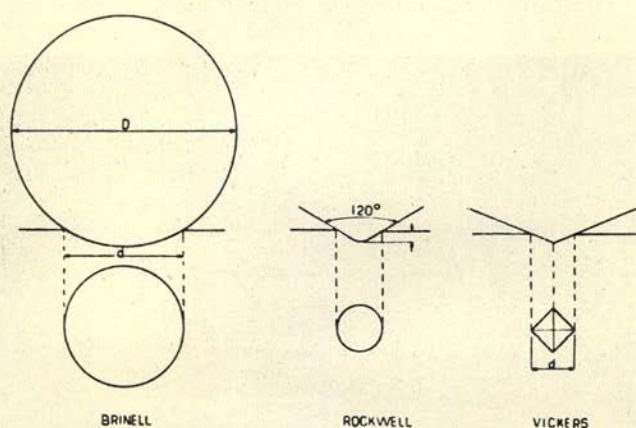


Fig. 28 geeft schematisch de vorm van de indruklichamen en van de daarmee gemaakte indrukken van resp. het Brinell-, Rockwell-, en Vickers-toestel.

Het toestel van Knoop, heeft een indruklichaam, eveneens van diamant, dat een langgerekt parallelgram als indruk geeft (fig. 29).

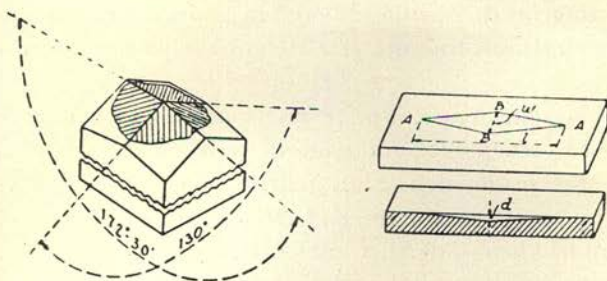


Fig. 29

De diamanten punt heeft men een dusdanige vorm gegeven, dat er een constante verhouding bestaat tussen de lengte van de grote diagonaal van de indruk en het totale oppervlak van de indruk.

Het **Knoop-hardheidsnummer** (K.H.N.) is gelijk aan:

$$H_K = \frac{G}{A} = \frac{G}{C_p \times d} \text{ waarin:}$$

H_K = K n o o p-hardheidsnummer

G = belasting in kg

A = totaal oppervlak in mm^2 der indruk

d = lengte van de langste diagonaal

C_p = constante verhouding tussen d en totale oppervlak A

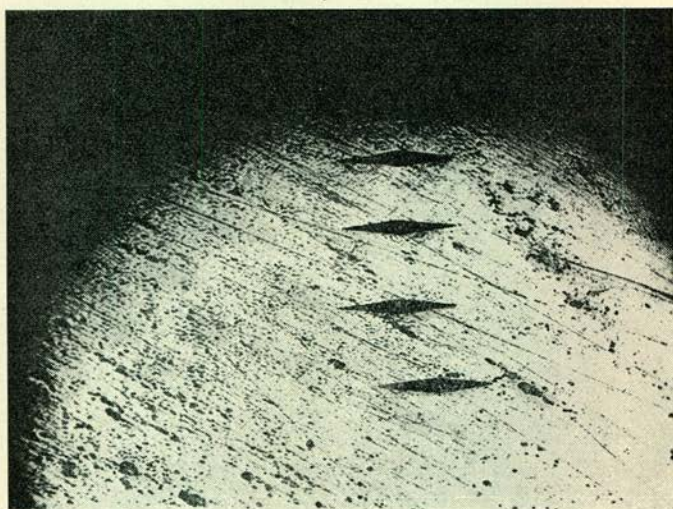


Fig. 30

De belasting bij de hardheidsbepaling volgens K n o o p duurt 20 seconden en de afmeting der diagonaal wordt microscopisch gemeten.

Het toestel van K n o o p, evenals dat van V i c k e r s en R o c k w e l l, lenen er zich toe om de hardheid van een materiaal zeer plaatselijk te bepalen. Men gebruikt deze toestellen voor het uitvoeren van zogenaamde micro-hardheidsbepalingen, waarbij de gemaakte indrukken onder het microscoop gemeten worden. Langs deze weg kan men b.v. de hardheid van tandboortjes meten of de hardheid van tandglazuur op verschillende plaatsen. Fig. 30 beeldt

de indrukken af, die met het **K n o o p**-toestel op een slijppreparaat van tandglazuur zijn gemaakt. Fig. 31 geeft als voorbeeld de af-

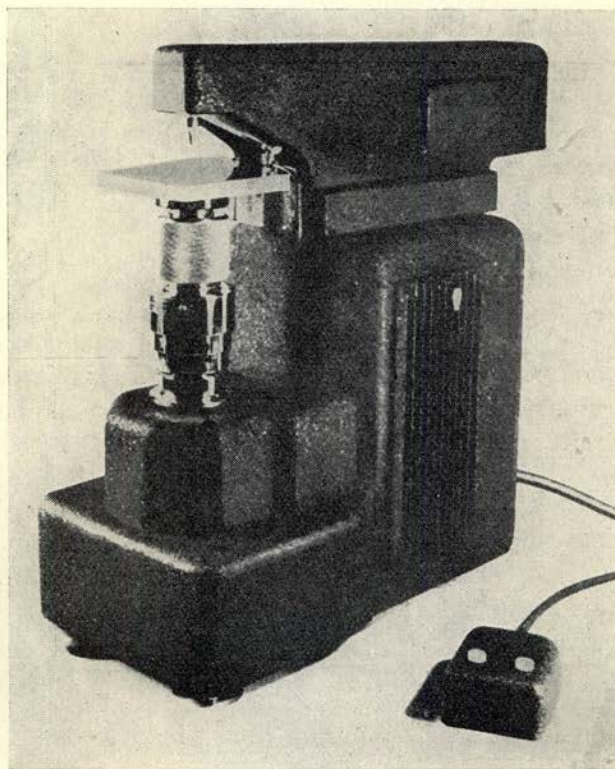


Fig. 31

beelding van een toestel waarmede dergelijke hardheidsbepalingen worden uitgevoerd.

§ 8. *De Kerfslagproef*

Een voor de beoordeling van een materiaal eveneens van belang zijnd gegeven levert de zogenaamde **kerfslagproef**, waarvoor men gewoonlijk het slingerhamertoestel van **C h a r p y** gebruikt.

Een metalen slinger, waaraan een gewicht bevestigd is, laat men van een bepaalde hoogte los. De slinger valt tegen een proefstaafje van genormaliseerde afmetingen, waarin in het midden een kleine inkerving gegeven is. Het proefstaafje wordt gebroken en de slinger zal, afhankelijk van de energie die nodig was om het proefstaafje

te breken, tot een zekere hoogte, die dan bepaald wordt, doorslingeren. De kerfslagwaarde geeft een indruk omtrent de hoeveelheid energie die een materiaal kan opvangen bij een plotselinge stoot. De waarde wordt in energie-eenheden (kilogram-meters, pound-inches) opgegeven en is zeer afhankelijk van de vorm van het proefstaafje, de aard van het apparaat en van de temperatuur, waarbij de proef genomen wordt, zodat de waarden uit verschillende laboratoria afkomstig niet altijd goed vergelijkbaar zijn.

Het materiaal kan bij deze proef op twee wijzen breken, en wel met een knapbreuk, waarbij de twee breukhelften goed tegen elkaar passen, en met een vervormings- of rekbreuk, waarbij de beide stukken niet meer tegen elkaar passen. In het laatste geval is het materiaal, alvorens te breken, eerst plastisch vervormd en aangezien arbeid kracht \times weg is, zal de kerfslagwaarde bij knapbreuk, zoals bij brosse materialen voorkomt, lager zijn dan bij rekbreuk welke bij meer plastische materialen optreedt.

§ 9. *Vermoeiingsproeven*

Bij steeds wisselende dynamische belasting treden er in materialen verschijnselen op die men onder de naam van **vermoeidheid van een materiaal** samenvat.

Bij roterende assen, bewegende machinedelen, wisselend belasten e.a. heeft de ervaring geleerd, dat niettegenstaande de belasting zelfs onder de elasticiteitsgrens van het materiaal bleef, soms plotseling een breuk optreedt. Het verraderlijke is dat deze vermoeidheidsbreuken zonder voorafgaande vervormingen, zelfs bij het taaiste materiaal voorkomen. Prothetische en orthodontische apparaten worden door de kauwfunctie in de mond wisselend belast en inderdaad komen hier vermoeidheidsbreuken voor.

Bij een breuk door vermoeidheid zijn er aan het breukvlak meestal twee delen te onderscheiden. Het „vermoeidheids”breukvlak zelf, dat zich tijdens de belastingschommelingen langzaam gevormd heeft; het is vrij glad en gaat meestal uit van een onregelmatigheid in het oppervlak of van een fout in het materiaal, waaromheen het schelpvormige ringen vertoont. Het andere deel van het breukvlak is het restbreukvlak, dat bij het plotselinge doorbreken van de rest van de doorsnede ontstond; dit ziet er als een normale breuk uit.

De Duitse spoorwegingenieur W ö h l e r was de eerste die de vermoeidheidsverschijnselen systematisch bestudeerde.

De Wöhler-kromme bij een vermoeiingsproef is de kromme, die bij verschillende belastingen van het materiaal aangeeft, hoe vaak men een as kan laten draaien, of hoe vaak men een staaf afwisselend op druk of trek kan belasten, dan wel een staaf kan heen en weer buigen enz. enz. alvorens het materiaal breekt.

Uit de Wöhler-kromme blijkt dat bij iedere wissel-belasting er een belasting is waarbeneden geen vermoeiingsbreuk meer optreedt, hoe vaak men de belasting ook laat wisselen. Men noemt dit de **wisselsterkte** van het materiaal en spreekt daarbij naar gelang van de aard der belasting van de **wisseltreksterkte**, de **wisselbuigsterkte** en de **wisselwringsterkte**.

Wordt een materiaal afwisselend belast en ontlast, dan wisselt de belasting tussen nul en maximaal, men krijgt dan belasting-sprongen. Een voorbeeld van een dergelijke sprongbelasting treft men bij de orthodontische en prothetische apparaten in de mond, waarvan het materiaal bij de kauwfunctie afwisselend van onbelast op doorbuiging wordt belast. Met behulp van de Wöhler-kromme voor een dergelijke wisselende belasting kan men ook hier de vermoeidheidsgrens bepalen, waaraan de naam van de **sprongsterkte** gegeven is. Deze sprongsterkte ligt hoger dan de wisselbuigsterkte van hetzelfde materiaal.

Een vermoeidheidsbreuk begint vaak bij een scherpe overgang van de constructie of bij een kerfje in het materiaal. De spanningsconcentraties, die daarbij optreden, zijn de oorzaak van het begin der breuk. Hiermede in verband staat de waarneming dat gepolijste staven een hogere vermoeidheidsgrens dan ruwe staven hebben.

Als een materiaal onder een statische belasting staat en bovendien een wisselende dynamische belasting ondervindt, dan **superponeert** deze wisselspanning als een rimpelspanning op de spanning der statische belasting. Het is begrijpelijk, dat de vermoeidheidsgrens van een dergelijk, reeds statisch belast materiaal lager ligt dan die van het onbelaste materiaal. Deze statische belasting kan ook door **inwendige spanningen** in het materiaal veroorzaakt worden, welke inwendige spanningen vooral in kunstharsprothesen zeer vaak voorkomen. De vermoeidheidsgrens van zo'n prothese is dan aanmerkelijk lager dan die van een prothese, waarin geen of minder inwendige spanningen aanwezig zijn.

(Wordt vervolgd)