

Nijverheidsorganisatie T.N.O.
INSTITUUT T.N.O. VOOR BOUWMATERIALEN EN BOUWCONSTRUCTIES.
I.B.B.C.

Lange Kleiweg 5,
Rijswijk (Z.H.).

Postbus 49, Delft.
Tel.: 01730-38222.

RAPPORT NO.: BI-65-87

OPDRACHT NO.: 15 k 52.

OKTOBER 1965.

HET BEPALEN VAN DE LENGTE EN VAN SCHEURVORMING BIJ GEHEIDE PALEN.

Werkzaamheden ten behoeve van opdrachtgevers worden slechts uitgevoerd op voorwaarde, dat de opdrachtgever afstand doet van ieder recht op aansprakelijkstelling en zich verplicht tot vrijwaring voor iedere aansprakelijkheid jegens derden, een en ander behalve indien en voor zover grove schuld en/of opzet wordt aangetoond.

NOTATIES

		dimensie
a	snelheid van de spanningsgolf	cm/sec
E	elasticiteitsmodulus	kgf/cm ²
F	oppervlakte	cm ²
g	versnelling van de zwaartekracht	cm/sec ²
h	valhoogte	cm
K	veerconstante	kgf/cm
k	beddingsconstante	kgf/cm ³
l	paallengte	cm
P	kracht	kgf
V	snelheid van de hamer	cm/sec
γ	soortelijk gewicht	kgf/cm ³

INLEIDING.

Om de lengte van in de grond geheide palen te controleren, werd een kort durende spanningsgolf door een stootbelasting, bijv. een klap met een hamer op de kop van een paal, opgewekt en de verplaatsing daarvan gemeten. De spanningsgolf zal met een snelheid $a = \sqrt{\frac{Eg}{\gamma}}$ door de paal lopen. Als de mantelwrijving geen invloed heeft, dan zal de verplaatsing van de paalkop constant blijven nadat de spanningsgolf is gepasseerd langs het meetpunt, totdat de golf aan de punt van de paal is gereflecteerd en omhoog lopend opnieuw het meetpunt passeert. Uit de tijd die tussen de twee bewegingen van het meetpunt verloopt, is de lengte van de paal te bepalen. In werkelijkheid bleek dat o.a. mantelwrijving en scheurvorming ook invloed hadden op de bewegingen. Uit de gemeten verplaatsingen was het mogelijk een indruk te krijgen over de plaats en de mate van scheurvorming. In enkele gevallen werd bij ontgraving geconstateerd dat de veronderstellingen ten aanzien van de scheurvorming met de werkelijkheid overeenkwamen.

DE MEETMETHODE.

De spanningsgolf wordt in de paal opgewekt door een klap met een hamer. De hamer weegt 5 kgf en de klap wordt zodanig gegeven, dat een verplaatsing ontstaat van ongeveer 20μ à 50μ . Hiervoor is vereist dat de hamer een snelheid heeft van ongeveer 400 cm/sec op het ogenblik van treffen. Dit kan ook worden bereikt door een gewicht te laten vallen van

$$h = \frac{v^2}{2g} = \frac{400^2}{2 \cdot 1000} = 80 \text{ cm hoogte.}$$
 De lengte van de hamerkop bepaalt de lengte (of tijdsduur) van de spanningsgolf. Bij een lengte van de hamerkop van 17,5 cm wordt de spanningsgolf in de paal 35 cm lang. De verplaatsing van de paalkop wordt gemeten met een Philips absolute verplaatsingsopnemer. Deze zet de mechanische bewegingen, die binnen 0,1 sec hun maximum bereiken, om in een elektrisch verschijnsel. De beweging wordt geregistreerd met een snelheid van 200 cm/sec door middel van een U.V.-schrijver.

TE VERWACHTEN MEETRESULTATEN.

Als de hamer de paalkop treft, heeft hij een snelheid van ongeveer $V_0 = 400 \text{ cm/sec}$. De spanning welke hierdoor in de betonpaal wordt opgewekt, is afhankelijk van de verhouding

van $\frac{EF}{a}$ voor de paal en de hamer. Voor de paal is ¹⁾

$$\frac{EF}{a} \approx \frac{4 \cdot 10^5 \cdot 1600}{4 \cdot 10^5} = 1600 \frac{\text{kg/sec}}{\text{cm}}$$

en voor de hamer is

$$\frac{EF}{a} = \frac{2,1 \cdot 10^6 \cdot 40}{5 \cdot 10^5} = 168 \frac{\text{kg/sec}}{\text{cm}}$$

De kracht tussen hamer en paal is bij deze verhouding ongeveer

$$P = \frac{EF}{a} \cdot V_0 = 168 \cdot 400 = 67 \text{ ton.}$$

De spanning in de paal is $\sigma = \frac{67000}{1600} = 42 \text{ kgf/cm}^2$. Bij een golflengte van 35 cm is een verplaatsing te verwachten van

$$\Delta l = \frac{42 \cdot 35}{4 \cdot 10^5} = 37 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 37 \mu$$

De golflengte is tweemaal de hamerlengte, omdat de hamer opspringt als de spanningsgolf de hamer tweemaal (heen en terug) doorlopen heeft.

Als de paal alleen gesteund wordt bij de voet, dan loopt de spanningsgolf zonder af te nemen door de paal heen. De verplaatsing van de paalkop ontstaat als de spanningsgolf passeert en blijft constant tot de golf na beneden te zijn teruggekaatst, weer boven is.

Als de paalvoet op een zeer harde ondergrond staat (bijv. een stalen massa of een zeer grote betonnen voet), dan reflecteert de drukgolf als een nieuwe drukgolf, waarin de paaldeeltjes een snelheid hebben, welke tegengesteld is aan - en even groot als - die van de heengaande golf. De verplaatsing is dan ook tegengesteld.

Als de paalvoet vrij zweeft, dan reflecteert de drukgolf als een trek golf, waarin de paaldeeltjes een snelheid hebben die dezelfde richting heeft en even groot is als de heengaande golf.

¹⁾ De afleiding van de gebruikte formules is o.a. te vinden in het artikel van Prof.Dr.Ir. G. de Josselin de Jong: "Wat gebeurt er in de grond tijdens het heien" in De Ingenieur - 22-6-1956, blz. B.77 - 68 jrg. no. 25.

Bij de paal op een zeer grote betonnen voet is de verplaatsing van een punt onder de top van de paal getekend in fig. 1. De drukgolf door de klap met een hamer geeft een verplaatsing naar beneden, die constant blijft gedurende $2 \frac{1}{a}$ sec (l = paallengte, a = snelheid van de golf in de paal). Daarna komt de drukgolf terug en veroorzaakt een tegengestelde verplaatsing. Weerkaatsing aan het vrije bovineinde van de paal veroorzaakt opnieuw een verplaatsing naar boven en een trek golf die naar beneden loopt, enz. Bij een paal met een vrij zwevende voet wordt de verplaatsing zoals aangegeven in fig. 2. Hierbij is de snelheid van de paaldeeltjes steeds gelijk gericht, zodat bij iedere passing van de spanningsgolf de verplaatsing met een gelijke waarde wordt vergroot.

In werkelijkheid is de paal niet over de volle lengte vrij, maar wordt door de grond gesteund. Door de mantelwrijving wordt de kracht in de paal minder en beweegt de paal weer omhoog. De grond werkt ongeveer als een veer onder de paal. De verplaatsing van de paal op een veer is getekend in fig. 3. De grootte van de spanningsgolf neemt af omdat een deel van de kracht nodig is om de veer in te drukken. Door de veer wordt een langzaam verlopende kracht op de paal uitgeoefend, waardoor de paal wordt teruggedrukt. De verplaatsing neemt langzaam af en wordt zelfs negatief. De paal blijft op de veer natrillen. De mantelwrijving werkt onmiddellijk na het passeren van de spanningsgolf en veroorzaakt een verplaatsing zoals in fig. 4 is aangegeven. Als de paalvoet niet is gesteund, is de verplaatsing aan de top door de gereflecteerde golf ongeveer tweemaal de verplaatsing die de paal op dat moment had (zie fig. 4).

Ook een paal, die door een zeer grote scheur praktisch een vrij uiteinde heeft gekregen, zal dit beeld te zien geven.

Als de paaldoorsnede slechts voor een deel is gescheurd, zal ook maar een deel van de spanningsgolf teruglopen, zodat slechts een kleine extra verplaatsing aan de kop zal worden geconstateerd.

ENIGE MEETRESULTATEN.

In de figuren 5, 6, 7, 8 en 9 zijn de verplaatsingen van 5 palen gegeven. De horizontale as is de tijd-as ($2 \text{ cm} = 1/100 \text{ sec}$) en de vertikale as geeft de verplaatsing ($1 \text{ cm} \approx 10 \mu$). Omdat de loop-

snelheid van de golf in de paal ongeveer 4000 m/sec is, zal de spanningsgolf een paal van 20 m lengte in $\frac{2 \cdot 20}{4000} = 1/100$ sec heen en terug doorlopen. De reflectie bij de paalpunt is dus bij een 20 m lange paal in de figuren op 2 cm voorbij het beginpunt van de verplaatsing te verwachten. In de figuren komt dus 1 mm op de horizontale as overeen met 1 m in werkelijkheid. Bij een herhaling van de proef op dezelfde paal geeft iedere slag een zeer goed reproducerend beeld te zien. In fig. 10 zijn de bewegingen ten gevolge van twee slagen door elkaar getekend. Niet alleen het beeld in de eerste cm is hetzelfde, maar ook het beeld nadat de spanningsgolf enige malen de paal heeft doorlopen.

Getracht is de kracht, waarmee de hamer de paal treft, te meten door een drukdoos op de paal te zetten en op de kogel van de drukdoos te slaan. De kracht in de drukdoos wisselde snel omdat de drukdoos zelf zich als veer gedroeg met de bovenplaat als massa. Dit gaf geen beeld van de kracht.

Een indruk van de kracht wordt verkregen uit de maximale verplaatsing bij een klap. Volgens de berekening is 37μ te verwachten. Deze waarde varieert bij de meting tussen 20 en 50μ , omdat niet altijd even hard wordt geslagen. De orde van grootte is goed.

De golflengte is bij deze proeven niet gemeten. Wel is een dergelijke proef uitgevoerd in het laboratorium. Een stalen staaf van 10 m lengte werd horizontaal opgehangen aan dunne draden van 2 m lengte. Een andere staaf met een lengte van 1 m werd tegen de lange staaf gestoten. Hierdoor ontstond in de lange staaf een spanningsgolf. Door middel van een rekstrookje werd de spanning in de staaf bepaald en geregistreerd met een oscilloscope. Het rekstrookje bevond zich op 2 m van de plaats waar de staaf werd aangestoten. De spanning is weergegeven in fig. 11. In deze figuur is in verticale richting de spanning uitgezet en in horizontale richting de tijd. In deze figuur komt de afstand tussen 2 streepjes van de verdeling op de oscilloscope overeen met 2,00 m in werkelijkheid. De spanningsgolf blijkt rechthoekig te zijn en duidelijk een lengte van 2 m te bezitten. Het wisselen van de spanning in trek en druk aan de einden van de staaf is onmiddellijk te zien. Ook is iets te

zien van het afvlakken van de spanningsgolf door inwendige demping, door het afstaan van spanning aan de ophanging en andere oorzaken. De spanning kwam overeen met de berekende spanning.

De verplaatsing van een paal door het heen en weer lopen van de spanningsgolf is schoksgewijs. Dit is geconstateerd bij een laboratoriumproef door de beweging op een snel draaiende film vast te leggen en deze film vertraagd te projecteren. Op een bouwwerk is op een betonpaal, die in de takels hing, in axiale richting een klap gegeven. De beweging is met een absolute verplaatsingsopnemer gemeten en weer gegeven in fig. 12. Duidelijk blijkt het schoksgewijs verplaatsen zoals in fig. 2 of 3.

In fig. 5 is de verplaatsing gegeven van een gave paal zonder verzwaarde punt. De gemeten verplaatsing komt uitstekend overeen met die van fig. 4. Duidelijk zijn de reflecties van de paalpunt te zien.

Fig. 6 geeft het beeld van de verplaatsing van een paal met een scheurtje. De voet van de paal geeft een duidelijke reflex. Het scheurtje bevindt zich op ongeveer 4,10 m onder het meetpunt. De grootte van het scheurtje is moeilijk aan te geven. Bij ontgraven van enige palen bleek dat scheurtjes van 0,1 à 0,2 mm een extra verplaatsing geven, ongeveer zoals die van fig. 6.

Fig. 7 geeft het beeld van een paal die op 2,5 m en 4 m een kleine scheur heeft, maar op 7 m onder het meetpunt een zeer grote scheur vertoont. Deze paal is niet uitgegraven, maar waarschijnlijk is dit een scheur van 0,5 à 1 mm (dus vloeien van de wapening). Het is bij deze paal niet zeker dat de voet nog is aan te geven. De tweede grote extra verplaatsing bevindt zich op 14 m onder het meetpunt. Dit kan de paalvoet zijn, maar waarschijnlijker is het dat de spanningsgolf voor de tweede maal op de scheur is gereflecteerd.

Fig. 8 geeft een soortgelijk beeld als fig 7. Hier is een ernstige scheur te zien op 6 m onder het meetpunt.

De verplaatsing van een paal met een zeer zware voet (Frankspaal) is gegeven in fig. 9. Deze paal vertoont enige kleine scheuren. De verplaatsing die door de reflex van de spanningsgolf aan de paalvoet wordt veroorzaakt, is bij deze paal tegengesteld aan die ten gevolge van de impuls. Dus ongeveer als in fig. 1. Bij

deze paal werd de klap niet op de paalkop, maar op de funderingsbalk over de paalkoppen gegeven.

In fig. 10 zijn de verplaatsingen van een paal zonder grote scheuren ten gevolge van twee klappen uitgezet. De beweging van de paal, nadat de golf enige malen door de paal is gelopen, is bij beide klappen praktisch gelijk. Het lijkt op een massa die uittrilt. De frequentie is ongeveer 60 Hz. De massa van de paal is 6 ton. Hieruit volgt een veerconstante voor de paal van $K = 60^2 \cdot (2\pi)^2 \cdot 6 = 8,5 \cdot 10^5$ kgf/cm. De paal zal volgens deze waarde ten gevolge van 100 ton ongeveer 1,2 mm zakken. Dit is een redelijke waarde.

Als de vering door de mantelwrijving wordt geleverd, dan verschuift de grond 1 cm door een spanning van $\frac{8,5 \cdot 10^5}{25 \cdot 10^4} = 3,4$ kgf/cm².

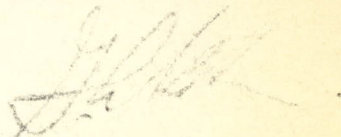
Hierin is $25 \cdot 10^4$ cm² het manteloppervlak van de paal. Dit is vergelijkbaar met een beddingsconstante van $k = 6,8$ kgf/cm³.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat ter controle drie palen werden ontgraven. Hierbij werd geconstateerd dat de gemeten afstand vanaf de paalkop en de grootte van de scheuren goed met de werkelijkheid overeenkwamen.

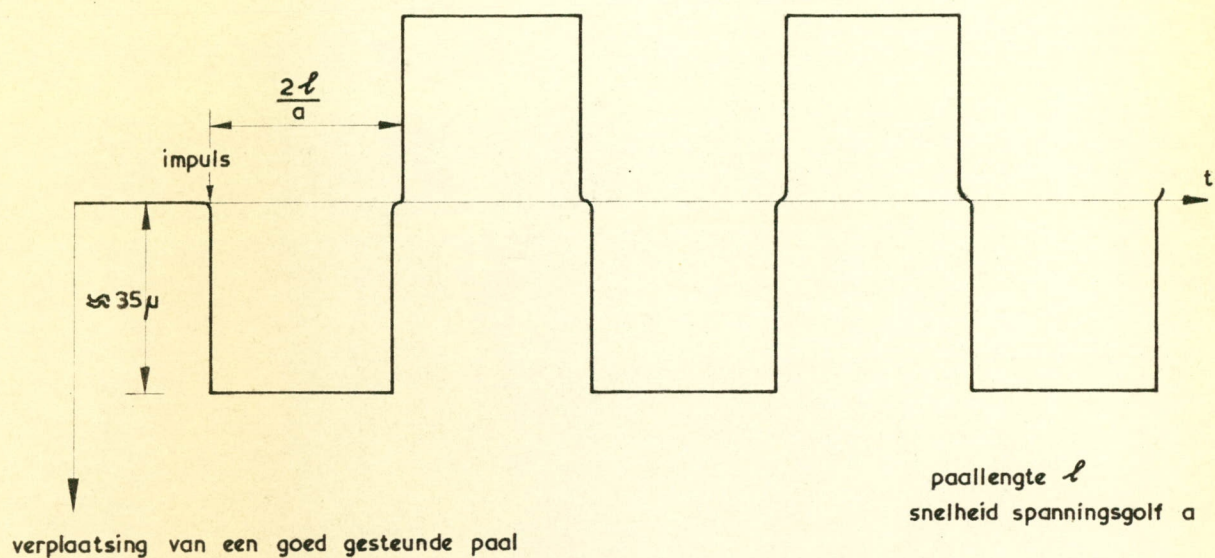
ANDERE MEETMOGELIJKHEDEN.

Een andere mogelijkheid om scheuren te constateren of om de paallengte te bepalen, is het aanstoten van de paal met een snel wisselende kracht. Als de frequentie van de aanstootkracht overeenkomt met de frequentie waarmee de spanningsgolf heen en weer loopt in de paal, dan zal de spanningsgolf bij iedere wisseling versterkt worden. De paal wordt dan aangestoten in een eigenfrequentie in langsrichting. Deze eigenfrequentie zal duidelijk te constateren zijn als de verplaatsingen of de rekken worden gemeten. Op deze wijze is de paallengte te bepalen. Ook reflecties op scheuren zijn op deze wijze te meten.

INSTITUUT T.N.O. VOOR
BOUWMATERIALEN EN BOUWCONSTRUCTIES.



(H. van Koten)



de spanningsgolf weerkaatst als drukgolf

fig. 1

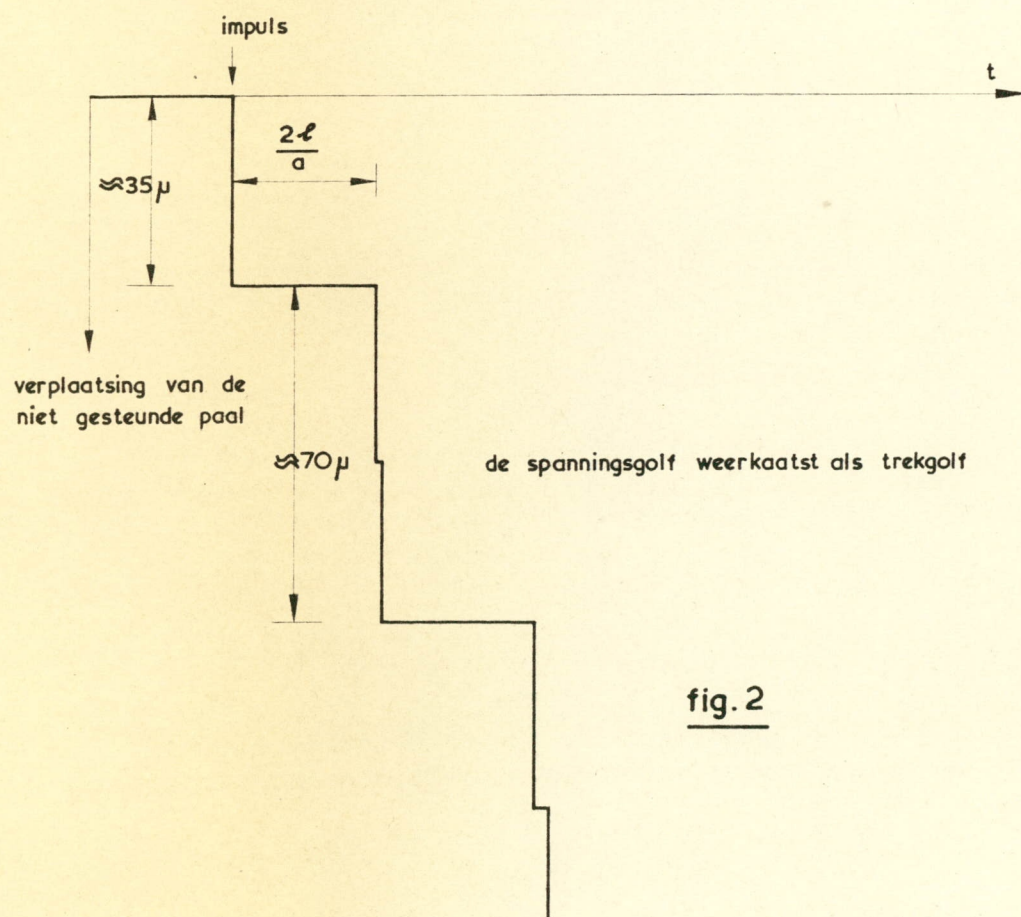


fig. 2

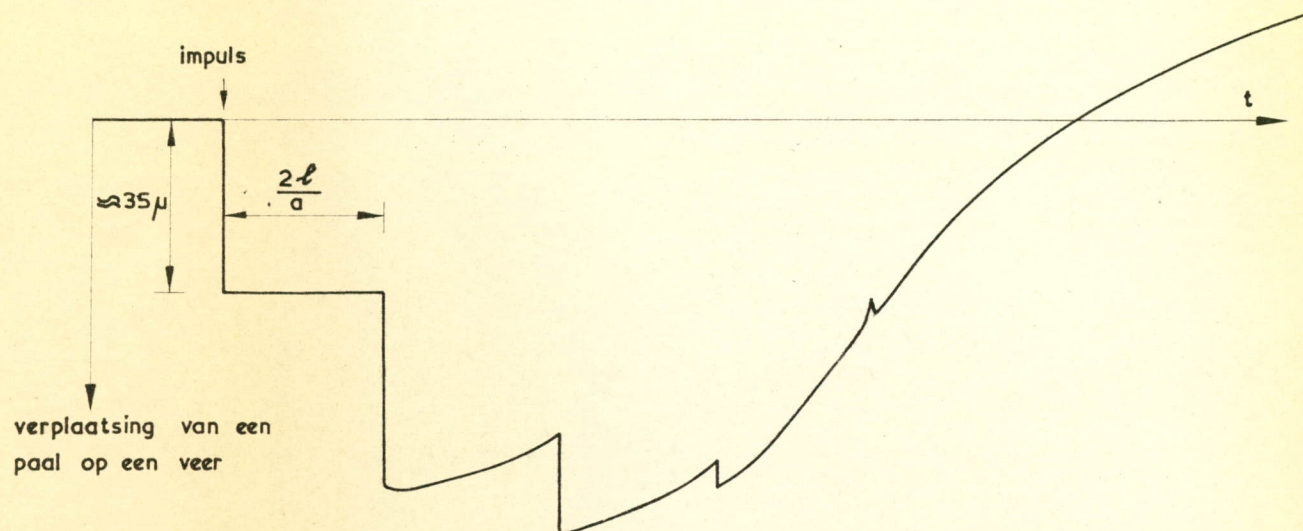


fig. 3

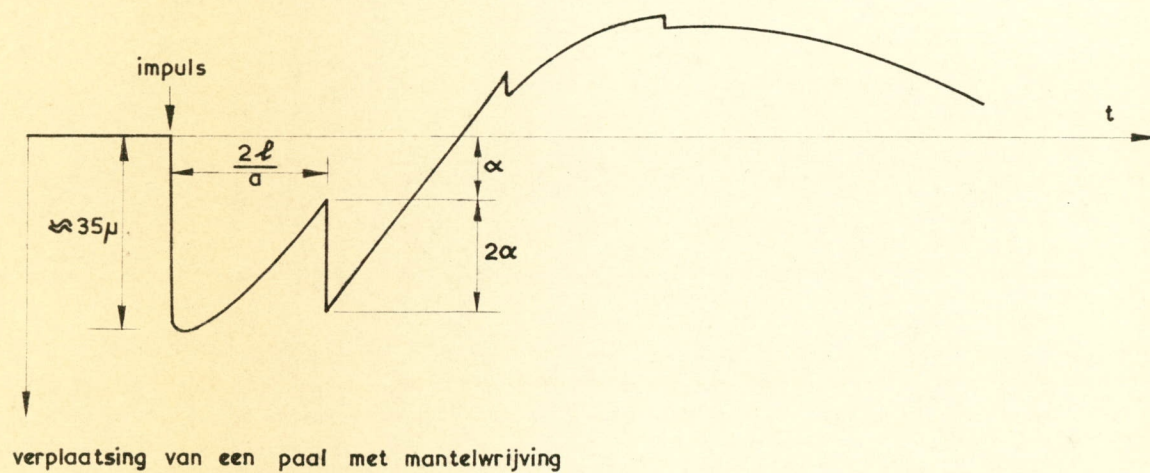


fig. 4

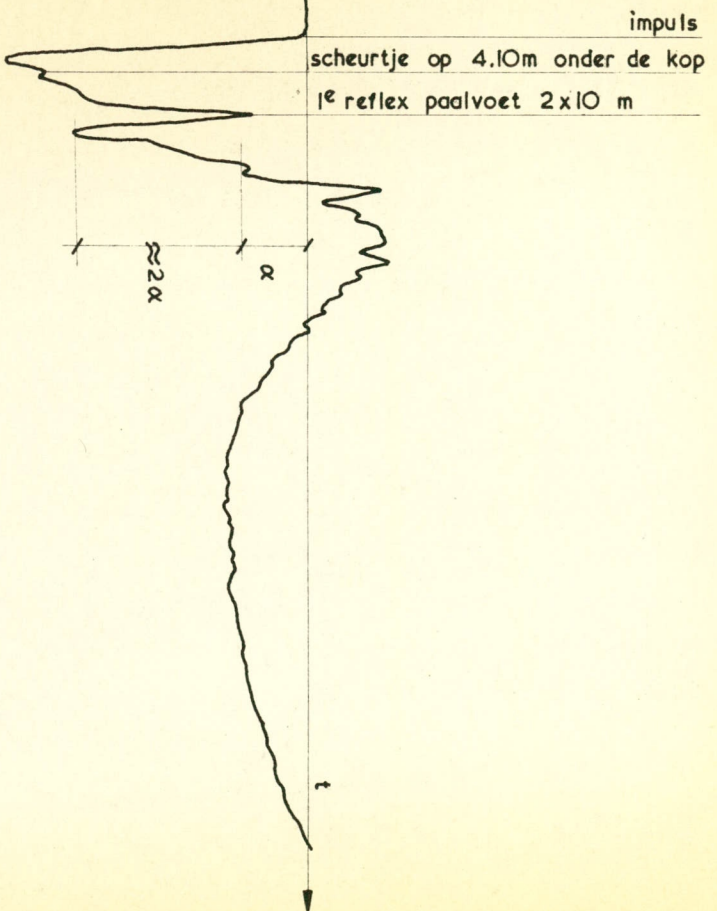
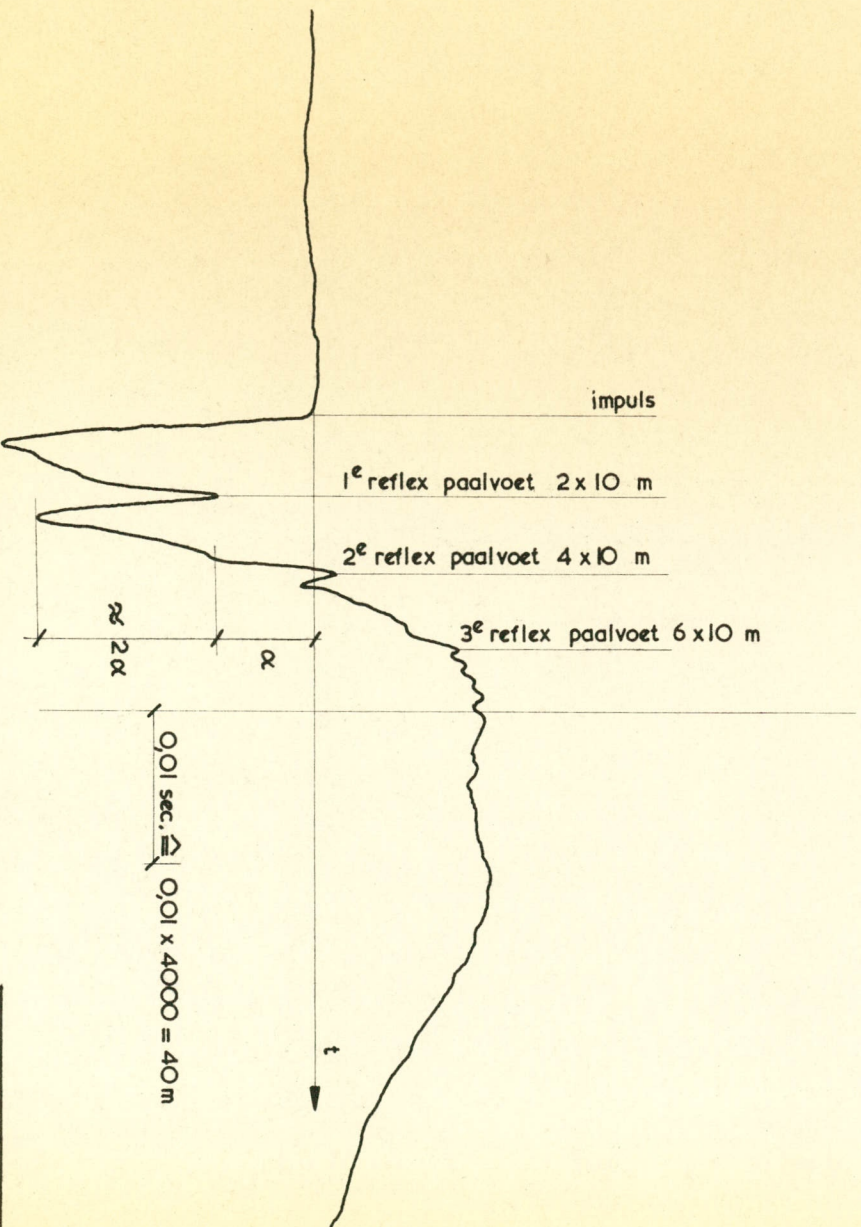


fig. 6



gemeten verplaatsing van een paal zonder scheuren.

fig. 5

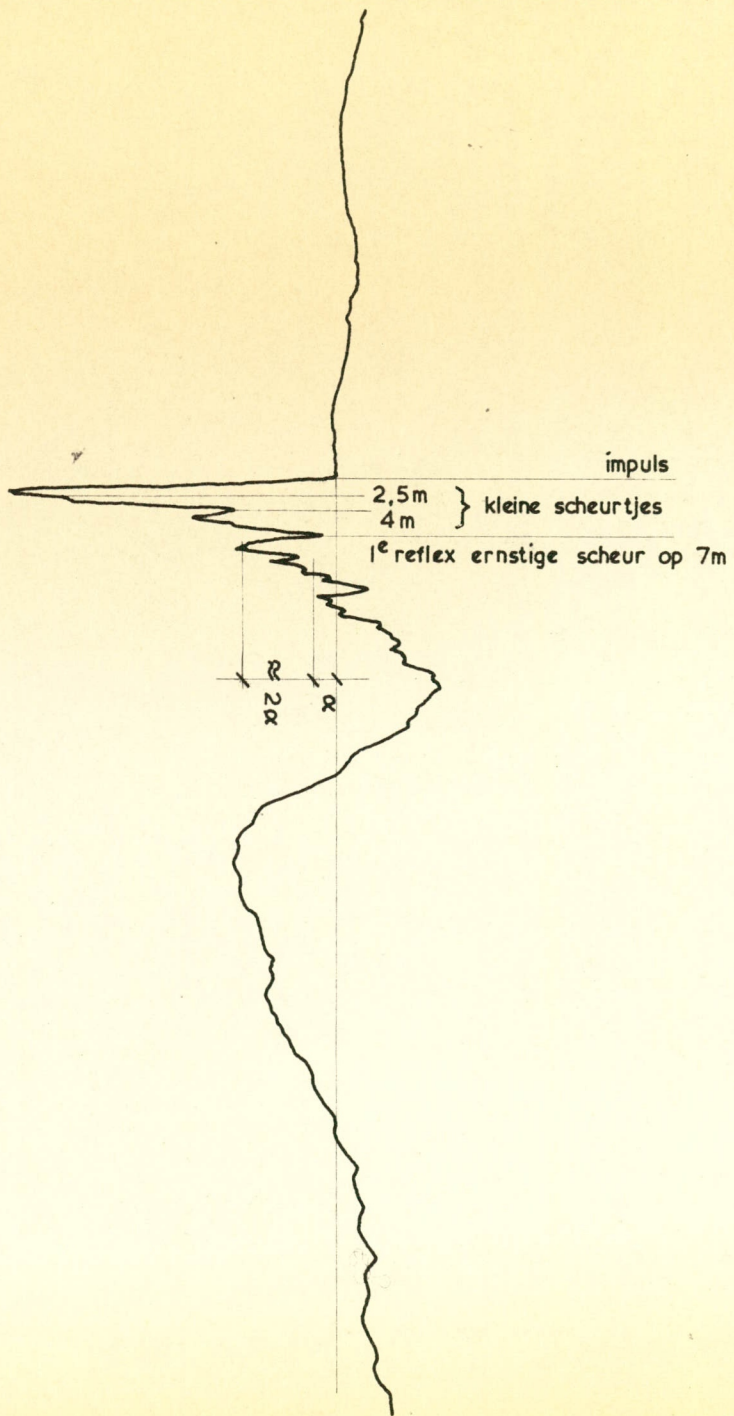


fig. 7

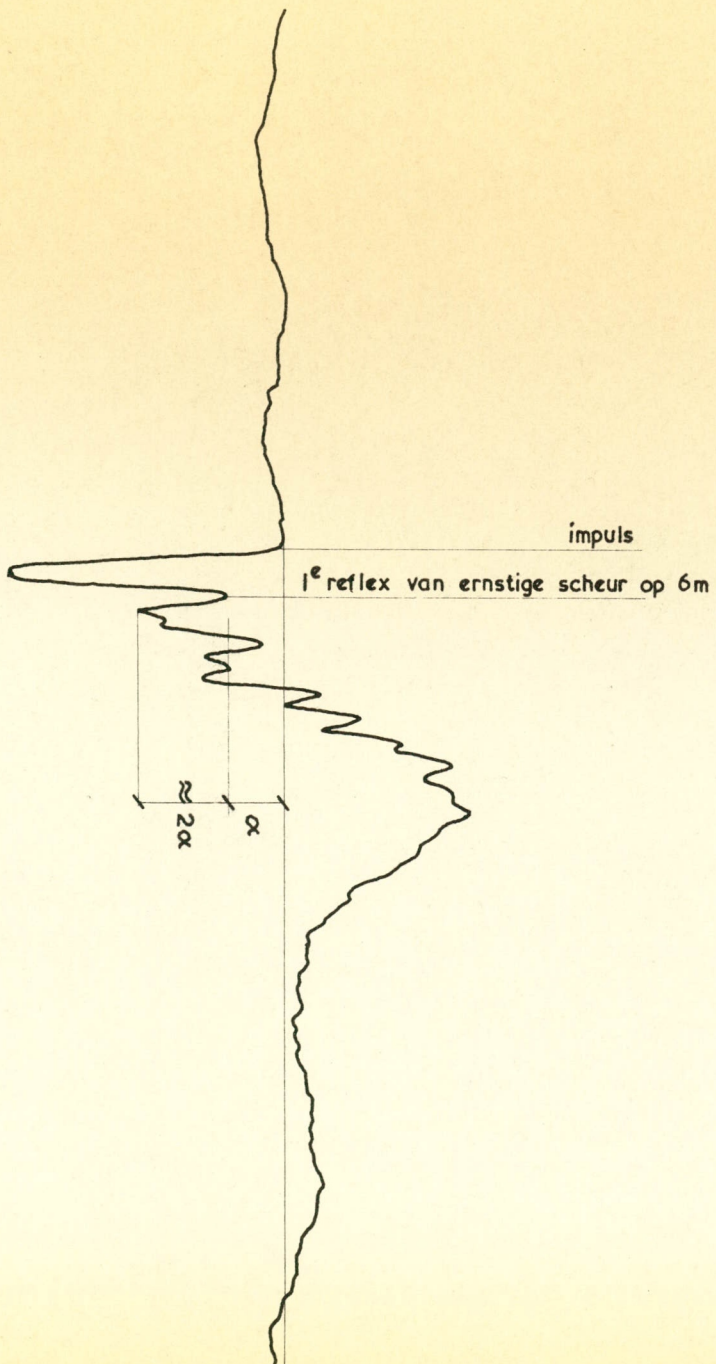


fig. 8

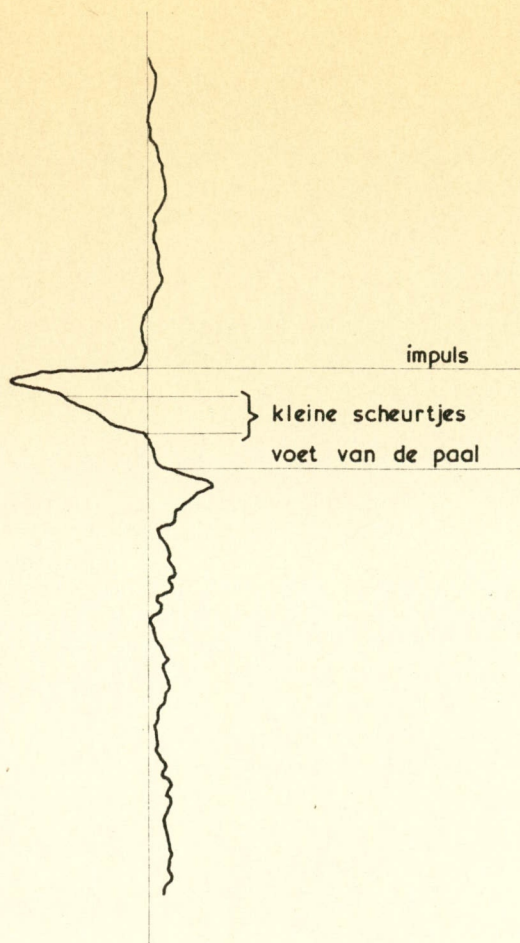
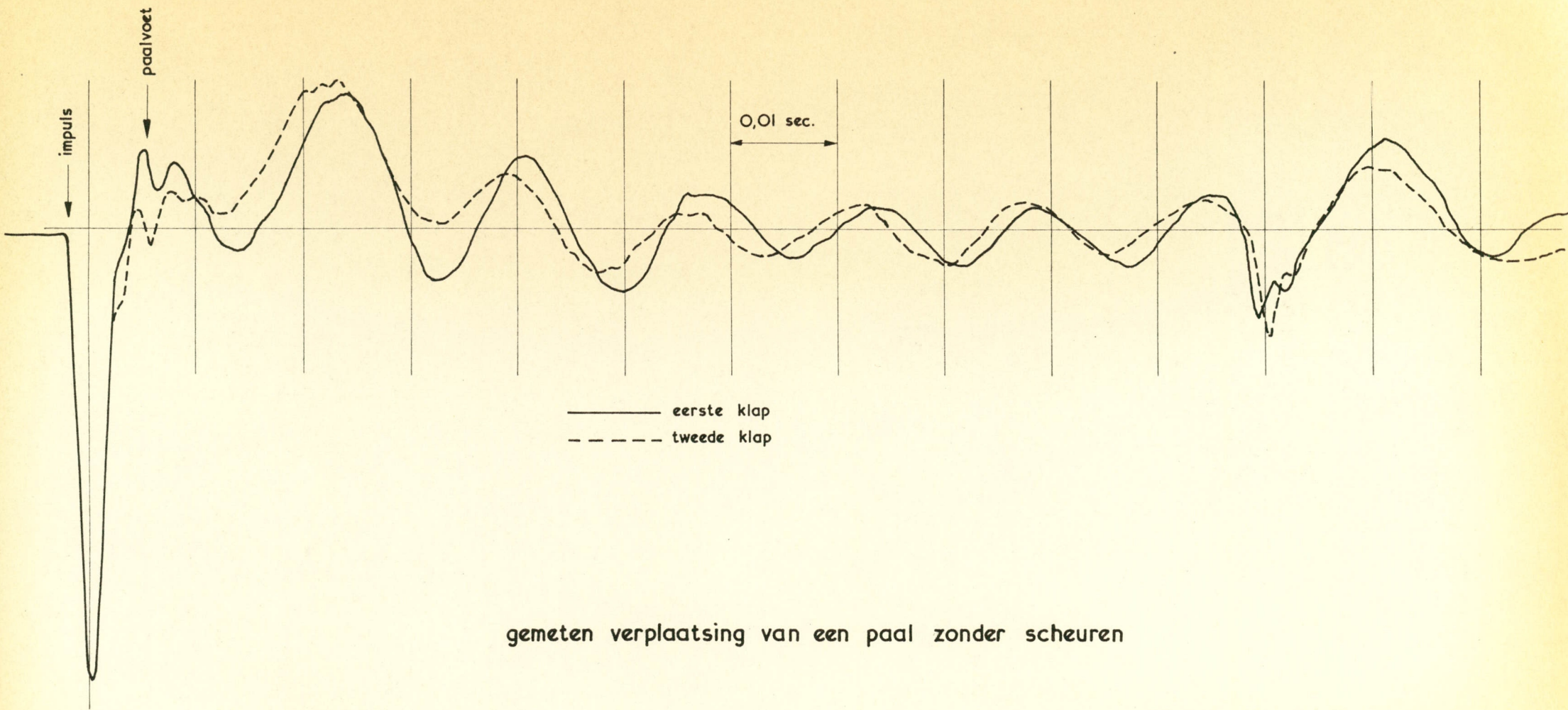
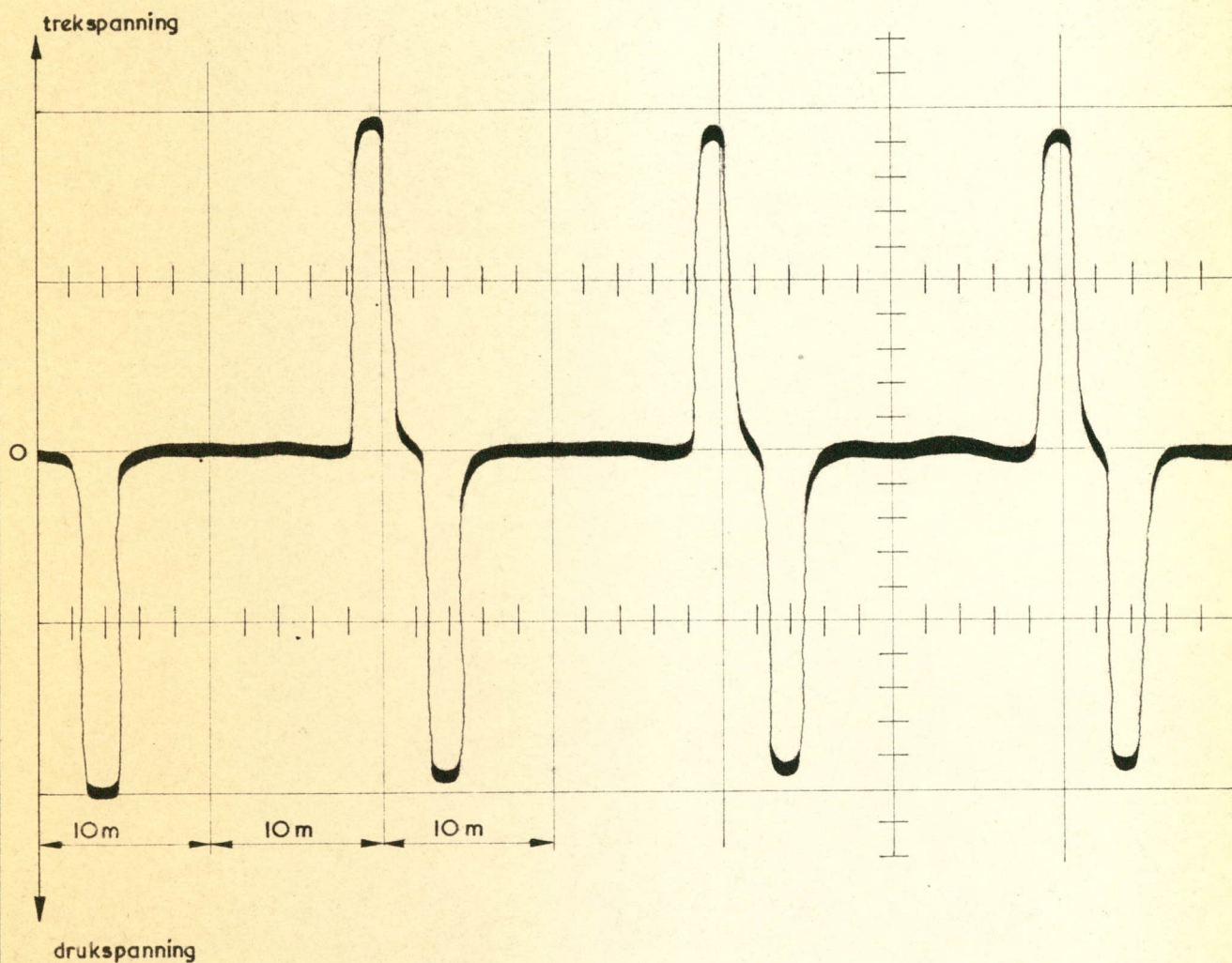


fig. 9

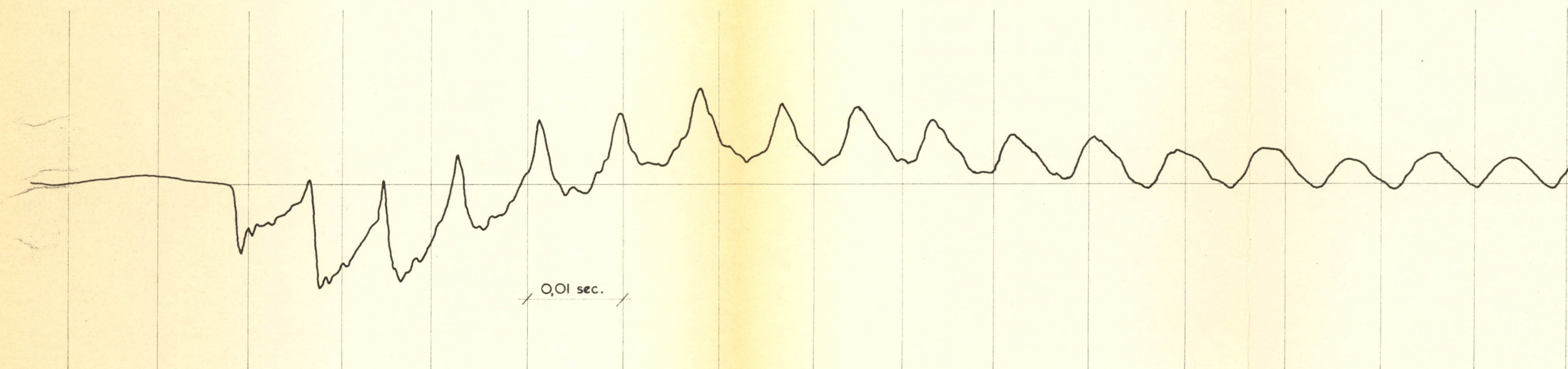


gemeten verplaatsing van een paal zonder scheuren

fig. 10



de spanningsgolf in een lange stalen staaf.



gemeten verplaatsing van een horizontaal opgehangen paal.

fig.12

