

EEN HYPOTHESE TER VERKLARING VAN VERMOEIINGS-VERSCHIJSSELEN, OPTREDEND IN TAAIE STAALSOORTEN

Op grond van de voortschrijdende rekvermindering, welke optreedt in taaie staalsoorten, die boven de vermoeiingsgrens zijn belast, wordt een arbeidshypothese opgesteld. Daarbij wordt een gedeelte van de dempingsarbeid aansprakelijk gesteld voor de breukvorming. De mathematische formulering van de hypothese maakt het mogelijk om de bekende vermoeiingskarakteristieken in formules vast te leggen. Ook zijn aan de hand van de theorie verschillende merkwaardige fenomenen, welke bij vermoeiingsbeproevingen optreden, te verklaren, zoals het „hochtrainieren“; de verlaging van de vermoeiingssterkte bij overbelasting; de grote spreidingen, die in de regel bij vermoeiingsonderzoekingen optreden. Tenslotte volgt de toepassing van de theorie op dynamisch belaste spoorwegbruggen.

I. Inleiding

Tot de merkwaardigste fenomenen, waarvoor in technische kringen grote belangstelling bestaat, behoren wel de zogenaamde vermoeiingsverschijnselen, die in constructies, die wisselend belast worden, kunnen optreden. Alhoewel waarschijnlijk alle materialen bij dynamische overbelasting vermoeiing zullen vertonen, zal in het hierna volgende de aandacht uitsluitend gericht worden op één van de belangrijkste bouwmaterialen en wel het taaie staal, waartoe ook het bekende St. 37 behoort. Deze grote belangstelling in technische kringen is niet zonder reden; immers de vermoeidheidsbreuk treedt plotseling, zonder enige voorafgaande waarschuwing, op. Er zijn tevoren praktisch nooit plastische vervormingen aan te tonen, die op overbelasting zouden kunnen wijzen. Verder treedt de dynamische breuk op bij spanningen, die belangrijk lager liggen dan de breukspanningen, die bij de statische trekproef waargenomen worden. Uitgebreide experimenten hebben zelfs uitgewezen dat dynamische breuken kunnen voorkomen bij spanningen, die niet onbeduidend beneden de vloeigrens liggen. In 1949 werd in de Ingenieur (lit. 1) in het artikel „Onderzoek van staalconstructies en vermoeiingsverschijnselen” gewezen op een serie proefnemingen, die afweken van de gebruikelijke op dit gebied en die merkwaardige feiten aan het licht brachten. De daarin beschreven experimenten benevens de daaraan ten grondslag liggende gedachtengang vormden een uitbreiding en voortzetting van een reeks Russische waarnemingen, waarover melding werd gemaakt door de hoogleraar Streletzki, (lit. 2), die mededeelde, dat in Rusland vaak waargenomen was, dat proefstukken, vervaardigd uit materiaal afkomstig van de hoofdliggers van zwaar belaste spoorwegbruggen in het algemeen lagere rek- en vermoeiingscijfers vertoonden, dan die,

vervaardigd uit weinig belaste onderdelen, zoals windverbandstaven en dat dit verschijnsel in West-Europa minder bekend was. Deze mededeling vormde de grondslag van de hieronder volgende hypothese:

„Het is denkbaar, dat de rek in staal door wisselbelastingen boven bepaalde spanningsgrenzen, langzamerhand verdwijnt en dat een vermoeiingsbreuk optreedt op het moment, dat die rek juist geheel verdwenen is.”

Bij de in eerstgenoemd artikel beschreven proeven-reeks werd aan een kleine honderd proefstaven onmiskenbaar aangetoond dat Streletzki gelijk had. Niet alleen in bruggenmateriaal kon achteruitgang in de rek waargenomen worden, maar eveneens in materiaal dat in een trek-druk-pulsator aan wisselbelasting blootgesteld en, dat vóór een vermoeiingsbreuk optrad, in een statische trek-machine verder tot breuk toe belast werd. Voorts bleek de rek-achteruitgang een functie te zijn van het aantal door de pulsator volbrachte lastwisselingen. Over het algemeen werden tamelijk grote spreidingen in de waarnemingsuitkomsten geconstateerd.

Stel dat een proefstaaf, uit een bepaald materiaal vervaardigd, na n spanningswisselingen van een bepaald spanningsinterval in de pulsator breekt en stel dat daarna aan vier proefstaven van hetzelfde materiaal op de volgende wijze de rek-achteruitgang wordt bepaald. Staaf 1 wordt geheel niet aan wisselbelasting blootgesteld. Staaf 2 wordt gedurende $\frac{1}{3} n$ lastwisselingen van hetzelfde spanningsinterval in de pulsator belast en is dus nog niet gebroken. Daarna wordt staaf 3 gedurende $\frac{2}{3} n$ lastwisselingen en staaf 4 gedurende iets minder dan n lastwisselingen op dezelfde wijze belast. Staaf 4 is dan nog juist *niet* gebroken. Worden al deze proefstaven in de statische trek-machine daarna tot breuk belast, dan worden vier rek-diagrammen verkregen, zoals in fig. 1 staan aangegeven. Hieruit kan duidelijk worden geconstateerd, dat de lineaire rek, dit is de rek vanaf het begin der trekproef tot aan het moment waarop insnoering optreedt, duidelijk kleiner wordt en wel als een functie van het aantal volbrachte spanningswisselingen. Bij staaf 4 is die lineaire rek geheel verdwenen en ontstaat direct na de elastische vormverandering insnoering. Merkwaardig is, dat de contractie-rek, dit is de rek, die optreedt vanaf het moment van insnoering tot de breuk en die dus uitsluitend een gevolg is van het insnoeringsverschijnsel, practisch niet verandert, dat dus, althans zoals tot nu toe werd waargenomen, alleen de lineaire rek verdwijnt. Het moet niet onwaarschijnlijk worden geacht, dat kort voor de vermoeiingsbreuk ook de contractie-rek in zeer snel tempo verdwijnt. Het zal echter uitermate moeilijk zijn om dit laatste feit nader te onderzoeken, want men mag reeds van puur geluk spreken wanneer een diagram volgens 4 wordt verkregen. Immers niets waarschuwt vooraf de naderende vermoeiingsbreuk, terwijl de spreidingen vrij groot zijn. Het is volkomen toeval wanneer de vermoeiingsproef juist voordat de dynamische breuk optreedt, beëindigd wordt. Niettemin lukte dit tot twee keer toe dank zij een meer verfijnde onderzoekingsmethode, die bij de beschreven proeven werd toegepast. Overeenkomstige verfijning van het

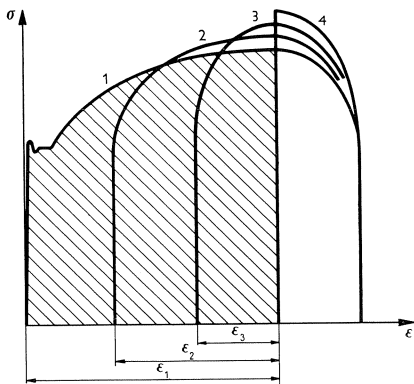


Fig. 1. σ — ϵ diagrammen van materiaal bij voortschrijdende vermoeiing. Staaf 1 werd niet dynamisch belast en vertoont bij de statische trekproef het normale σ — ϵ diagram 1. Treedt bij een opgelegde spanning $\pm\sigma$ na n pulsaties een vermoeiingsbreuk op, dan vindt men bij een statische trekproef na belasting door $1/3 n$ pulsaties diagram 2, na $2/3 n$ pulsaties diagram 3 en na iets minder dan n pulsaties diagram 4. De vier diagrammen zijn zó verschoven, dat de momenten van insnoering samen vallen. Hierdoor ziet men duidelijk, dat bij het vermoeiingsproces alleen de lineaire rek vermindert, de contractie-rek echter niet verandert, de breukkracht groter wordt en de geprononceerde vloeigrens verdwijnt.

onderzoek verricht op materiaal, afkomstig uit zwaar belaste brugonderdelen, leidde eveneens tot zeer markante resultaten.

Het verschijnsel van rek-achteruitgang veroorzaakt door wisselspanningen, werd ook door andere onderzoekers vastgesteld. Zo kan o.a. gewezen worden op een proevenreeks uitgevoerd door K. Memmler en K. Laute (litt. 3), ongeveer op overeenkomstige principes berustend, waaruit bleek, dat na aftrek van de contractierek, één van de vier op wisselbelasting beproefde staven, zich ook reeds in een vergevorderde staat van rek-achteruitgang bevond. Merkwaardigerwijze wordt door de schrijvers ternauwernood enige aandacht aan dat verschijnsel besteed.

II. De hypothese

a. *Physische formulering*

Analyseert men nu fig. 1 nader, dan kan geconstateerd worden:

1. Gestadige achteruitgang van de lineaire rek.
2. Geringe vergroting van de breukbelasting als gevolg van het vermoeiingsproces, een soort versteviging van het materiaal dus.
3. Als direct gevolg van de rekachteruitgang, een achteruitgang van het beschikbare plastische arbeidsvermogen van het materiaal (dit is de oppervlakte van het σ — ϵ diagram gemeten tot het punt van insnoering.)

Het mag verder bekend ondersteld worden dat elk materiaal over een zogenaamd dempend vermogen beschikt, dit wil zeggen: Wordt enig elastisch systeem in trilling gebracht, dan verdwijnt die trilling na korter of langer tijd wanneer de uitwendige energietoever wordt stopgezet, ook in een luchtledige omgeving.

Ook worden in geval van resonantie, bij uiterst kleine pulserende krachtwerving, nooit oneindig grote uitslagen waargenomen, doch wordt na kortere of langere tijd een min of meer stabiele trillingsuitslag bereikt. Ook dit geldt voor een luchtledige omgeving. Er vindt dus arbeidsvernietiging plaats en dit

komt doordat geen enkel materiaal, zelfs bij de kleinst mogelijk optredende spanningen, in feite ideaal elastisch is.

Er vinden namelijk, hoe klein de elastische vormveranderingen ook zijn, steeds zeer kleine plastische vervormingen plaats. En het zijn deze zeer kleine plastische vormveranderingen, die in het σ — ϵ diagram door een gesloten hysteresislus weergegeven worden (fig. 2) en die naar alle waarschijnlijkheid voor de vermoeiingsverschijnselen aansprakelijk gesteld moeten worden.

In 1938 werd in de Ingenieur in Ned. Indië (lit. 4) in het artikel „Een hypothese ter verklaring van de in taaie staalsoorten optredende vermoeiingsverschijnselen” de theoretische opzet reeds behandeld.

Daar dit blad hier te lande in 't algemeen weinig gelezen werd, bleef de ontwikkelde theorie onopgemerkt. De volledige hypothese luidt als volgt:

1. De dempingsverschijnselen zijn in wezen debet aan de vermoeidheidsbreuken.
2. Tot een bepaalde grootte A_w van de dempingsarbeid per impuls (c.q. spanningswisseling), is die demping ongevaarlijk en kan oneindig lang verdragen worden.
3. Wordt A_w overschreden door belasting volgens hogere spanningsintervallen, dan begint *een gedeelte* van de totale dempingsarbeid per impuls een breukveroorzakende invloed uit te oefenen.
4. Bij elke impuls (spanningswisseling) wordt een zeer klein gedeelte van het arbeidsvermogen van het materiaal verbruikt, vermindert dus het beschikbare arbeidsvermogen van de proefstaaf, hetgeen uitwendig merkbaar is aan de waar te nemen rekachteruitgang.
5. Aangezien bij de genomen proeven bleek, dat, naast geleidelijke rekachteruitgang tevens een geleidelijke versteviging van het materiaal plaats vindt (zie fig. 1), is het logisch te onderstellen, dat het gedeelte van de dempingsarbeid, dat een breukveroorzakende invloed uitoefent, niet constant blijft doch gaandeweg vermindert (zie fig. 4).
6. Aangenomen wordt, dat gedurende een continu uitgevoerde proef de vermindering van dit breukveroorzakende vermogen van de dempingsarbeid evenredig is aan het dan reeds verbruikte deel van het arbeidsvermogen van de staaf (zie fig. 4).
7. Is het beschikbare arbeidsvermogen van de proefstaaf door het verbruik van dit arbeidsvermogen uitgeput, dan treedt op dat moment breuk op. Op dat ogenblik is dan juist de lineaire rek verdwenen. Hadden wij met

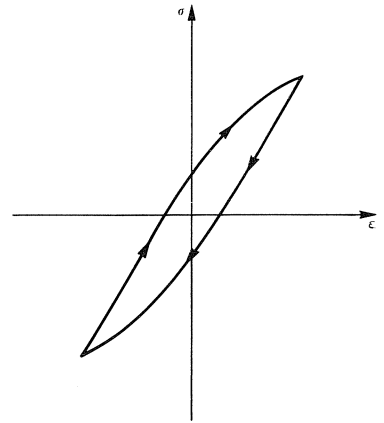


Fig. 2. Hysteresislus.

een hypothetisch zuiver materiaal te maken dan zou de staaf op dat moment in poeder uiteenvallen.

Doch hypothetische zuiverheid is nooit aanwezig, zodat de staaf samenhangend blijft, omdat de zwakkere gedeelten sneller achteruit gegaan zijn dan de sterkere. Wel blijkt dat bij taaiere staalsoorten, na strekken van het vermoeide materiaal, de proefstaaf als het ware doorploegd is van vermoeiingsscheuren zoals in fig. 3, overgenomen uit lit. 5, duidelijk te zien is.

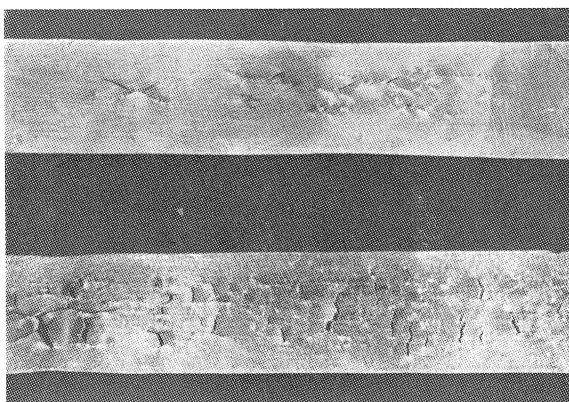


Fig. 3. Vermoeiingsscheuren.

b. *Mathematische formulering*

In fig. 4 staat als abcis aangegeven het aantal volbrachte lastwisselingen n en als ordinaat de momentane grootte van de dempingsarbeid $A_{n,\sigma}$ als functie van het aantal volbrachte lastwisselingen.

Stel dat een staaf in een bepaald spanningsinterval met even grote positieve als negatieve spanningsgrenzen ($\pm \sigma$) gedurende een vermoeiingsproef wordt belast en dat geheel bij het begin van de proef de, bij dit spanningsinterval behorende, grootte van de dempingsarbeid per spanningswisseling, $A_{0,\sigma}$ bedraagt en dat $A_{0,\sigma}$ groter is dan A_{ω} als A_{ω} de juist nog ongeveer gelijk dempingsarbeid per spanningswisseling voorstelt.

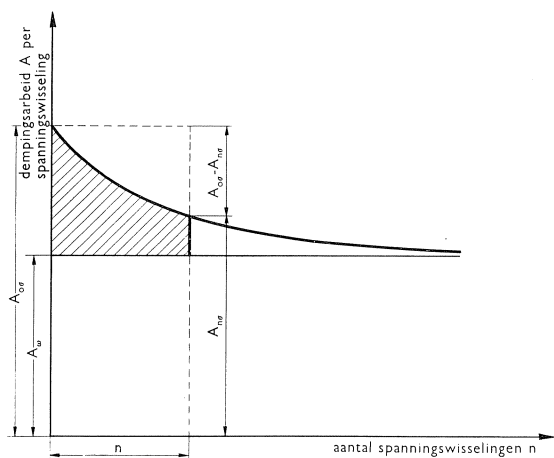


Fig. 4. Verloop van de, voor breukvorming maatgevende, dempingsarbeid per pulsatie als functie van het aantal volbrachte pulsaties. Volgens de opgestelde hypothese wordt deze dempingsarbeid per pulsatie tijdens een vermoeiingsproef gestadig kleiner en wel zó, dat de verkleining evenredig is met het totaal van de gedurende de proef tot dat moment verrichte, voor breukvorming maatgevende dempingsarbeid, dit is dus het gearceerde gedeelte van het diagram, dus:

$$A_{0\sigma} - A_{n\sigma} = a \left(\int_0^n A_{n\sigma} dn - A_{\omega} \cdot n \right)$$

Notaties:

- $\pm \sigma_\omega$ = spanningsinterval, waarbij juist de dempingsarbeid A_ω optreedt
- $\pm \sigma_{tr}$ = (natuurlijke elasticiteitsgrens) trillingssterkte van het materiaal
- n = het aantal bij een continue vermoeingsproef volbrachte spanningswisselingen
- \mathfrak{A} = In het maagdelijk materiaal beschikbare hoeveelheid arbeidsvermogen
- A_ω = Grenswaarde van de gevaarlijke dempingsarbeid per spanningswisseling
- $A_{o\sigma}$ = Dempingsarbeid per spanningswisseling bij een spanningsinterval $\pm \sigma$ voor maagdelijk materiaal
- $A_{n\sigma}$ = Dempingsarbeid per spanningswisseling bij een spanningsinterval van $\pm \sigma$, na n volbrachte spanningswisselingen
- A_{tr} = De waarde van $A_{o\sigma}$ waarbij na een oneindig groot aantal spanningswisselingen juist breuk optreedt

Volgens punt 6 van bovenstaande hypothese moet dan: (zie fig. 4)

$$A_{o\sigma} - A_{n\sigma} = a \left[\int A_{n\sigma} \cdot dn - A_\omega \cdot n \right] \quad (1)$$

of wel $A_{n\sigma} = A_{o\sigma} - a \left[\int A_{n\sigma} dn - A_\omega \cdot n \right]$ waarin a een evenredigheidsfactor is. Na eenmaal differentieren vindt men:

$$\frac{dA_{n\sigma}}{dn} = -a \left[A_{n\sigma} + A_\omega \right] \quad (2)$$

een lineaire differentiaalvergelijking van de eerste orde met als oplossing:

$$A_{n\sigma} = C e^{-an} + A_\omega \quad (3)$$

De beginvoorwaarde is dat voor $n=0$

$$A_{n\sigma} = A_{o\sigma} \text{ waaruit volgt } C = A_{o\sigma} - A_\omega$$

$$\text{dus } A_{n\sigma} = (A_{o\sigma} - A_\omega) e^{-an} + A_\omega \quad (4)$$

Wordt thans $\left[\int_0^n A_{n\sigma} dn - A_\omega \cdot n \right]$

bepaald, dat is dus het verbruikte arbeidsvermogen na n spanningswisselingen, dan wordt hiervoor gevonden:

$$\left[\int_0^n A_{n\sigma} \cdot dn - A_\omega \cdot n \right] = \frac{A_{o\sigma} - A_\omega}{a} (1 - e^{-an}) \quad (5)$$

Breuk treedt op als dit verbruikte arbeidsvermogen juist gelijk is aan het beschikbare arbeidsvermogen \mathfrak{A} , dat is dus de inhoud van het $\sigma - \epsilon$ diagram van het maagdelijk materiaal tot het moment van insnoering.

Wordt in een spanningsgebied gewerkt waarbij inderdaad arbeidsvermogen wordt verbruikt, dan geldt dus op het moment van breuk:

$$\frac{A_{o\sigma} - A_\omega}{a} (1 - e^{-an}) = \mathfrak{A} \quad (6)$$

Deze betrekking geeft, gelijkvormig met Wöhler, het verband weer tussen het aantal spanningswisselingen waarbij breuk optreedt en de begindempingsarbeid $A_{o\sigma}$, die op zichzelf weer een functie is van het toegepaste spanningsinterval $\pm \sigma$. Volgens (6) is de waarde van $A_{o\sigma}$, die nog juist gedurende een oneindig aantal spanningswisselingen verdragen kan worden:

$$A_{o\sigma} = a \mathfrak{A} + A_\omega \quad (7)$$

Bij aanpassing van de theorie aan reeds bekend waarnemingsmateriaal blijkt, dat de experimentele uitkomsten het best worden weergegeven indien a lineair afhankelijk van $A_{o\sigma}$ wordt gesteld, dus:

$$a = \alpha A_{o\sigma} \quad (8)$$

waarin α een constante is.

Voorts kan ondersteld worden:

$$A_{\sigma\sigma} = 2 \gamma \sigma^p. \quad \dots \dots \dots (9)$$

Hierin blijken γ en p over grote spanningsgebieden constant te zijn. In deze formule moet σ steeds in absolute grootte worden ingevuld.

De waarde van $A_{\sigma\sigma}$, waarbij na een oneindig groot aantal spanningswisselingen juist breuk optreedt, wordt A_{tr} genoemd en het daarbij behorende even grote positieve als negatieve spanningsinterval, de trillingssterkte $\pm \sigma_{tr}$. Met (8) en (9) gesubstitueerd in (7) vinden wij dan

$$\sigma_{tr} = \sqrt[p]{\frac{A_{\omega}}{2\gamma(1-\alpha\mathfrak{A})}} \quad \dots \dots \dots (10)$$

Wordt het spanningsinterval, waarbij $A_{\sigma\sigma}$ juist de waarde A_{ω} heeft, de natuurlijke elasticiteitsgrens $\pm \sigma_{\omega}$ genoemd, dan is dus volgens (9)

$$A_{\omega} = 2 \gamma \sigma_{\omega}^p$$

waarmede uit (10) volgt:

$$\sigma_{tr} = \sigma_{\omega} \sqrt[p]{\frac{1}{1-\alpha\mathfrak{A}}} \quad \dots \dots \dots (11)$$

Formule (6) verder uitwerkend, verkrijgen wij

$$e^{+an} = \frac{A_{\sigma\sigma} - A_{\omega}}{A_{\sigma\sigma}(1-\alpha\mathfrak{A}) - A_{\omega}} = \frac{\sigma^p - \sigma_{\omega}^p}{(1-\alpha\mathfrak{A})\sigma^p - \sigma_{\omega}^p}$$

of wel

$$n = \frac{\log [\sigma^p - \sigma_{\omega}^p] - \log [(1-\alpha\mathfrak{A})\sigma^p - \sigma_{\omega}^p]}{2 \gamma \alpha \sigma^p \cdot \log e} \quad \dots \dots \dots (12)$$

Wordt voorts de resterende inhoud van het $\sigma-\varepsilon$ diagram na n volbrachte spanningswisselingen $I_{n\sigma}$ genoemd, dan volgt uit (6):

$$I_{n\sigma} = \mathfrak{A} - \frac{A_{\sigma\sigma} - A_{\omega}}{a} (1 - e^{-an})$$

of anders geschreven

$$I_{n\sigma} = \mathfrak{A} - \frac{\sigma^p - \sigma_{\omega}^p}{\alpha\sigma^p} (1 - e^{-2\alpha\gamma\sigma^p n}) \quad \dots \dots \dots (13)$$

Men kan nu zonder moeite eveneens formules opschrijven voor het zogenaamde Smith diagram, dat in de W.G.S.-Mededelingen no. 2—1953, in het artikel over eigenspanningen en scheurvorming in stalen profielen reeds besproken is. Dit diagram kan echter veel overzichtelijker met de zogenaamde arbeidslijn grafisch bepaald worden. Deze arbeidslijn vormt een nieuw begrip en geeft het verband weer tussen het toegepaste spanningsinterval $\pm \sigma$ en het per lastwisseling verbruikte arbeidsvermogen $A_{\sigma\sigma}$ bij het begin van de proef, dus voor het maagdelijk materiaal.

III. De arbeidslijn

Wordt de betrekking (9): $A_{\sigma\sigma} = 2 \gamma \sigma^p$ tot ver in 't vloeigebied grafisch weergegeven, dan wordt het volgende diagram (fig. 5) verkregen. Op de horizontale as staat de grootte van $A_{\sigma\sigma}$ en op de verticale as de grootte van σ aangegeven. Wordt nu een volledige spanningswisseling toegepast dus volgens $\sigma = 0 \rightarrow \sigma_b \rightarrow \sigma = 0 \rightarrow \sigma_o \rightarrow \sigma = 0$, dan wordt aan dempingsarbeid verricht: $(A_{\sigma\sigma_o} + A_{\sigma\sigma_b})$, dat zijn dus de twee horizontale lijnstukjes bij elkaar opgeteld.

De vorm van de arbeidslijn kan ook met behulp van de formule (6), wanneer die voor een bepaalde materiaalsoort experimenteel bepaald is, na enig zoeken en proberen vastgesteld worden. Zij blijkt voor een groot gebied te voldoen aan de betrekking

$$A_{\sigma\sigma} = 2 \gamma \sigma^p \quad (9)$$

waarin p als een constant getal beschouwd kan worden. In de hogere spanningsgebieden vertoont zich echter een zeer scherpe knie en daar moet p

variabel genomen worden. Met nadruk wordt er op gewezen dat de getekende arbeidskromme de *begintoestand* weergeeft, dit wil dus zeggen de per impuls verrichte dempingsarbeid geheel aan het begin van de continue beproeving.

Voor het geval dat $\sigma_o = -\sigma_b$ en dat de som der twee daarbij behorende lijnstukjes $A_{\sigma\sigma_o} + A_{\sigma\sigma_b} = A_{tr}$ ontstaat bij een continue uitgevoerde vermoeiingsproef na een oneindig groot aantal spanningswisselingen juist breuk. In wezen is dan de trillingssterkte ($\pm \sigma_{tr}$) bepaald. Het is duidelijk, dat bij enige andere spanningswisseling bij een continue vermoeiingsproef, onafhankelijk tussen welke grenzen deze wordt uitgevoerd, de som van de twee horizontale arbeidslijnstukjes ook gelijk

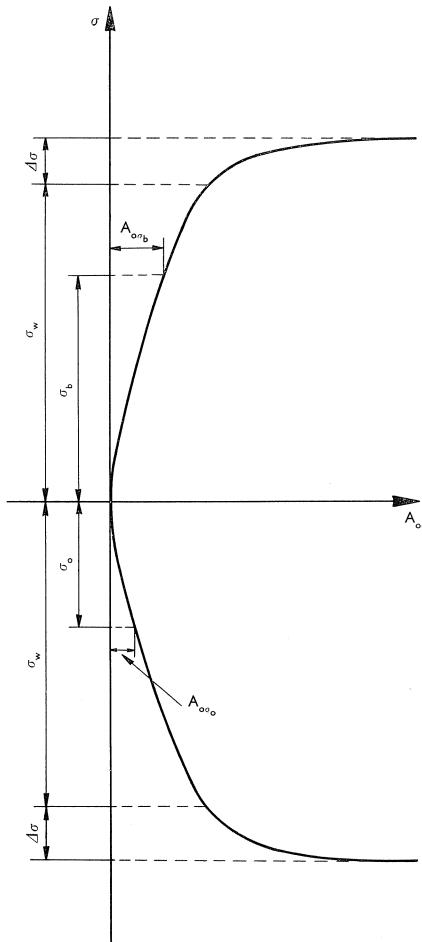


Fig. 5. De arbeidslijn.

Bij pulsatie van $0 \rightarrow +\sigma_b \rightarrow 0 \rightarrow -\sigma_o \rightarrow 0$ wordt aan dempingsarbeid verricht de som van de twee lijnstukken $A_{\sigma\sigma_b}$ en $A_{\sigma\sigma_o}$. De lijn geeft de toestand weer voor het nog maagdelijke materiaal. Men ziet nu, dat bij hoge wisselspanningen, als in de knie van de arbeidslijn wordt gewerkt, een kleine vermeerdering van σ_w met $\Delta\sigma$ een aanzienlijke toename van de dempingsarbeid tot gevolg heeft. Excentriciteitsmomenten en andere kleine afwijkingen bij de beproeving kunnen dus oorzaak zijn van grote spreidingen in de resultaten.

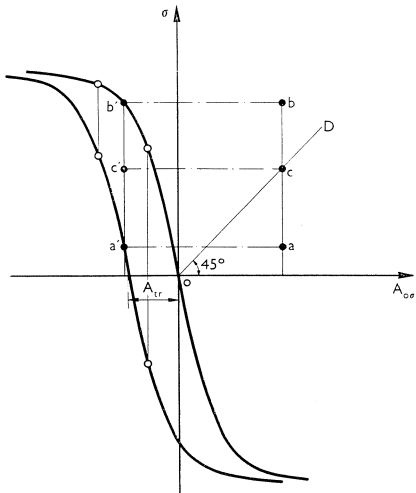


Fig. 6. De constructie van het Smith-diagram met behulp van de arbeidslijn.

verschoven. Wordt nu tussen deze twee krommen in, een serie verticale lijnen getrokken, dan geven de snijpunten van deze verticale lijnen met de twee krommen de diverse spanningsintervallen weer, bijvoorbeeld de punten a' en b' van de middelste der drie getekende verticale lijnen. Wordt vervolgens het midden c' van $a' b'$ bepaald en daarna het snijpunt c van de horizontale lijn door c' met de lijn OD die een hoek van 45° vormt met de abscis en worden de punten a' en b' door middel van horizontale lijnen naar a en b , gelegen op de verticaal door c , overgebracht, dan vormen a en b twee aan elkaar toegevoegde punten van het Smith-diagram.

Op deze wijze is fig. 7 geconstrueerd, aangevende het Smith-diagram voor staal 37 en wel voor fijn afgewerkte, echter niet gepolijste, proefstaven. Zonder twijfel is hier een merkwaardig verband tussen Wöhler-kromme, arbeidslijn en Smith-diagram aangetoond, een verband dat via de hiervoor afgeleide formules bereikt werd.

De lezer wordt er op gewezen dat eerst via enig zoeken en proberen, tot deze resultaten gekomen kon worden, immers de in de literatuur opgegeven waarden voor de Wöhler-kromme zijn allen ongetwijfeld behept met spreidingsfouten en deze kunnen vrij belangrijk zijn.

Hoe het ook zij, de afgeleide formules geven op juiste wijze de algemene tendenz van de bekende vermoeiingskarakteristieken weer.

IV. Verklaring van enkele verschijnselen aan de hand van de gegeven theorie

In het voorgaande werd aangenomen, dat gedurende een continue proef de verbruikte dempingsarbeid op een zeker moment bepalend is voor de ver-

aan A_{tr} moet zijn, als juist na een oneindig groot aantal spanningswisselingen breuk zal optreden.

Aan de hand van deze overwegingen is de grafische bepaling van het Smith-diagram zeer eenvoudig, zodra de arbeidslijn bekend is. Dit is in fig. 6 gebeurd, waarin het bovenste gedeelte van de arbeidslijn ten behoeve van een overzichtelijke constructie in spiegelsymmetrische zin is getekend. De horizontale as geeft dan aan beide kanten van de ordinaat een *positieve* waarde weer van de verbruikte dempingsarbeid per impuls.

Vervolgens wordt een tweede geheel gelijkvormige arbeidslijn getekend welke echter over een afstand A_{tr} naar links is

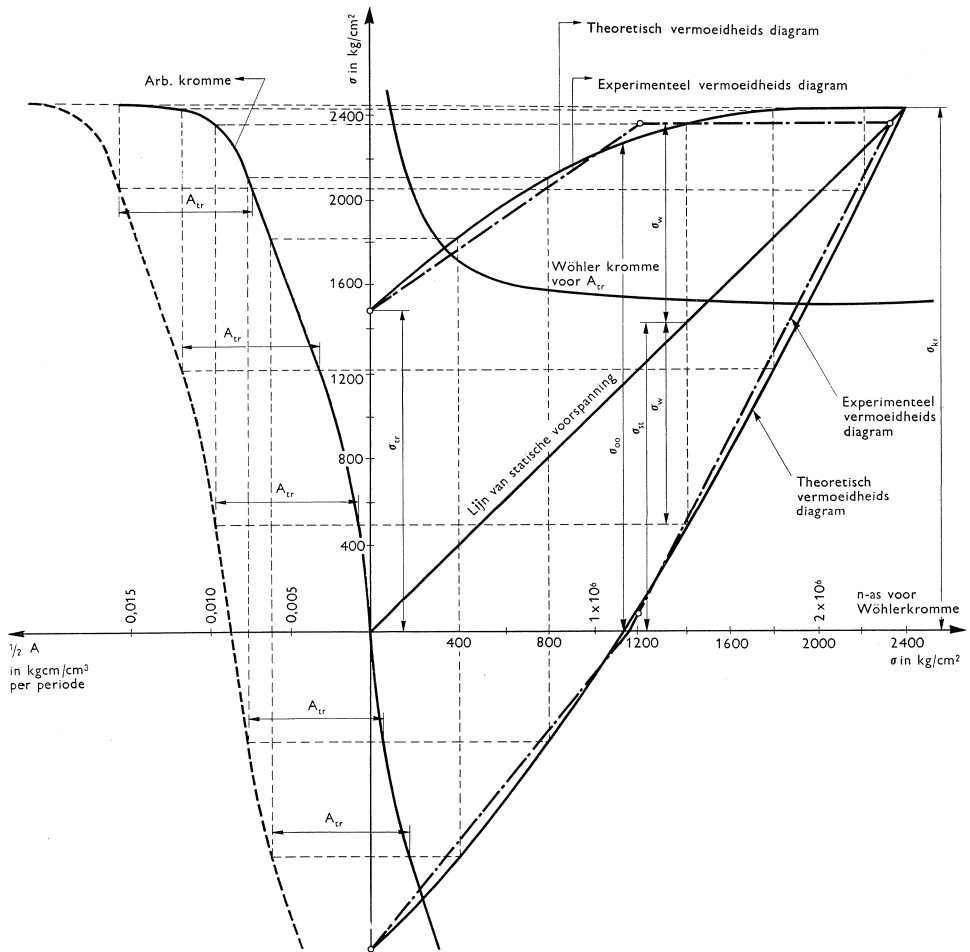


Fig. 7. Wöhlerkromme, Smith-diagram en arbeidslijn voor St. 37. Het Smith-diagram geldt voor fijn bewerkt, echter niet gepolijst, materiaal.

andering van deze dempingsarbeid per impuls. Deze aanname dient echter alleen om tot een rationele beschrijving van het verloop van deze dempingsarbeid te komen. Voor de rest is bij vermoeiingsproeven uitsluitend het aantal volbrachte spanningswisselingen bepalend. Dit houdt het volgende in: In fig. 8 staan vier $A_{n\sigma}$ -lijnen weergegeven, behorende bij vier verschillende spanningsintervallen, t.w. $\pm \sigma_1$, $\pm \sigma_2$, $\pm \sigma_3$ en $\pm \sigma_4$.

Stel dat een staaf beproefd wordt: eerst op de wisselspanning $\pm \sigma_1$ gedurende n_1 lastwisselingen en daarna verder op $\pm \sigma_3$. De $A_{n\sigma}$ -lijn van die beproeving volgt eerst de $A_{n\sigma_1}$ -lijn tot het punt a , behorende bij n_1 lastwisselingen, volgt dan bij de veranderde spanning $\pm \sigma_3$ bij verdere beproeving de $A_{n\sigma_3}$ -lijn vanaf punt b . Hetzelfde gebeurt met een staaf die eerst op $\pm \sigma_4$ belast wordt

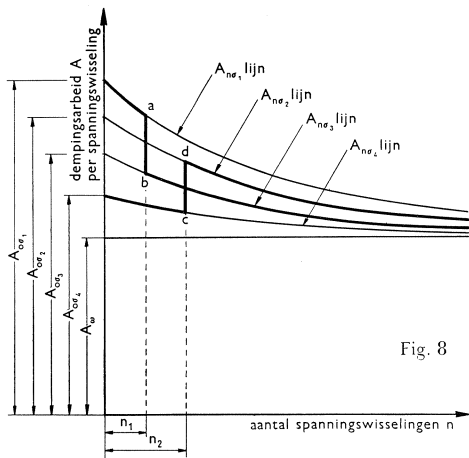


Fig. 8

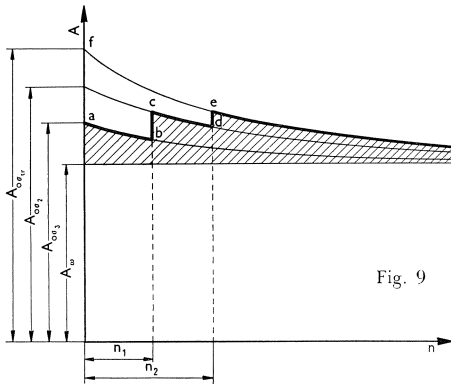


Fig. 9

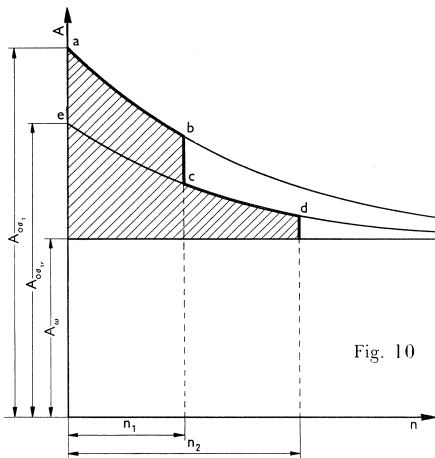


Fig. 10

gedurende n_2 lastwisselingen en daarna op $\pm \sigma_2$. De $A_{n\sigma}$ -lijn van deze staaf volgt aanvankelijk de $A_{n\sigma_1}$ -lijn tot punt c behorende bij n_2 lastwisselingen om daarna over te gaan naar punt d van de $A_{n\sigma_2}$ -lijn om verder deze laatste lijn te volgen.

Met behulp van deze lijnen, die het verband weergeven tussen de verandering van de dempingsarbeid en het aantal volbrachte spanningswisselingen, kunnen twee zeer interessante, bij vermoeingsproeven waargenomen fenomenen worden verklaard. In figuur 9 staat als bovenste lijn de $A_{n\sigma_{tr}}$ -lijn weergegeven, dat is dus het verloop van de dempingsarbeid bij de beproeving op $\pm \sigma_{tr}$ waarbij juist breuk plaats vindt als $n = \infty$. Stel dat men een proef begint met een spanning $\pm \sigma_3$, kleiner dan $\pm \sigma_{tr}$, doch groter dan $\pm \sigma_{\omega}$ en dat deze proef verricht wordt gedurende n_1 lastwisselingen. Daarna wordt de spanning tot $\pm \sigma_2$ verhoogd, echter zodanig dat ook $\pm \sigma_2$ kleiner

Fig. 8. Het verloop van de dempingsarbeid A per spanningswisseling bij verandering van het opgelegde spanningsinterval tijdens een vermoeingsbeproeving voor 2 verschillende gevallen.

Fig. 9. Verklaring voor het fenomeen „Hochtrainieren“. Wordt een vermoeingsbeproeving begonnen met een spanningsinterval, dat kleiner is dan de vermoeingssterkte, dan blijkt, dat, na enige sprongsgewijze verhogingen van dat spanningsinterval, het materiaal uiteindelijk een hogere vermoeingssterkte heeft gekregen. Er wordt door deze wijze van beproeven de inhoud $abcdef$ van de arbeidsfiguur minder aan gevaarlijke dempingsarbeid verricht.

Fig. 10. Vermindering van de vermoeingssterkte door overbelasting van het materiaal. Er werd reeds de inhoud $abce$ van de arbeidsfiguur te veel aan gevaarlijke dempingsarbeid verricht.

is dan $\pm \sigma_{tr}$ en deze spanningswisseling wordt gedurende $(n_2 - n_1)$ pulsaties volgehouden om ten slotte op $\pm \sigma_{tr}$ te worden gebracht. Nu valt gemakkelijk in te zien, dat door dit bijzondere proces zelfs na een oneindig groot aantal spanningswisselingen nog geen breuk optreedt. Immers gedurende de eerste proef wordt van de $A_{n\sigma_3}$ -lijn het stuk $a - b$ doorlopen, daarna van de $A_{n\sigma_2}$ -lijn het stuk $c - d$ en tenslotte de $A_{n\sigma_1}$ -lijn vanaf e tot het punt in het oneindige. Door dit verloop wordt het arbeidsvermogen, voorgesteld door het oppervlak $abcdef$ niet verbruikt, zodat na $n = \infty$ deze hoeveelheid in de proefstaaf beschikbaar is, waardoor de staaf dus niet tot breuk komt. Het zou dan mogelijk geweest zijn na het bereiken van de $A_{n\sigma_1}$ -lijn nog enige spanningstrappen hoger te gaan alvorens breuk na een oneindig groot aantal spanningswisselingen optreedt. Volgt men dus bij een vermoeiings-experiment stapsgewijze dit opklimmende proces van beproeving, dan wordt een hogere vermoeiingssterkte gevonden. Dit proces is bekend onder de naam „hochtrainieren” en kan dus goed met de gegeven theorie verklaard worden.

Is een staaf gedurende n_1 spanningswisselingen dynamisch overbelast geweest (fig. 10) door de spanning $\pm \sigma_1$, die groter is dan $\pm \sigma_{tr}$ en zou men daarna die staaf op $\pm \sigma_{tr}$ verder belasten, dan zou breuk reeds bij n_2 spanningswisselingen optreden, immers het verloop van de $A_{n\sigma}$ -lijn is volgens $a-b-c-d$. Gedurende het eerste deel van het proces werd reeds een te veel aan arbeidsvermogen verbruikt ter grootte van het oppervlak $a-b-c-e$ om nog verder de $A_{n\sigma_{tr}}$ -lijn te kunnen volgen. Wil men dus breuk eerst na een oneindig groot aantal spanningswisselingen bereiken, dan moet het later opgelegde spanningsinterval belangrijk kleiner worden. Dit is het verschijnsel waarop Streletzki in zijn mededeling doelde en dat dus eveneens met de gegeven theorie goed is te verklaren.

Eigenaardig zijn ook de grote spreidingen die bij vermoeidheidsbeproevingen vallen waar te nemen. Dit is niet uitsluitend aan het materiaal te wijten, doch evenzeer aan de beproevingsmachine. Kleine excentriciteits- en inklemmingsmomenten enz. zijn niet te vermijden, waardoor buigspanningen op de gelijkmatig verdeelde normaalspanningen gesuperponeerd worden. De extreme spanningen worden dus groter. Beproeft men bij een hoge spanning $\pm \sigma_w$, die reeds vlak bij de knie van de arbeidskromme ligt (zie fig. 5), dan is het duidelijk dat bij een kleine toename $\pm \Delta\sigma$ van $\pm \sigma_w$ als gevolg van de buigingsinvloeden, in de randvezels een spanning $\sigma_w + \Delta\sigma$ optreedt, waardoor een zeer belangrijke vergroting van de dempingsarbeid per spanningswisseling in de randvezels van de proefstaaf ten opzichte van die van de kern kan optreden. Er ontstaat dus in die randvezels veel eerder een scheur. Heeft zich echter een scheur ontwikkeld, dan geeft dat prompt aanleiding tot zeer hoge kerfspanningen, waardoor een sterk versneld vermoeiingsproces zeer plaatselijk doorgaat en de staaf spoedig daarna breekt. Zou men van de kern van de gebroken proefstaaf een dunnere proefstaaf draaien en die in de statische trekbank op breuk belasten, dan zou nog een belangrijke rest aan arbeidsver-

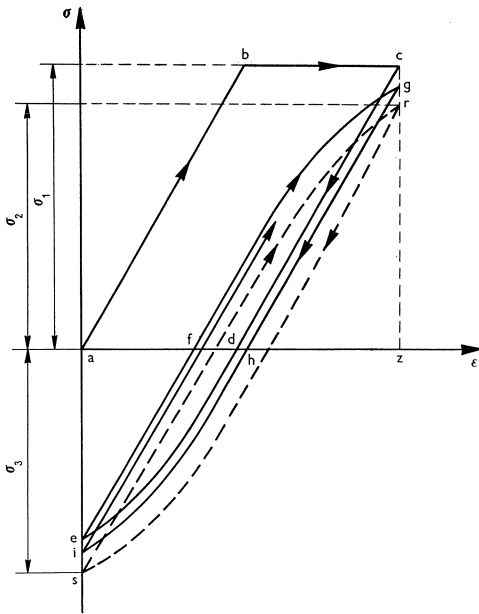


Fig. 11. Verklaring van de gunstige werking van plasticiteit in kleine kerfspanningsvelden, die omgeven zijn door overmatig sterke, elastisch gebleven, gebieden. Hierdoor wordt het spanningsinterval in gunstige zin veranderd.

mogen, c.q. lineaire rek, aangetoond kunnen worden.

Hetzelfde geldt ten aanzien van de afwerking van de staaf. Hoe fijn ook afgewerkt, microscopisch zijn altijd nog zeer fijne oppervlaktekerfjes aan te tonen, als gevolg van het afdraaien en afvijlen, tenzij de staaf gepolijst is. Deze kerfjes geven aanleiding tot kerfspanningen aan de periferie van de staaf. Zelfs bij een praktisch onmogelijke zuiver gelijkmatig verdeelde spanning ontstaat toch aan de omtrek een hogere spanning dan in de kern.

Door dit „skin”-effect treden dus soortgelijke verschijnselen op als boven vermeld.

Hoewel niet direct karakteristiek voor de boven gegeven theorie is het volgende verschijnsel zeer aardig: Berekent men volgens de elasticiteitstheorie hoe groot de randspanning is bij een klinknagelgat in een getrokken staaf en bepaalt men de verhouding hiervan ten opzichte van de gemiddelde spanning in de doorsnede (dit is dus exclusief de klinknagelverzwakking), dan vindt men een niet onbelangrijk hoger quotiënt dan men uit vermoeiingsproeven, uitgevoerd aan staven met en zonder klinknagelgaten kan bepalen. Dit is als volgt te verklaren. Wij hebben hier in feite te doen met zeer kleine kerfspanningsvelden waarin al snel plasticiteitsverschijnselen optreden en die omgeven zijn door een veel groter en veel sterker elastisch veld. Het materiaal in die kerfspanningsvelden wordt dan door die veel sterkere omgeving gedwongen steeds dezelfde vormveranderingen mee te maken, ondergaat echter niet dezelfde spanningen. Fig. 11 geeft dit in het $\sigma-\epsilon$ diagram weer. Het kerfspanningsveld wordt dus gedwongen de vormverandering volgens $a \rightarrow z \rightarrow a \rightarrow z$ enz. mee te maken. De spanningen verlopen als volgt: eerst elastisch ab , dan plastisch bc (vereenvoudigd $\sigma-\epsilon$ diagram), dan bij ontlasting elastisch cd , daarna zwak kromlijinig de (Bauschinger-effect). Hiermee is de gedwongen vormverandering $a \rightarrow z \rightarrow a$ gevolgd. Bij volgende belasting $a \rightarrow z \rightarrow a$ wordt gevolgd: eerst elastisch ef daarna zwak kromlijinig fg , vervolgens bij ontlasting elastisch gh , en daarna zwak kromlijinig hi .

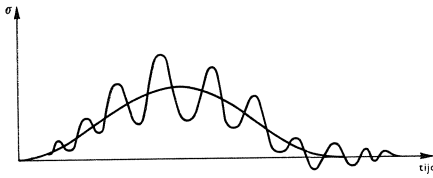


Fig. 12. Spanningsdiagram voor een constructiedeel van een met resonantiesnelheid bereiden spoorwegbrug.

Na enige herhalingen wordt een stabiele eindtoestand bereikt, overeenkomende met een spanningswisseling tussen $+\sigma_2$ en $-\sigma_3$ (het verloop wordt dan volgens de gestippelde hysteresislus $r-s$). De spanningswisseling die oorspronkelijk tussen 0 en σ_1 plaats vond, komt na enige tijd tussen $+\sigma_2$ en $-\sigma_3$ te liggen. Deze wisseling ligt in een gunstiger gebied van de vermoeiingskromme, waar een groter spanningsinterval toelaatbaar is. Dit verklaart, dat experimenteel een lagere kerfwerkingsfactor wordt gevonden dan volgens de theoretische elasticiteitsberekening.

V. Toepassing van de theorie op stalen spoorwegbruggen

Hoe gedraagt zich nu een wisselspanning in een brug? Aan de hand van trillingstheoriën uitgerekend en ook praktisch geverifieerd, verloopt in enig constructiedeel van een brug de spanning als schetsmatig in fig. 12 staat weergegeven, indien de locomotief met resonantiesnelheid passeert. Het arbeidsverbruik van zo'n treinovergang kan als volgt bepaald worden. Na reductie van de arbeidslijn met de ongevaarlijke dempingsgrootte A_ω , behorende bij σ_ω , verkrijgt men een lijn, zoals in fig. 13 staat weergegeven. Hierin is dus alleen het breukvormende gedeelte verdisconteerd terwijl de abcissen *gehalveerd* zijn en zodanig in twee takken verwerkt, dat de rechter krommen voor de heengang gelden en de linker krommen voor de teruggang. Zolang dus de wisselingen tussen $\pm \sigma_\omega$ plaats vinden wordt geen arbeidsvermogen verbruikt.

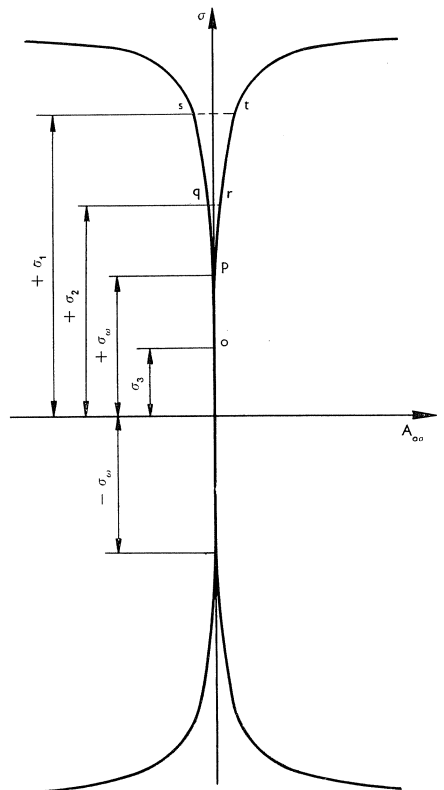


Fig. 13. Gereduceerde arbeidslijn voor de toepassing van de theorie op de berekening van dynamisch belaste spoorwegbruggen e.d.

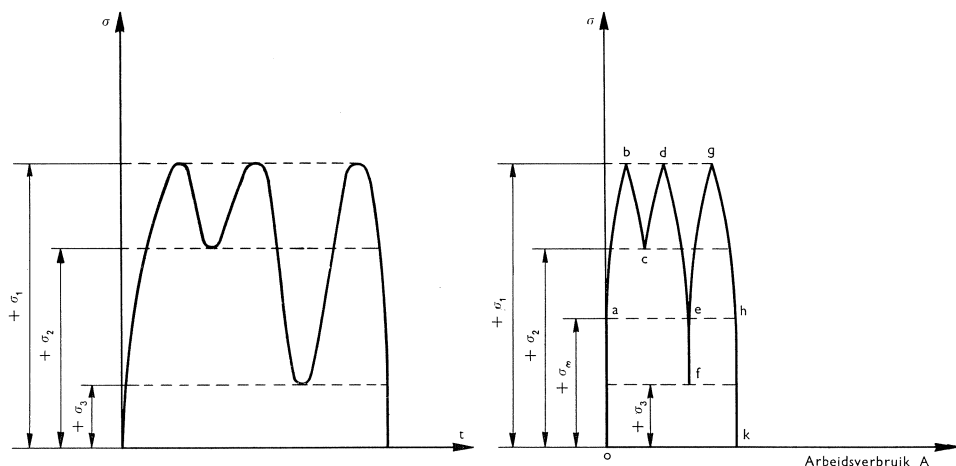


Fig. 14. Toepassing van de gereduceerde arbeidslijn bij de bepaling van de verrichte, gevaarlijke, dempingsarbeid bij pulsaties van verschillende grootte.

Stel er wordt belast volgens $0 \rightarrow \sigma_1 \rightarrow +\sigma_2 \rightarrow +\sigma_1 \rightarrow +\sigma_3 \rightarrow +\sigma_1 \rightarrow 0$, dan kan de constructie van fig. 14 opgezet worden. Met fig. 13 wordt gevonden het verloop $0 \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \leftarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow e \rightarrow g \rightarrow h \rightarrow k$. Het totale verbruik aan arbeidsvermogen komt dan overeen met het lijnstuk $0 \rightarrow k$. Geheel overeenkomstig kan men de spanningswisseling van fig. 12 behandelen. Men komt dan tot de slotsom dat een treinovergang volgens fig. 12 gelijkwaardig is aan een zeker aantal herhalingen van een spanningswisseling tot de maximaal bereikte spanning σ_1 .

VI. Besluit

Bij de onderzoeken te Bandoeng volgde na een grote succesvolle reeks bij een frequentie van 50 Hz een tweede reeks bij een frequentie van 2 Hz. Hierbij traden aanvankelijk enige mislukkingen op als gevolg van het optreden van onverwachte knikverschijnselen. De staven die op trillingssterkte getest werden — dat is dus tussen positieve en negatieve maximum-spanningsgrenzen — knikten plotseling uit, hoewel verschillende eerst enkele dagen lang de krachtwerking zonder bezwaar verdragen hadden. Dit wees er dus op dat tevens een gestadige verandering van de elasticiteitsmodulus optrad.

Na deze mislukkingen is tenslotte slechts 1 serie van 5 staven beproefd, die op oorsprongsterkte werd belast — dit is dus tussen 0 en een maximum trekspanning, in dit geval tussen 0 en $+1850 \text{ kg/cm}^2$.

De eerste vier staven, waarvan de eerste maagdelijk gehouden was, gaven met elkaar een bijzonder fraaie serie, zoals in fig. 1 te zien is. De vierde staaf had dus nog slechts een geringe lineaire rek over.

De beproeving van de vijfde staaf leidde tot een merkwaardig resultaat. Het aantal wisselingen werd voorzichtig opgevoerd om zo dicht mogelijk de vermoeiingsbreuk te benaderen, zonder dat deze echter zou optreden. Daarna werd bij de statische trekproef van deze staaf echter het diagram van maagdelijk materiaal verkregen. Dit diagram was analoog aan dat van staaf 1 en vertoonde eveneens de zeer duidelijke vloeigrens, die bij vermoeiingsbelastingen snel verdwijnt. Bij controle van de trekbank bleek deze vastgelopen te zijn, zodat alle krachten via het frame van de trekbank overgebracht waren en de staaf dus volkomen onbelast gebleven was. Het afwijkende diagram bleek dus een indicatie te zijn voor een onklaar geraakte machine!

Bij deze serie werd de indruk verkregen dat de lage frequentie ongunstiger werkte dan de hogere van 50 Hertz. Het leek wel of bij die lage frequentie de hysteresislus in het materiaal zich vollediger kon instellen en daardoor destructiever werkte. De serie was echter te klein om daaruit reeds enig vaststaande conclusie te kunnen trekken.

Kort daarop konden de proeven door de oorlog niet meer voortgezet worden. Alle oorspronkelijk opgenomen diagrammen gingen geheel verloren tijdens een grote brand. Van een groot deel van de resultaten met de 50 Hertz machine zijn foto-copiën gemaakt, zodat de resultaten daarvan gelukkig gespaard bleven; helaas is dit echter niet geschied met de bijzonder fraaie laag-frequentie serie.

LITERATUUR:

1. W. J. van der Eb: Onderzoek van staalconstructies en vermoeiingsverschijnselen. De Ingenieur No 32—1949.
2. N. Streletzky: Ergebnisse der Brückenuntersuchungen in Russland 1919—1924. „Eisenbahnwesen”, p. 340. Sonderausgabe der Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure. V.D.I.-Verlag, Berlin 1925.
3. K. Memmler und K. Laute: Dauerversuche an der Hochfrequenz Zug-Druck Maschine Bauart Schenck. Forschungsarbeiten aus dem Gebiete des Ingenieurwesens. V.D.I. Heft 329.
4. W. J. van der Eb: Een hypothese ter verklaring van de in taaie staalsoorten optredende vermoeidheidsverschijnselen. De Ingenieur in Ned. Indië, No 2—1938.
5. O. Föppl-E. Becker-G. v. Heydekampf: Die Dauerprüfung der Werkstoffe. Springer-Verlag, Berlin 1929.
6. E. Voigt und K. H. Christensen: Ueber die Dämpfungsfähigkeit und Schwingungsfestigkeit des Stahles. Mitteilungen aus dem Kaiser Wilhelm Institut für Eisenforschung zu Düsseldorf. Band 14 p. 151.
7. A. Pomp und M. Hempel: Dauerfestigkeitsschaubilder von Stählen bei verschiedenen Zugmittelspannungen unter Berücksichtigung der Prüfstabform. Mitteilungen aus dem Kaiser Wilhelm Institut für Eisenforschung zu Düsseldorf. Band 18—1936. p. 1—14.
8. O. Graf: Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe und der Konstruktions-elemente. Springer-Verlag, Berlin 1929.
9. O. Graf: Die Dauerfestigkeit von Stählen mit Walzhaut ohne und mit Bohrung von Niet- und Schweissverbindungen. V.D.I.-Verlag, Berlin 1931.
10. A. Thum und W. Buchman: Dauerfestigkeit und Konstruktion. V.D.I.-Verlag, Berlin 1932.