

Laboratorium voor Scheepsconstructies.

Intern Rapport nr.

SSL 61

Enige beschouwingen over breukverschijn-  
selen, sterktecriteria en constructieve  
vormgeving in het bijzonder met  
betrekking tot scheepsconstructies.

door

ir. J. J. W. Nibbering.

Enige beschouwingen over breukverschijnselen,  
sterktecriteria en constructieve vormgeving  
in het bijzonder met betrekking tot scheeps-  
constructies.

door  
ir. J. J. W. Nibbering,  
wetenschappelijk medewerker bij het  
Laboratorium voor Scheepsconstructies  
der Technische Hogeschool.

Inhoud:

- § 1. Inleiding.
- § 2. Het gedrag van vloeistaal onder statische belastingen.
- § 3. De invloed van discontinuïteiten op de statische sterkte van constructies.
- § 4. Spanningsconcentraties en dynamische belastingen.
- § 5. Enkele opmerkingen over sterktecriteria en constructieve vormgeving.
  - a. Voor statisch belaste constructies.
  - b. Voor dynamisch belaste constructies.
- § 6. Slotopmerkingen.

- - - -

## §1. Inleiding.

Tijdens en na de laatste wereldoorlog heeft het optreden van brosse breuken in gelaste schepen zich tot een probleem ontwikkeld dat voordien nauwelijks gekend werd.

Het onderzoek naar de oorzaken van dergelijke breuken is, speciaal in de Verenigde Staten, op grootscheepse wijze aangepakt. Dit heeft geleid tot een bijna nieuwe tak van wetenschap, die voor de niet op dit terrein werkzame scheepsbouwer niet gemakkelijk toegankelijk is.

Niettemin is een algemeen inzicht in de factoren die een rol spelen bij de ontwikkeling van breuken, zowel voor het maken van sterkteberekeningen als voor het ontwerpen van constructies, van groot belang. Dit geldt in de eerste plaats ten aanzien van de grenscriteria (toelaatbare spanning, toelaatbare vervorming, enz.) die bij een sterkteberekening worden toegepast. Veelal worden deze ontleend aan een in een laboratorium uitgevoerde trekproef met een zorgvuldig vervaardigde proefstaaf.

Deze werkwijze is merkwaardig, als men beseft dat in scheepsconstructies dikwijls z.g. brosse breuken geconstateerd zijn, terwijl de genoemde trekproef tot een taaie breuk leidt.

Wanneer de oorzaken welke leiden tot bros breken gekend worden, is het misschien mogelijk constructies te ontwerpen waarin de gunstige mechanische eigenschappen van staal

beter tot hun recht komen dan thans het geval is. De aandacht zal in dit verband speciaal gericht dienen te worden op de vormgeving van discontinuïteiten in constructies. De spanningsconcentraties die ter plaatse van die discontinuïteiten optreden, stempelen deze tot zwakke punten. Dergelijke zwakke elementen komen al of niet noodgedwongen nog steeds veel in schepen voor. Voor wie hieraan twijfelt, wordt verwezen naar een artikel van G.Vedeler [1], waarin recente ervaring van een klassebureau ten aanzien van het optreden van scheuren in gelaste constructies wordt weergegeven.

Alleen al uit een oogpunt van besparing op toekomstige reparaties is het nuttig zich te bezinnen op de vormgeving van discontinuïteiten. Niet onbelangrijke materiaalbesparingen kunnen echter eveneens mogelijk zijn, als men beseft dat de aanwezigheid van zwakke punten in een constructie eigenlijk materiaalverspilling inhoudt.

Immers, als een constructie onder de vereiste belasting ter plaatse van zijn zwakke punten niet bezwijkt, betekent dit dat de sterkte elders groter is dan noodzakelijk. M.a.w. er is teveel materiaal in de constructie ondergebracht.

Naast een min of meer elementaire behandeling van problemen die in verband staan met de aanwezigheid van discontinuïteiten in constructies, zullen in dit artikel enkele in het verleden uitgevoerde laboratoriumproeven met scheepsconstructies ter sprake komen. Toegelicht zal worden dat de interpretatie van de resultaten van die proeven minder eenvoudig is dan door de uitvoerders ervan gepresenteerd is. Hierbij zullen enkele principes naar voren komen die bij het ontwerpen van constructies van belang kunnen zijn.

§2. Het gedrag van vloeistaal onder statische belastingen.

Het karakter van de z.g. statische trek-kromme van vloeistaal is algemeen bekend (fig.1).

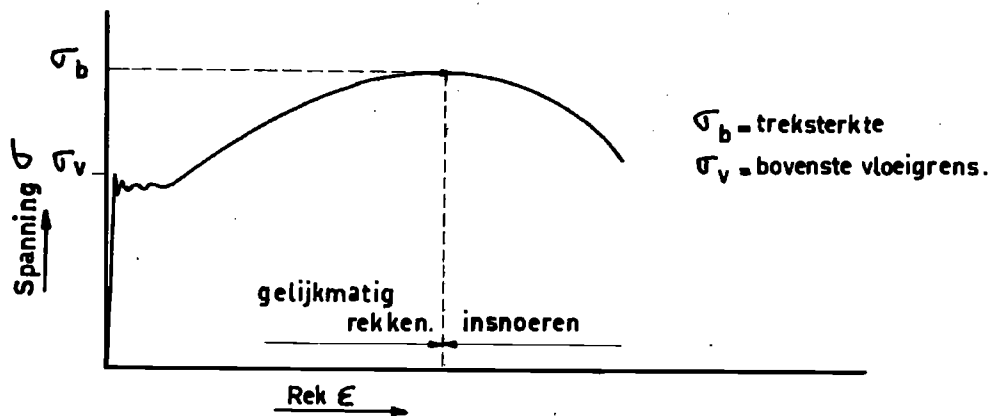


Fig.1

De mechanische eigenschappen die in deze trekkromme tot uiting komen, maken het materiaal bij uitstek geschikt voor de bouw van schepen. Zowel voor het warm en koud bewerken van platen en profielen als voor het voorkómen van grote inwendige spanningen ten gevolge van slecht paswerk en lasvervormingen, is immers de mogelijkheid van voldoende plastische vervorming van het materiaal een eerste vereiste.

Deze plastische vervorming kan zich evenwel niet onder alle omstandigheden manifesteren. Dit hangt daarmee samen dat het verband tussen spanning en vervorming voor een bepaald materiaal sterk bepaald wordt door:

- a. de spanningstoestand,
- b. de temperatuur,
- c. de belastingssnelheid,
- d. de voorgeschiedenis van het materiaal.

Dit zijn tevens de factoren, waarvan het type breuk dat in staal kan optreden - namelijk taai of bros - afhankelijk is.

ad a. De spanningstoestand.

Wanneer de spanning in een trekstaaf de vloeigrens overschrijdt, neemt de rek plotse-ling sterk toe, zonder dat aanvankelijk de belasting hoeft toe te nemen. Dit z.g. vloeien is een gevolg van het feit dat de schuifspanningen in vlakken die niet loodrecht op de staafas staan, zo groot zijn ge- worden dat deze vlakken ten opzichte van elkaar gaan glijden. Deze glijbewegingen komen tenslotte tot stilstand doordat:

- 1e. de roosterverstoringen die door het langs elkaar glijden van kristalvlakken ontstaan, de structuur dusdanig wijzigen dat verder glijden pas bij hogere span-ningen kan geschieden;
- 2e. het staal opgebouwd is uit willekeurig georiënteerde kristallieten, die elkaars vervormingen beperken.

Na het vloeien moet de belasting dus voortdurend toenemen om verder rekken teweeg te brengen (versteviging). Het bijzondere in het vloeï- en verstevigingsproces is dat de samenhang van het materiaal, ondanks de inwendige verschuivingen, niet wordt ver- broken. Breuk kan pas intreden als door de

versteviging de belasting die nodig zou zijn om verder plastisch rekken teweeg te brengen, groter is geworden dan de belasting nodig om het materiaal te breken.

Bij het breken zelf kunnen zich de volgende verschijnselen voordoen:

- 1e. het materiaal splijt, doordat de cohesiekrachten niet bestand zijn tegen de door de uitwendige belasting veroorzaakte normaalspanningen (splijtbreuk).
- 2e. het materiaal wordt in de vlakken waar de schuifspanningen het grootst zijn, afgeschoven (schuifbreuk).

Met het voorgaande in gedachten kunnen we nu spreken van drie kritische spanningen, bij overschrijding waarvan plastische vervorming of breuk optreedt:

- 1e. een kritische schuifspanning ( $\tau_{\text{plast.}}$ ), die het begin van plastisch vervormen aangeeft.
- 2e. Een kritische schuifspanning ( $\tau_{\text{breuk}}$ ), welke het begin van een schuifbreuk bepaalt.
- 3e. Een kritische normaalspanning ( $\sigma_{\text{breuk}}$ ).

De grootte van  $\tau_{\text{plast.}}$  is voor staal onder meer sterk afhankelijk van de mate waarin het bij vroegere belastingen plastisch is vervormd; het eerder besproken "verstevigen" is niets anders dan stijgen van  $\tau_{\text{plast.}}$

Tot nu toe zijn alleen breuken met voorafgaande plastische vervorming aan de orde gekomen. Dergelijke breuken zullen in dit artikel als taai worden beschouwd. Een

breuk wordt bros genoemd, als in de naaste omgeving ervan géén plastische vervorming aanwezig is.

In afwijking van het bovenstaande zou men de begrippen bros en taai ook in verband kunnen brengen met het breukuiterslijk. Een splijtbreuk zou dan bros en een schuifbreuk taai zijn. Men zit dan evenwel met de moeilijkheid dat in staal het breukvlak veelal zowel uit een afgeschoven als een gespleten gedeelte is samengesteld.

Een breuk zonder voorafgaande plastische vervorming - hier dus bros genoemd - kan nu ontstaan als:

- 1e. de door de uitwendige belasting teweeggebrachte normaalspanningen hoog zijn in vergelijking met de schuifspanningen.  $\sigma_{\text{breuk}}$  kan dan worden overschreden, vóórdat  $\tau_{\text{plast.}}$  is bereikt. Er ontstaat dan een brossse splijtbreuk.
- 2e.  $\tau_{\text{plast.}}$  groter is dan  $\tau_{\text{breuk}}$ . Er ontstaat dan een brossse schuifbreuk, óf, in het geval dat bij olopemde belasting  $\sigma_{\text{breuk}}$  eerder wordt overschreden dan  $\tau_{\text{breuk}}$ , een brossse splijtbreuk.

Een vermoelingssscheur zal in dit artikel als een bijzonder geval van een brossse breuk worden beschouwd vanwege de afwezigheid van plastische vervorming in de nabijheid van de scheur (zie ook § 4).

De drie kritische waarden ( $\tau_{\text{plast.}}$ ,  $\tau_{\text{breuk}}$ ,  $\sigma_{\text{breuk}}$ ) zou men nu in berekeningen



als sterktecriteria kunnen hanteren, ware het niet dat hun grootte afhankelijk is van de reeds eerder genoemde factoren temperatuur, belastingssnelheid, voorgeschiedenis van het materiaal en de spanningstoestand. Als we de eerste 3 van deze 4 factoren buiten beschouwing laten\*) en alleen de spanningstoestand waarin het materiaal verkeert, bekijken, is met behulp van cirkels van Mohr te beoordelen of een bepaalde spanningstoestand tot splijtbrek of schuifbrek zal leiden, alsmede óf, en bij welke belasting, plastische vervorming optreedt. Als voorbeeld is een alzijdige trektoestand genomen met hoofdspansingen  $\rho_1, \rho_2$  en  $\rho_3$  (fig.2).

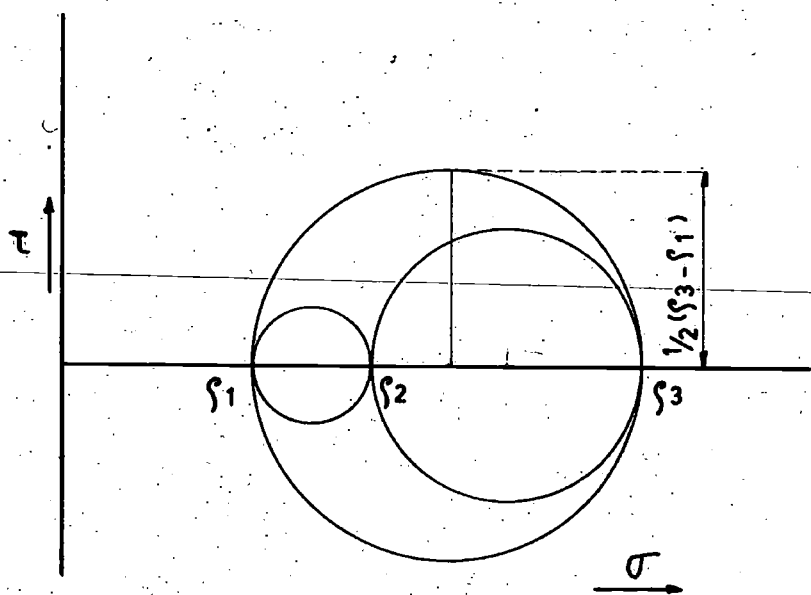


Fig. 2

1e. Plastische vervorming treedt op als de grootste schuifspanning in het materiaal groter wordt dan de kritische waarde  $\tau_{plast.}$  dus als

$$\tau_{max.} = \frac{\rho_3 - \rho_1}{2} > \tau_{plast.}$$

2e. Brosse splijtbrek ontstaat als

$$\tau_{max.} = \frac{\rho_3 - \rho_1}{2} < \tau_{plast.}$$

en  $\rho_3 > \sigma_{breuk.}$

\*) Dit houdt vooral in dat ondersteld wordt dat  $\tau_{breuk} \gg \tau_{plast.}$

3e. Taaie breuk ontstaat als aan 1e is voldaan. Er ontstaat dan een splijtbreuk als  $\rho_3$  eerder  $\sigma_{\text{breuk}}$  overschrijdt dan dat  $\tau_{\text{max}}$  de waarde  $\tau_{\text{breuk}}$  bereikt. Een schuifbreuk ontstaat in het omgekeerde geval. Combinaties van splijt- en schuifbreuken ontstaan wanneer de spanningstoestand in het materiaal op het moment van breken niet uniform is.

Blijkens het voorgaande zijn alleen de uiterste hoofdspansingen ( $\rho_1$  en  $\rho_3$ ) bij plastische vervormings- en breukkwesities van belang. Daardoor zijn deze problemen bij een lijnspanningstoestand en een vlakspanningstoestand analoog. In beide gevallen is namelijk de kleinste hoofdspansing  $\rho_1$  gelijk aan nul.

Alleen een ruimtespanningstoestand is uit een oogpunt van bros breken gevaarlijk, als tenminste de drie hoofdspansingen trekspanningen zijn.

We keren nu nog even terug tot de trekproef met een gladde cilindrische staaf, ten einde uit te laten komen hoe lastig het is om tot betrouwbare cijfers voor bijv. de kritische waarde  $\sigma_{\text{breuk}}$  te komen.

Bij een bepaalde belasting vormt zich de welbekende insnoering. Deze treedt op, zodra het kleiner worden van de dwarsdoorsnede de door de uitwendige belasting veroorzaakte spanningen zo sterk doet groeien dat de staaf zonder verhoging van de belasting verder rekt. Insnoeren is derhalve een evenwichtsverschijnsel.

Voor het materiaal van de trekstaaf is het feitelijke verband tussen spanning en rek nu dat, wat ter plaatse van de insnoering geldt. Fig. 3 geeft hiervan een indruk.

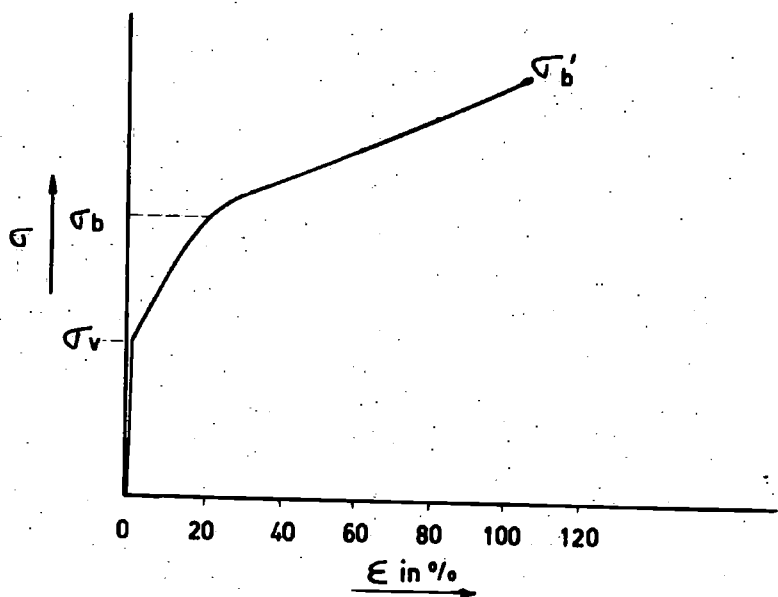


Fig. 3

De spanning is dus berekend als het quotient van de belasting en het bij die belasting behorende oppervlak van de dwarsdoorsnede. We zien dat de plaatselijke rek wel 100 % kan bedragen, terwijl de werkelijke spanning op het moment van breken het dubbele van de z.g. treksterkte kan zijn. De werkelijke waarde van de breukspanning zal in het vervolg  $\sigma'_b$  genoemd worden.

De breuk welke een combinatie van splijten en schuifbreuk is, is dusdanig gecompliceerd dat we omtrent de kritische spanningen  $\tau_{\text{breuk}}$  en  $\sigma_{\text{breuk}}$  nog niet veel wijzer zijn. Daarbij komt nog dat als gevolg van de insnoering de spanningstoestand op het moment van breken niet lineair maar driedimensionaal was.

Wanneer zich in een constructie een driedimensionale trekspanningstoestand voordoet, zal de doorsnedevermindering als functie van de belasting kleiner zijn dan bij een lijnspanningstoestand. Evenzo zal een minder geprononceerde insnoering optreden. Het begin van insnoeren zal bovendien pas bij een hoge belasting plaats vinden. De rek op het moment van breken kan zeer klein zijn.

Dit alles staat in verband met het feit dat de waarde van de grootste schuifspanningen ten opzichte van de grootste normaalspanningen bij een driedimensionale trekspanningstoestand klein is.

Het is dan niet reëel om voor St.42 met een breuksterkte van  $42 \text{ kg/mm}^2$  te rekenen. Immers, wanneer zich geen insnoering kan ontwikkelen kan de breuksterkte wel het dubbele bedragen.

De mechanische eigenschappen van staal, gevonden uit een proef met een trekstaaf, zijn voor dergelijke gevallen dus geen geschikte sterktecriteria. Dit geldt nog speciaal voor de rek.

In gelaste constructies, vooral wanneer zij samengesteld zijn uit dikke platen en zware profielen, bevinden zich veel plaatsen waar een driedimensionale trekspanningstoestand heerst (zie §3). De omstandigheid dat het materiaal aldaar slechts weinig kan rekken betekent voor de constructie in zijn geheel een groot gevaar. In §3 en §5 zal hier nader op worden ingegaan.

ad b,c,d. De invloed van de temperatuur, de belastingssnelheid en de voorgeschiedenis van het materiaal op het verband tussen spanning en vervorming.

Een verlaging van de temperatuur leidt tot een stijging van de kritische schuifspanning  $\tau_{\text{plast}}$ . Dit uit zich o.a. in een hogere vloeigrens.

Het verband tussen temperatuur en  $\tau_{\text{plast}}$  is overigens zeer merkwaardig. Zorgvuldig vervaardigde vloeistalen proefstaven kunnen tot temperaturen lager dan  $-130^{\circ}\text{C}$  breuken vertonen welke niet veel minder taai zijn dan bij kamertemperatuur. Beneden  $\pm 180^{\circ}\text{C}$  onder nul komen echter vrijwel uitsluitend brosse breuken voor. Er is dus een overgangsgebied, waarin het breuktype van taai in bros verandert.

Men spreekt meestal niet van een overgangsgebied, maar van overgangstemperatuur. Als criterium hiervoor kan men het breuk-  
uiterlijk, de plastische vervorming tot breuk of de breukenergie nemen. We zullen hier verder niet op ingaan en slechts over de overgangstemperatuur spreken.

Deze is sterk afhankelijk van de belastingssnelheid, de spanningstoestand en de voorgeschiedenis van het materiaal. Afgezien van deze invloed kunnen die drie factoren zelf tevens tot een verhoging van  $\tau_{\text{plast}}$  aanleiding geven. Dit is het geval bij een hoge belastingssnelheid, een driedimensionale trektoestand en versteviging en/of veroudering van het materiaal.

De overgangstemperatuur kan in ongunstige gevallen tot omstreeks 0° C stijgen. Het gevaar van brosse breuk in schepen is dan evident. Dit gevaar kan belangrijk worden verkleind door doelmatig construeren. Hiervoor is een behoorlijk inzicht in de typische verschillen tussen het ontstaan van breuken in constructies en breuken in trekstaven gewenst.

Naast het in deze § behandelde wordt daarom in de volgende § de aandacht nog gericht op de invloed van discontinuïteiten in constructies.

Opmerking: Bekend is dat de neiging tot bros breken in grote constructies sterker is dan in kleine constructies. Dit hangt samen met de minder gunstige mechanische eigenschappen van zware platen en profielen ten opzichte van lichter materiaal - met de omstandigheid dat driedimensionale trekspanningstoestanden in zware constructies vrijwel onvermijdelijk zijn-(zie §3) en met het feit dat in grote constructies veel energie kan worden opgehoopt, waardoor kleine beginscheurtjes zich snel tot grote breuken kunnen ontwikkelen (zie in dit verband het artikel van Prof.ir.H.E.Jaeger elders in dit nummer van Schip en Werf).

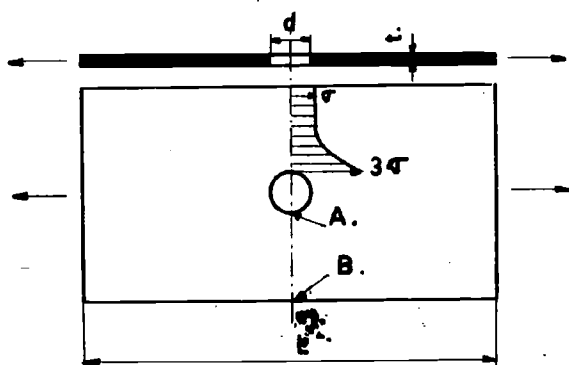
§3. De invloed van discontinuïteiten op de statische sterkte van constructies.

Een scheepsbouwer kan slechts zijdelings verantwoordelijk geacht worden voor de invloed die de samenstelling van het materiaal, de

temperatuur en de belastingsnelheid hebben op het ontstaan van breuken in schepen.

Met de voorgeschiedenis is het anders gesteld. Een constructie ontworpen vanuit statisch gezichtspunt, kan, indien er dynamische belastingen op worden uitgeoefend, aanzienlijk zwakker blijken te zijn dan uit de statische berekening zou volgen. Deze kwestie zal in § 4 worden behandeld.

Eerst zal de invloed van discontinuïteiten op de statische sterkte van een constructie worden bekeken. Hiertoe wordt uitgegaan van het eenvoudige geval van een plaat met een gat er in. Verondersteld wordt dat het gat klein is ten opzichte van de breedte en de lengte van de plaat, en dat de gatdiameter  $d$  minstens twee maal de plaatdikte  $t$  is (fig.4).



Dit laatste is, zoals straks duidelijker wordt, nodig om de spanningstoestand in de omgeving van het gat als tweedimensionaal te mogen beschouwen. In dat geval is, zoals in § 2 is vermeld, grote plastische vervorming mogelijk.

Het gat in de plaat verstoort de gelijkmatige elastische spanningsverdeling. In de buurt van punt A in fig.4 ontstaat hierdoor een concentratie van spanningen.

Theoretisch en experimenteel is aan te tonen dat voor een oneindig brede plaat de concentratiefactor ter plaatse van het punt A gelijk is aan 3: m.a.w. de spanning in de langsrichting van de plaat is ter plaatse van A drie maal zo groot als op grote afstand van het gat (punt B).

We gaan nu na wat er met het materiaal ter plaatse van A gebeurt, wanneer de belasting opgevoerd wordt tot uiteindelijk breuk optreedt. Wanneer in A de spanning boven de vloeigrens komt zal het materiaal slechts weinig vloeien. Dit komt doordat het omringende materiaal, dat veel lager belast wordt, een grote vervorming niet toelaat. Bij verdere toename van de belasting zal de spanning ter plaatse van A aanvankelijk niet groter worden dan  $\sigma_v$ . Pas wanneer overal in doorsnede AB de vloeigrens wordt overschreden, zal het materiaal in A zo sterk rekken dat het verstevigt. De spanning zal daardoor groter worden dan de vloeigrens. De rekken in A en B verhouden zich nu anders dan in het elastisch gebied. Aanvankelijk is de rekconcentratie\*) in A groter dan 3, door het plastisch meegeven van het materiaal. Op de duur vervormt het gat zich echter tot een ellips, waardoor de spanningsverdeling zich in gunstige zin wijzigt. De rekconcentratie zal hierdoor belangrijk afnemen.

Voor het gemak laten we deze overwegingen buiten beschouwing en nemen aan dat de rekconcentratie gedurende het gehele belastingsproces de waarde 3 heeft. Wanneer de belasting nu zo hoog wordt opgevoerd dat het materiaal ter plaatse van A begint in te snoeren, dan heeft de rek op die plaats ongeveer de grootte die bij  $\sigma_{max}$  in de trek-kromme van staal hoort (zie fig. 5:  $\xi_{(A)}$ ). De rek in punt B ( $= \xi_{(B)}$ ) is dan gelijk aan  $1/3 \xi_{(A)}$ . De bijbehorende spanning is uit de trek-kromme af te lezen ( $\sigma_{(B)}$ ).

\*) Hieronder verstaan we de verhouding tussen de specifieke rek in A en B op een bepaald moment.



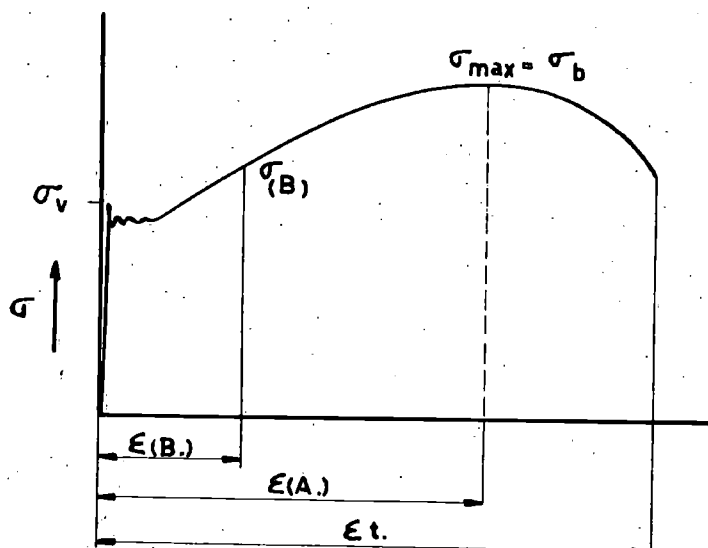


Fig. 5

Wordt de belasting nu verder opgevoerd tot zich in A een flinke insnoering heeft ontwikkeld, dan zal  $\epsilon_{(B)}$  eveneens nog sterk toenemen ( $\epsilon'_{(B)}$ ). De spanning  $\sigma_{(B)}$  zal daardoor uiteindelijk tot de waarde  $\sigma_{max}$  kunnen naderen.

We zien dus dat de statische sterkte van een brede plaat door de aanwezigheid van een gat vrijwel niet wordt verminderd.

De breukbelasting is immers niet gelijk aan ongeveer  $1/3$  van die van een volle plaat, zoals uit de aanwezigheid van de elastische spanningsconcentratie ten onrechte wel eens geconcludeerd wordt. De breuklast bedraagt namelijk  $P_{br.} = \sigma_{max.} \times (F_{plaat} - F_{gat}) \approx \sigma_{max.} F_{plaat}$ .

De totale verlenging van de plaat met gat is wel belangrijk kleiner dan van de volle plaat.

Wanneer de lengte  $L$  van de plaat groot is ten opzichte van het gat, is de verlenging vrijwel gelijk aan  $\epsilon'_{(B)} \cdot L$ . Voor de volle plaat is de verlenging  $\epsilon_t \cdot L$  (zie fig.5). De arbeid tot breuk is voor beide gevallen resp.:

$$a_1 = \sigma_{(B)} (F_{plaat} - F_{gat}) \cdot \epsilon'_{(B)} \cdot L \text{ (plaat met gat),}$$

$$a_2 = \sigma_{max.} F_{plaat} \cdot \epsilon_t \cdot L \text{ (plaat zonder gat).}$$

Voor korte platen kan  $a_2$  een veelvoud van

$a_1$  zijn. Naarmate de lengte groter wordt, zal  $a_1$  meer tot  $a_2$  naderen. Bij grote lengten is de in-snoeringsrek namelijk relatief klein.

Ter illustratie van het bovenstaande zijn in fig.6 de statische trekkrommen gegeven van twee platen, elk met een meetlengte van 15 cm, een breedte van 10 cm en een dikte van 9 mm. In een der platen bevond zich een gat met een diameter van 1,5 cm.

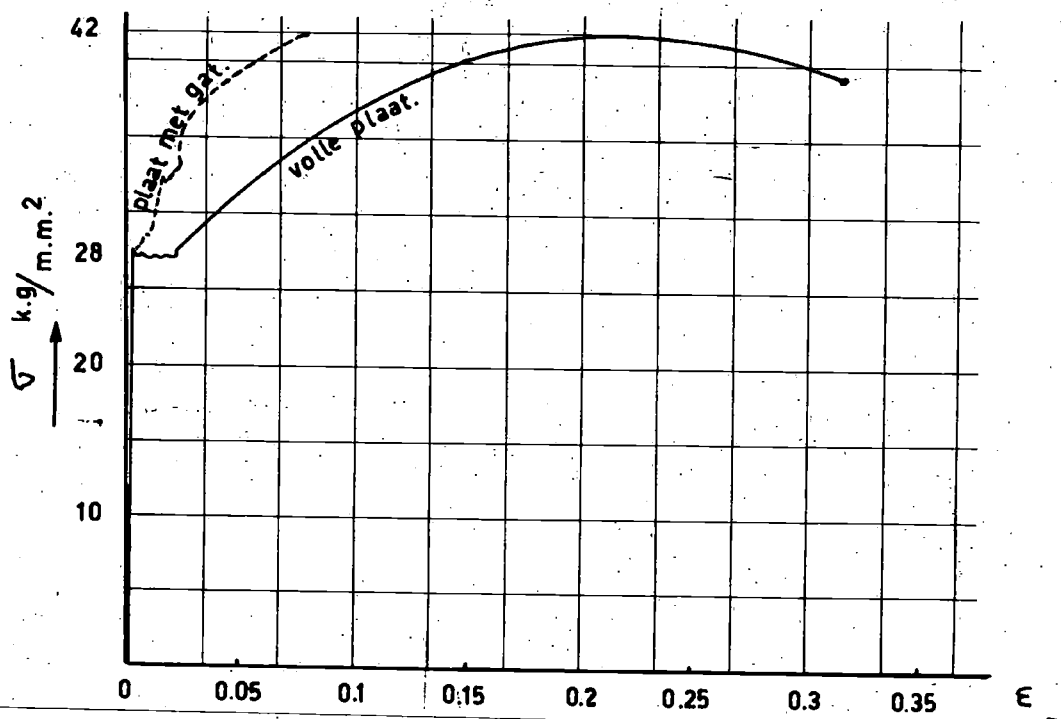


Fig. 6

De gemiddelde spanning op het moment van breken bedroeg voor de volle plaat  $42,0 \text{ kg/mm}^2$  en voor de plaat met gat  $41,7 \text{ kg/mm}^2$ . De verlenging der platen was resp. 7,5% en 31,0% voor een meetlengte van 15 cm.

Het is nu van belang na te gaan of de beschreven gang van zaken ook geldt voor het in fig.7 getekende geval. De afmeting van het gat in de krachtrichting  $v$  is hier zowel klein ten opzichte van de breedte van het gat  $w$  als ten opzichte van de plaatdikte  $t$ .

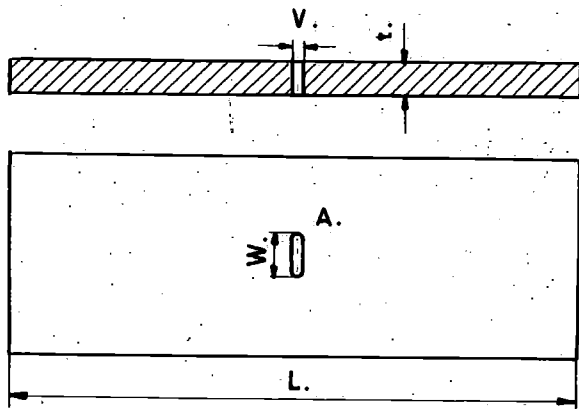


Fig. 7

A kleiner, omdat de spanningen daar lager zijn. Het materiaal buiten A zal dus de sterke dwarscontractie ter plaatse van A tegenwerken.

Dit heeft tot gevolg dat in A trekspanningen in de richting van de plaatdikte ontstaan. De maximum waarde van deze spanningen zal groter zijn, naarmate de plaat dikker is bij gelijke afmetingen van het gat. Dit is enigszins in te zien door te bedenken dat de dwarscontractie  $S_1$  in A bij een dunne plaat kleiner is ten opzichte van de lengte van het gat  $v$  dan bij een dikke plaat ( $S_2$ ) (fig. 8).

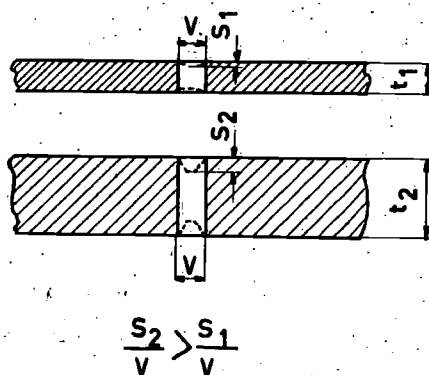


Fig. 8

De spanningsconcentratie is door de minder gunstige vorm van het gat groter dan bij een rond gat. Bovendien liggen de piekspanningen sterker geconcentreerd rondom A. Vanuit A is er dus in elke richting een groot spanningsverval.

De hoge spanningen in A willen in de richting van de plaatdikte dwarscontractie veroorzaken. De dwarscontractie is buiten

Naast deze secundaire spanningen in een richting loodrecht op de plaat, ontstaan op soortgelijke wijze trekspanningen in de breedterichting van de plaat. Beide typen secundaire spanningen zullen, zoals in § 2 is behandeld, tot gevolg hebben dat het materiaal ter plaatse van A pas kan vloeien als de primaire trekspan-

ning een bepaald bedrag hoger is dan de vloeigrens.

Men kan zich indenken dat deze nieuwe waarde van de vloeigrens boven de breeksterkte van het materiaal komt te liggen, bijv. in het geval van zeer dikke platen en zeer scherpe kerven. Er ontstaat dan breuk zonder plastische vervorming, m.a.w. een brosse breuk.

Bij kamertemperatuur en lage belastingsnelheid gedraagt vloeistaal zich echter, zelfs bij zeer dik materiaal en scherpe kerven, in zoverre gunstig, dat aan de breuk altijd nog wel enige plastische vervorming voorafgaat. Deze vervorming is echter zo klein dat, zodra buiten de kerf de vloeigrens wordt overschreden, een scheur wordt ingeleid. De breuklast is in dat geval derhalve slechts  $\sigma_v \cdot F$  in plaats van  $\sigma_b \cdot F$ . De totale vervorming op het moment van scheuren is bovendien zeer klein. Zij kan in de orde van grootte van de elastische vervorming, behorende bij de spanning  $\sigma_v$  zijn, dus gelijk aan  $\frac{\sigma_v \cdot L}{E}$ .

Bij lage temperaturen en/of hoge belastingssnelheden kan breuk optreden zonder plastische vervorming. De breuklast wordt dan alleen bepaald door de grootte van de spanningsconcentratie  $k$  in de kerf en de in § 2 besproken zuivere breeksterkte van het materiaal. Als bijv.  $k = 8$  en  $\sigma_b$  voor St.42 ongeveer  $80 \text{ kg/mm}^2$ , zal derhalve breuk optreden bij een kracht van  $\frac{80}{8} \times F = 10 F \text{ kg}$ . M.a.w. de nominale spanning ( $10 \text{ kg/mm}^2$ ) buiten de kerf is op het moment van breken slechts een fractie van de treksterkte en minder dan de helft van de vloeigrens.

Resumerende hebben we tot dusver gezien dat:

- 1e. Bij brede platen met een rond gat ( $d > 2t$ ) de breuklast ongeveer gelijk is aan die van een plaat zonder gat. Bij korte platen zijn totale verlenging en arbeid tot breuk bij een plaat met een gat aanzienlijk kleiner dan bij de ongeschonden plaat. Het verschil neemt echter af met toenemende plaatlengte.
- 2e. Bij scherpe kerven ( $v \ll t$  en  $w$ ) de driedimensionale spanningstoestand niet meer genegeerd kan worden. Bij kamertemperatuur en lage belastingssnelheid is er nog een, zij het geringe, plastische vervorming; de breuklast is ongeveer  $\sigma_v \cdot F$ . Bij lage temperatuur en/of hoge belastingssnelheid is er geen plastische vervorming meer en breekt de plaat als in de kerf de zuivere breeksterkte bereikt wordt.

Het zal nu duidelijk zijn geworden dat het gevaar van een hoge spanningsconcentratie niet direct schuilt in de hoge spanningen die ter plaatse aanwezig zijn, maar in de complexe spanningstoestand, die er noodzakelijk mee gepaard gaat. Dit geldt echter alleen voor statische belastinggevallen.

In de volgende § zal het voorgaande daarom worden uitgebreid met een beschouwing waarin ook dynamische belastingen worden betrokken.

#### §4. Spanningsconcentraties en dynamische belastingen.

Behoudens voor onderdelen als machinefundaties en dergelijke, wordt bij de sterkteberekening en vormgeving van scheepsconstructies betrekkelijk weinig in aanmerking genomen dat de belastingstoestand niet statisch maar dynamisch is.

Wanneer in schepen hoogstens trek- of drukspanningen in de orde van de vloeigrens zouden

voorkomen, zou men inderdaad het dynamisch aspect in de belasting buiten beschouwing mogen laten. Het aantal malen dat gedurende het bestaan van een schip dergelijke spanningen optreden, is namelijk zo gering dat geen gevaar voor vermoeiing bestaat.

Bij spanningsconcentraties is de toestand evenwel zó dat als het omringende materiaal tot dicht bij de vloeigrens wordt belast, op de beschouwde plek in het algemeen plastische vervorming zal optreden. Indien dit in verband met de spannings-toestand ter plaatse niet mogelijk is, zullen zeer hoge spanningen ontstaan, zoals in § 3 is verklaard.

We dienen nu eerst een indruk te krijgen van wat er in het eerste geval gebeurt - dus als plastische vervorming wel mogelijk is - wanneer het materiaal afwisselend op trek en druk wordt belast.

Om de gedachten te bepalen beschouwen we nog eens de dunne plaat voorzien van een gat uit § 3. Hierbij wordt weer verondersteld dat niet alleen in het elastisch gebied maar ook in het plastisch gebied de toename van de rek ter plaatse van de spanningsconcentratie A steeds drie maal zo groot is als er buiten B. Tevens wordt verondersteld dat het verband tussen spanning en vervorming in trek- en drukgebied gelijk is \*) (zie fig. 9).

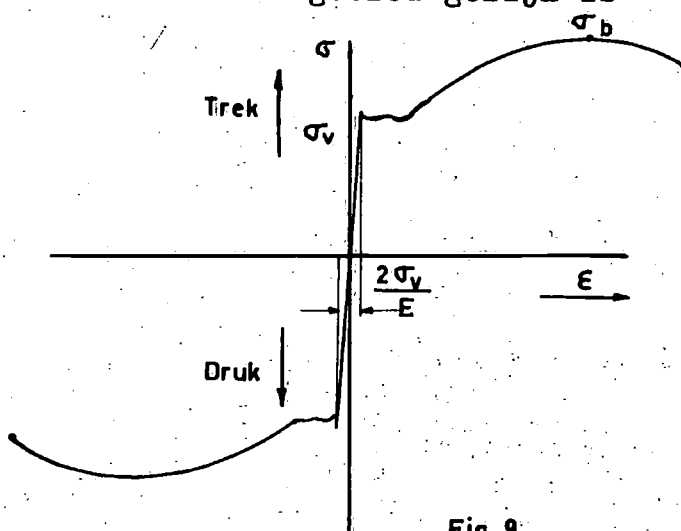


Fig. 9

Als we nu de spanning in B telkens tussen  $+\sigma_v$  en  $-\sigma_v$  laten variëren, zodanig dat daar juist geen vloeien optreedt, wisselt de rek daar ter plaatse tussen  $+\frac{\sigma_v}{E}$  en  $-\frac{\sigma_v}{E}$ ; de absolute som van de vervormingen gedurende

\*) Dit is weliswaar aanvechtbaar, maar voor de hier gegeven kwalitatieve beschouwing toelaatbaar.

één belastingscyclus is  $\left| \frac{2 \sigma_v}{E} \right|$ ; deze vervorming is elastisch. Omdat in A het materiaal gaat vloeien, zal ook daar de spanning aanvankelijk variëren tussen  $+\sigma_v$  en  $-\sigma_v$ ; de hierbij behorende vervorming is echter  $\frac{3 \sigma_v}{E}$ . De absolute som van de vervormingen gedurende één belastingscyclus is  $\left| \frac{6 \sigma_v}{E} \right|$ . Hiervan is  $\frac{2 \sigma_v}{E}$  elastisch; de rest namelijk  $\frac{4 \sigma_v}{E}$  is dus plastisch.

Bedenken we nu dat plastische vervorming van staal in het algemeen tot versteviging, en derhalve tot verhoging van de vloeigrens leidt, dan ligt het voor de hand te veronderstellen dat het hier beschouwde plastisch rekken en krimpen eenzelfde resultaat zal hebben.

Bij toenemend aantal belastingswisselingen zal dan een steeds groter gedeelte van de absolute som van rek en krimp ter plaatse van A elastisch worden. Uiteindelijk is plastisch rekken en krimpen niet meer mogelijk. De spanning ter plaatse van A zal in dat geval steeds drie maal zo hoog zijn als in B.

Voor St.42 met  $\sigma_v = 28 \text{ kg/mm}^2$  zou nu de spanning in A derhalve wisselen tussen  $\pm 84 \text{ kg/mm}^2$  en  $-84 \text{ kg/mm}^2$ . Voor het zover is, zal zich ter plaatse van A een scheurtje ontwikkeld hebben. Dit scheurtje betekent voor het materiaal een zeer hoge spanningsconcentratie, zodat te verwachten is dat het zich onder de hier beschouwde belastingstoestand snel zal uitbreiden.

Het aantal wisselingen nodig om het beginscheurtje in te leiden, zou men kunnen schatten met behulp van de onderstelling dat de versteviging die tengevolge van een plastisch rekken  $\epsilon_v$  en een plastisch krimpen  $\epsilon_k$  optreedt, gelijk is aan de verste-

viging die tengevolge van een plastische rek ter grootte van  $|\xi_r| + |\xi_k|$  optreedt. Uit de statische trekkromme van staal is dan eenvoudig af te leiden dat zich in ons geval een scheurtje na  $\pm 300$  wisselingen moet gaan vormen.

Het is nu mogelijk dat het bovenaangegeven proces van progressieve versterking niet geheel plaats vindt, of zich in een veel langzamer tempo ontwikkelt. Dit is het geval als de versterking teweeggebracht door plastisch rekken, geheel of gedeeltelijk wordt te niet gedaan door plastisch krimpen, en omgekeerd. Het materiaal zal dan een belangrijk groter aantal wisselingen tot breuk kunnen verdragen dan in het eerder beschreven geval.

Breuk hoeft echter niet alléén op te treden als sluitstuk van progressieve versterking. Het afwisselend plastisch vervormen onder trek en druk kan namelijk betekenen dat er in het materiaal kristalvlakken zijn, die voortdurend langs elkaar heen en weer glijden. \*)

Dit heen en weer glijden kan een dusdanig slijtageproces voor het materiaal betekenen, dat zich op de duur een scheurtje ontwikkelt. Het is in dit geval niet mogelijk een ruwe schatting te maken van het aantal belastingswisselingen tot breuk.

Het voor het eerste geval berekende aantal van  $\pm 300$  stelt vermoedelijk wél de meest ongunstige situatie voor. Het ligt overigens ver beneden het aantal van  $\pm 10.000$  wisselingen, dat dikwijls als de grens van het vermoeingsgebied wordt beschouwd.

\*) Aan sommige z.g. dislocatietheorieën, die een theoretische verklaring van plastische deformatie en vermoeingsverschijnselen geven, liggen dergelijke overwegingen ten grondslag.



Ondanks dat dus vermoeiing in eigenlijke zin niet optreedt, is de breuklast van de hier beschouwde plaat lang niet gelijk aan de sterkte onder een statische belasting. De nominale breukspanningen zouden immers voor resp. één maal belasten en circa 300 maal belasten  $42 \text{ kg/mm}^2$  en  $28 \text{ kg/mm}^2$  zijn. Eveneens belangrijk is, dat de vervorming tot breuk voor de dynamisch belaste plaat vrijwel nihil is.

De progressieve versteviging heeft ertoe geleid dat het materiaal ter plaatse van A in feite bros is geworden.

In de techniek is tot dusver weinig aandacht geschonken aan de eigenschappen van materialen onder hoge dynamische belastingen. Het ligt niet direct op het terrein van de scheepsbouwer in deze leemte te voorzien. Anderzijds is de kwestie wel zó belangrijk dat elke uitbreiding van de desbetreffende kennis welkom is. Het is daarom dat in het laboratorium voor Scheepsconstructies der Technische Hogeschool enkele platen met gaten dynamisch zijn beproefd. Het resultaat is weergegeven in fig.10.

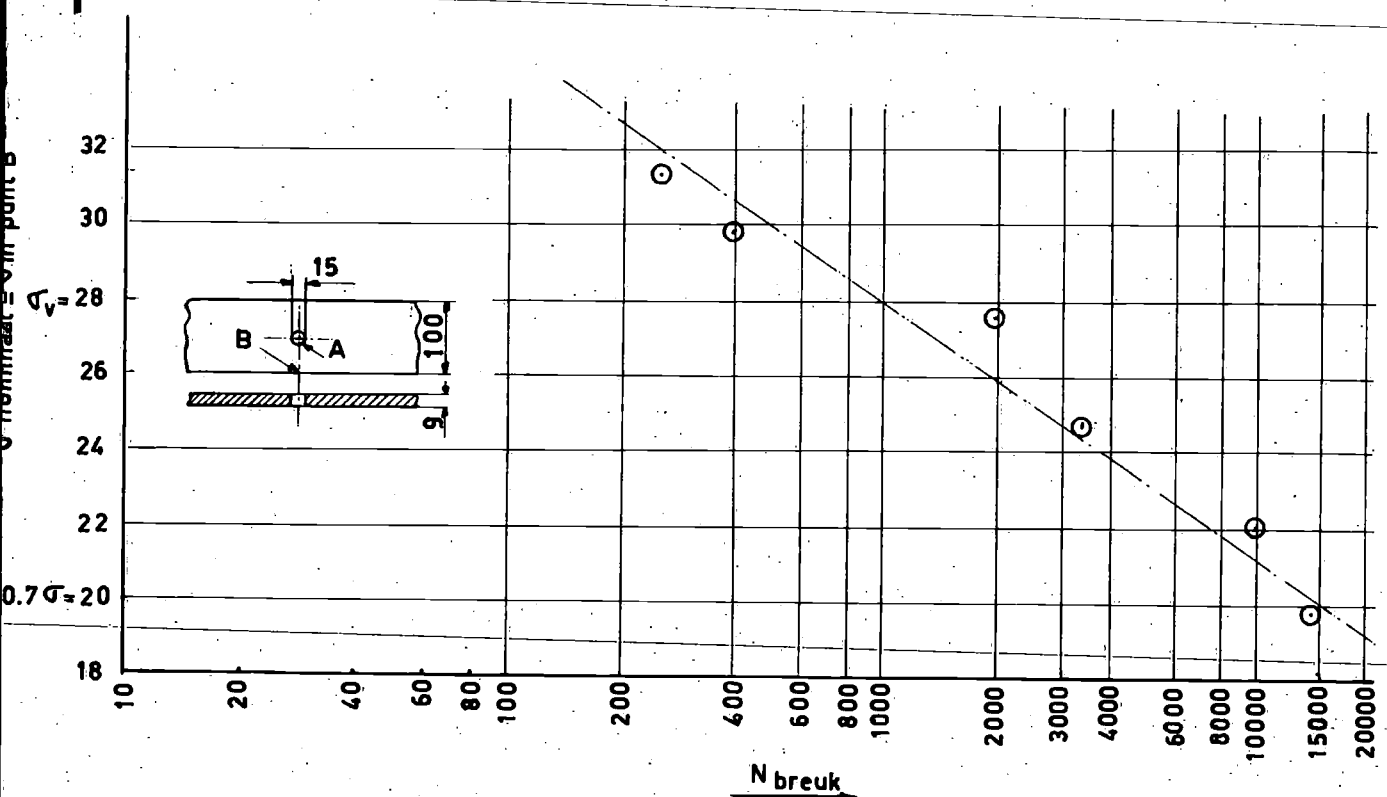


Fig. 10

Opvallend is dat de punten onderling zeer behoorlijk stroken, ondanks dat bij vermoeingsproeven de spreiding dikwijls bijzonder groot is. De scheurtjes lagen bovendien alle op, of zeer dicht bij de plaats waar de spanningsconcentratie het grootst was (punt A). Verder werden zij vrijwel steeds ongeveer gelijktijdig aan weerskanten van het gat geconstateerd.

Door dit alles maken de proeven, ondanks het geringe aantal proefstukken, een betrouwbare indruk. We zien dat voor het in deze § behandelde geval, waarbij de nominale spanning buiten het gat tussen  $+\sigma_v$  en  $-\sigma_v$  wisselde, het aantal wisselingen tot breuk  $\pm 1.000$  bedroeg, in plaats van de berekende 300. Ook is te zien dat bij een nominale spanning van 70 % van de vloeigrens het aantal wisselingen nog maar  $\pm 15.000$  bedraagt.

Metingen met behulp van rekstrookjes hebben nog interessante bijzonderheden omtrent het gedrag van het materiaal ter plaatse van punt A (fig.10) opgeleverd.

Bij langzame wisselingen van de belasting (2 per minuut) bleek de vervorming bij toenemende en afnemende belasting belangrijk te verschillen. Na enkele tientallen wisselingen bleek deze hysteresis te zijn afgenomen tot een waarde die bij voortgaand belasten vrijwel constant bleef.

Merkwaardig was evenwel dat een honderdtal tussentijdse belastingswisselingen à 250/minuut een sterke afname van deze resthysteresis bracht. De belastingsnelheid schijnt derhalve het gedrag van het materiaal sterk te bepalen.

Iets dergelijks doet zich ook voor bij het verouderen van het materiaal; na een onderbreking van de proef van 24 uur was de resthysteresis eveneens sterk afgenomen.

Resumerende kunnen we constateren dat de sterkte van een constructie waarin spanningsconcentraties voorkomen, bijzonder afhankelijk is van het feit of de belasting statisch of niet-statisch is. Bij enkele honderden belastingswisselingen kan de breuklast al 30 % lager zijn dan bij een statische belasting.

Een belasting welke bijv. in schepen gedurende hun bestaan niet meer dan enkele honderden malen tussen een maximum en minimum waarde wisselt, is al de belasting van een tussendek ten gevolge van de lading op dit dek. Door het laden wordt het dek belast, door het lossen ontlast.

We zullen ons nu meer in het bijzonder met de belastingstoestand bij scheepsconstructies bezig houden.

Het is niet overdreven als het aantal grote belastingswisselingen dat een schip tijdens zijn leven in zwaar weer meemaakt, op ongeveer 10.000 geschat wordt. We hebben verder gezien dat een plaat met een matige spanningsconcentratie een wisselspanning van 70 % van de vloeigrens of wel 47 % van de treksterkte, slechts 15.000 maal kon doorstaan. Op grond van dit alles kunnen we een schip moeilijk als een zuiver statisch belaste constructie beschouwen. Dit is van invloed zowel op de berekening als op de constructieve vormgeving.

O.a. houdt het in dat het plastisch ontwerpen en berekenen van scheepsconstructies met grote voorzichtigheid dient te geschieden. Het optimisme van Baker in [2] ten aanzien van de toekomst van "plastic design" in de scheepsbouw is dan ook niet gerechtvaardigd. Er zijn namelijk vrijwel geen zuiver statisch belaste constructies in een schip.

Eenzelfde voorzichtigheid dient men te be-

trachten bij de beoordeling van de resultaten van proeven met constructies als luikhoofdhoeken, knieverbindingen van langsspanten, e.d. Tot nu toe zijn namelijk al deze proeven verricht bij statische belastingen. In de volgende § zal daarom nader op de resultaten van die proeven worden ingegaan.

Voordat hiertoe wordt overgegaan moet nog het volgende opgemerkt worden:

Ofschoon vele breuken geconstateerd aan boord van schepen typische brosse breuken zijn, kan het niet-statisch zijn van de belasting een rol bij de ontwikkeling ervan gespeeld hebben. Een dynamische belasting kan immers tot versteviging van het materiaal aanleiding geven. Dit betekent een brosser worden van het materiaal, gepaard gaande met een hogere overgangstemperatuur.

Het is verder zeer wel mogelijk dat de gevaarlijke kerf die een vermoeiingsscheurtje voor een constructie betekent, de aanleiding tot het ontstaan van sommige brosse breuken is geweest.

## §5. Enkele opmerkingen over sterktecriteria en constructieve vormgeving.

### a. Voor statisch belaste constructies.

In de Verenigde Staten zijn naar aanleiding van het optreden van breuken in scheepsconstructies uitgebreide onderzoeken verricht. Een gedeelte hiervan bestond uit experimenten met proefstukken die met constructiedetails van schepen overeenkwamen.

Algemeen bekend zijn de proeven met luikhoofdhoeken [4]. Irwin en Campbell onderzochten verder de doorverbinding van langsspanten ter plaatse van waterdichte schotten [3]. Hun proefstukken werden bij diverse temperaturen statisch tot breuk belast. Als belangrijkste criterium voor

de beoordeling van verschillende constructietypen werd de arbeid beschouwd die tot op het moment van breken door een proefstuk was opgenomen.

Dit wordt door hen min of meer verantwoord door de opmerking dat de juistheid van deze werkwijze bij luikhoofdhoekconstructies door latere praktijkervaring is bevestigd. Deze verantwoording is nogal aanvechtbaar. Voor drie verschillende typen luikhoofd-proefstukken verhield zich namelijk de arbeid tot breuk als 1 : 4 : 30 [4]. Voor de drie typen langsspantdoorvoeringen weergegeven in fig.11 werden veel geringere verschillen gevonden zoals uit tabel I blijkt.

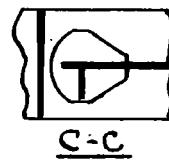
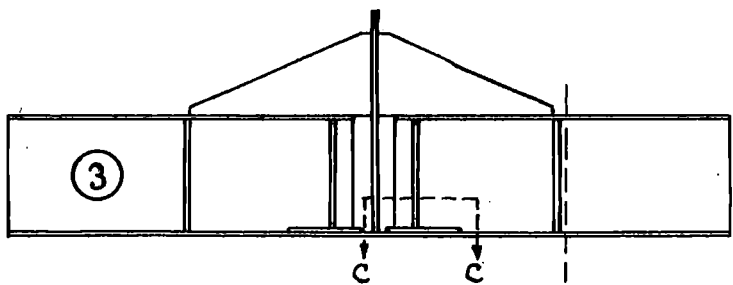
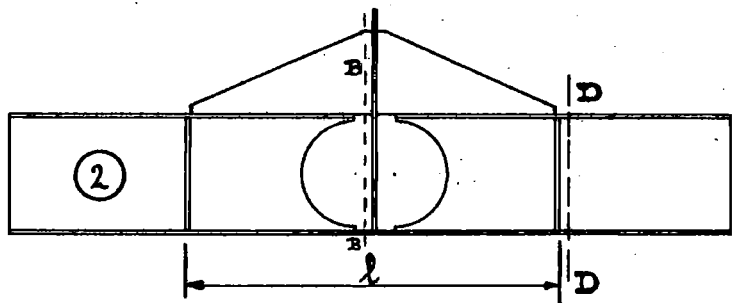
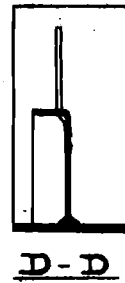
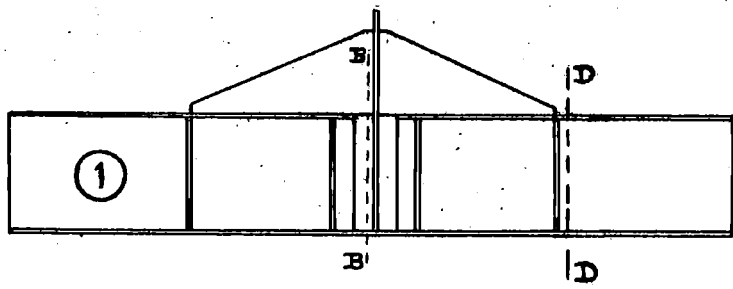


Fig. 11

Tabel I.

Enkele resultaten van proeven met langsspan-  
doorvoeringen.

Type:	Proef- stuk:	Temperatuur:	Arbeid(mkg):	Gemiddelde spanning in D-Din kg/mm <sup>2</sup> :	Verlen- ging na breuk in mm:
1	{ 1A4	- 6° F	4970	24,8	15,7
	{ 1A6	- 1° F	3320	22,2	12,1
	{ 1A5	+ 3° F	12900	28,9	52,0
2	2A*	- 1° F	16730	27,3	43,4
3	{ 3A	+ 8° F	17350	29,9	42,7
	{ 12A*	- 4° F	9070	28,8	23,4

Type 2 en 3 vertonen bij overeenkomstige tem-  
peraturen <sup>aen</sup> twee à drie maal zo grote arbeid tot  
breuk als type 1.

Het is sterk de vraag of, louter op grond van  
de correlatie tussen de proeven met luikhoofdhoeken  
en praktijkervaring, ook de langsspanconstructies  
geklasseerd mogen worden naar arbeid tot breuk.  
De onderlinge verschillen in arbeid in tabel 1 zijn  
zoals reeds opgemerkt veel kleiner dan de verschil-  
len in arbeid voor de typen luikhoofdhoeken.

Daarenboven is in de vorige §§ al tot uiting  
gekomen dat de in sterkteberekeningen toe te passen  
sterktecriteria niet alleen afhankelijk zijn van  
de temperatuur, maar ook van de belastingstoestand,

de materiaalverdeling in de constructie, enz.

Het ligt nu niet in de bedoeling om in dit artikel precieze richtlijnen ten aanzien van de te gebruiken sterktecriteria voor uiteenlopende gevallen te geven. Het wil slechts de aandacht richten op bepaalde gezichtspunten, die bij het kiezen van sterktecriteria niet uit het oog mogen worden verloren.

Een nadere behandeling van de waarde van de criteria: arbeid tot breuk en breuklast bij beproevingen met scheepsconstructies, kan hierbij verhelderend werken. Dit zal worden gedaan aan de hand van de in fig.11 gegeven langsspantverbindingen.

De typen 2 en 3 zijn beide variaties op uitvoering 1, welke laatste oorspronkelijk in T<sub>2</sub>-tankers werd toegepast. In type 2 is gestreefd naar een slapper, beter vervormbaar geheel; type 3 heeft een stijvere constructie.

Uit het rapport van Irwin en Campbell is nu het volgende af te leiden:

- 1e. Bij 0° F is de arbeid tot breuk van type 2 ruwweg 3 x groter en voor type 3 ruwweg 2 x groter dan van type 1.
- 2e. De totale rek na breuk bedroeg bij 0° F voor type 2 circa 50 mm en voor type 3 circa 30 mm.
- 3e. De breukspanning berekend over de doorsnede buiten het kniegedeelte was voor type 2 27,8 kg/mm<sup>2</sup> en voor type 3 29,2 kg/mm<sup>2</sup>.
- 4e. De vloeigrenzen van langsspant en bodemplaat hebben dusdanige waarden, dat het waarschijnlijk is dat bij type 3 buiten het kniegedeelte een niet onbelangrijke plastische vervorming heeft plaats gehad. Bij type 2 zal dit, in verband



met de lagere spanning op het moment van breken (zie 3e) in het geheel niet of in veel geringer mate plaats gevonden hebben.

5e. De plastische vervorming in bodemplaat en knie in de omgeving van het schot was bij type 2 gemiddeld  $\pm 3x$  groter dan bij type 3.

Hoe gevaarlijk het is de energie tot breuk als maatstaf bij de interpretatie van proefresultaten te hanteren, kan blijken door na te gaan wat er zou gebeuren als we bij gelijkblijvende vorm van het kniegedeelte de proefstukken zouden verlengen.

Bij type 2, waar langsspant + bodemplaat weinig of niet gevloeid hebben, zal de totale rek na breuk slechts weinig groter worden; de arbeid tot breuk zal dus eveneens weinig afhankelijk zijn van de proefstuklengte.

Bij type 3 daarentegen zal de arbeid tot breuk door het niet alleen elastisch, maar ook plastisch rekken van de verlengstukken, sterk afhankelijk zijn van de proefstuklengte.

Bij voldoende lengte kan voor type 3 de arbeid tot breuk groter worden dan voor type 2.

Het behoeft geen betoog dat de waarde van arbeid tot breuk als maatstaf voor de beoordeling van proeven door dit alles bijzonder twijfelachtig is.

Een nog belangrijker conclusie is dat het beslist noodzakelijk is dat bij experimenteel onderzoek aan scheepsconstructies, model en prototype niet alleen geometrisch gelijkvormig zijn, maar ook gelijke randvoorwaarden bezitten. Deze conclusie brengt ons er toe eens te zien of de breedte van de onderzochte constructies overeenstemde met de situatie aan boord. Het blijkt dan dat de bodemplaat veel smaller was dan de helft van de langsspant-

afstand. Ook dit beïnvloedt de proefresultaten sterk. Teneinde dit duidelijk te maken, bekijken we eens een constructie met een extreem brede bodemplaat (fig.12).

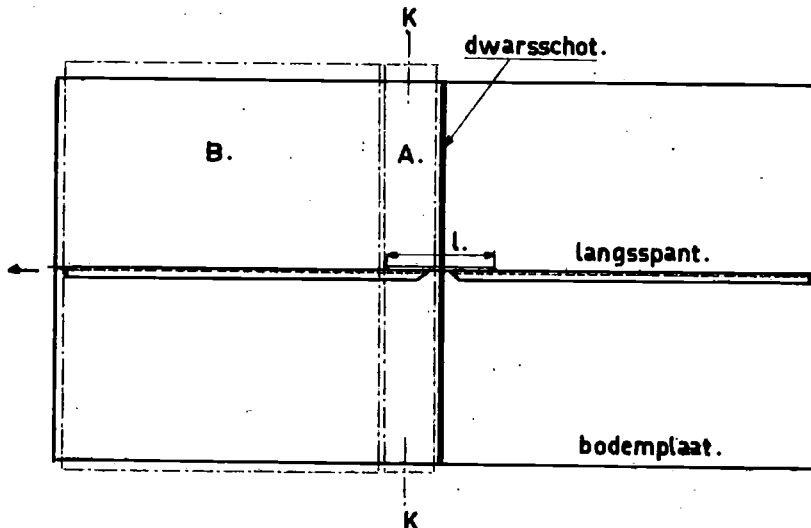


Fig. 12

In doorsnede k-k naast het schot zal het materiaal van langsspant + knie slechts een fractie zijn van dat in de bodemplaat. Stel dat de langsspant-schot-verbinding van type 2 is. Eerder is besproken dat wanneer dit type een smalle bodemplaat heeft, het in het kniegedeelte plastisch vervormt en breekt, vóórdat in de langspanen buiten  $l$  (fig.11) de vloeigrens kan worden bereikt. Is nu een brede bodemplaat aanwezig, dan kan zich geen grote plastische vervorming in het kniegedeelte vrij ontwikkelen. Pas wanneer over de gehele breedte van de constructie (gebied A) het materiaal is gaan vloeien zal dit wél het geval zijn. Vrijwel gelijktijdig zal dan ook de vloeigrens in het gedeelte B overschreden zijn, in tegenstelling tot het gedrag bij het proefstuk met smalle bodemplaat. Bij verder belasten zal de gehele constructie zich ongeveer gedragen als de in § 3 behandelde dunne plaat met rond gat. Het effect van de knieverbinding is namelijk soortgelijk aan dat van een spanningsconcentratie van matige grootte in een breed plaatveld. De breuklast kan dus vèr boven de vloeilast liggen, terwijl de vervorming aanzienlijk zal zijn.

Wanneer nu constructietype 3 in de situatie van fig.12 wordt geplaatst, is het met de statische sterkte van het geheel veel slechter gesteld. Dit type is namelijk betrekkelijk stijf. Dit betekent dat in het eigenlijke kniegedeelte tot op het moment van breken weinig of geen plastische vervorming mogelijk is.

Iets soortgelijks zijn we in § 3 tegengekomen bij het geval van een dikke plaat voorzien van een kerf. Voor beide gevallen geldt dat ter plaatse van de spanningsconcentratie (kerf of knie) spoedig een scheur zal optreden, zodra de vloeigrens in de omgeving wordt overschreden.

De breuklast kan dus weinig of niet boven de vloeilast stijgen in tegenstelling tot het geval waarbij type 3 voorzien was van een smalle bodemplaat. De totale rek zal nu (type 3, brede bodemplaat), ook bij een grote lengte van het proefstuk, klein zijn. De oorzaak hiervan is dat voordat ergens aanzienlijke plastische vervorming kan optreden, het materiaal reeds gescheurd is.

Een belangrijke conclusie is nu dat een stijve, plastisch weinig vervormbare constructie als type 3 dan ook niet thuishoort temidden van een grote hoeveelheid plastisch goed vervormbaar materiaal. Voor een dergelijk geval is, zoals eerder toegelicht, het slappe type 2 de aangewezen constructie.

Soms kan het gebeuren dat men om de een of andere reden toch een stijve constructie wil toepassen. Men dient er dan voor te zorgen dat over de gehele breedte van het gebied A in fig.12 de vloeigrens niet wordt overschreden, zo lang in het gebied B zich nog geen behoorlijke plastische vervorming heeft kunnen ontwikkelen. Men kan dit bewerkstelligen door het gehele gebied A te versterken, bijv. door een dikke plaat of desnoods een dubbelplaat.

Hetgeen hierboven te berde is gebracht ten aanzien van een langspant-schotconstructie geldt ook voor een luikhoofdhoek. Een kleine dubbelplaat in de directe omgeving van de hoek maakt de constructie alleen maar stijver. Dit betekent voor de dekdoorsnede A-A (fig.13a) eerder een verzwakking dan een versterking. De geringe hoeveelheid materiaal in de dubbelplaat zal de dekdoorsnede namelijk slechts weinig vergroten, maar de constructie uit een oogpunt van bros breken gevaarlijker maken. Een betere uitvoering is gegeven in fig.13b.

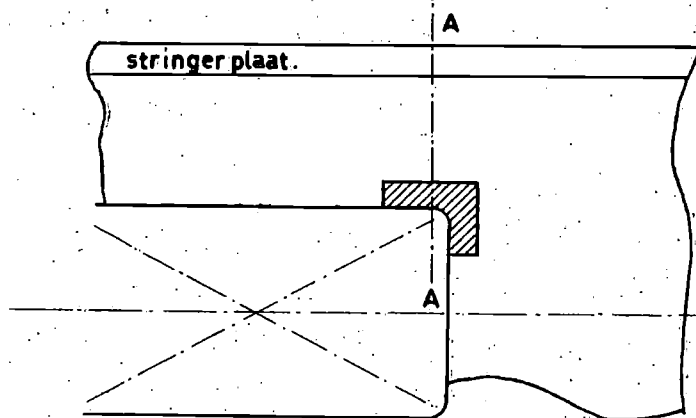


Fig. 13a.

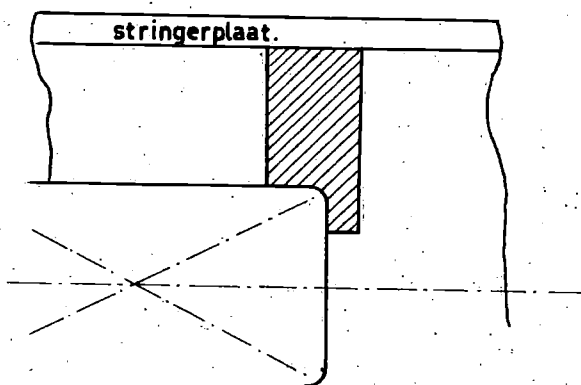


Fig. 13 b.

Een statisch belaste constructie dient dus zó te worden ontworpen dat als ter plaatse van discontinuïteiten breuk zou optreden, het materiaal er buiten ook vrijwel op breken staat. Alleen dan is er een economische materiaalverdeling bereikt. De breuklast, rek tot breuk en arbeid tot breuk zijn dan optimaal.

§ 5 b. Constructieve vormgeving van dynamisch belaste constructies.

Het is nu van belang na te gaan in hoeverre het in § 5 besprokene opgaat voor het geval dat de belasting dynamisch is.

De proeven van Irwin en Campbell hebben uitgezeten dat in proefstuk 2 een grote spanningsconcentratie voorkomt in de rand van de uitholling van het langsspant. Proefstuk 3 daarentegen vertoont in veel mindere mate spanningsconcentraties.

In § 4 is nu aangetoond dat de aanwezigheid van spanningsconcentraties voor de sterkte van een dynamisch belaste constructie nadeliger is dan voor een statisch belaste constructie. Proefstuk 2 zou dus onder een dynamische belasting minder geschikt zijn dan type 3.

Evenals in § 5a dienen we ons echter af te vragen of de afmetingen der proefstukken niet van invloed zijn op de proefresultaten.

We beschouwen alleen het geval van een zuivere wisselbelasting. Het zal zonder meer duidelijk zijn dat in dat geval de lengte der proefstukken voor de sterkte onbelangrijk is. Dit geldt niet voor de breedte.

Wanneer type 2 een zeer brede bodemplaat heeft, is de vervorming van het kniegedeelte bij elke belasting veel kleiner dan indien de bodemplaat smal was.

De spanningsconcentraties aan de rand van de uitholling van het langsspannt zullen daardoor eveneens veel lager zijn.

Bij type 3 is het omgekeerde mogelijk. De elastische vervorming die dit type in het kniegedeelte bij een bepaalde belasting ondergaat, is veel kleiner dan bij type 2, indien beide voorzien zijn van een smalle bodemplaat. Dit betekent dat bij gelijke vervormingen van type 2 en type 3 in het kniegedeelte, de spanningen in type 3 veel hoger zijn dan in type 2.

Bij een zeer brede bodemplaat is nu juist de vervorming in het kniegedeelte niet meer afhankelijk van het proefstuktype, zoals we in § 5a hebben gezien. Toepassing van type 3 is dan dus ongunstiger dan van type 2.

Als conclusie van deze § kan dus gesteld worden dat slappe constructies als type 2, zowel in statische als dynamische belastingsgevallen meestal de voorkeur verdienen boven type 3.

Wel dient te worden opgemerkt dat deze conclusie in veel mindere mate geldt voor lange smalle constructies. Deze komen in schepen echter zelden of nooit voor.

Als om welke reden dan ook in een schip toch brede stijve constructies als type 3 worden toegepast, verdient het aanbeveling de spanningen in het stijve (knie)gedeelte te beperken door de vervormingen van het bodemgedeelte A (fig.12) klein te houden. Hiertoe is weer een verdikking van de bodemplaat of een dubbelplaat over de gehele breedte van het gebied A geschikt.

## § 6. Slotopmerkingen.

Er wordt de aandacht op gevestigd dat de constructietypen 2 en 3 uit fig.11 alleen ter il-

lustratie van twee, voor ons doel karakteristieke, gevallen naar voren zijn gehaald. Voor wie geïnteresseerd is in andere en betere langspant-schotverbindingen, wordt daarom verwezen naar [3].

Het was verder in het kader van dit artikel onmogelijk om allerlei aspecten die zowel algemeen als in het bijzonder ten aanzien van langspant-schotverbindingen van belang zijn, te bespreken. Beschouwingen over knik, toelaatbare vervormingen, onvlakke plaateffecten, belastingen door waterdruk, lasproblemen, enz. moesten derhalve achterwege blijven.

Tenslotte valt op te merken dat in dit artikel niet gesproken is over de factoren die het al of niet vóórtschrijden van een beginscheurtje bepalen. Een beschouwing over deze kwestie zou hier, waar de aandacht speciaal gericht was op sterktecriteria en constructieve vormgeving, minder op zijn plaats geweest zijn. Er wordt daarom verwezen naar de vele publikaties die op het gebied van bros breken zijn verschenen.

- - - - -

Literatuurlijst.

- 【1】 Prof.Dr.G.Vedeler: "One learns from bitter experience". International Shipbuilding Progress, blz. 67, vol.5, no.42.
- 【2】 Prof.Dr.J.F.Baker: "Shortcomings of structural analysis". North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders 1951 - 1952, blz. 31 - 50, 9 november 1951.
- 【3】 L.K.Irwin en W.R.Campbell: "Tensile tests of large specimens representing the intersection of a bottom longitudinal with a transverse bulkhead in welded tankers". Report of the Ship Structure Committee SSC-68, 18 januari 1954.
- 【4】 "Considerations of welded hatch corner design". Report of the Ship Structure Committee SSC-37, 1 oktober 1952.

- - - - -