

ONDERZOEKINGEN OVER DE SPANNINGS- VERDELING IN KOPHOEKKLASSEN

Proeven over de sterkte van kophoeklassen door Van der Eb genomen wezen op een andere invloed van de krachtrichting, dan uit de proeven en de theorie van Jensen en Kist volgde. Om dit verschil te verklaren is de spanningstoestand in een kophoekklas uitvoerig onderzocht. Bij zuivere trek treden typische verschijnselen van een spanningsconcentratie op, bij zuivere dwarskracht wordt door vloeien de spanningsverdeling veel gelijkmatiger. Bij het inwendig sterk gekerfde lasmateriaal van Kist kwamen deze verschillen veel minder sterk tot uiting, dan bij het moderne materiaal van Van der Eb.

Ter introductie

Het Laboratorium voor Experimenteel Spanningsonderzoek van de afdeling der Weg- en Waterbouwkunde van de Technische Hogeschool heeft reeds verscheidene malen van zich doen spreken o.a. door de ontwikkeling en de toepassing van het foto-elastisch onderzoek en van de moiré-methode. Tussen het laboratorium en het Instituut T.N.O. voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, welke zich beide bewegen op het gebied van de constructies uit de civiele techniek, zijn vele contacten en bestaat een goede samenwerking. Valt bij het laboratorium het accent op het fundamentele speurwerk, in het bijzonder op de ontwikkeling van experimentele methoden van onderzoek, bij het Instituut ligt het accent op de rechtstreekse dienstverlening aan de praktijk.

Het zal van belang zijn, kennis te nemen van de werkzaamheden van het laboratorium en het is met bijzonder veel genoegen, dat wij voortaan in dit blad plaatsruimte zullen afstaan voor mededelingen van die zijde.

Als eerste in de reeks verschijnt thans een bijdrage over onderzoekingen over de spanningsverdeling in kophoeklassen van de hand van Ir. F. K. Ligtenberg.

Inleiding

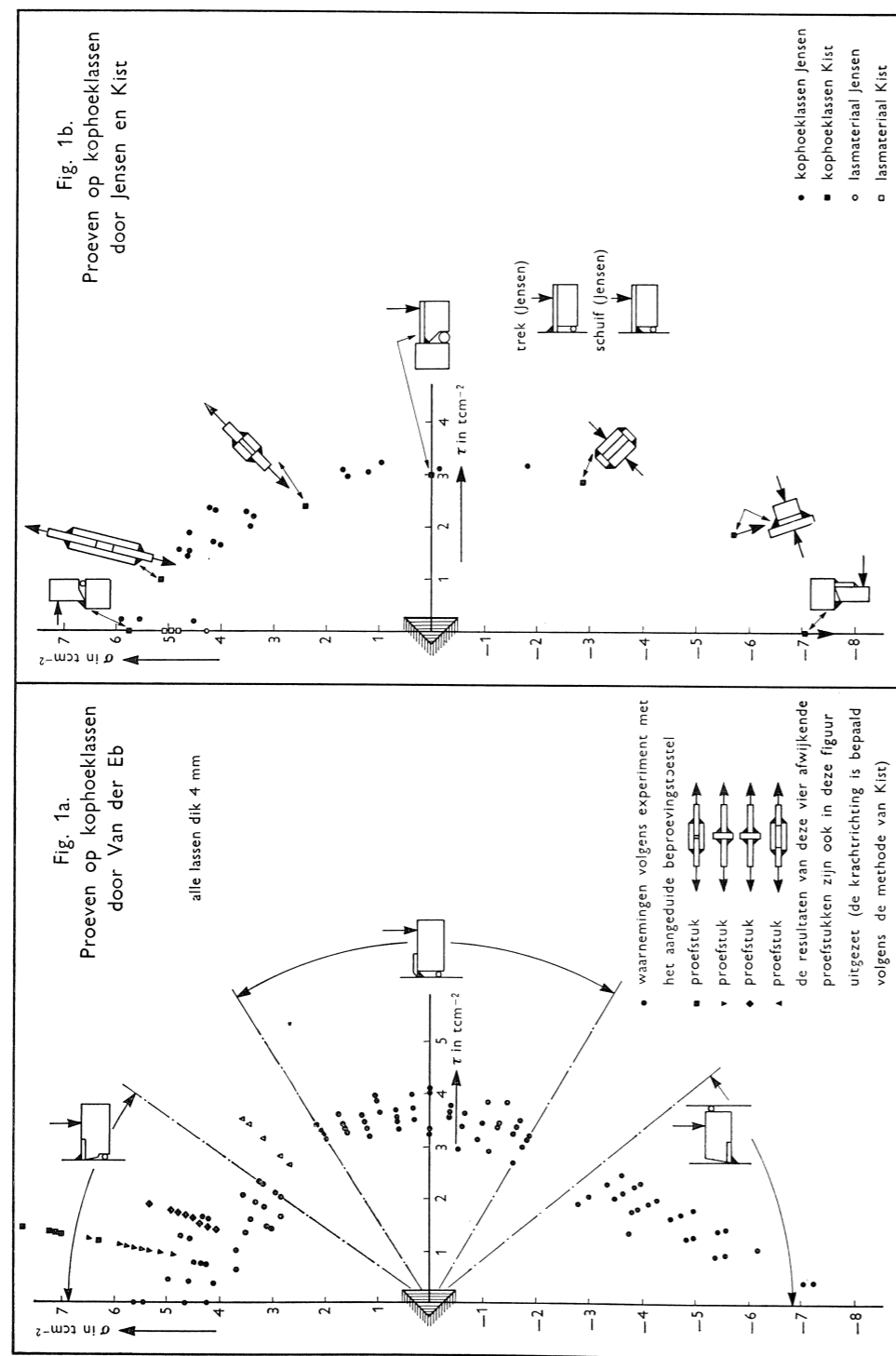
Niet lang geleden is door de Werkgroep Gewapend Beton- en Staalconstructies van T.N.O. een uitvoerig onderzoek naar de sterkte van kophoeklassen ingesteld. De resultaten zijn gepubliceerd als „Studie over kophoeklassen”, rapport St I-10-4023 van de hand van Ir. W. J. VAN DER EB.

De hierin beschreven proeven waren opgezet om de experimentele basis voor de berekening van kophoeklassen breder te maken, waarbij dan tevens een indruk zou kunnen worden verkregen van de eventuele veranderde eigenschappen van het moderne lasmateriaal in vergelijking met dat, wat door JENSEN [1] en KIST [2] bij hun proeven gebruikt was. De resultaten van dit onderzoek leverden — in tegenstelling tot de verwachting — aanwijzingen, dat de rekenmethode KIST toch niet geheel juiste resultaten gaf. En wel was het opvallend, dat de proefstukken in staat bleken, aanmerkelijk meer dwarskracht op te nemen dan — beoordeeld volgens het criterium van KIST — verwacht werd. Daar een dergelijke afwijking zeker op den duur tot wijziging van de berekeningsvoorschriften zal moeten leiden, leek het gewenst te trachten enig nader inzicht in de oorzaken van dit verschil te krijgen. Dit was de reden, waarom in het laboratorium voor experimenteel spanningsonderzoek een onderzoek naar de spanningsverdeling in kophoeklassen is ingesteld. Dit onderzoek heeft zeker wel bijgedragen tot een beter inzicht in het probleem, al moet het voorlopig voor onmogelijk worden gehouden, alleen uit theoretische overwegingen de sterkte van een kophoekklas af te leiden.

Om het probleem zo scherp mogelijk te doen uitkomen, volgt hier eerst een korte en met opzet enigszins subjectief gehouden samenvatting van de voorgeschiedenis van het onderzoek van kophoeklassen.

Voorgeschiedenis

In 1934 publiceerde JENSEN [1] een artikel, waarin hij resultaten publiceerde van proeven, die hij genomen had om de sterkte van kophoeklassen



bij verschillende krachtrichtingen te bepalen. De zeer primitieve theorieën, die hij hiermee vergeleek, leverden geen van alle een bevredigend resultaat. KIST [2] wees er echter op, dat een zeer goede aansluiting aan de waarnemingen kon worden verkregen, door een gelijkmatige spanningsverdeling in de keeldoorsnede aan te nemen en hieruit met de, aan de theorie van HUBER HENCKY ontleende, formule: $\sigma_1 = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$ de trekspanning te berekenen, die even gevaarlijk is als de optredende spanningstoestand. KIST voerde nu ook proeven uit om zijn theorie te toetsen. Deze proevenserie was bijzonder fraai opgezet. Er werden niet slechts kophoeklassen, doch ook flanklassen in het onderzoek betrokken en van ieder proefstuk werden 3 exemplaren met verschillende elektroden (van het ferrimantel type) vervaardigd.

Daar echter, zoals in fig. 1b te zien is, KIST slechts enkele krachtrichtingen onderzocht en alleen gemiddelden van zijn waarnemingen publiceerde, werd het later toch wenselijk geacht de proeven te herhalen, nu met meer krachtrichtingen en met de bedoeling ook meer gegevens in het drukgebied (waarin de proefstukken van KIST op een andere plaats dan de onderzochte las bezweken waren) te verzamelen.

Een theoretisch onderzoek door Louw [5], waarbij in plaats van de eigenlijk slechts voor de vlakke spanningstoestand geldende formule $\sigma_1 = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$ een aantal andere in aanmerking komende breuktheorieën en aannamen betreffende de spanningstoestand in een kophoeklas werden geprobeerd, leverde geen aanleiding om, behalve voor het drukgebied, belangrijke afwijkingen van de conclusie van KIST te verwachten. De verschillende onderzochte theorieën leverden alle een ellips als grensspanningsfiguur, met assenverhoudingen liggende tussen 0,5 en 0,645 en een lengte van de grootste as liggende tussen 0,866 en 1,154 \times de breuksterkte van het niet-gekerfde materiaal. Enkele tegelijkertijd in het laboratorium van Prof. BRANDSMA uitgevoerde voorlopige proeven schenen er echter op te wijzen, dat de grenskromme toch wellicht niet onaanzienlijk afweek van die volgens de hypothese van KIST.

Deze indruk werd bevestigd, doordat de met grote zorg door VAN DER EB uitgevoerde proeven [6] een duidelijk afwijkend beeld te zien gaven (zie fig. 1a). Naar aanleiding van het voorlopige onderzoek werd ook het gebied tussen trek en afschuiving uitvoerig onderzocht.

Niet alleen werd bij deze proevenserie de, wel verwachte, grote toelaatbare drukspanning gevonden, maar bovendien bleek, dat de toelaatbare schuifspanning ongeveer 0,8 \times de toelaatbare trekspanning was, dus aanmerkelijk hoger, dan door KIST voorspeld werd.

Het is jammer, dat geen gegevens over een met hetzelfde lasmateriaal uitgevoerde stuiklas beschikbaar zijn. (Als benadering kan wellicht de opgave van SMIT voor de elektrode Resistens dienen, die een treksterkte heeft van 47 tot 52 kg/mm²). Ook zouden (zoals in het vervolg van dit artikel nog zal blijken) met meer zorg uitgevoerde waarnemingen van de vervormingen zeker belangrijk tot het inzicht in het gedrag van kophoeklassen hebben bijgedragen.

De beproeving geschiedde met een apparatuur, die zeer sterke overeenkomst vertoonde met de door JENSEN en KIST gebruikte, zodat hierin geen verklaring voor de verschillen kan worden gezocht. Het grote aantal proefstukken (4 proefstukken voor elk van 29 verschillende krachtrichtingen) sluit een verklaring als samenloop van omstandigheden geheel uit.

Er rijzen naar aanleiding hiervan dus twee vragen:

1. Hoe komt het, dat de proeven van JENSEN en KIST een ander grensooppervlak te zien geven, dan de proeven van VAN DER EB?
2. Hoe komt het, dat alle voor de hand liggende breuktheorieën een kleinere toelaatbare schuifspanning doen verwachten, dan werkelijk gevonden is?

In het vervolg van dit artikel wordt een poging gedaan om deze vragen te beantwoorden. Het blijkt niet mogelijk te zijn, de sterkte van kophoeklassen uit de spanningsverdeling te berekenen; daarvoor spelen te veel nevenfactoren een rol. Door het hier beschreven onderzoek is het echter wel mogelijk gebleken de resultaten van de proeven beter te begrijpen en een kwalitatief inzicht te krijgen in het gedrag van kophoeklassen.

Het onderzoek van de spanningsverdeling

Om tot een beter inzicht te geraken werd allereerst besloten zoveel mogelijk te weten te komen betreffende de spanningstoestand in een kophoeklas. In het elastische gebied leverde dit geen al te grote moeilijkheden op, daar het foto-elastisch onderzoek op vrij eenvoudige wijze de hele spanningsverdeling bekend maakt. De overgang naar het plastisch gebied is echter buitengewoon moeilijk, daar een methode, waarmee de niet-elastische spanningstoestand redelijkerwijs kan worden benaderd, nog niet bestaat. Bij onderzoek bleken de plasticiteitstheorieën, die geheel van vloeilijnen (een soort glijdvlakken) uitgaan tot geheel absurde resultaten te voeren. Een voorbeeld is wel te vinden in de oplossing, die LEE [7] geeft voor een aan weerszijden met een V-vormige kerf gekerfde trekstaaf. Dit is nl. een van de weinige gevallen, waarvan met de relaxatiemethode van SOUTHWELL [8] een vrij betrouwbare oplossing ook voor het plastische gebied bekend is. In dit rapport is daarom een poging gedaan, om, steunende op enkele door SOUTHWELL uitgewerkte gevallen en op wat NADAI [9] daarover vermeldt, door extrapolatie uit het elastische gebied althans enig inzicht te krijgen in wat er na het overschrijden van de vloeigrens gebeurt. Door enkele zeer eenvoudige modellen van boetseerlei is verder hieraan nog wat steun gegeven. In de allerlaatste tijd is een methode ontwikkeld, om door het aanbrengen van een foto-elastische oppervlaktelaag, plastische vervormingen ook in staal nauwkeurig te volgen [12]. Hiervan kon echter bij dit onderzoek nog geen gebruik worden gemaakt.

De spanningstoestand in de werkelijke kophoeklas is nog zeer aanmerkelijk ingewikkelder, dan uit het hier besproken onderzoek blijkt, daar door krimp tijdens het lassen, vooral als de las in meerdere lagen wordt gelast, nog

uiterst gecompliceerde en onoverzichtelijke inwendige spanningen aanwezig zullen zijn. Het enige, wat hierover in het algemeen met enige zekerheid te zeggen is, is dat door de afkoeling bijna steeds een trekspanning in de langsricting van de las zal heersen (doordat het lasmateriaal kleiner wordt, en de omgeving zijn oorspronkelijke afmetingen behoudt). Over de invloed van deze krimpspanningen is niets met zekerheid bekend. Het zou wel goed zijn, daarover eens enkele proeven uit te voeren, waarbij de sterkte van wel- en niet-uitgegloeide lassen en proefstukken van dezelfde vorm, uit één stuk materiaal geschaafd, vergeleken worden.

Foto-elastisch onderzoek van de spanningsverdeling

Een model volgens fig. 2 werd van Kriston vervaardigd. Dit model vertoont een grote gelijkenis met de proefstukken van JENSEN, KIST en VAN DER EB en maakt het op eenvoudige wijze mogelijk in 5 verschillende richtingen (variërende tussen zuivere trek en zuivere afschuiving) krachten aan te brengen. Theoretisch is het weliswaar voldoende, in het elastische gebied, om slechts twee krachtrichtingen volledig te onderzoeken, daar door superpositie elke gewenste tussentoestand gevonden kan worden. Superponeren is echter ook zeer bewerkelijk en er treedt een ongunstige ophoping van waarnemingsfouten bij op, zodat liever de 5 krachtrichtingen afzonderlijk onderzocht werden.

Zoals bekend is, worden foto-elastisch lijnen gevonden, waarlangs de richting („isoclinen”) of het verschil („isochromen”) van de hoofdspansingen σ_1 en σ_2 constant is [13]. Uit de isoclinen kunnen dan hoofdspansingstrajectoriën (lijnen, die in ieder punt evenwijdig aan de hoofdspansingsrichting lopen) en schuifspanningstrajectoriën (die de richting aangeven, waarin de grootste schuifspanningen werken) geconstrueerd worden.

Verder is langs de randen veelal een der hoofdspansingen gelijk aan nul of bekend, zodat het verschil (dat uit de isochromen wordt verkregen) voldoende is om de overblijvende hoofdspansing aldaar te bepalen. Hiermee is ook de som van de hoofdspansingen ($\sigma_1 + \sigma_2$) langs de rand bekend en deze kan verder met behulp van de relaxatiemethode ook voor de rest van het model berekend worden. Hiermee is dan de gehele spanningstoestand bekend.

Bij een vlakke spanningstoestand zijn σ_1 en σ_2 de enige aanwezige spanningen, waarvan dus in elk punt richting en grootte bekend zijn; bij een vlakke vormveranderingstoestand komt hier nog bij een hoofdspansing σ_3

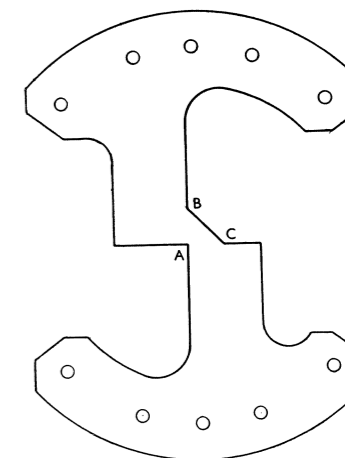


Fig. 2. Beproevingmodel van een kophoeklas (ABC).

loodrecht op het vlak van de doorsnede, die gelijk is aan $\nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)$.

De spanningstoestand is steeds voor alle krachtrichtingen aangegeven voor dezelfde belasting, overeenkomend met kracht gedeeld door keeldoorsnede = $P/F = 200$ eenheden.

De spanningsverdeling in een kophoeklas

Bestudering van de figuren, die het resultaat van het spanningsonderzoek weergeven, (fig. 3 t/m 6) doet zien, dat er in het elastische gebied geen sprake

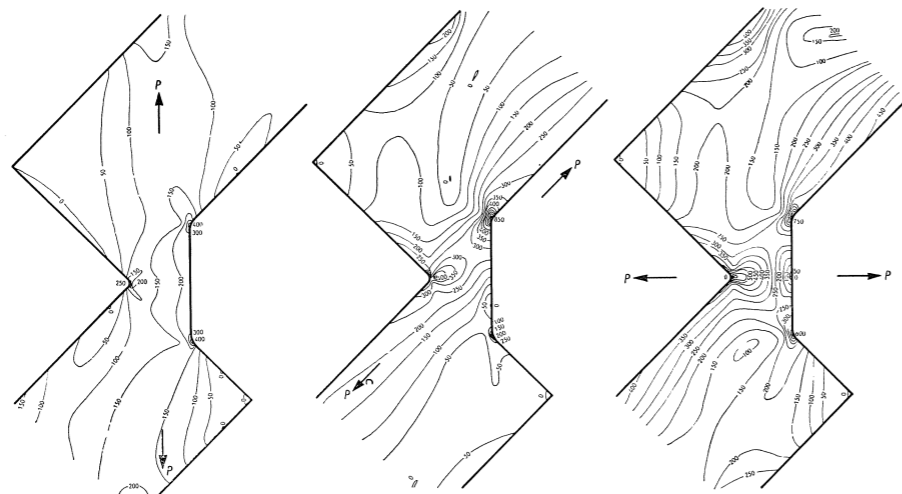


Fig. 3. Kophoeklas. Isochromen (lijnen van gelijk hoofdspansingsverschil).

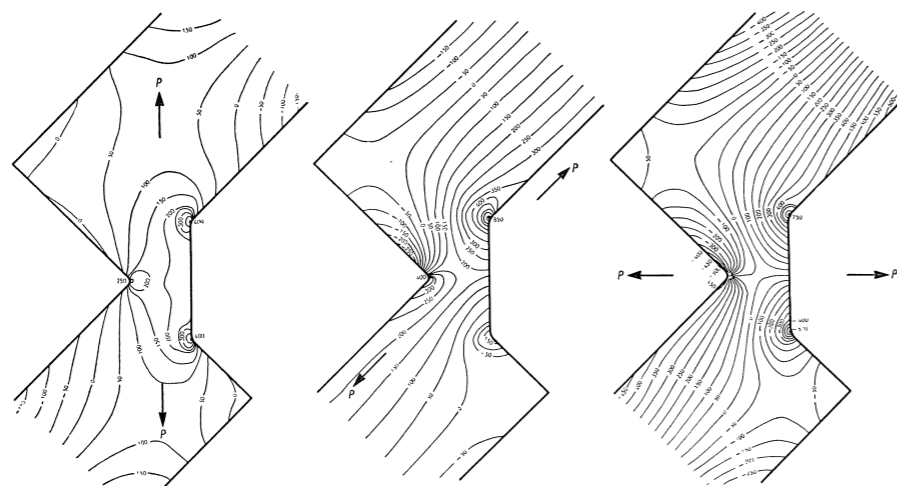


Fig. 4. Kophoeklas. Hoogtelijnen van de hoofdspansingsom.

van is, dat de door KIST aangenomen spanningsverdeling optreedt. Zowel bij de hoek A als bij B en C (zie fig. 2) treedt in het algemeen een „spanningsconcentratie” op, waar de gemiddelde spanning aanmerkelijk overschreden wordt, terwijl ook de hoofdspansingsrichtingen van punt tot punt verschillen.

Uit dit gecompliceerde elastische spanningsbeeld ontwikkeld zich echter bij steeds toenemende belasting een elastisch-plastische spanningstoestand, waarbij, zodra de vloeigrens in een bepaald punt bereikt is, de spanning daar niet verder meer kan toe nemen. Het resultaat is dan ook natuurlijk een af-

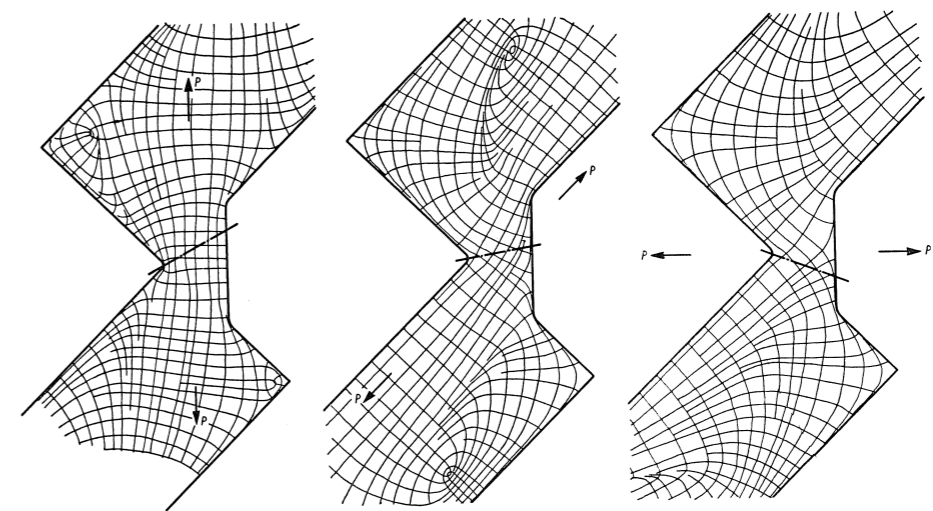


Fig. 5. Kophoeklas. Hoofdspansingstrajectoriën. - - - = richting van het breukvlak.

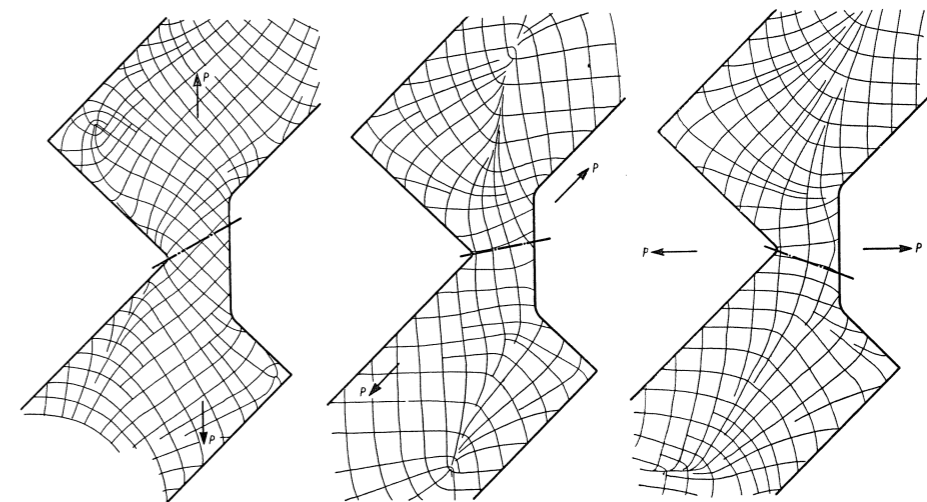


Fig. 6. Kaphoeklas. Schuifspanningstrajectoriën. - - - = richting van het breukvlak.

vlakken van de spanningsspitsen. Dit laatste is ook de reden waarom bij een onderzoek volstaan kon worden met een willekeurig gekozen afrondingsstraal in de hoekpunten A, B en C, daar de plaatselijke invloed daarvan voor het inzicht in het gehele spanningsbeeld weinig betekenis heeft.

Willen we een indruk krijgen, hoe het vloeiverschijnsel begint, dan is het noodzakelijk het verloop van de functie, die het vloeien bepaalt, te kennen. Algemeen wordt aangenomen, dat hiervoor de gedaanteveranderingsarbeid maatgevend is: $A_g = \frac{1}{-12G} \cdot [(\varrho_1 - \varrho_2)^2 + (\varrho_2 - \varrho_3)^2 + (\varrho_3 - \varrho_1)^2]$. Vergelijkingswaarden hiervan zijn bij aanname van de vlakke vormveranderingstoestand in verschillende punten van de keeldoorsnede berekend en

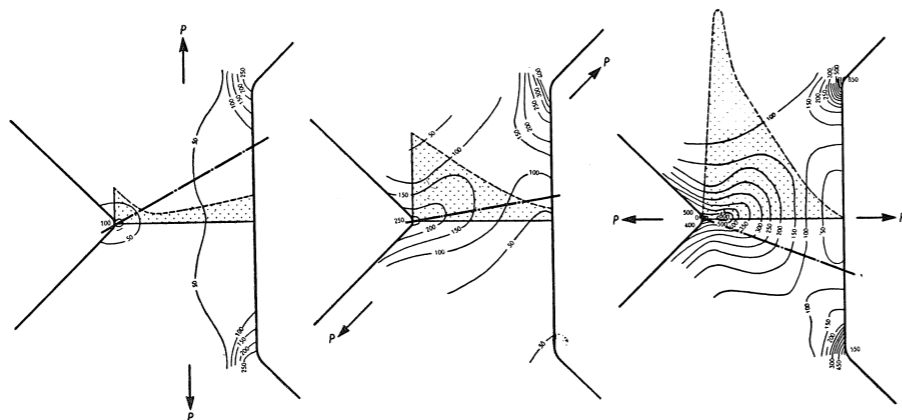


Fig. 7 Kophoeklas. Gedaanteveranderingsarbeid A_g voor vlakke vormveranderingstoestand.

in fig. 7 weergegeven. We zien, dat bij zuivere dwarskracht zeer hoge waarden worden bereikt. Het materiaal zal dus gemakkelijk gaan vloeien en vrij sterk vervormen, terwijl de spanningen een steeds meer gelijkmatig verloop krijgen. Door de sterke vervorming zal de kracht goed gelijkmatig over de lengte van de las verdeeld worden.

Vergelijken we hiermee de zuivere trek, dan krijgen we een totaal ander beeld. Niet alleen begint het vloeien in de keeldoorsnede pas bij een bijna $6 \times$ zo grote last, maar ook blijft dit vloeien veel sterker plaatselijk beperkt, zodat een soort harde kern binnenin de las blijft bestaan, die veroorzaakt wordt doordat de hoofdspansingen over een zeer groot gebied hetzelfde teken hebben. De las blijft daardoor stijf, zodat een ongelijkmatige verdeling van de belasting niet vereffend wordt en door de in alle richtingen werkende trekspanningen (ϱ_3 nog versterkt door de krimpspanningen in de lengterichting van de las) bestaat een grote kans op een brosse breuk, die niet door overschrijding van de toegelaten gedaanteveranderingsarbeid, maar wellicht door de totale

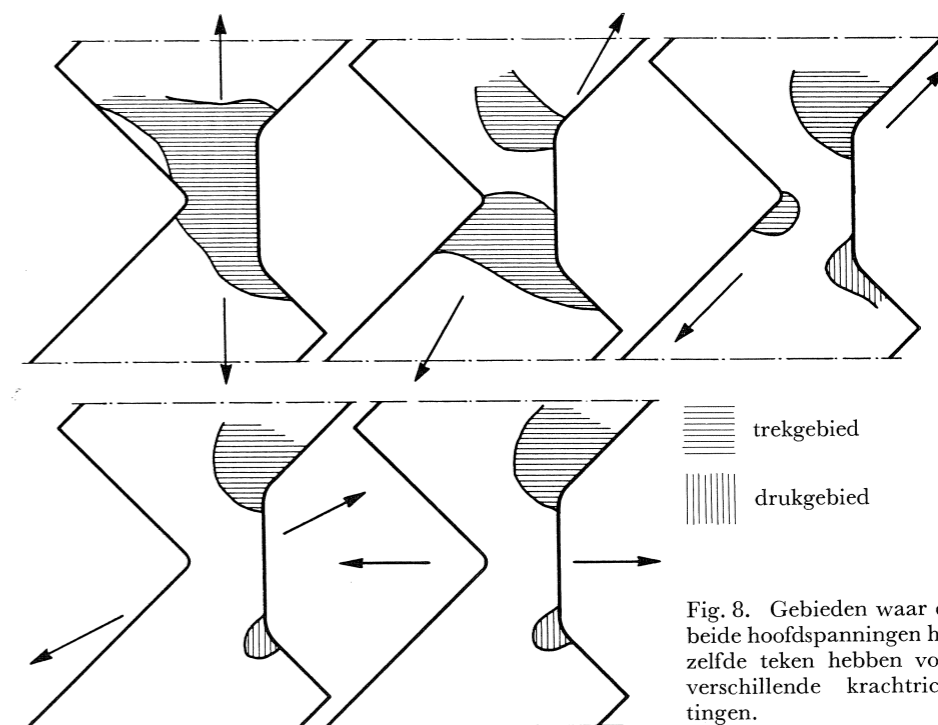


Fig. 8. Gebieden waar de beide hoofdspansingen hetzelfde teken hebben voor verschillende krachtrichtingen.

vormveranderingsarbeid, of door de grootste rek of trekspanning bepaald wordt.

Dit verschil in karakter tussen de verschillende krachtrichtingen is gemakkelijk te zien, wanneer we uit fig. 3 en fig. 4 de gebieden afleiden, waarin alle hoofdspansingen hetzelfde teken hebben (zie fig. 8). Ook een eenvoudige proef (zie fig. 9 en 10), waarbij uit modeline (een soort boetseerklei) enkele hoek-

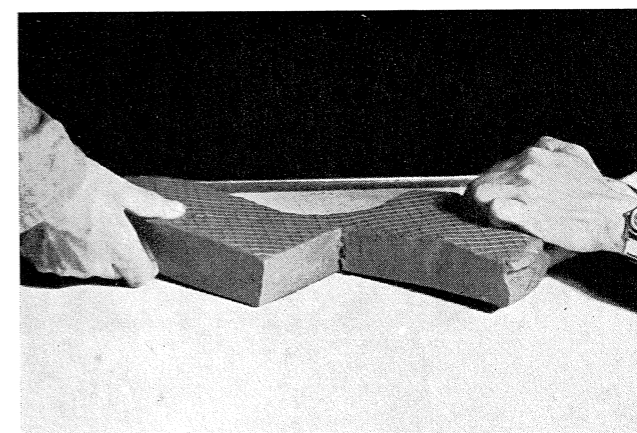


Fig. 9. Proef met modeline.

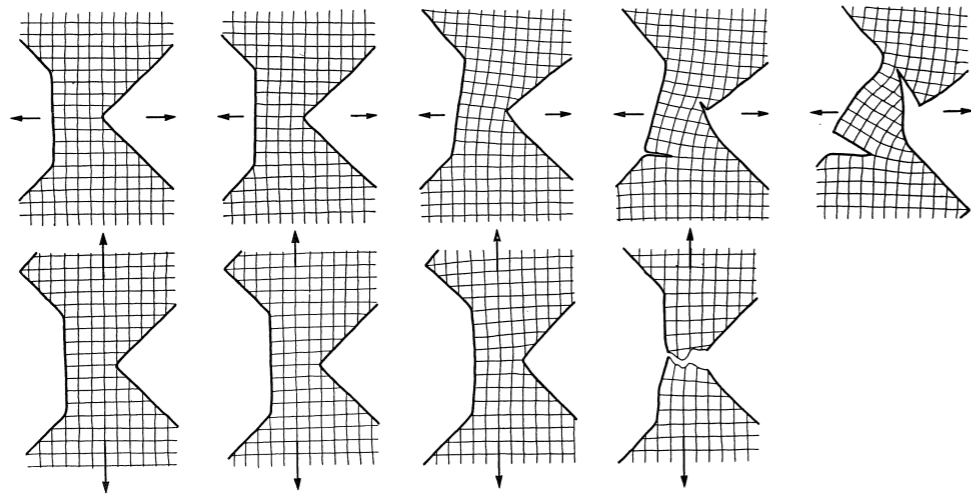


Fig. 10. Modeline modellen. Vormveranderingen bij toenemende belasting bij zuivere afschuiving en zuivere trek.

lasmodellen werden gemaakt en met de hand stuk getrokken, gaf weer dezelfde indruk van de starheid van de zuiver getrokken hoeklas, tegenover de grote vervormingen die bij zuivere afschuiving kunnen optreden. De *breuk* treedt bij de modeline op geheel andere wijze op dan bij staal; een trekproefstuk geeft echter wel een duidelijke insnoering te zien; het vloeiverschijnsel zal dus wel niet zo heel veel afwijken van wat bij staal optreedt. Het is jammer, dat de door VAN DER EB verrichte vormveranderingsmetingen zo primitief waren, dat ze het verschil tussen een getrokken en een op afschuiving belaste kophoeklas niet duidelijk hebben laten zien. De bedoeling was slechts een „duidelijke vloeigrens” te vinden, waarbij plotseling de hele las tegelijk zou gaan vloeien. Dit trad natuurlijk niet op.

Uit de verschillende bovenbesproken gegevens is nu enigszins een beeld gegroeid van de wijze, waarop het plastisch vloeien zich in de kophoeklas ontwikkelt. Fig. 11 geeft een, uiteraard niet op grote nauwkeurigheid aanspraak makende, schets van de wijze waarop de plastische gebieden zich bij verschillende krachtrichtingen bij toenemende last zullen ontwikkelen.

Niet alleen de breukkracht, maar ook de ligging van het breukvlak zou uit de spanningstoestand te verklaren moeten zijn. Bij zijn proeven heeft VAN DER EB de richting van het breukvlak voor de verschillende krachtrichtingen bepaald. Deze is steeds als een —·—·—·— lijn in de tekening betreffende de spanningstrajectoriën en de vormveranderingsarbeid aangegeven. Het is wel direct te zien, dat de volume- of gedaanteveranderingsarbeid door zijn *grootte* geen enkele aanwijzing over de ligging van het breukvlak geeft. Ook de hoofdspansingstrajectoriën hebben een geheel andere richting, dan de door

VAN DER EB waargenomen breukvlakken. Breuk treedt dus waarschijnlijk niet op door overschrijding van de toelaatbare grootste trekspanning of rek. De schuifspanningstrajectoriën echter passen zich vrij goed bij het breukvlak aan. Alleen bij zuivere trek is nog een afwijking te constateren. De schuifspanningen hebben dus blijkbaar wel een belangrijke invloed op het breukverschijnsel maar bepalen het toch niet geheel. Dit wekt gedachten op aan het criterium van de gedaanteveranderingsarbeid, waarin alle drie de hoofdspansingsverschillen een rol spelen. Ook dit criterium maakt het mogelijk bij een gegeven spanningstoestand te bepalen, in welke richting breuk (of vloeilijnen) zal (zullen) optreden, indien alle hoofdspansingen in dezelfde verhouding worden vergroot. Wegens de symmetrie zullen in elk punt twee breukrichtingen, die naar weerszijden gelijke hoeken met de grootste hoofdspansing maken, gevonden worden. De breukvlakrichtingen blijken slechts zeer kleine verschillen met de schuifspanningstrajectoriën te vertonen, zodat het niet de moeite waard was ze apart te tekenen.

Wanneer echter de hoofdspansingssom positief is en nog sterker als alle hoofdspansingen trekspanningen zijn, dan geldt het criterium van de ge-

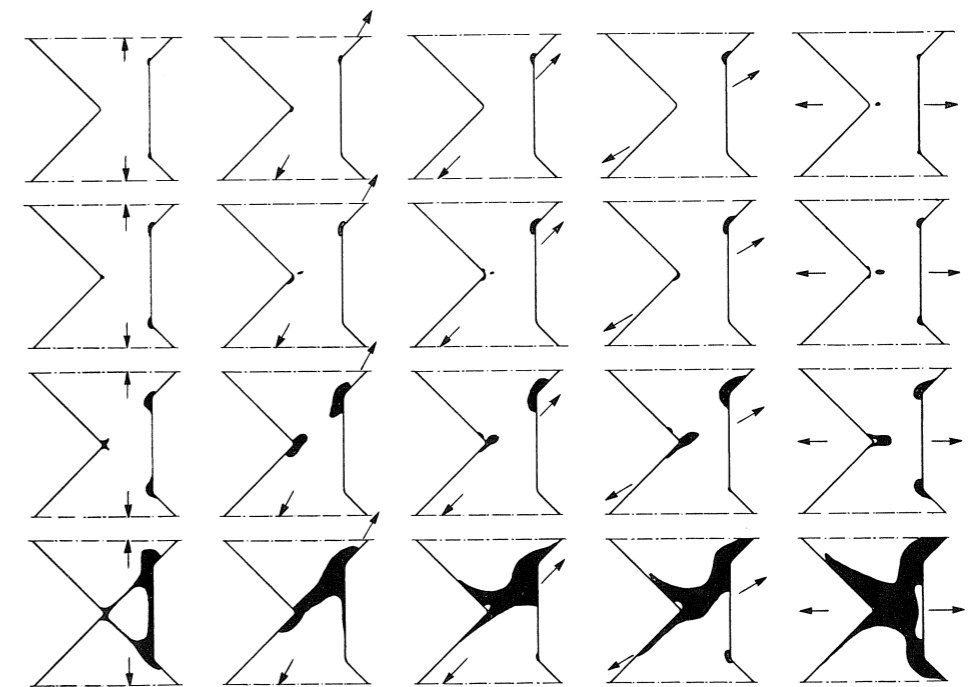


Fig. 11. Kophoeklas. Schetsmatige voorstelling van de uitbreiding van het plastische gebied bij toenemende belasting.

daanteveranderingsarbeid niet meer, maar moet de totale vormveranderingsarbeid (volgens HAIGH) in rekening worden gebracht. Hiermee wordt:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{\nu \varrho_1 - (1 - \nu) \varrho_2}{(1 - \nu) \varrho_1 - \nu \varrho_2}}$$

hetgeen voor $\nu = 0,3$ (vloeien treedt niet zo gemakkelijk op!) wordt,

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{3\varrho_1 - 7\varrho_2}{7\varrho_1 - 3\varrho_2}}$$

zodat in de buurt van de zuivere trek α aanmerkelijk kleiner dan 45° kan zijn. Voorkeursrichtingen voor de breukvlakken, berekend uit de totale vormveranderingsarbeid, zijn in fig. 12 te vinden.

Voor het geval van zuivere trek zien we een opmerkelijke overeenstemming tussen de waargenomen breukvlakrichting en de uit de spanningstoestand volgende voorkeursrichtingen van de breuk, terwijl ook voor de andere kracht-richtingen, waar het verschil tussen schuifspanningstrajectoriën en breukvlakrichtingen niet zo groot is, en waar nog een groot gedeelte van de eigenlijke las een positieve hoofdspanningsom heeft, van een goede overeenstemming kan worden gesproken. Dit wijst er wel op, dat de krimpspanningen in de las het gedrag daarvan toch niet geheel en al verstoren.

Wanneer we bedenken, dat breuk eerst optreedt nadat een vrij aanzienlijke mate van vloeien heeft plaats gevonden, waardoor uiteraard de spannings-

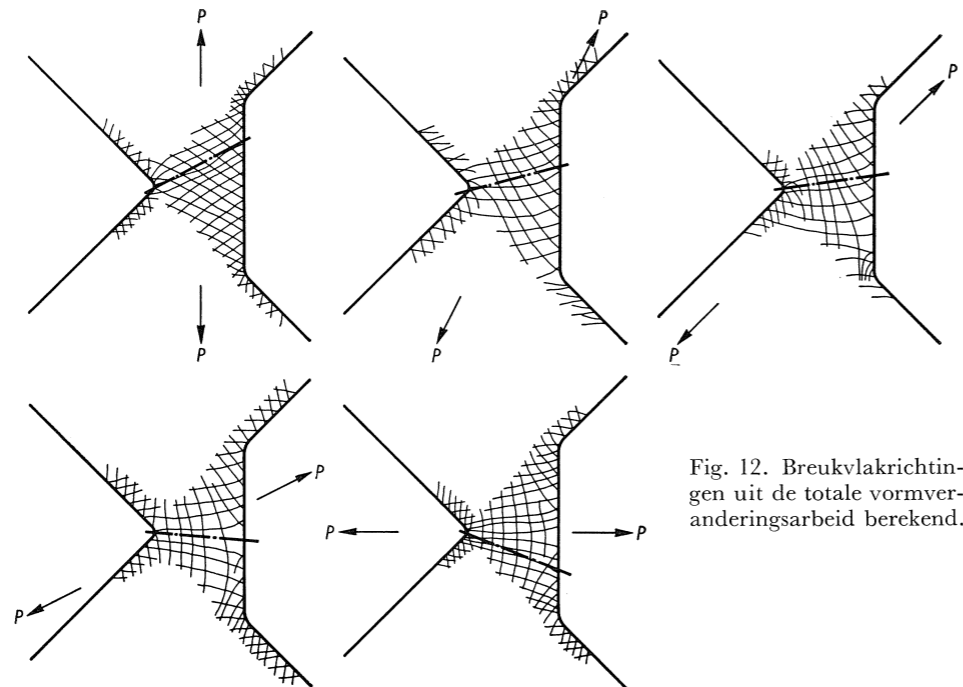


Fig. 12. Breukvlakrichtingen uit de totale vormveranderingsarbeid berekend.

toestand verandert, terwijl bovendien als de breuk eenmaal begonnen is, het spanningsbeeld zich tijdens het voortschrijden daarvan nogmaals progressief wijzigt, dan is het verrassend, dat het toch nog mogelijk is uit de elastische spanningstoestand zoveel aanwijzingen over de ligging van het breukvlak te vinden.

Het is altijd moeilijk voor *breuk*verschijnselen een theorie toe te passen. De breuk begint nu eenmaal in het zwakste punt en zet zich snel door als hij eenmaal begonnen is. Kleine materiaalfoutjes hebben daardoor altijd een grote invloed en terwijl bij vloeiverschijnselen het gemiddelde gedrag van een groot aantal deeltjes wordt waargenomen, kan breuk afhangen van één enkel toevallig ongunstig gelegen deeltje. Een grote spreiding in de proefresultaten bij breukproeven is daarvan steeds het noodzakelijk gevolg.

Hierdoor is het ook begrijpelijk, dat de boven gegeven beschouwingen het niet mogelijk hebben gemaakt uit de spanningstoestand de sterkte van kophoekklassen kwantitatief te bepalen. Toch is door dit onderzoek wel wat bijgedragen, om de resultaten van de proeven van VAN DER EB begrijpelijk te maken. De veel geringere starheid van de op afschuiving belaste kophoekklas moet wel als de voornaamste oorzaak worden gezien van de gevonden hoge breuksterkte in het afschuivingsgebied. Door dezelfde oorzaak wordt ook verklaard, dat de spreiding van de proefresultaten in het trekgebied groter is dan in het afschuivingsgebied, omdat in het laatste een veel gelijkmatiger belastingsverdeling plaats vindt. De „kerfwerking” doet zich dus bij zuivere trek veel sterker voelen, dan bij zuivere afschuiving, waardoor ook een brosser type breuk ontstaat.

Het verschil tussen de resultaten van Van der Eb en de oudere proeven

Rest nog te verklaren waarom de oudere proeven van JENSEN en KIST een ander grensooppervlak voor de breuksterkte hebben opgeleverd.

Gezien het feit, dat de drie proevenseries zijn uitgevoerd met apparatuur, die een zeer grote mate van overeenkomst vertoont, is het niet aan te nemen, dat de verschillen een gevolg zijn geweest van de wijze waarop de proef is opgezet. Daardoor blijft welhaast geen andere mogelijkheid meer over, dan dat dit verschil een gevolg is van de inmiddels plaatsgevonden vooruitgang in de lastechniek. Het is daarom zeer te betreuren, dat van de grote serie door KIST onderzochte proefstukken nog slechts één exemplaar is overgebleven. Dit proefstuk vertoont inderdaad, vergeleken met de door VAN DER EB onderzochte proefstukken, een zeer onregelmatige structuur met blaasjes en slecht gehechte plaatsen, met een ongelijkmatig oppervlak en een breukvlak, dat gedachten aan gietijzer opwekt (zie fig. 13).

Indien dit proefstuk, zoals wel waarschijnlijk is, als representatief mag worden opgevat, dan is het wel mogelijk uit dit structuurverschil te verklaren,

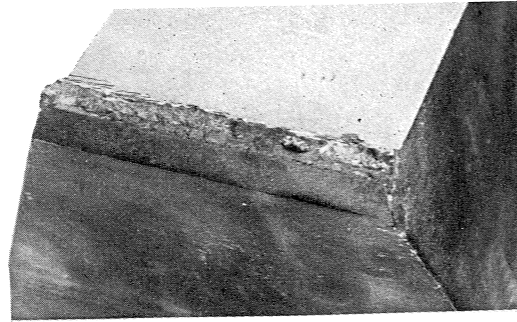


Fig. 13 Gebroken proefstuk uit de proevenserie van KIST.

waarom de beide proevenseries geen overeenstemmende resultaten gaven.

Een kophoeklas is namelijk, zoals in het voorgaande gebleken is, een constructie-element, waarbij een sterke kerfwerking optreedt. Een blaasje of oppervlakte-onregelmatigheid in het lasmateriaal geeft natuurlijk eveneens een spanningsconcentratie. Bevinden zich toevallig twee blaasjes naast elkaar, dan zullen deze samen een iets hogere spanningsconcentratie geven. Is nu bovendien het constructie-element uitwendig gekerfd (door de vorm, die eraan gegeven is) dan is het denkbaar, dat ook vlak bij de kerf nog een blaasje aanwezig is, dat de spanningsconcentratie nog verhoogt. Zolang de kerf echter van dezelfde orde van grootte is als het blaasje, zal deze spanningsconcentratie niet of nauwelijks groter zijn dan die, welke reeds door de nabijheid van twee blaasjes in het niet gekerfde-materiaal veroorzaakt wordt, zodat in een dergelijk geval de gekerfde vorm — enigszins verrassend — geen extra spanningsconcentratie teweeg brengt. De engelse uitdrukking „You cannot spoil a bad egg” beschrijft de situatie treffend. Wordt echter de kerf groter ten opzichte van de blaasjes en krijgt hij een groter afrondingsstraal, dan begint het mogelijk te worden, dat in het gebied waar de kerf een spanningsconcentratie teweeg brengt, ook nog twee blaasjes dicht bij elkaar kunnen liggen, zodat de kerf wel degelijk invloed op de grootste optredende spanningen krijgt.

Zo zien we dus, dat de kerfwerking bij materiaal met een goede homogene en fijne structuur reeds veel eerder merkbaar zal zijn, dan bij slecht, grofkorrelig en inwendig sterk gekerfd materiaal. Bovendien zal ook een toename van de afmetingen van de kerf de kerfwerking sterker merkbaar maken wanneer we aannemen, dat hierdoor de materiaaleigenschappen niet veranderen. Hiermee is dus niet alleen verklaard, waarom eerst bij de door VAN DER EB verrichte proevenserie de kerfwerking duidelijk merkbaar is geweest, maar ook waarom verwacht mag worden, dat deze zich bij dikkere lassen nog iets sterker zal doen voelen. Het feit dat een dikkere las door afrondingsstralen e.d. niet geheel gelijkvormig met een dunnere is, veroorzaakt natuurlijk wel complicaties; deze zullen echter wel niet van zo heel veel betekenis zijn.

Deze theorie, die als „equivalent inherent flaw theory” wordt beschreven is oorspronkelijk door GRIFFITH [10] opgesteld en in het recente boek van HEYWOOD [11] verder ontwikkeld.

LITERATUUR

- [1] JENSEN, C. D., Combined stresses in end fillet welds; Journal of the American Welding Society **13** (1934) feb., p. 17.
- [2] KIST, N. C., Sterkteberekening van kophoeklassen; De Ingenieur **49** (1934) no 38 p. 172—174.
- [3] KIST, N. C., Berechnung der Schweißnähte unter Berücksichtigung konstanter Gestaltsänderungsenergie; Vorbericht 2ter Kongress Int. Verein für Brücken- und Hochbau. p. 521—532. Berlin-München 1936
- [4] KIST, N. C. Theoretische beschouwing en proeven ter bepaling van de draagkracht van gelaste constructies; Lassymposium 10 en 11 mei 1939 N.V.L. (zie ook V 1069).
- [5] LOUW, C. J., Onderzoek van kophoeklassen, theoretische beschouwingen; T.N.O.-C.O.C. rapport St I-4-4010 (sept. 1943).
- [6] EB, W. J. v. D., Studie over kophoeklassen; T.N.O.-C.O.C. rapport St I-10-4023. EB, W. J. v. D., The testing of end fillet welds; Vorbericht 4 ter Kongress. Int. Verein für Brücken- und Hochbau. p. 459—474. Cambridge - London 1952.
- [7] LEE, E. H., Plastic flow in a V notched bar pulled in tension; Journal of applied mechanics, **19** (1952) no 3, sep. p. 331.
- [8] ALLEN, N. D. DE G. en R. V. SOUTHWELL, Relaxation methods applied to engineering problems XIV, Plastic straining in two dimensional stress systems; Phil. Trans. Roy. Soc. of London, A no 850, **242** (1950) june p. 379-414,
- [9] NADAI, A., Theory of flow and fracture of solids; McGraw Hill, New York 1950. HILL, R., The mathematical theory of plasticity; Clarindon, Oxford 1950. PRAGER, W. en P. G. HODGE, Plasticity; Wiley, New York 1950. ITERSÖN, F. K. TH. v., Plasticiteitsleer; Kluwer, Deventer 1945. PRAGER, W., A geometrical discussion of the slip line field in plane plastic flow; Handlingar Kungl. Techniska Högskolan, no 65, 1953
- [10] GRIFFITH, A. A., The phenomena of rupture and flow in solids; Phil. Trans. Roy. Soc. A **221** (1920) oct. p. 163-198. GRIFFITH, A. A., Stress concentrations in theory and practice; Report British Association 1921 p. 316.
- [11] HEYWOOD, R. B., Designing by photoelasticity; Chapman and Hall, London 1952.
- [12] DRUCKER, D. C., e.a., An analysis of plastic behavior of metals with bonded birefringent plastic; Proc. Soc. Exp. Stress Analysis **2** (1954) Part 2 ZANDMANN, F., Mededelingen op Colloque de photoelasticité I.U.T.A.M. Brussel 1954, en Symposium sur l'observation des structures R.I.L.E.M. Lissabon 1955.
- [13] zie b.v. FROCHT, M. M., Photoelasticity I en II. Wiley, New York 1941 en 1948. MESSMER, G., Spannungsoptik. (Springer, Berlin 1939). LIGTENBERG, F. K., Colledictaat experimenteel spanningsonderzoek, Handleiding b 1 Centrale Commissie voor Studiebelangen, Delft 1955.

Summary

Experiments on the strength of end fillet welds by VAN DER EB did not give the same influence of the direction of the force on the strength as earlier experiments by JENSEN and KIST and the theory of KIST led to believe. In order to find an explanation for this phenomenon the stress distribution in an end fillet weld was investigated extensively.

In pure tension typical phenomena belonging to a stress concentration occur, in pure shear plastic flow gives rise to a much more uniform stress distribution. In the weld material used by KIST — which was severely notched internally — these differences were much less marked than in the modern material used by VAN DER EB.