

Een onderzoek is verricht naar de sterkte van een gelaste balk-kolom verbinding, waarin lassen voorkomen die op verschillende wijzen worden belast. Voor het opstellen van een berekeningsmethode is het evenwel niet voldoende te weten dat een bepaalde verbinding een zekere sterkte bezit, doch hiervoor moet tevens bekend zijn waarom de verbinding de gevonden sterkte bezit. Dit is onmogelijk indien niet bekend is welk aandeel elke las in het overbrengen van de belasting heeft op het oogenblik van bezwijken van de verbinding. Metingen van vervormingen geven hierover geen uitsluitsel omdat geen spannings-vervormingsdiagrammen van de verschillende lassen bekend zijn. Wel waren gegevens beschikbaar over de sterkte van afzonderlijke lassen onder verschillende belastingscondities. Daarom had het slechts zin de sterkte van de verbindingen te bepalen. Niettemin bleek het mogelijk op grond van theoretische overwegingen en door een systematische opzet van de proeven een inzicht te verkrijgen in het aandeel van elke las afzonderlijk in het overbrengen van de belasting op het oogenblik van bezwijken van de verbinding. Het één en ander leidde tot een eenvoudige berekeningsmethode ter bepaling van de sterkte van de onderzochte verbinding.

Inleiding

Vorig jaar is in samenwerking met het Stevin-laboratorium een serie proeven genomen die bedoeld was om een inzicht te verkrijgen in de sterkte van een gelaste verbinding. Om verschillende redenen zijn deze proeven interessant. In de eerste plaats komt de gekozen balk-kolom verbinding (zie fig. 1) in de praktijk veel voor. Deze vormt dus een belangrijk constructie-element. In de tweede plaats is dit onderzoek van belang omdat daarbij de samenwerking van een aantal op geheel verschillende wijzen belaste lassen is nagegaan. Hoewel reeds veel spuurwerk was verricht (o.a. in ons land door KIST en VAN DER EB) om een inzicht te verkrijgen in de sterkte van afzonderlijke lassen hetgeen heeft geleid tot de voorschriften in NEN 1062-VI, was er nog slechts zeer weinig bekend over de sterkte van een uit meerdere lassen bestaande verbinding.

In het algemeen kunnen de krachten die door een hoeklas worden overgebracht, worden ontbonden in drie componenten t.w. σ_{\perp} , τ_{\perp} en τ_{\parallel} (zie fig. 2). Met deze symbolen worden de gemiddelde trek- en schuifspanningen in de keeldoorsnede aangeduid. Uit de proeven van VAN DER EB ¹⁾ is gebleken, dat met de formule:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 1,8 (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \dots \dots \dots (1)$$

de sterkte van een afzonderlijke las goed kan worden bepaald. In fig. 3 zijn voor het geval $\tau_{\parallel} = 0$ de proefresultaten van VAN DER EB en de uitkomst van formule (1) weergegeven. De waarde van σ_i is gelegen tussen 4000 en 5000 kg/cm².

¹⁾ Men zie: EB, W. J. v. D. Studie over kophoeklassen; T.N.O.-G.O.C., rapport StI-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.

Voorwoord

Het in bijgaand artikel beschreven onderzoek maakt deel uit van het spuurwerk van de Nederlandse Afdeling van Commissie XV van het International Institute of Welding. De werkgroep die met dit onderzoek was belast stond onder voorzitterschap van prof. Ir. A. A. van Douwen. De benodigde fondsen werden, behalve door het I.B.B.C., mede door de afdeling Weg- en Waterbouwkunde van de Technische Hogeschool te Delft, door het Centrum voor Las-techniek N.V.L.-T.N.O. en door de Vereniging van Constructiewerkplaatsen ter beschikking gesteld. De vervaardiging van de proefstukken geschiedde door de N.V. Pletterij Enthoven te Delft. De proeven werden gedeeltelijk in het Stevin-laboratorium van de T.H. en gedeeltelijk in het I.B.B.C. genomen. Slechts dank zij de volledige medewerking van alle betrokkenen was het mogelijk het gehele onderzoek binnen een half jaar te voltooien. Een woord van dank is hier zeker op zijn plaats.

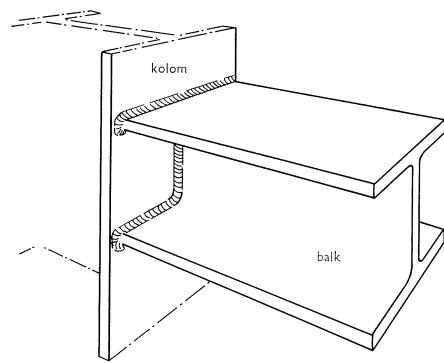


Fig. 1. Balk-kolom verbinding.

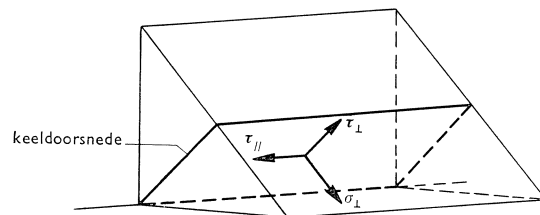


Fig. 2. Spanningscomponenten in een hoeklas, zoals deze werken op de keeldoor-snede.

Met het bovenstaande is het echter nog geenszins mogelijk een voorspelling te doen over de wijze waarop verschillende lassen samenwerken, daar het zeer goed mogelijk is dat één las reeds breekt op een ogenblik dat de vervormingen nog zo klein zijn dat de andere lassen slechts een gering gedeelte van hun breukbelasting opnemen. Blijkbaar is het dus eveneens van belang te weten welke vervormingen een op een gegeven wijze belaste las kan ondergaan. Hierover is helaas niets nauwkeurig bekend. Wel is bekend dat bij een belasting met σ_{\perp} plastisch vloeien betrekkelijk moeilijk optreedt – zie I.B.C.-mededelingen 4 (1956) no. 1. Bij een belasting met alleen τ_{\perp} en τ_{\parallel} treden minder grote spanningsconcentraties op zodat grotere plastische vervormingen kunnen worden verwacht. Daar uiteraard ook de afmetingen en de eigenschappen van het aan een las grenzende materiaal bij het vervormen een rol spelen, is het bijzonder moeilijk kwantitatieve gegevens te verkrijgen. Dit had tot gevolg dat het niet mogelijk was vooraf met enige nauwkeurigheid te voorspellen welke sterkte de te onderzoeken proefstukken zouden hebben. Door een proefstuk tot breuk te belasten zou de sterkte uiteraard kunnen worden vastgesteld. Deze sterkte zegt echter niet veel indien niet tevens bekend is welke gedeelten van de totale kracht door de afzonderlijke lassen worden

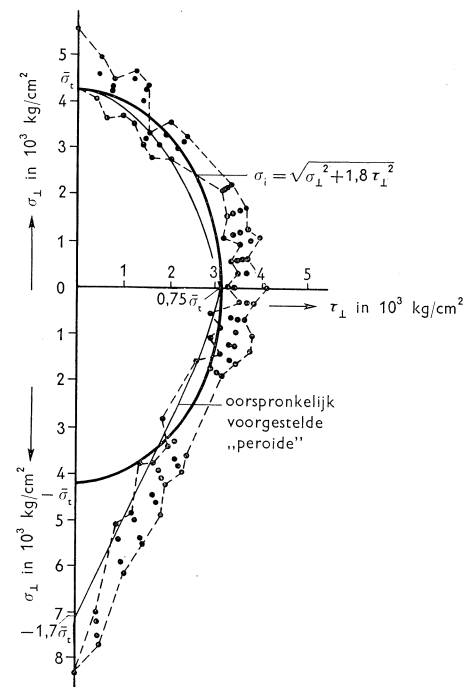


Fig. 3. Proefresultaten van VAN DER EB vergeleken met NEN 1062-VI ($\tau_{\parallel} = 0$).

overgebracht op het ogenblik van bezwijken. Wegens het ontbreken van voldoende gegevens over het verband tussen spanningen en vervormingen zouden ook rekmetingen niet veel tot dit inzicht kunnen bijdragen. Aangezien het toch de bedoeling was om enigszins algemeen geldende conclusies te trekken, diende aan de opzet van het onderzoek grote zorg te worden besteed.

Opzet van het onderzoek

Alvorens met de proeven te beginnen moest het doel van het onderzoek precies worden vastgelegd. Uiteraard kent elk beproevingsprogramma zijn beperkingen. Daarom werd de nadruk gelegd op het verkrijgen van inzicht in de wijze waarop een aantal verschillend belaste lassen samenwerken. Alleen variabelen waarvan een zekere invloed op deze samenwerking kon worden verwacht zijn in aanmerking genomen, zodat variabelen van lastechnische aard zoals elektrode-type, lassysteem en lasvorm, alsmede de materiaaleigenschappen van het te gebruiken staal buiten beschouwing zijn gelaten.

De in de praktijk voorkomende verbindingen worden niet steeds op dezelfde wijze belast. Het was dus duidelijk dat verschillende verhoudingen tussen moment en dwarskracht in het programma dienden te worden opgenomen. Normaal krachten die bij op overeenkomstige wijze vervaardigde kolom-voetplaat verbindingen optreden, werden voorlopig buiten beschouwing gelaten.

Voorts vertoont de constructievorm nog enkele variabelen waarvan invloed op de krachtsverdeling mocht worden verwacht. De meest belangrijke zijn:

1. de breedte van de flenzen van de balk. Deze werd gevarieerd door in de proevenserie een DIN- en een NP-profiel op te nemen. Een bredere flens brengt een dwarskracht minder gelijkmatig over dan een smallere;
2. de dikte van de las. Er bestaat uiteraard een zeker verband tussen de toe te passen dikte van een las en de dikte van het te lassen profiel. De ideale toestand zou zijn dat de dikte van de lassen bij de flenzen aan de dikte van de flenzen en bij het lijf aan de dikte van het lijf zou zijn aangepast. Dikwijls wordt echter rondom eenzelfde dikte van de lassen aangehouden. Het leek zeker gewenst de invloed van de dikte van de lassen na te gaan.
3. de stijfheid van het aansluitvlak voor de balk. In een geheel gelaste verbinding kan het aansluitvlak voor een balk als vrijwel stijf worden beschouwd wanneer de flenzen van de balk geheel zijn doorverbonden. In de proevenserie werd deze verbinding vereenvoudigd (zie fig. 4a). Worden evenwel de flenzen van de kolom verdikt om de doorverbinding van de flenzen van de balk achterwege te kunnen laten of wordt een montageverbinding gemaakt zoals in fig. 4b is weergegeven, dan is het vlak waarmee de balk is verbonden aanzienlijk minder stijf. Daar de stijfheid van de lassen vermoedelijk een grote rol zou spelen bij de krachtsverdeling was ook te verwachten dat een verschil in stijfheid van het aansluitvlak de sterkte van de verbinding aanzienlijk zou kunnen beïnvloeden.

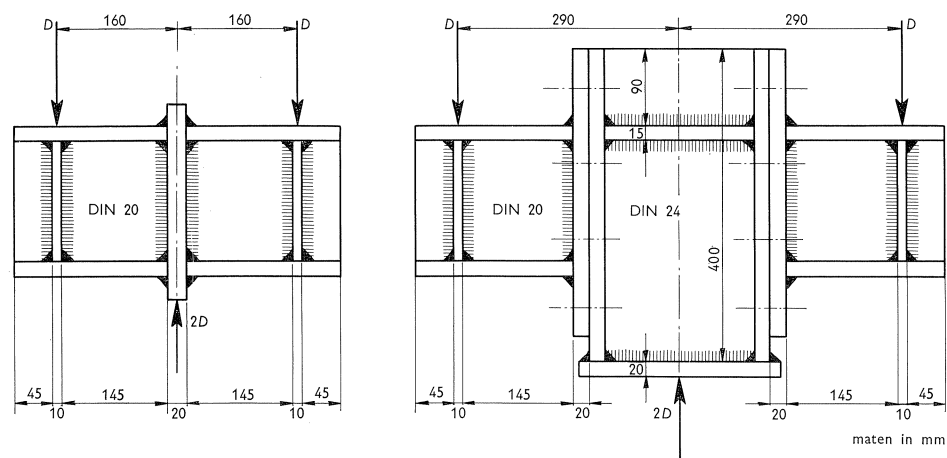


Fig. 4a. Proefstuk met stijf aansluitvlak voor de balk ($M/D = 15$ cm).

Fig. 4b. Proefstuk met minder stijf aansluitvlak voor de balk ($M/D = 15$ cm).

Op grond van deze overwegingen werd de volgende opzet verkregen:

- A. Voor de verhouding van moment tot dwarskracht M/D werd gekozen:
 - a. zuiver buigend moment, dus $M/D = \infty$;
 - b. $M/D = 30$ cm en
 - c. $M/D = 15$ cm.
- B. het profiel van de balk:
 - a. DIN 20
 - b. NP 28, welke profielen vrijwel hetzelfde weerstandsmoment bezitten.
- C. de dikte van de lassen:
 - a. bij de flenzen een dikte van 6 mm en bij het lijf een dikte van 3 mm (notatie 6-3);
 - b. zowel bij de flenzen als bij het lijf een dikte van 4,5 mm (notatie 4,5).
- D. de stijfheid van het aansluitvlak:
 - a. zo stijf mogelijk (zoals weergegeven in fig. 4a);
 - b. minder stijf (zoals is weergegeven in fig. 4b).

Door deze variabelen op alle denkbare manieren met elkaar te combineren werd een serie proefstukken verkregen zoals in tabel I is weergegeven. Deze serie bevatte dus 24 verschillende proefstukken. Door deze alle tot breuk te belasten zou de sterkte van elk afzonderlijk kunnen worden bepaald. Door vergelijking van de verschillende uitkomsten zou het waarschijnlijk mogelijk zijn enige „invloeden” te onderkennen. Zonder een voorafgaande theoretische beschouwing was het evenwel niet denkbaar dat met deze vergelijking enig inzicht zou worden verkregen in de vraag om welke redenen de te onderzoeken proefstukken de te vinden sterkten zouden bezitten. Het was dus nodig eerst een zo goed mogelijke theoretische analyse te maken van hetgeen kon worden verwacht.

Tabel I Proevenschema van de hoofdsérie

M/D	∞		30 cm		15 cm		
	aansluitvlak	stijf	slap	stijf	slap	stijf	slap
DIN 20	6-3	x	x	x	x	x	x
	4,5	x	x	x	x	x	x
NP 28	6-3	x	x	x	x	x	x
	4,5	x	x	x	x	x	x

Theoretische beschouwing

In de verbinding komen vijf lassen voor welke zijn gemerkt a, b, c, a' en b' (zie fig. 5). Elk van deze lassen wordt op een andere wijze belast. In las a is σ_{\perp} (trek) de belangrijkste belasting en in las b τ_{\perp} (zie fig. 6), terwijl in las c τ_{\parallel} een zeer voorname rol speelt. De lassen a' en b' worden evenals a en b resp. hoofdzakelijk belast op σ_{\perp} en τ_{\perp} doch met tegengesteld teken. De las a' wordt dus gedrukt. Voorts is het waarschijnlijk dat de lassen niet over hun gehele lengte gelijkmatig worden belast, terwijl bovendien de gedrukte flens van de balk nog door contactdruk krachten op de kolom kan overbrengen.

Het lijkt dus vrijwel onmogelijk langs theoretische weg enigszins de sterkte van de verbinding te voorspellen. Als evenwel wordt bedacht dat het gaat om die toestand waarbij de verbinding bezwijkt, dan is het duidelijk dat in minstens één van de lassen de grensspanningstoestand is bereikt. Uiteraard

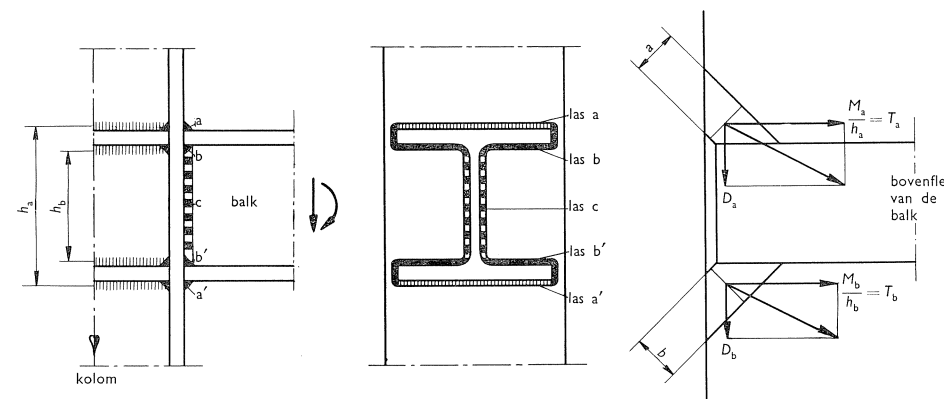


Fig. 5. Balk-kolom verbinding met aanduiding van de verschillende lassen.

Fig. 6. Krachten werkend op de lassen a en b.

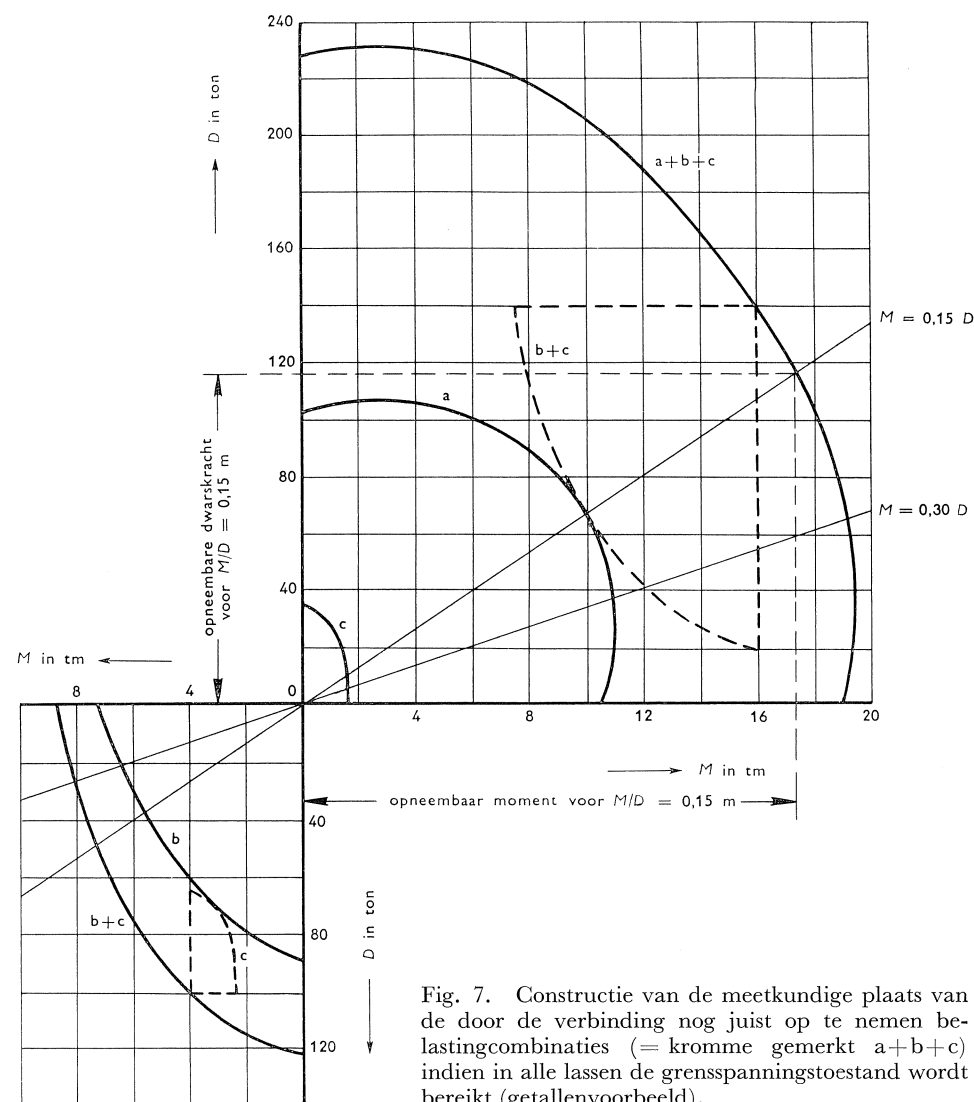


Fig. 7. Constructie van de meetkundige plaats van de door de verbinding nog juist op te nemen belastingcombinaties (= kromme gemerkt a+b+c) indien in alle lassen de grensspanningstoestand wordt bereikt (getallenvoorbeeld).

is dit het geval aan de getrokken zijde van de balk zodat alleen de lassen a, b en c hiervoor in aanmerking komen. Het feit dat las a hoofdzakelijk wordt belast door σ_{\perp} en dus minder grote vervormingen kan ondergaan dan de beide andere, maakt het waarschijnlijk dat in deze las de breuk wordt ingeleid. Indien voorts ter vereenvoudiging wordt aangenomen dat de neutrale lijn ook bij de verbinding ter halver hoogte van de balk ligt, dan bepaalt de spanningstoestand in de lassen a, b en c het moment M en de dwarskracht D die door de verbinding worden overgebracht. Wordt voorts ondersteld dat in al deze lassen de grensspanningstoestand over de gehele lengte wordt bereikt dan is het mogelijk, uitgaande van formule (1) en met een aangenomen waarde

voor σ_i , grafieken te construeren waarin de belastingcombinaties kunnen worden afgelezen die de genoemde lassen afzonderlijk kunnen overbrengen – zie de formules (2, 3 en 4) opgenomen in de appendix-I op blz. 31 e.v. In het meest gunstige geval zullen alle lassen zo goed plastisch kunnen vervormen dat breuk van de verbinding optreedt wanneer in alle lassen de grensspanningstoestand is bereikt. De belastingcombinaties welke door de verbinding nog kunnen worden overgebracht zijn nu gemakkelijk te bepalen op de in fig. 7 voorgestelde wijze.

Voorafgaande proeven

Om te komen tot de in de appendix-I vermelde berekening werd dus een groot aantal onderstellingen gedaan, en zonder deze althans enigszins te verifiëren zou het niet mogelijk zijn conclusies te trekken uit de vergelijking tussen de uitkomsten van deze berekening en die afkomstig van de in een vorige paragraaf beschreven hoofdproevenserie. Daarom moesten naast deze serie nog twee proevenseries worden opgezet waarvan de uitkomsten op overeenkomstige wijze zouden kunnen worden geanalyseerd, maar waarbij de vergelijking met de berekening eenvoudiger zou dienen te zijn.

Daartoe werd in de eerste plaats gekozen een proevenserie met proefstukken van dezelfde vorm als die van de hoofdsérie, waarbij evenwel alleen de lassen a en a' waren aangebracht. Daar deze proefstukken minder sterk zouden zijn dan die van de hoofdsérie, zou het verschil tussen een stijf en een minder stijf aansluitvlak toch niet tot zijn recht komen zodat alleen de meer eenvoudige stijve proefstukken volgens fig. 4a werden vervaardigd overeenkomstig het schema in tabel II. De serie bestond dus uit 12 proefstukken.

Tabel II Proevenschema van de 1e hulpserie

M/D	∞	30 cm	15 cm	
DIN 20	6-3	x	x	x
	4,5	x	x	x
NP 28	6-3	x	x	x
	4,5	x	x	x

Bij de vier proefstukken welke op zuivere buiging werden belast was de krachtsverdeling geheel bekend, zodat σ_i – met formule (2) van de appendix waarin $D_a = 0$ – kon worden bepaald. Het bleek dat $\sigma_i = 4150 \text{ kg/cm}^2$. Met deze waarde voor σ_i en met de genoemde formule kon vervolgens worden berekend welke totale belasting bij een bepaalde verhouding M/D kon worden opgenomen. Bij de vergelijking van de proefresultaten verkregen met het

NP-profiel met de uitkomsten van de berekening bleek de verbinding aanzienlijk sterker te zijn dan was voorspeld. De verklaring kon worden gevonden in de „staart” van fig. 3 waaruit blijkt dat de gedrukte las a' sterker is (ca. $1,6 \times$) dan uit formule (1) zou volgen. Ook voor het DIN-profiel kon redelijkerwijs hetzelfde worden geconcludeerd. Dit onderstellende bleek slechts de helft van de breedte van de flens mede te werken aan het overbrengen van de dwarskracht.

Op soortgelijke wijze werd eveneens onderzocht of de sterkte van de lassen b, c en b' overeenstemde met die volgend uit de berekening. De verwachting was dat las a en niet één van deze lassen de breuk zou inleiden omdat deze betrekkelijk goed plastisch kunnen vervormen. Om deze reden werd slechts een kleine proevenserie opgezet, bestaande uit 6 proefstukken volgens fig. 4a. Alleen de lassen b, c en b' werden aangebracht. De proefstukken werden zodanig over het schema verdeeld dat zo weinig mogelijk systematische fouten zouden worden gemaakt (zie tabel III).

Tabel III Proevenschema van de 2e hulpserie

M/D	∞	30 cm	15 cm
DIN 20 6-3 4,5	x	x	x
NP 28 6-3 4,5	x	x	x

Het bleek dat bij zuivere buiging de sterkte zelfs nog iets groter was dan uit de berekening – formules (3 en 4) van de appendix waarin $D_b = D_c = 0$ – zou volgen. Dit kan zijn veroorzaakt door het optreden van enige contactdruk bij de gedrukte flens. Bij de proeven waarbij $D \neq 0$ bleef de opneembare dwarskracht echter ver beneden de verwachting. De indruk werd verkregen dat alleen las c in dit opzicht tot zijn recht kon komen terwijl de lassen b en b' alleen of vrijwel alleen meewerkten aan het overbrengen van het buigend moment.

Interpretatie van de uitkomsten van de hoofdproevenserie

Er is nu voldoende basis aanwezig om de uitkomsten van de hoofdproevenserie te vergelijken met een theorie die een enigszins redelijke experimentele grondslag heeft. Het is zo goed als zeker dat las a de breuk zal inleiden. De sterkte van las a (+a') alleen is bekend uit de 1e hulpserie. De sterkte van de gehele verbinding is bekend uit de hoofdproevenserie, zodat door aftrekken kan worden bepaald welk aandeel de lassen b, c en b' van de maximale belasting hebben opgenomen. Zoals uit fig. 8 blijkt is deze werkwijze slechts bij benadering juist, daar de verhouding M/D voor las a een andere waarde

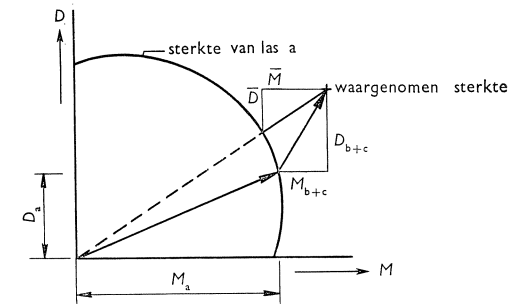


Fig. 8. Verdeling van de belastingen over a en de lassen b en c.

kan hebben dan voor de andere lassen. Ter vereenvoudiging wordt evenwel aangenomen dat $\frac{M_a}{D_a} = \frac{M_{b+c}}{D_{b+c}}$, zodat door de lassen b, c en b' de belasting overeenkomend met \bar{M} en \bar{D} wordt overgebracht.

In fig. 9 zijn voor de verschillende onderzochte verbindingen de maximale door de lassen b + c + b' opneembare belastingscombinaties uitgezet, waarbij is aangenomen dat alleen las c dwarskracht overbrengt – $D_b = 0$ en in formule (4) van de appendix $M_c = 0$ – terwijl alle lassen medewerken aan het overbrengen van het moment – in de formules (3 en 4) van de appendix $D_b = D_c = 0$. Indien de op bovenstaande wijze verkregen waarden voor \bar{M} en \bar{D} welke eveneens in fig. 9 zijn weergegeven hiermede worden vergeleken, dan blijkt dat bij zuivere buiging de maximale opneembare belasting door b + c + b' wordt bereikt. Indien eveneens dwarskracht moet worden opgenomen is dit niet het geval. De verbinding blijkt reeds te bezwijken als las c tot ongeveer een derde tot de helft van de opneembare dwarskracht wordt belast. Het geval 6-3 waarbij de dikte van de lassen is aangepast aan die van het profiel is blijkbaar gunstiger dan het geval 4,5. De proefstukken met een stijf aansluitvlak bezitten in het algemeen een iets grotere sterkte dan die met een minder stijf vlak.

Uitgaande van de theoretische beschouwingen en aansluitend op de uitkomsten van de verschillende proevenseries kan nu een theorie A worden opgesteld. Hierin wordt gesteld:

1. dat de neutrale lijn ter halver hoogte ligt bij de verbinding;
2. dat las a gelijkmatig door een buigend moment wordt belast en door een dwarskracht zodanig dat bij een NP-profiel eveneens op een gelijkmatige verdeling kan worden gerekend. Bij een DIN-profiel werkt echter slechts de helft van de breedte van de flens mee om dwarskracht op te nemen;
3. dat de lassen b en c bij zuivere buiging een moment kunnen opnemen dat als „volplastisch” kan worden berekend d.w.z. de lassen zijn over hun gehele lengte in de grensspanningstoestand – in de formules (3 en 4) van de appendix resp. $D_b = D_c = 0$. Voorts worden dwarskrachten

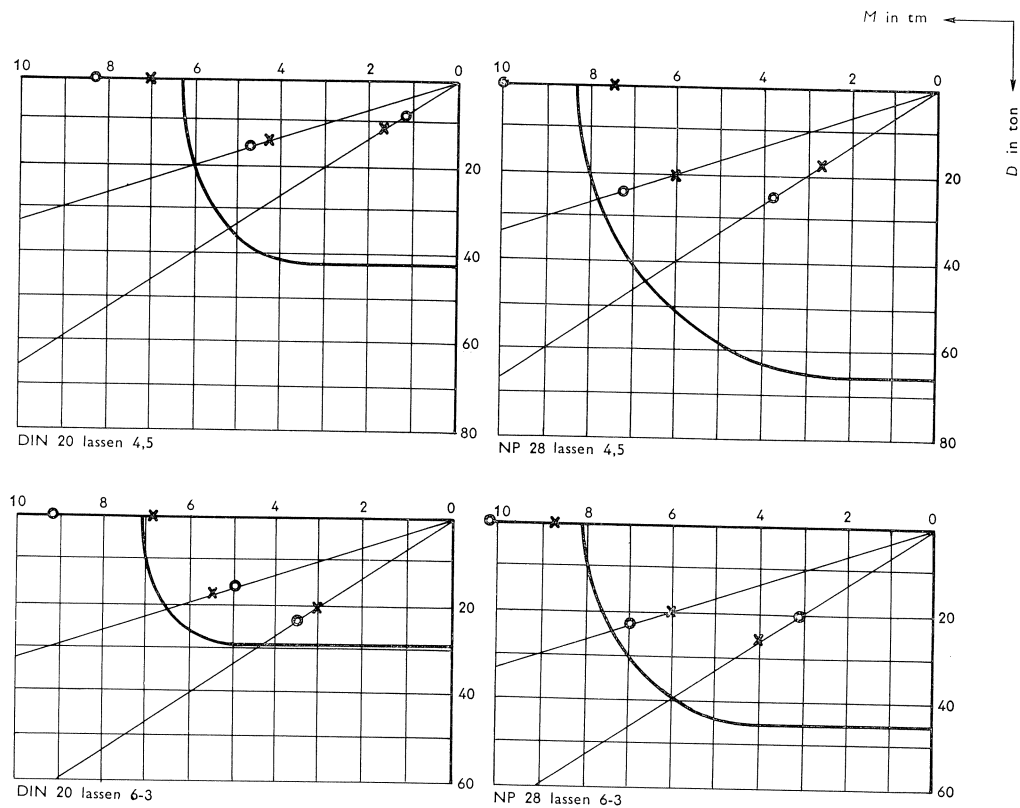


Fig. 9. De bij breuk overgebrachte belastingen door de lassen b, c en b', bepaald aan de hand van de uitkomsten van de hoofdproevenserie en de 1e hulpserie (o, x), vergeleken met de sterkte van deze lassen gebaseerd op de onderstelling dat alleen las c dwarskracht overbrengt en dat alle lassen meewerken aan het overbrengen van het buigend moment (—).
 o = stijf x = minder stijf

alleen door las c opgenomen doch slechts voor de helft van de theoretische maximale dwarskracht – zie formule (4) van de appendix waarin $M_c = 0$ – in geval de dikte van de lassen aan die van het lijf is aangepast en voor een derde indien dit niet het geval is;

4. dat $\frac{M_a}{D_a} = \frac{M_{b+c}}{D_{b+c}} = \frac{M}{D}$.

De op deze wijze berekende sterkte (zie fig. 10, theorie A) komt bijzonder goed met de waarnemingen overeen.

Voor praktisch gebruik zijn de berekeningen enigszins omslachtig. Door gebruik te maken van het feit dat las a vrijwel voor elke belastingscombinatie ongeveer hetzelfde moment kan overbrengen (zie fig. 10), kan een meer eenvoudige theorie B (zie appendix-II) worden opgesteld. Hierbij wordt aangenomen dat las a het volplastisch moment kan overbrengen – in formule (2) van de appendix $D_a = 0$ – en daarbij nog zoveel dwarskracht als nodig is om de gegeven verhouding M/D te bereiken. Voor de lassen b en c gelden de

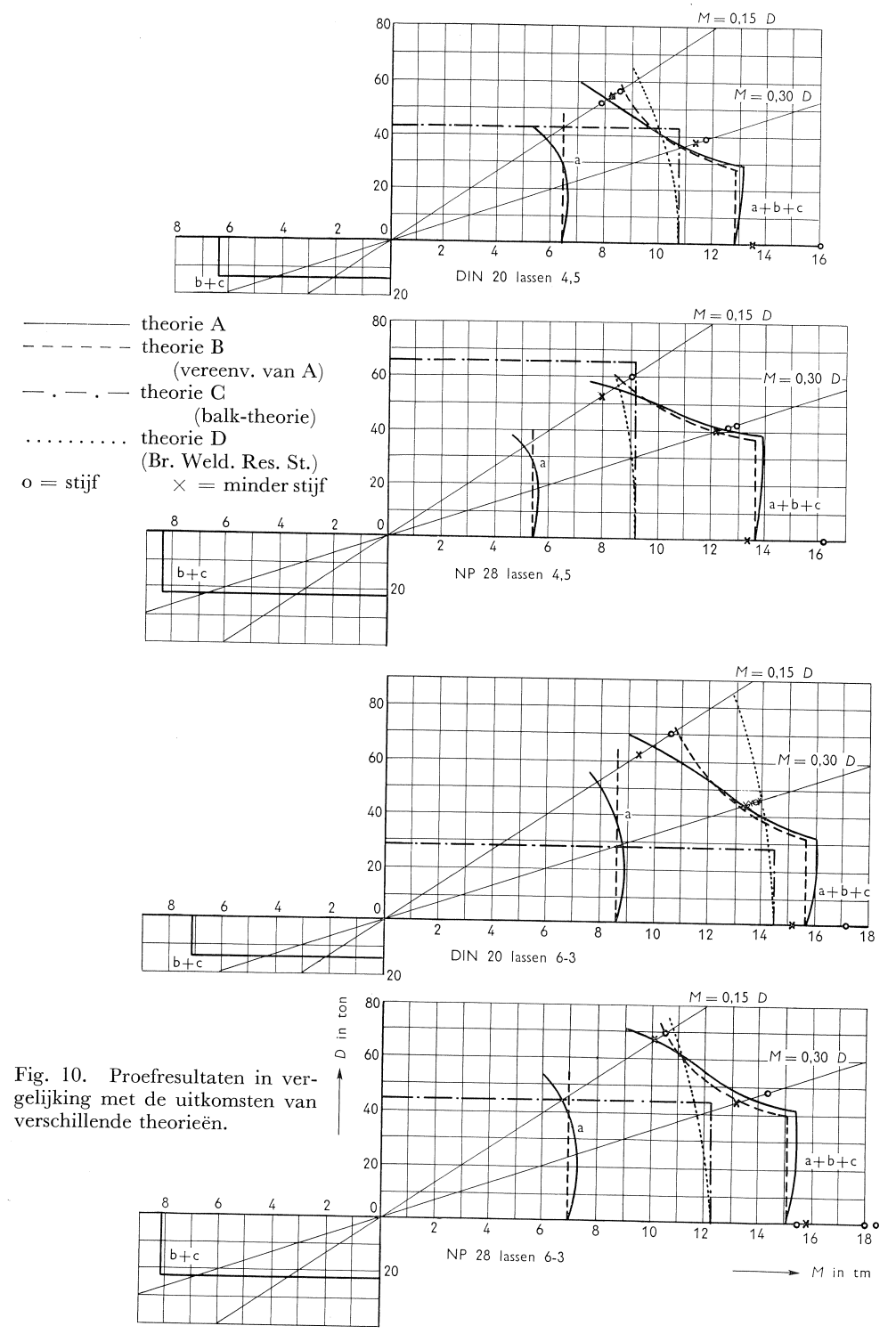


Fig. 10. Proefresultaten in vergelijking met de uitkomsten van verschillende theorieën.

reeds genoemde onderstellingen. Grafisch is de meetkundige plaats van de opneembare belastingscombinaties (een rechte en een hyperbool) voor elk geval nu gemakkelijk te construeren (zie fig. 10). Ook deze lijnen sluiten goed aan bij de uitkomsten van de proeven. Voorts zij vermeld dat de meeste in de praktijk voorkomende verbindingen in staat zullen zijn het volplastisch moment op te nemen daar de verhouding M/D meestal groot is.

De proeven zijn op zodanige wijze opgezet dat een statistische analyse van de uitkomsten mogelijk is. Het is uiteraard noodzakelijk voldoende gegevens te verkrijgen om de standaardafwijking in de sterkte te schatten. Daartoe zijn enkele proefstukken in tweevoud of in vijfvoud uitgevoerd. De uit de standaardafwijking en de gemiddelde sterkte berekende variatiecoëfficiënt bedroeg ca. 5 %.

Vergelijking met in de praktijk gebruikelijke rekenmethoden

Wanneer men niet bekend is met de voorafgaande analyse zou men geneigd zijn te veronderstellen dat met redelijke onderstellingen een bruikbaar inzicht in de sterkte van de onderzochte verbinding kan worden verkregen. Er blijkt echter wel enig verschil van mening te bestaan over de vraag wat „redelijke onderstellingen” zijn. Men ontmoet althans de meest uiteenlopende berekeningsmethoden.

Vrij logisch lijkt het te veronderstellen dat de verbinding belastingen overbrengt op ongeveer gelijke wijze als de balk. Hierbij nemen de flenzen hoofdzakelijk het buigend moment op en het lijf de dwarskracht. Wordt dit aangenomen, dan is het resultaat met een waarde van $\sigma_i = 4150 \text{ kg/cm}^2$ weer te geven als is gedaan in fig. 10 (theorie C). Deze „balk-theorie” geeft dus slechts een zeer beperkt inzicht in de sterkte van de verbinding. Wordt deze berekeningsmethode toegepast voor de proefstukken die een grote dwarskracht hadden op te nemen ($M/D = 15 \text{ cm}$) en de uitkomsten vergeleken met de proefresultaten (zie tabel IV), dan is het duidelijk dat de dikte van de lassen langs het lijf in werkelijkheid zeker niet de op te nemen dwarskracht bepaalt. Dat de proefstukken met een kleinere dikte van de lassen langs het lijf een

Tabel IV Vergelijking proefresultaten voor $M/D = 15 \text{ cm}$ met uitkomsten van de „balk-theorie”

	balk-theorie		proefresultaten			
	6-3	4,5	6-3		4,5	
DIN 20	4,25 t	6,4 t	9,3; 10,5; 8,2; 8,2	gem. 9,05 t	8,2; 8,2; 8,2; 8,4; 8,1; 7,8	gem. 8,15 t
NP 28	6,7 t	9,1 t	10,0; 10,1; 10,4	10,15 t	7,9; 9,0	8,45 t

grotere sterkte bezitten is uiteraard veroorzaakt door het feit dat de dikte van de lassen langs de flenzen dan juist 6 mm is.

Een ander gedetailleerd voorschrift is te vinden in het boekje „Design of welded joints”, uitgegeven door het British Welding Research Station (dec. 1956). De dwarskracht wordt evenredig met de dikte gelijkmatig over de lassen verdeeld. Het buigend moment wordt elastisch opgenomen zodat las a het meest wordt belast. Op deze wijze wordt tengevolge van de dwarskracht een spanning σ_s en tengevolge van het buigend moment een spanning σ_b gevonden. De kritieke spanning wordt dan berekend met:

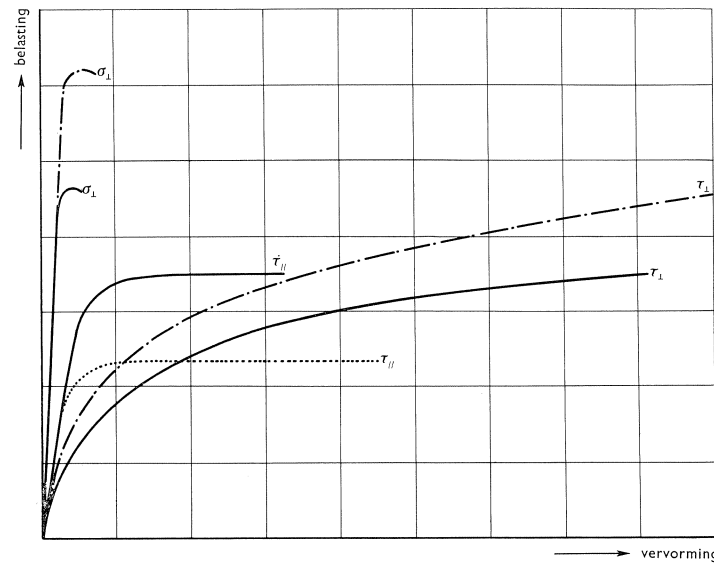
$$\sigma_{er} = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_b^2} \dots \dots \dots (5)$$

Teneinde een goede vergelijking te verkrijgen is uit dezelfde vier proeven waaruit $\sigma_i = 4150 \text{ kg/cm}^2$ was berekend, eveneens σ_{er} bepaald. Gevonden werd $\sigma_{er} = 3530 \text{ kg/cm}^2$. Ook het resultaat van deze berekening is in fig. 10 (theorie D) weergegeven. Het blijkt dat de invloed van de dwarskracht verre wordt onderschat. Er is vrijwel geen verband te bespeuren tussen de waargenomen en de berekende sterkte.

Dat dergelijke grote afwijkingen ten opzichte van de werkelijke sterkte in de praktijk niet worden geconstateerd, moet wel worden toegeschreven aan het feit dat volgens de voorschriften slechts met $\sigma_i = 1400 \text{ kg/cm}^2$ mag worden gerekend hetgeen een veiligheidscoëfficiënt van ca. 3 inhoudt. De spreiding in de sterkte van overeenkomstige proefstukken is zeker niet zo groot dat een dergelijke grote veiligheidscoëfficiënt noodzakelijk zou zijn, maar de onnauwkeurigheid van de berekeningsmethoden misschien wel.

Verdere beschouwingen

Het is tenslotte wel interessant te trachten een beter inzicht te verkrijgen in het ontstaan van de krachtsverdeling in de verbinding. De gegeven „theorie” was toch in feite niets anders dan een beschrijving van de waargenomen verschijnselen. Een beter inzicht is natuurlijk alleen mogelijk als het verband tussen spanningen en vervormingen ten aanzien van de gebruikte lassen bekend is. Gegevens zijn hierover niet beschikbaar, maar enige fantasie leidt tot grafieken als zijn geschetst in fig. 11. Wanneer las a wordt belast gedacht met σ_{\perp} , las b met τ_{\perp} en las c met $\tau_{//}$, zoals bij een vrij grote dwarskracht wel mag worden aangenomen, dan is het duidelijk dat las a reeds bezwijkt bij een vervorming waarbij de andere lassen nog slechts een gering deel van hun breukbelasting opnemen. Bij zuivere buiging worden alle lassen op dezelfde wijze belast en zullen zij dus ongeveer gelijktijdig hun breuksterkte bereiken. Door ook bij volgende proeven de resultaten met dergelijke geschatte spannings-vervormingsgrafieken te vergelijken, kan worden verwacht dat op den duur een redelijk inzicht in de sterkte van iedere willekeurige lasverbinding mogelijk zal zijn. Het is duidelijk dat hierbij in geen geval alleen van de elasticiteitstheorie mag worden uitgegaan.



— . — lassen 6 mm
 ——— lassen 4,5 mm
 lassen 3 mm

Fig. 11. Geschatte vervormingsdiagrammen voor lassen, belast met σ_{\perp} , τ_{\perp} en τ_{\parallel} .

Bij de onderzochte verbinding bleek het profiel ten opzichte van de lassen slechts weinig te vervormen. Alleen de brede flenzen van het DIN-profiel waren zo slap, dat daardoor weinig dwarskracht werd overgebracht. Het verschil in sterkte tussen de proefstukken met stijve en met minder stijve aansluitvlakken was betrekkelijk gering, doch het duidelijkst te constateren in het geval van zuivere buiging. Hieruit kan worden geconcludeerd dat in het algemeen bij een verbinding waarin een aantal op verschillende wijzen belaste lassen voorkomen, de krachtsverdeling in belangrijke mate wordt bepaald door de vervormingen in de lassen, terwijl de vervormingen van de verbonden onderdelen slechts een secundaire rol spelen. Een nader onderzoek in deze richting is dringend nodig om tot een verantwoorde lasberekening te komen.

APPENDIX

I. Berekening van de sterkte van de lassen a, b en c afzonderlijk.

a. las a (zie fig. A1):

Gegeven: dikte van de las = a
 lengte van de las = l_a
 hefboomsarm van het moment $M_a = h_a$

Berekening:

$$T_a = \frac{M_a}{h_a} \text{ en } S_a = \frac{D_a}{2}$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{\frac{1}{2}\sqrt{2}}{al_a} (T_a + S_a) =$$

$$= \frac{1}{2}\sqrt{2} \frac{1}{al_a} \left(\frac{M_a}{h_a} + \frac{D_a}{2} \right)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{\frac{1}{2}\sqrt{2}}{al_a} (T_a - S_a) =$$

$$= \frac{1}{2}\sqrt{2} \frac{1}{al_a} \left(\frac{M_a}{h_a} - \frac{D_a}{2} \right)$$

$$\tau_{\parallel} = 0$$

Volgens formule (1) is:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\perp}^2 + 1,8\tau_{\perp}^2 =$$

$$= \frac{1}{2a^2l_a^2} \left(2,8 \frac{M_a^2}{h_a^2} - 0,8 \frac{M_a D_a}{h_a} + 2,8 \frac{D_a^2}{4} \right) \dots \dots \dots (2)$$

b. las b (zie fig. A2):

Gegeven: dikte van de las = b
 lengte van de las = l_b
 hefboomsarm van het moment $M_b = h_b$

Berekening:

$$T_b = \frac{M_b}{h_b} \text{ en } S_b = \frac{D_b}{2}$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{\frac{1}{2}\sqrt{2}}{bl_b} (T_b - S_b) =$$

$$= \frac{1}{2}\sqrt{2} \frac{1}{bl_b} \left(\frac{M_b}{h_b} - \frac{D_b}{2} \right)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{\frac{1}{2}\sqrt{2}}{bl_b} (T_b + S_b) =$$

$$= \frac{1}{2}\sqrt{2} \frac{1}{bl_b} \left(\frac{M_b}{h_b} + \frac{D_b}{2} \right)$$

$$\tau_{\parallel} = 0$$

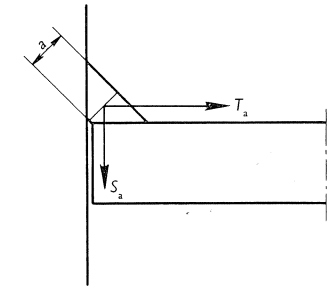


Fig. A1. Krachten werkend op las a.

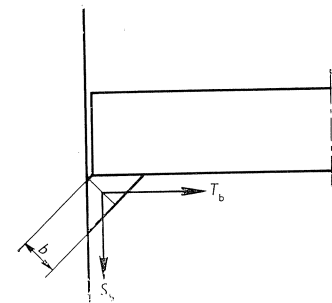


Fig. A2. Krachten werkend op las b.

Volgens formule (1) is:

$$\begin{aligned} \sigma_i^2 &= \sigma_{\perp}^2 + 1,8\tau_{\perp}^2 = \\ &= \frac{1}{2b^2l_a^2} \left(2,8 \frac{M_b^2}{h_b^2} + 0,8 \frac{M_b D_b}{h_b} + 2,8 \frac{D_b^2}{4} \right) \dots \dots (3) \end{aligned}$$

c. las c (zie fig. A3):

Gegeven: dikte van de las = c
 lengte van de las = l_c

Berekening: In dit geval is het niet zeker op welke wijze de spanningen veroorzaakt door M_c en D_c over de lengte van de las zijn verdeeld. Een eenvoudige onderstelling is gedaan (zie fig. A3). Andere redelijke onderstellingen veroorzaken slechts geringe verschillen in uitkomsten ten opzichte van die verkregen met de gedane onderstelling.

$$\begin{aligned} T_c &= \frac{M_c}{\frac{1}{2}l_c} \text{ en } S_c = \frac{D_c}{2} \\ \sigma_{\perp} = \tau_{\perp} &= \frac{\frac{1}{2}\sqrt{2}}{\frac{1}{2}l_c \cdot 2c} T_c = \frac{\sqrt{2}M_c}{cl_c^2} \\ \tau_{\parallel} &= \frac{S_c}{cl_c} = \frac{D_c}{2cl_c} \end{aligned}$$

Volgens formule (1) is:

$$\begin{aligned} \sigma_i^2 &= \sigma_{\perp}^2 + 1,8\tau_{\perp}^2 + 1,8\tau_{\parallel}^2 = \\ &= \frac{2(1+1,8)M_c^2}{c^2l_c^4} + \frac{1,8}{4} \frac{D_c^2}{c^2l_c^2} = \\ &= 5,6 \left(\frac{M_c}{c^2l_c^2} \right)^2 + 0,45 \left(\frac{D_c}{cl_c} \right)^2 \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

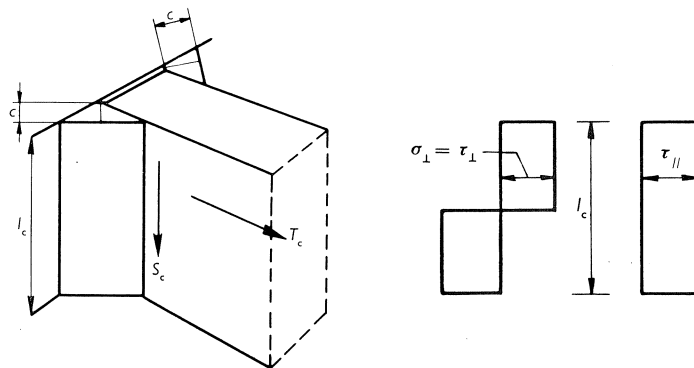


Fig. A3. Krachten werkend op las c en aangenomen spanningsverdeling.

II. Berekening van de sterkte van de verbinding (theorie B).

Volgens formule (2) waarin $D_a = 0$:

1. $M_a = \sigma_i al_a h_a \sqrt{\frac{2}{2,8}} = 0,85 al_a h_a \sigma_i$
2. D_a wordt zodanig aangepast dat $\frac{M_a}{D_a} = \frac{M}{D}$, zodat $D_a = D \frac{M_a}{M}$.
 De beide voorwaarden leiden in fig. 10 tot de verticale rechten a.
 Uit formule (3) waarin:
3. $D_b = 0$
 volgt:
4. $M_b = 0,85 bl_b h_b \sigma_i$
 Volgens formule (4) waarin $D_c = 0$:
5. $M_c = \frac{0,85}{2} cl_c^2 \sigma_i$
 Volgens formule (4) waarin $M_c = 0$:
6. $D_c = \sqrt{\frac{1}{0,45}} cl_c \sigma_i = 1,5 cl_c \sigma_i$

De som $M_b + M_c$ correspondeert in fig. 10 met de verticale rechten (b+c). Afhankelijk van de aanpassing van de dikte van de lassen aan die van het profiel correspondeert $\frac{1}{2}D_c$ of $\frac{1}{3}D_c$ met de horizontale rechten (b+c). De door de verbinding opneembare belastingscombinaties kunnen worden gevonden door de bepaling van de snijpunten van de rechten $M = \lambda D$ met de besproken rechten. De horizontale afstand van de snijpunten geeft het opneembare moment en de verticale afstand de opneembare dwarskracht. Ter vereenvoudiging zijn in fig. 10 reeds de meetkundige plaatsen van de opneembare belastingscombinaties geconstrueerd (a+b+c).