

ONDERZOEK NAAR DE VERVORMING VAN STATISCH BELASTE HOEKKLASSEN

U.D.C. 624.078.3;
539.37

Behandeld wordt een systematisch programma, waarbij diverse lassen onder bepaalde belastingstoestanden tot breuk van het proefstuk zijn onderzocht, onder gelijktijdige bepaling van het verloop van de vervormings-toestand daarbij. Na een inleiding tot een aantal beschouwingen betreffende de bewerking van de uitkomsten der proeven alsmede de aspecten van de vervormingen, wordt geconcludeerd tot het bestaan van een redelijke overeenstemming met de breukspanningsellipsoïde als basis voor de sterkteberekening van zijhoekklassen. Enkele uitkomsten, getoetst aan die verkregen bij een analoog internationaal onderzoek, vertonen een bevredigende correlatie.

0 Inleiding

De berekening van de sterkte van een door middel van hoekklassen verkregen verbinding berust tot heden nog op diverse aannamen. De I.S.O.-formule $\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 1,8(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)}$ maakt weliswaar een redelijke schatting mogelijk van de *breuksterkte* van een las die in een bepaalde richting belast wordt, bij een verbinding echter, waar een aantal lassen samenwerken, doch onderling verschillend belast worden, is te verwachten dat de aan eventuele breuk voorafgaande *vervormingen* van die lassen een belangrijke rol spelen.

Om nu een inzicht te krijgen in de vervormingen van een las onder invloed van een bepaalde belastingstoestand is een proevenserie ontworpen, zich uitstrekkend over de volgende 7 belastinggevallen:

$$\sigma_{\perp}, \tau_{\perp}, \tau_{//}, \sigma_{\perp} = \tau_{\perp}, \sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \sigma_{//}, \sigma_{\perp} = \tau_{//} \text{ en } \tau_{\perp} = \tau_{//}.$$

Ook voor enkele belastingcombinaties van $\sigma_{//}$ en $\tau_{//}$ werden proefstukken vervaardigd. De breuk vond echter in al deze gevallen plaats in het moeder-materiaal, zodat ten aanzien van het gestelde probleem geen betrouwbare gegevens verkregen werden; deze belastinggevallen zijn dan ook verder buiten beschouwing gelaten.

Fig. 1 en tabel 1 tonen een overzicht van de desbetreffende proefstukken en hun codering. Bij hun dimensionering is uitgegaan van lassen ter dikte van 5 mm en ter lengte van 10 cm.

De belasting wordt in het algemeen over 2 lassen verdeeld, zodat bij een kritieke spanning $\sigma_i = 5000 \text{ kgf/cm}^2$ ten hoogste een kracht van 50 ton te verwachten valt.

De te verbinden staafdelen van de proefstukken dienden zodanige afmetingen te krijgen dat breuk alleen de lassen zou treffen, en het moeder-materiaal door een behoorlijke reserve zeer kleine deformaties zou vertonen.

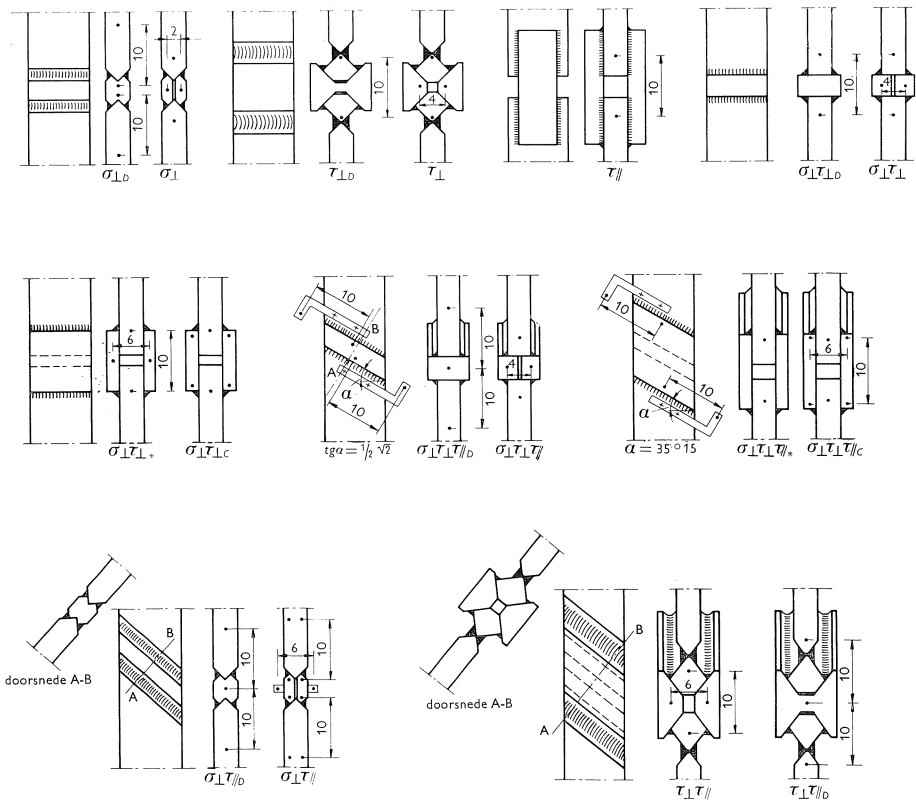


Fig. 1. Overzicht proevenserie.

Tabel 1.

Tabel 2.

Tabel 3.

belasting-geval	beproevingsschema			P/F nominaal in kgf/mm^2 breukspanning berekend op nominale lasdoorsnede		P/F gemeten in kgf/mm^2 breukspanning berekend op gemeten lasdoorsnede												
	A	B	C	gem.	gem.	gem.												
σ_{\perp}	5	6	12	34	68,8	72,0	59,0	¹⁾ 61,4	56,5	63,5	56,9	51,9	50,1	¹⁾ 55,1	54,9	53,8		
$\sigma_{\perp D}$	3	5	16	2	85,2	85,5	74,3	65,0	64,2	65,6	73,3	57,3	57,3	62,9	54,8	57,5	57,6	
τ_{\perp}	1	5	3	6	51,1	55,0	41,6	37,5	34,4	38,8	43,1	29,5	33,7	29,5	35,6	31,9	26,4	31,1
$\tau_{\perp D}$	5	6	13	2	50,3	48,2	34,4	37,0	31,8	31,6	38,9	32,0	33,1	28,0	30,4	24,6	25,3	28,9
		C	C	C														
$\tau_{//}$	1	2	3	4	¹⁾ 37,8	35,8	38,0	37,1	35,5	36,8	¹⁾ 35,9	36,8	35,0	33,0	33,0	34,7	34,7	
$\sigma_{\perp}\tau_{\perp}$	1	2	3	4	44,4	44,1	46,2	44,0	44,5	44,6	40,4	38,9	40,2	40,2	39,4	39,8	39,8	
$\sigma_{\perp}\tau_{\perp D}$	1	2	3	4	53,7	54,9	50,0	54,2	55,0	54,1	46,5	48,5	42,1	46,6	47,0	45,4	45,4	
$\sigma_{\perp}\tau_{\perp}^*$	1	2	3	4	53,0	47,0	54,9	53,6	60,0	53,9	53,7	53,0	44,0	56,0	42,9	59,5	56,7	52,0
$\sigma_{\perp}\tau_{\perp c}$	1	2	3	4	39,1	43,0	41,0	41,0		41,0	34,0	37,4	35,6	35,6		35,4	35,4	
		A	B	C														
$\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//}$	2	5	16	3	53,9	54,0	41,5	36,6	36,4	34,5	42,8	43,0	39,5	41,0	36,8	39,0	35,5	39,1
$\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//D}$	3	6	15	2	62,1	54,0	34,7	37,5	43,3	38,1	44,9	47,4	47,0	34,0	38,0	40,9	41,0	41,4
$\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//}^*$	3	4	5	6	80,9	81,6	68,1	53,0	54,8	65,8	67,4	66,0	62,9	68,4	51,2	54,0	65,0	61,2
$\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//c}$	2	3	14	5	53,2	57,5	47,9	44,9	43,3	¹⁾ 49,4	42,3	45,5	47,5	44,5	45,0	¹⁾ 44,9	44,9	44,9
$\sigma_{\perp}\tau_{//}$	2	5	1	3	69,1	70,7	45,8	45,2	45,9	44,1	53,4	53,5	48,0	37,9	35,5	33,8	38,2	40,8
$\sigma_{\perp}\tau_{//D}$	4	5	3	6	67,9	67,2	45,4	38,9	47,6	45,0	52,0	47,6	48,5	41,9	35,6	44,2	40,4	43,0
$\tau_{\perp}\tau_{//}$	3	5	4	6	52,2	47,4	36,5	37,0	34,6	34,4	40,5	37,5	33,0	32,3	34,3	31,3	28,0	32,7
$\tau_{\perp}\tau_{//D}$	4	5	1	2	54,1	54,9	38,9	37,5	34,0	32,6	42,0	38,0	34,7	33,8	32,5	29,4	31,6	33,3

¹⁾ breuksterkte niet gemeten.

Aldus zouden de gemeten vervormingen als maatstaf kunnen gelden voor de verplaatsing van de onderdelen ten opzichte van elkaar, en dus voor de vervorming van de lassen.

De te verbinden staafdelen hebben op grond van deze overweging een doorsnede van 10×4 cm gekregen.

De proefstukken zijn symmetrisch uitgevoerd, zodat er in het algemeen 4 lassen zijn, die op dezelfde wijze belast worden.

Alleen bij het belastingsgeval $\tau_{//}$ wordt de belasting verdeeld over 2 maal 4 lassen, ieder 8 cm lang.

De proefstukken worden aangeduid naar het belastingsgeval, dus respectievelijk met σ_{\perp} , τ_{\perp} , $\tau_{//}$, $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}$, $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//}$, $\sigma_{\perp}\tau_{//}$ en $\tau_{\perp}\tau_{//}$.

1 Variaties

1. De stijfheid van het verbindingsstuk is gevarieerd. De proefstukken σ_{\perp} , τ_{\perp} , $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}$, $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//}$, $\sigma_{\perp}\tau_{//}$ en $\tau_{\perp}\tau_{//}$ zijn in twee uitvoeringsvormen vervaardigd, nl. die gemerkt met σ_{\perp} enz. en die aangeduid met $\sigma_{\perp D}$ enz.

In het eerste geval wordt de verbinding tussen de staafeinden gevormd door een verbindingsstuk bestaande uit twee afzonderlijke delen, in het tweede geval door een massief verbindingsstuk.

Dit had tot resultaat, dat de deformatie van de lassen in het eerste geval in twee richtingen, nl. loodrecht op en evenwijdig aan de kracht mogelijk was, en in het tweede geval de deformatie in de richting loodrecht op de krachtrichting door het massieve tussenstuk vrijwel volledig werd tegengegaan.

2. De verbinding van de staafdelen is bij de proefstukken $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}$ en $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//}$ op twee verschillende manieren tot stand gebracht.

Het eerste geval volgt normaal uit de opbouw van de proevenserie en hierbij is de richting van de kerf in de las, gevormd door het contactvlak van de aansluitende delen, loodrecht op de krachtrichting.

In het tweede geval, aangeduid met $\sigma_{\perp}\tau_{\perp*}$ en $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//*}$, is deze kerf evenwijdig aan de krachtrichting en wordt het verbindingsgedeelte tussen de staafdelen gevormd door 2 ter weerszijden van de oorspronkelijke staaf aangebrachte lasplaten.

Bovendien was het bij dit laatste geval mogelijk de invloed van een drukbelasting op de vervorming van de lassen na te gaan zonder kans op introductie van ongewenste contactdrukken.

Daarom zijn hiervoor enige identieke proefstukken vervaardigd gemerkt $\sigma_{\perp}\tau_{\perp c}$ en $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//c}$.

Alle overige proefstukken zijn uitsluitend op trek belast.

3. Er zijn verschillende elektrodesoorten toegepast. De proefstukken $\tau_{//}$, $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}$, $\sigma_{\perp}\tau_{\perp D}$, $\sigma_{\perp}\tau_{\perp*}$ en $\sigma_{\perp}\tau_{\perp c}$ zijn alle gelast met een rutielelektrode (Cumulo-elektrode van Smit – Nijmegen).

Van elk type zijn 5 exemplaren beproefd: de overige proefstukken zijn in 6-voud vervaardigd, waarbij van iedere serie van 6 stuks er 2 met ferri-elektrode (Smit-Resistens), 2 met basische elektrode (Smit-Conarc 47) en 2 met rutiel-elektrode (Smit-Cumulo) gelast zijn.

De elektrodesoort wordt voor deze 3 gevallen in de genoemde volgorde aangeduid met respectievelijk A, B en C.

2 Uitvoering van de proeven

De trekproeven zijn verricht op een hydraulische trekbank met een capaciteit van 400 tf.

De belasting werd in trappen van 5 tf opgevoerd en na iedere belastingsverhoging werd de afstand bepaald tussen de op de beide staafhelften aangebrachte meetpunten.

De metingen waren er op gericht de afstandsverandering tussen de verschillende onderdelen van ieder proefstuk evenwijdig aan en bij de proefstukken σ_{\perp} etc. bovendien loodrecht op de krachtrichting te bepalen.

Bij de proefstukken belast met $\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{//}$ is tevens de vervorming in de richting van de las bepaald.

De meetpunten zijn aangebracht met onderlinge afstand van respectievelijk 2, 4, 6 of 10 cm (zie fig. 1).

Alle metingen zijn verricht met de afneembare rekmeter. Een speciale voorziening is tijdens het beproeven in de trekbank aangebracht om bij breuk van het proefstuk een zo klein mogelijke schok in het bankgestel te krijgen. Zodra namelijk de gemeten verlengingen niet meer lineair met de belasting toenamen (toestand van vloeien, inleidend tot breuk) werden 4 staven van hoogwaardig staal parallel aan het proefstuk in de trekbank aangebracht, die bij optredende breuk als een soort schokdemper werkten.

Een bijkomend voordeel was, dat de tot breuk voerende verdere belastingsverhogingen van 5 tf mede over deze staven verdeeld werden, zodat het proefstuk zelf door het vloeien van de lassen geleidelijk aan een steeds kleiner deel van de belastingstoename voor zijn rekening kreeg.

De grote deformaties, die zich even voor de breuk voordeden, konden zodoende over een voor het proefstuk gereduceerd belasting-interval bepaald worden.

Met rekstrookjes werd de rek van deze hulpstaven vastgesteld, zodat het deel van de totale belasting, dat voor hun rekening kwam, bekend was.

Het verschil met de totale belasting leverde de kracht waaraan het proefstuk zelf was onderworpen.

Een ijking bewees de juistheid van de berekening van de kracht in de hulpstaven op grond van de wet van Hooke.

3 Bewerking van de proefresultaten

3.1 Breuksterkte

De gevonden waarden voor de breukkrachten (zie tabel 2 en 3) zijn allereerst vergeleken met de I.S.O.-formule $\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 1,8(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}$. In fig. 2 en 3 zijn in ruimtelijke figuren de hoogste en de laagste alsmede de gemiddelde waarden van de gevonden breukspanningen uitgezet en vergeleken met de bovengenoemde breukspanningsellipsoïde, waarbij voor $\sigma_i = 5000 \text{ kgf/cm}^2$ is aangehouden.

In fig. 2 is bij de berekening van de breukspanningen de nominale lasdikte aangehouden.

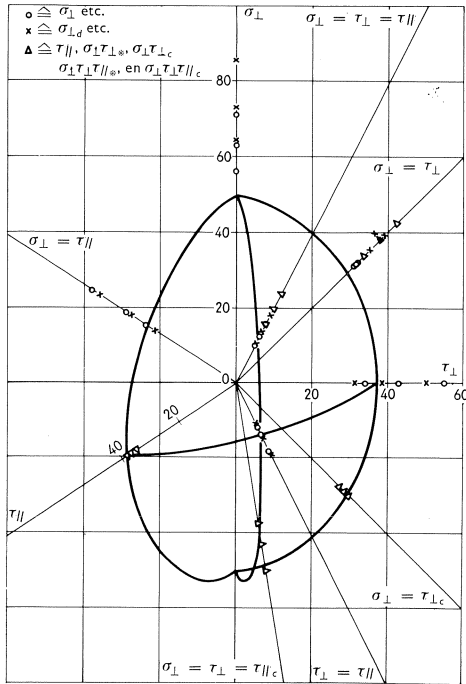


Fig. 2. Breukspanningen berekend op de nominale lasdoorsnede vergeleken met

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

waarbij $\sigma_i = 5000 \text{ kgf/cm}^2$

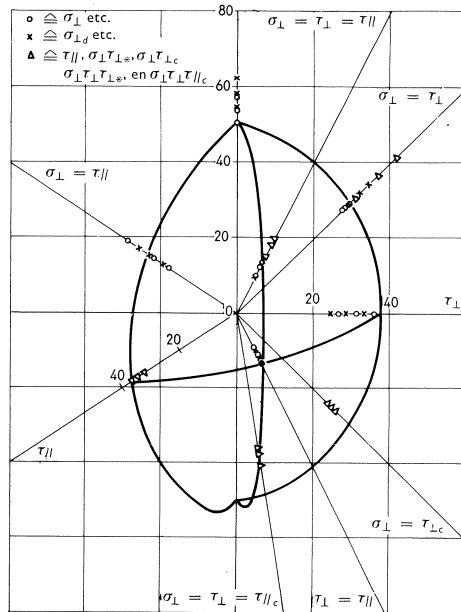


Fig. 3. Breukspanningen berekend op de gemeten lasdoorsnede vergeleken met

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

waarbij $\sigma_i = 5000 \text{ kgf/cm}^2$

Aangezien echter vrij grote afwijkingen van de ellipsoïde werden geconstateerd zijn deze breukspanningen gecorrigeerd op de gemeten lasdikte en opnieuw uitgezet in fig. 3.

Helaas vond de bepaling van de lasdikte pas plaats, nadat alle proefstukken beproefd waren, zodat alleen metingen op de intact gebleven lassen konden worden uitgevoerd.

Van deze lassen is per proefstuk op 10 verschillende plaatsen de lasdikte bepaald, en de gemiddelde waarde hiervan is beschouwd als „de lasafmeting” van dit proefstuk.

Bij de proefstukken $\sigma_{\perp}\tau_{\perp c}$ en $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//c}$ traden grote blijvende vervormingen op van de lasplaten, waardoor het niet mogelijk was de lasdikte in deze gevallen te bepalen.

In plaats daarvan is nu het gemiddelde aangehouden van de waarden gevonden bij de op trek belaste gelijkvormige proefstukken.

Aangezien breuk in de kleinste lasdoorsneden zal zijn opgetreden zullen de berekeningen met de gevonden lasafmetingen voor de breukspanningen lagere waarden geven dan de werkelijk opgetreden spanningen bij breken.

Bovendien zijn de gecorrigeerde breukspanningen onderworpen aan een berekening naar de aanpassingsmogelijkheid aan de formule

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\perp}^2 + c_1\tau_{\perp}^2 + c_2\tau_{//}^2$$

In deze formule waren σ_i , c_1 en c_2 de te bepalen grootheden. Om een indruk te krijgen van de invloed van de verschillende variaties in de vorm van het proefstuk is deze aanpassing verricht voor 3 gevallen.

Het eerste geval omvat de proefstukken σ_{\perp} , τ_{\perp} , $\tau_{//}$, $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}$, $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//}$, $\sigma_{\perp}\tau_{//}$ en $\tau_{\perp}\tau_{//}$; het tweede geval de overige proefstukken, en het laatste geval omvat de gehele proevenserie.

$$\text{geval 1:} = 55,32 \text{ kgf/mm}^2 \quad c_1 = 2,95 \text{ en } c_2 = 2,33$$

$$\text{geval 2:} = 59,72 \text{ kgf/mm}^2 \quad c_1 = 2,15 \text{ en } c_2 = 1,32$$

$$\text{geval 3:} = 59,85 \text{ kgf/mm}^2 \quad c_1 = 2,39 \text{ en } c_2 = 1,94$$

Hierbij bleek in geval 1 de nauwkeurigheid van de aanpassing zeer goed te zijn, in beide andere gevallen was deze minder goed.

In fig. 4 zijn deze oppervlakken onderling en met de I.S.O.-formule vergeleken in een ruimtelijke figuur.

Hierbij blijkt dat de I.S.O.-formule met $c_1 = c_2 = 1,8$ zeker niet bepaald sterk afwijkt van de verkregen oppervlakken, met bovendien nog als voordeel dat bij berekening volgens die formule de lassen belast met σ_{\perp} dikker uitvallen dan nodig is voor de sterkte, hetgeen gezien de later te behandelen kleine vervormingsmogelijkheid gunstig is bij combinaties met in andere richtingen belaste lassen.

In twee gevallen nl. bij de proefstukken $\sigma_{\perp}\tau_{\perp*}$ en $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//*}$ zijn veel grotere waarden gevonden dan uit de I.S.O.-formule zou volgen.

Dit laat zich verklaren uit de samenstelling van het proefstuk.

Bij de overige proefstukken wordt nl. de kerf, gevormd door het contactvlak der aansluitende delen, bij belasting vergroot, zodat zich ter plaatse een abnormale spanningsconcentratie voordoet, waardoor in deze gevallen de breuk kan worden ingeleid voordat de gehele keeldoorsnede is gaan vloeien.

Bij de genoemde proefstukken echter zullen de lasplaten onder invloed van de excentrisch aangrijpende belasting willen vervormen.

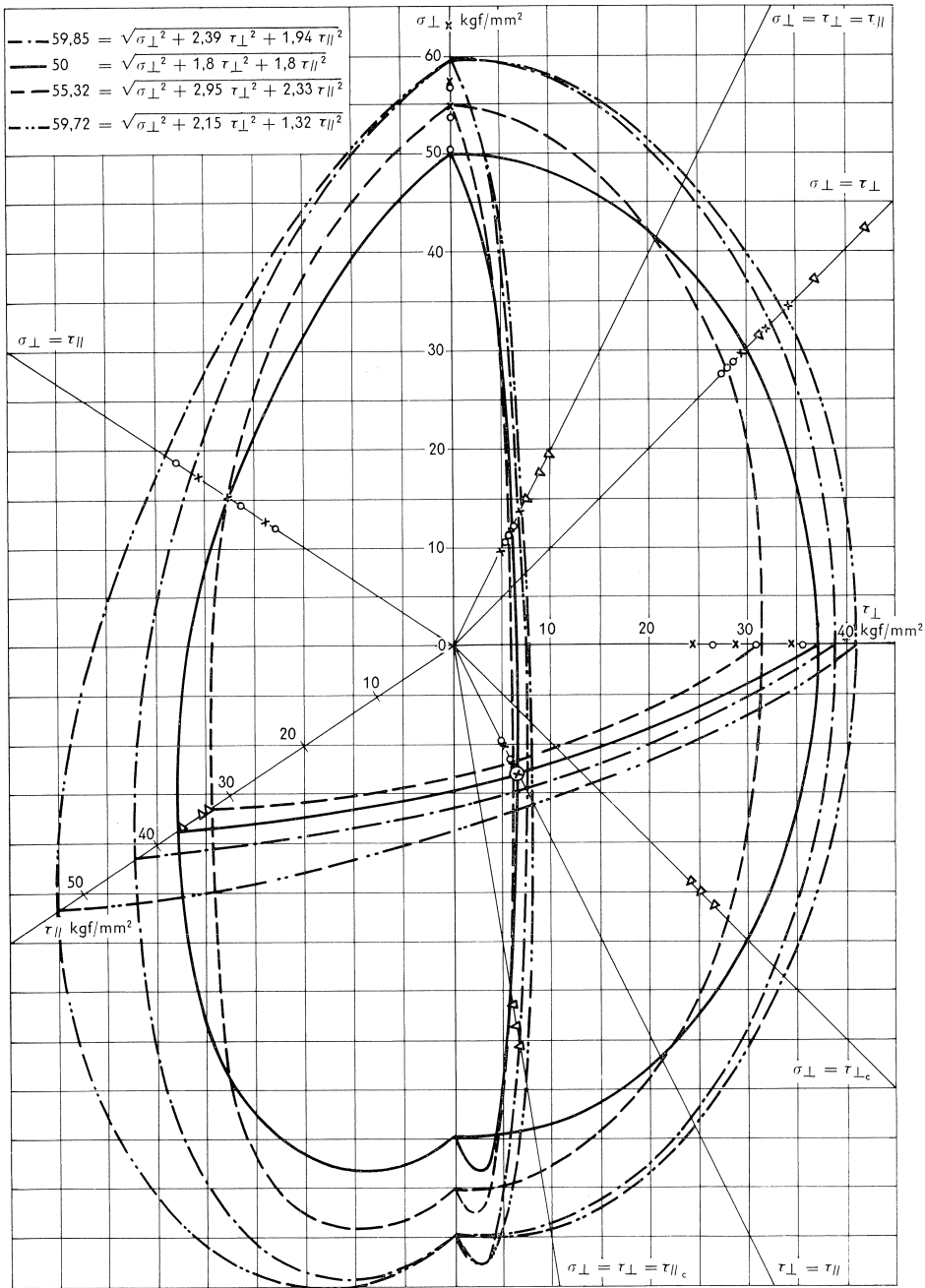


Fig. 4. $\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 1,8(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}$ waarbij $\sigma_i = 50$ kgf/mm² vergeleken met uit de proeven-serie verkregen waarden voor de aanpassing aan de formule

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + c_1 \tau_{\perp}^2 + c_1 \tau_{\parallel}^2}$$

Deze vervorming wordt gehinderd door het tussenliggende staafmateriaal. De kerf tussen de aansluitende delen gaat dus in dit geval niet openstaan, maar blijft dicht, waardoor een meer gelijkmatige spanningsverdeling in de keeldoorsnede kan optreden, met als gevolg hogere breuksterkte van de las.

Dit verschijnsel hangt samen met de overlappingslengte van staaf en lasplaten.

Een verklaring van de invloed van deze overlappingslengte kan gevonden worden in een analogie van dit geval met een ligger met stijfheid EI op elastische bedding met beddingconstante k , waarop aan het uiteinde een moment werkt.

De invloed van dit moment doet zich gelden tot een afstand van ongeveer 4λ van het uiteinde. Hierbij is λ de karakteristieke lengte, in formule

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}}$$

Wordt het staafgedeelte tussen de lasplaten beschouwd als elastische bedding met k als veerconstante en de lasplaat met stijfheid EI hierop gelegd, met aan het uiteinde een moment, veroorzaakt door het excentrisch aangrijpen van de kracht via de las, dan is een analoog geval verkregen. Bij een overlappingslengte groter dan 4λ zal er geen merkbare invloed meer zijn op de rand waar het moment aangrijpt, maar naarmate deze lengte afneemt zal een grotere vervorming van de lasplaten (dus ook ter plaatse van de las) optreden, wat zal resulteren in een lagere breuksterkte.

Bij deze opvatting is het berekenen van de weerstand tegen samendrukking van het staafgedeelte tussen de lasplaten niet gemakkelijk. Als benadering wordt hier aangenomen, dat zich tussen de lasplaten afzonderlijke elementjes bevinden, met breedte l_1 , lengte t en dikte 1 (zie figuur 5).

Een indrukking y van dit elementje zal een reactiekracht q ten gevolge hebben waarvoor geldt $q = ky$.

Volgens de wet van Hooke is voorts:

$$\frac{2y}{t} = \frac{q}{l_1 \cdot 1 \cdot E} \quad \text{of} \quad q = \frac{2l_1 \cdot E \cdot y}{t} = k \cdot y$$

en dus
$$k = \frac{2l_1 \cdot E}{t}$$

Aangezien de veerconstante in werkelijkheid groter zal zijn is met behulp van een coëfficiënt α te stellen:

$$k = \frac{2l_1 \cdot E}{t} \cdot \frac{1}{\alpha}$$

Hierin is $\alpha < 1$, maar $\sqrt[4]{\alpha} \approx 1$

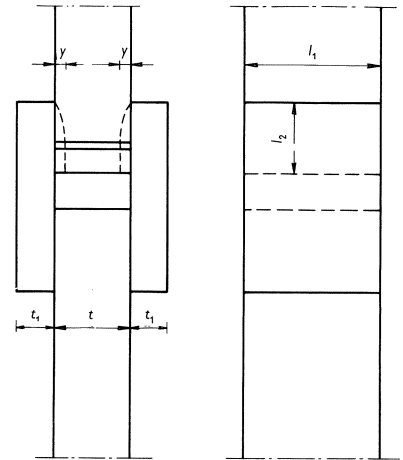


Fig. 5.

Nu wordt voor de lasplaten de karakteristieke lengte:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} = \sqrt[4]{4E \frac{t_1^3 l_1}{12} \frac{at}{2l_1 E}} = \sqrt[4]{\frac{att_1^3}{6}}$$

Meestal zal $t_1 = 0,5 t$ zijn, dan wordt $\lambda = 0,38t \sqrt[4]{a}$ en $4\lambda = 1,52t \sqrt[4]{a}$.

Als de overlappingslengte l_2 groter wordt dan $1,52t \sqrt[4]{a}$ zal dit geen verdere invloed meer hebben op de breuksterkte van de las.

Een proef uitgevoerd op een model gaf een goede overeenkomst te zien met de theorie.

Het werd van schuimrubber vervaardigd met een staafdikte t van 4 cm en lasplaten van 20 cm lengte bij 2 cm dikte.

De overlappingslengte in het model werd nu bij een constante belasting van 200 gf in trappen van 1 cm verminderd van 9 tot 0 cm door telkens met een schaar 1 cm af te knippen.

Uit de serie genomen foto's volgde dat de helling van de bovenzijde van de lasplaat vrijwel niet veranderde bij een vermindering van de overlappings-

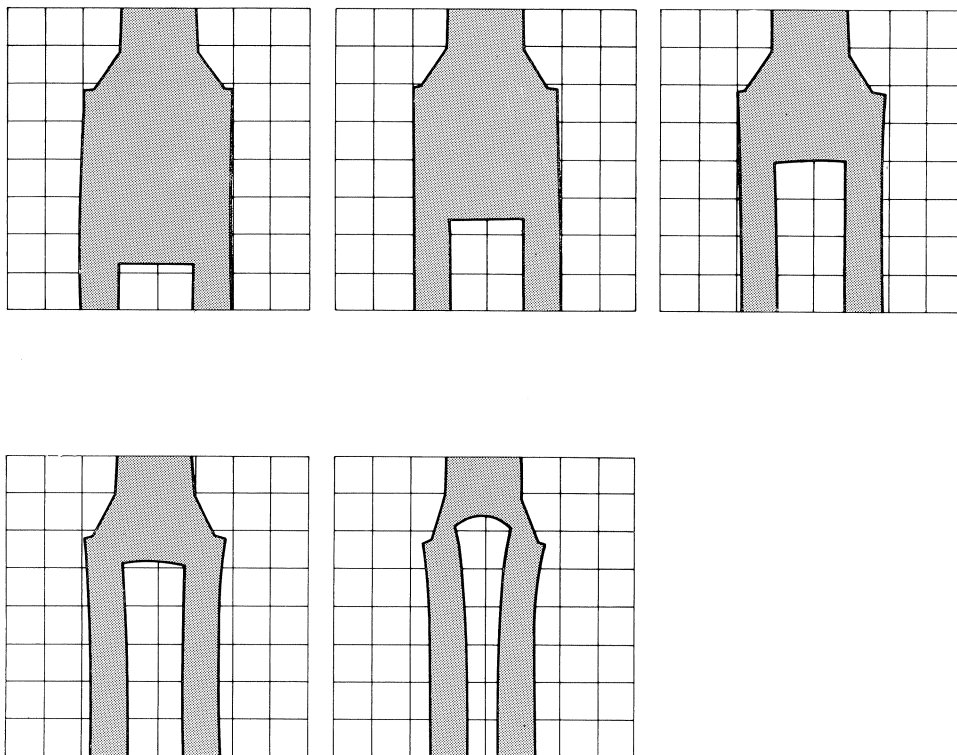


Fig. 6. Situaties bij een overlappingslengte van 9, 7, 4, 2 en 0 cm van een proef op een schuimrubber model van belastingsgeval $\sigma_1 \tau_1^*$.

lengte van 9 tot 6 cm, dus tot $1,5t$, en bij verdere afname van die lengte progressief toenam. Enkele situaties uit de proef zijn in fig. 6 weergegeven.

De invloed op de breuksterkte bij één- of tweedelig middendeel van het proefstuk volgt uit de gemeten vervormingen loodrecht op de krachtrichting.

Hieruit is nl. af te leiden of in de verticale middendoorsnede van de proefstukken met massief verbindingstuk trek- dan wel drukspanningen heersen.

Bij de proefstukken $\sigma_{\perp D}$ en $\sigma_{\perp \tau // D}$ blijken dit trekspanningen te zijn en bij de proefstukken $\tau_{\perp D}$, $\sigma_{\perp \tau_{\perp D}}$, $\sigma_{\perp \tau_{\perp} \tau // D}$ en $\tau_{\perp \tau // D}$ drukspanningen.

Werken deze spanningen het opengaan van de kerf tegen dan blijken in het algemeen hogere breuksterkten gevonden te worden.

Het verschil in breukspanning tussen de overeenkomstige belastingsgevallen blijkt 5 à 10% te zijn.

De elektrodesoort blijkt in het geheel geen invloed te hebben op de breuksterkte.

De lassen vervaardigd met ferri-elektrode zijn echter over het algemeen wat dikker i.c. 6 à 8 mm in plaats van 5 mm en het oppervlak van de las vertoont meer oneffenheden vergeleken met de lassen vervaardigd met basische en rutielelektrode.

De breuk trad in het algemeen op in de onmiddellijke omgeving van de keel-doorsnede. Slechts bij de op druk q belaste proefstukken is het breukvlak gelegen bij de aansluiting van de las aan het staafvlak evenwijdig aan de kracht.

3.2 Vervormingen

De vervormingen, die loodrecht op de krachtrichting gemeten zijn, waren vrij klein vergeleken met die evenwijdig aan de krachtrichting.

Bij de proefstukken $\sigma_{\perp \tau_{\perp} *}$, $\sigma_{\perp \tau_{\perp} c}$, $\sigma_{\perp \tau_{\perp} // *}$ en $\sigma_{\perp \tau_{\perp} // c}$ bleken deze gemeten vervormingen grote spreiding te vertonen, veroorzaakt door de vervorming van de lasplaten zelf. Hierdoor konden de metingen niet teruggebracht worden tot een vervorming van de las alleen, en derhalve zijn deze gevallen in dit opzicht verder buiten beschouwing gelaten.

Van de overige gevallen zijn grafieken gemaakt, waarbij de spanning in een las – berekend op de gemeten keeldoorsnede – is uitgezet tegen de bijbehorende relatieve verlenging, d.i. de verlenging van die las gedeeld door zijn dikte.

Ook de metingen in lasrichting bij de proefstukken belast op druk zijn op deze wijze bewerkt.

De vervormingen in krachtrichting geven een goede relatie te zien met de bijbehorende kracht voor de verschillend belaste lassen.

Allereerst zijn de meetresultaten in grafieken uitgezet, dus de kracht tegen de bijbehorende verlenging.

Hieruit bleek de noodzaak correcties in te voeren op de metingen in krachtrichting wegens de afstandsverlenging tussen de meetpunten.

Hiertoe is aangenomen, dat het materiaal tussen deze punten vervormde als een centrisc belaste staaf.

Bij enige proefstukken werden ter controle van deze aanname de verlengingen van het materiaal over deze afstand gemeten, waarbij een goede overeenstemming bleek met de aanname.

In onderstaande tabel 4 zijn de correcties aangegeven:

Tabel 4.

proefstuk	meetlengte	correctie op de vervorming
σ_{\perp}	10 cm	$1,25 \cdot P \cdot 10^{-3}$ mm (P in tonf)
$\sigma_{\perp D}$	2×10	2,25
τ_{\perp}	10	0,6
$\tau_{\perp D}$	10	0,5
$\tau_{//}$	10	0,65
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp}$	10	1,01
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp D}$	10	0,99
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp}^*$	10	1,19
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp c}$	10	1,19
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{//}$	10	0,97
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{// D}$	2×10	2,14
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{//}^*$	10	1,48
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{// c}$	10	1,48
$\sigma_{\perp} \tau_{//}$	2×10	2,4
$\sigma_{\perp} \tau_{// D}$	2×10	2,38
$\tau_{\perp} \tau_{//}$	10	0,93
$\tau_{\perp} \tau_{// D}$	2×10	2,18

Na het aanbrengen van deze correcties zijn van de gegevens grafieken gemaakt waarbij de spanning, berekend op de gemeten keeldoorsnede, is uitgezet tegen de relatieve verlenging.

Vervolgens zijn van alle grafieken gemiddelde krommen bepaald, welke met het oog op een eenvoudige beschrijving benaderd zijn door een aantal rechte lijnen. Hiervoor is ten eerste de lijn met gemiddelde aanvangshelling genomen, ten tweede een raaklijn aan de gemiddelde kromme met een helling van $0,667 \cdot 10^3$ kgf/mm², ten derde een raaklijn in het punt met relatieve verlenging $50 \cdot 10^{-3}$ en ten slotte een horizontale lijn ter hoogte van de gemiddelde breukspanning. De verkregen gegevens zijn in tabel 5 opgenomen.

Bovendien zijn hierin opgenomen de factoren, die de gemiddelde grafieken bepalen van de op gelijke wijze belaste lussen, zoals bij de proefstukken σ_{\perp} en $\sigma_{\perp D}$ en dergelijke.

Tussen deze grafieken waren namelijk slechts kleine verschillen, die binnen de gemeten spreidingen vielen. In de tabel wordt de richting van de vervorming aangegeven door een pijl in een schematische afbeelding van de betreffende las, waarbij de aansluiting met het te verbinden staafgedeelte gearceerd is. In bijbehorende fig. 7 zijn enige geschematiseerde diagrammen weergegeven, die betrekking hebben op de vervorming in krachtrichting.

Tabel 5. Factoren ter beschrijving van de geschematiseerde diagrammen.

A. Diagrammen spanning – relatieve verlenging in de krachtrichting

belas-tings-geval	vervor-ming in positieve richting	E_1 in 10^3 kgf/mm ²	K_1		K_2		K_3	
			$\frac{\Delta l}{a}$	$\frac{P}{F}$	$\frac{\Delta l}{a}$	$\frac{P}{F}$	$\frac{\Delta l}{a}$	$\frac{P}{F}$
			‰	kgf/mm ²	‰	kgf/mm ²	‰	kgf/mm ²
σ_T		13,4	3,4	45,6	15,7	53,8	15,7	53,8
$\sigma_{\perp D}$		20,0	2,1	41,3	19,1	52,6	66,6	57,6
τ_{\perp}		2,7	5,4	14,6	19,3	23,8	100,0	31,1
$\tau_{\perp D}$		1,92	5,9	11,3	22,3	22,2	90,4	28,9
$\tau_{//}$		2,86	7,0	20,0	21,1	29,4	67,7	34,7
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp}$		9,0	2,6	23,0	17,2	32,7	66,5	39,8
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp D}$		16,6	1,9	32,1	16,1	41,6	66,0	45,4
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp}^*$		3,3	8,5	28,1	29,5	42,1	72,5	52,0
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp c}$		2,6	7,9	20,5	21,2	29,3	78,5	35,4
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{//}$		6,7	3,0	20,2	15,8	28,7	69,7	39,1
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{// D}$		8,0	3,1	25,0	19,0	35,6	71,0	41,4
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{//}^*$		8,5	4,6	38,7	22,7	50,7	84,5	61,2
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{// c}$		3,03	7,8	23,6	25,5	35,5	95,0	45,0
$\sigma_{\perp} \sigma_{//}$		14,3	1,8	26,0	14,7	34,6	84,0	40,8
$\sigma_{\perp} \tau_{// D}$		15,4	1,7	26,6	15,1	35,5	92,5	43,0
$\tau_{\perp} \tau_{//}$		3,68	4,3	15,8	16,2	23,7	110,0	32,7
$\tau_{\perp} \tau_{// D}$		2,35	7,1	16,6	19,7	25,0	104,0	33,3

B. Diagrammen spanning – relatieve verlenging in de lasrichting

$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{//}$		3,73	5,6	20,7	22,9	32,3	72,0	39,1
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{// D}$		4,55	5,5	24,9	20,5	35,0	74,0	41,4
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{//}^*$		5,25	7,7	40,4	26,0	52,6	80,0	61,2
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{// c}$		5,0	5,7	28,5	21,0	38,7	66,5	45,0

C. Diagrammen spanning – relatieve verlenging loodrecht op de krachtrichting

σ_{\perp}		250,0	0,18	45,6	12,5	53,8	12,5	53,8
τ_{\perp}		6,6	4,1	27,1	11,8	32,2	11,8	32,2
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp}$		10,6	2,4	25,5	19,6	37,0	54,0	39,8
$\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{//}$		7,7	3,25	24,8	21,0	36,6	52,0	39,1
$\sigma_{\perp} \tau_{//}$		-20,9	-1,6	33,6	9,1	40,8	9,1	40,8
$\tau_{\perp} \tau_{//}$		5,4	5,4	29,4	10,4	32,7	10,4	32,7

D. Gemiddelde diagrammen van de gelijksoortige gevallen ad A.

$\bar{\sigma}_{\perp}$		15,6	2,8	43,5	17,1	53,0	68,5	55,7
$\bar{\tau}_{\perp}$		2,35	5,5	13,0	20,5	23,0	95,0	30,0
$\bar{\sigma}_{\perp} \bar{\tau}_{\perp}$		13,0	2,1	27,4	16,2	36,8	66,5	42,6
$\bar{\sigma}_{\perp} \bar{\tau}_{\perp} \bar{\tau}_{//}$		7,1	3,2	22,7	16,7	31,7	71,3	40,3
$\bar{\sigma}_{\perp} \bar{\tau}_{//}$		13,9	1,9	26,4	15,4	35,2	88,0	41,9
$\bar{\tau}_{\perp} \bar{\tau}_{//}$		2,75	5,9	16,2	18,0	24,3	107,5	33,0

(Figuur behorende bij tabel 5.)

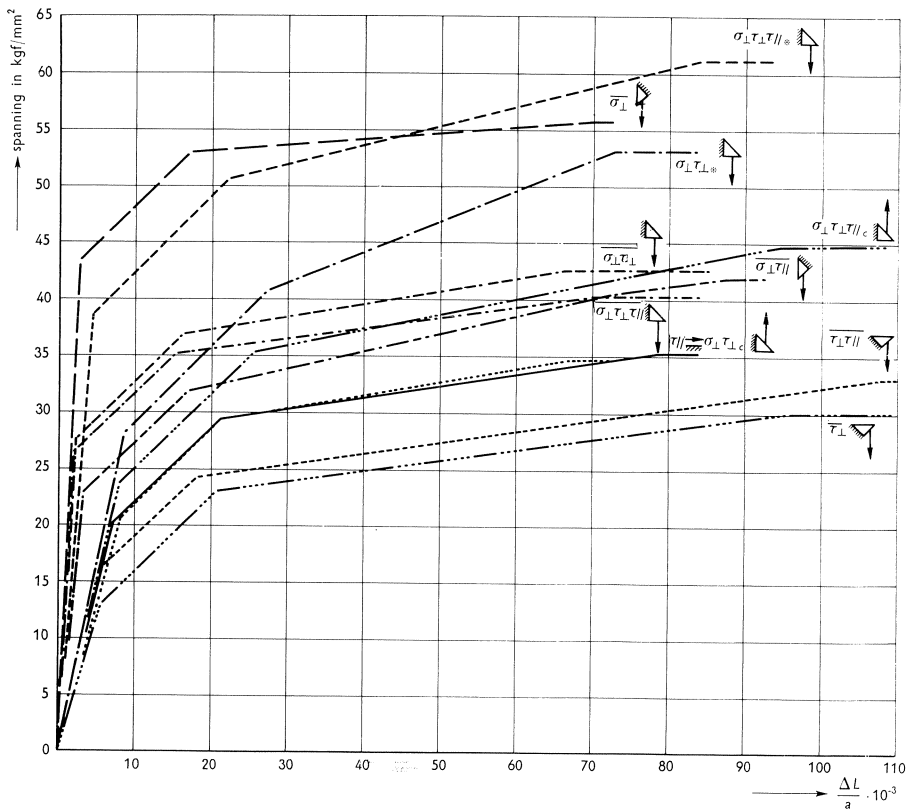
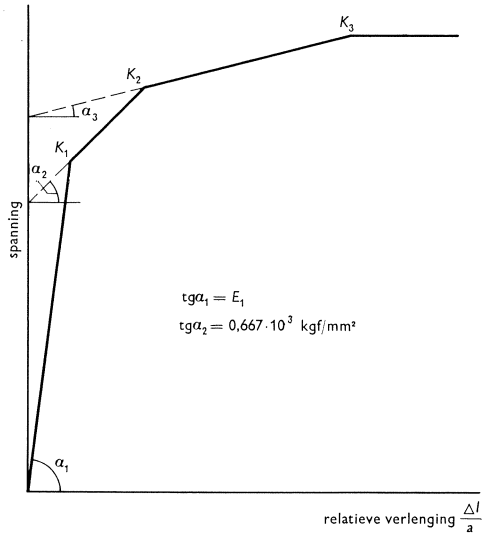


Fig. 7. Diagrammen gemiddelde spanning-relatieve verlenging.

4 Conclusies

De proeven hebben aangetoond, dat in de beschouwde belastingsgevallen de breukspanningsellipsoïde een redelijk uitgangspunt voor de sterkteberekening geeft.

Vooraf de waarden verkregen in de belastingsrichtingen $\sigma_{\perp}\tau_{\perp}\tau_{//}$, $\sigma_{\perp}\tau_{//}$ en $\tau_{\perp}\tau_{//}$ zijn in dit opzicht interessant, omdat tot dusver voor deze richtingen nog geen cijfers bekend waren, die in verband stonden met de overige belastingsrichtingen.

Verder geven de gevonden resultaten aanleiding tot het poneren van de twee volgende hypothesen:

De σ - $(\Delta l/a)$ -grafieken zijn zowel onafhankelijk van de *lasdikte* als van de *laslengte*.

Voor de eerste hypothese pleit het feit, dat ondanks verschillen van 1 à 2 mm in lasdikte bij in overige opzichten identieke proefstukken geen invloed hiervan aanwijsbaar was in de σ - $(\Delta l/a)$ -grafieken.

De tweede hypothese kwam naar voren bij vergelijking van enige resultaten met die uit internationale lasproeven betreffende flank- en kophoeklassen.

Hieruit konden namelijk σ - $(\Delta l/a)$ -diagrammen worden geconstrueerd, die goed overeenstemden met de reeds verkregen gegevens voor deze belastingsrichtingen, ondanks aanzienlijke verschillen in afmetingen van de lassen.

Er is hier blijkbaar sprake van een eenvoudige schaalregel. Wanneer men uitgaande van een bepaalde las van zekere lengte en breukkracht deze tweemaal zo dik maakt, dan zal niet alleen de breukkracht verdubbelen, maar ook de bijbehorende vervorming.

Blijft echter de lasdikte gelijk, terwijl de lengte van de las groter wordt, zodat bijvoorbeeld het oppervlak van de keeldoorsnede van de las tweemaal zo groot wordt, dan zal ook een tweemaal zo grote breukkracht worden gevonden, doch bij een zelfde vervorming als in het uitgangsgeslacht.

Aan de hand van een voorbeeld met een flanklas-verbinding wordt dit nader verduidelijkt (fig. 8).

De kracht is hierbij tweemaal verdeeld over vier lassen, ieder met een lengte van 10 cm en een dikte van 5 mm.

Uit de tabel vindt men de knikpunten K van dit diagram, dat de relatie geeft tussen spanning en relatieve vervorming in krachtrichting voor het belastingsgeval $\tau_{//}$. Vervolgens worden deze punten getransformeerd tot een kracht-vervormingsdiagram door de coördinaten van K1, 2, 3 te vermenigvuldigen met respectievelijk de lasdikte en het lasoppervlak, waarover de belasting zich verdeelt.

Vanwege de symmetrie van het gekozen voorbeeld moeten de hier gevonden waarden voor de verlenging met 2 vermenigvuldigd worden om de totale lasverlenging te krijgen.

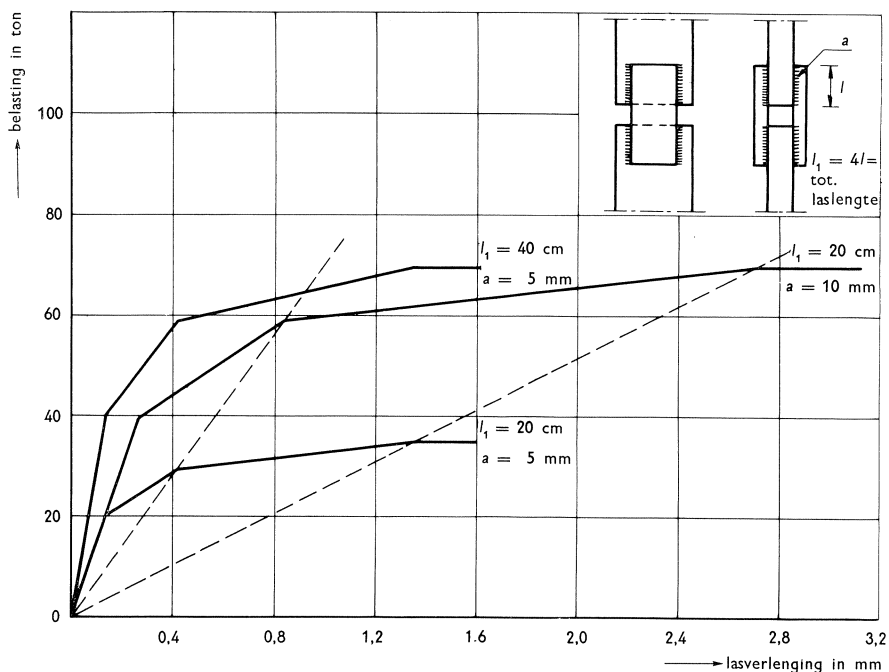


Fig. 8. Schaaleffect bij flanklas.

Hetzelfde is gedaan voor 2 flanklasverbindingen, waarbij de belasting tweemaal wordt verdeeld over vier flanklassen met een lengte van 5 cm, in het eerste geval met een lasdikte van 5 mm, en in het tweede geval met een lasdikte van 10 mm.

Uit de afgebeelde diagrammen is te zien dat een vergroting van de keeldoorsnede bij dezelfde lasdikte neerkomt op een evenredige vergroting van elke ordinaat, terwijl een vergroting van alleen de lasdikte een vermenigvuldiging vanuit de oorsprong van het assenkruis inhoudt.

Verder blijkt uit het onderzoek, dat met uitzondering van het belastingsgeval σ_{\perp} (fig. 9), in alle gevallen een aanzienlijk vloeitraject aanwezig is.

Dit houdt in, dat in de meeste gevallen geen bezwaar zal bestaan tegen de aanname, dat de breukkracht gelijktijdig bereikt wordt bij verbindingen met onderling verschillend belaste lassen.

Bij combinaties van lassen, waarbij een gedeelte op σ_{\perp} belast wordt, zoals bij de balk-kolomverbinding, moet men echter voorzichtigheid betrachten.

Het is aan te raden de met σ_{\perp} belaste lassen extra zwaar uit te voeren, opdat zij toch nog aan een aanzienlijke verlenging in krachtrichting kunnen gevolg geven.

Wat betreft de proefstukken $\sigma_{\perp} \tau_{\perp}^*$ en $\sigma_{\perp} \tau_{\perp} \tau_{//}^*$ mag verwacht worden dat een tot ongeveer 1,5 t toegenomen overlappingslengte hogere breuksterktecijfers zal opleveren (bij de proevenserie bedroeg deze lengte respectievelijk t en 1,22 t).

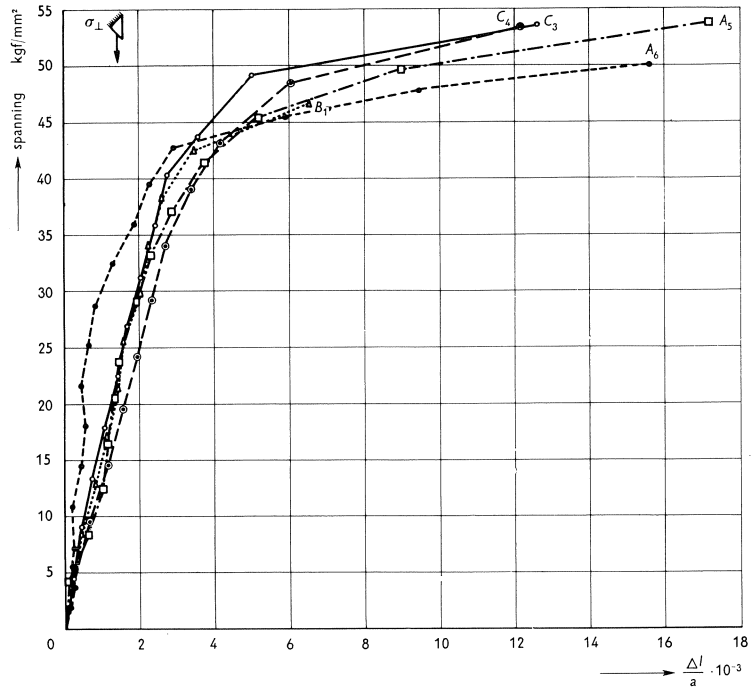


Fig. 9. Meetresultaten van proefstukken σ_{\perp} .

Waarschijnlijk zullen dan de diagrammen een steilere aanvangshelling vertonen. Omgekeerd zal een vermindering van de overlappingslengte lagere breuksterktecijfers opleveren alsmede een flauwere aanvangshelling van de diagrammen.

5 Toetsing van verkregen uitkomsten

Dank zij het reeds genoemde internationale onderzoek op het gebied van flank- en kophoeklassen, waarover eerlang een publikatie te verwachten is, was het mogelijk de daarbij gemeten verlengingen te vergelijken met die welke volgens de uit ons onderzoek verkregen gegevens zouden optreden.

Drie verschillende soorten proefstukken zijn hiertoe beschouwd nl. IbmR, IIcmA en IIIamB. In fig. 10 echter wordt volstaan met IbmR.

Van ieder proefstuk zijn drie verschillende verbindingsmogelijkheden beproefd, nl. waarbij de verbinding gevormd werd door flank- en kophoeklassen (IbmR etc.), alleen de kophoeklassen (IblmR etc.) en alleen de flanklassen (Ib2mR en Ib3mR etc.).

In bijgaande diagrammen stellen de gestippelde lijnen de berekende kracht-
vervormingsdiagrammen voor, terwijl de getrokken lijnen de proefresultaten weergeven.

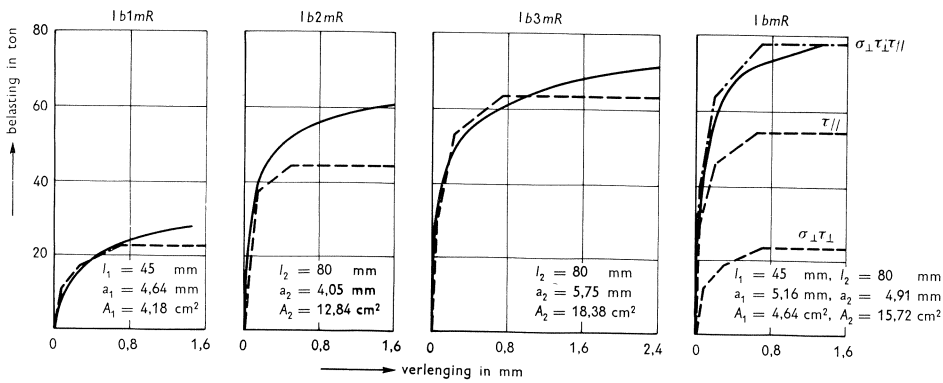
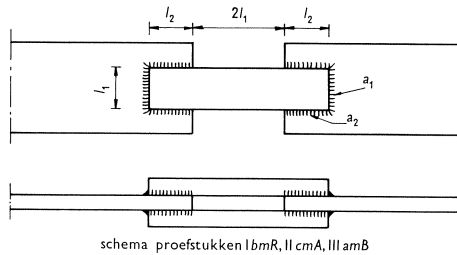


Fig. 10. Schema proefstukken IbmR, IIcmA, IIIamB.

— uit proeven verkregen diagrammen
 - - - m.b.v. tabel 5 berekende diagrammen



Bij de diagrammen, die betrekking hebben op de verbinding gevormd door een flank- en een koplus, is het uiteindelijke kracht-ervormingsdiagram verkregen door optelling van de bij de twee afzonderlijke belastingsgevallen behorende diagrammen, die eveneens in de figuur staan aangegeven.

Voorts is vermeld op welk oppervlak van de keeldoorsnede en op welke lasdikte de diagrammen gebaseerd zijn.

Het blijkt dat de berekeningen als een goede benadering van de werkelijk opgetreden vervormingen zijn te beschouwen ondanks de uiteenlopende lasdikten van 4 t/m 11,5 mm.