

Berekenen van lijmverbindingen*

Ir. L.P.V.M. van Rijn, Kunststoffen en Rubber Instituut TNO, Delft

Om een hoogbelaste gelijmde verbinding verantwoord toe te passen is kennis nodig van de mechanica der lijmnaden. In dit artikel wordt ingegaan op de mechanica van de lijmverbinding, zoals het bepalen van de maximale schuifspanning van lijm onder bepaalde condities. Voor het verkrijgen van een goede gelijmd eindproduct is het van belang dat produktvorm en lijmsysteem op elkaar worden afgestemd en dat de lijmwerkzaamheden met grote nauwkeurigheid worden uitgevoerd.

Lijmen wordt steeds belangrijker

Het verbinden van onderdelen met behulp van lijm is reeds bekend uit de oudheid. Archeologische vondsten die zo'n vierduizend jaar oud zijn, tonen aan dat hout, steen en glas toen al gelijmd werden. Van meer recente datum zijn lijmverbindingen tussen metalen onderdelen. Deze werden zo'n veertig jaar geleden voor het eerst toegepast, en wel in militaire vliegtuigen. Het Britse vliegtuigbedrijf De Havilland Aircraft Company bracht gedurende de laatste jaren van de Tweede Wereldoorlog gelijmde metalen versterkingen aan in houten vleugels [1].

Kort na het einde van de oorlog werd door De Havilland lijm op basis van *polyvinylacetaat-fenol* gebruikt in geheel metalen constructies, zowel voor militaire als voor burgervliegtuigen. In de Bondsrepubliek en in de Verenigde Staten werden *metaallijmen op basis van rubber* ontwikkeld, die eveneens voor het eerst werden gebruikt in militaire vliegtuigen.

Een mijlpaal in de geschiedenis van de lijmverbinding wordt gevormd door de *epoxyharslijmen*, ontwikkeld door Ciba-Geigy. Epoxyhars bleek eigenschappen te hebben die het ideaal maakt als grondstof voor lijmen.

Een andere belangrijke stap was de ontdekking van *cyanoacrylatlijmen*. Deze wijken in sommige opzichten sterk af van de bestaande lijmen. Zo bevatten zij geen oplosmiddelen en polymeriseren zij bij kamertemperatuur zonder toevoeging van een katalysator. De

goede hechtingseigenschappen werden bij toeval ontdekt in het laboratorium van Eastman-Kodak. Bij het bepalen van de brekingsindex van zeer zuiver ethyl-alfa-cyano-acrylaat bleek dat de beide daarvoor gebruikte prisma's door een druppel van dit materiaal onverbrekkelijk aan elkaar gelijmd waren.

Voor- en nadelen van lijmverbindingen

Zowel constructeurs als produktietechnici zijn steeds meer belangstelling voor gelijmde constructies gaan tonen als aanvulling op de klassieke bout-, klink- en lasverbindingen.

Voordelen van lijmverbindingen ten opzichte van deze conventionele methoden zijn:

- een lijmverbinding is continu en geeft daardoor een stijvere constructie;
- er is minder kans op plaatselijke overbelasting;
- de kans op kruip is minder;
- er is minder kans op spanningscorrosie, vooral bij Al-legeringen;
- de lijmverbinding komt tot stand zonder beïnvloeding van vorm en materiaaleigenschappen van de te verbinden onderdelen;
- in sommige gevallen is een gelijmde verbinding goedkoper.

Daarnaast kunnen toepassingsgerichte voordelen bestaan, zoals bijvoorbeeld het ontbreken van uitstekende boutkoppen of nagels bij aerodynamische of hydrodynamische constructies. Voorts verbeteren lijmverbindingen de stootsterkte van bijvoorbeeld autoruiten en lenen zij zich - door hun isolerende eigenschappen - speciaal voor het monteren van elektronische onderdelen.

Nadelen van lijmverbindingen zijn dat ze niet losneembaar zijn en alleen met speciale apparatuur kunnen worden gecontroleerd en geïnspecteerd.

Een onzekere factor is in bepaalde gevallen ook de invloed van milieu, tijd en temperatuur.

De lijmverbinding

Een lijmverbinding wordt gevormd door een lijmlaag die zich aan de contactvlakken van de te verbinden onderdelen hecht. Bij de lijmverbinding spelen de volgende begrippen een belangrijke rol:

- cohesiesterkte;
Dit is de sterkte van de lijmlaag.
- adhesiesterkte;
Dit is de sterkte van de hechting van de lijmlaag aan de contactvlakken.
- mechanische verankering,
Deze treedt op wanneer de lijm in vloeibare toestand zodanig in de niet-lossende poriën van de contactvlakken dringt, dat hij na overgang van de vloeibare in de vaste toestand daarin verankerd blijft.
- specifieke adhesie.
Deze berust op moleculaire aantrekkings- en afstotingskrachten.

De lijm hecht op het lijmvlak als gevolg van intermoleculaire krachten, die optreden op het grensvlak tussen lijmen te verlijmen oppervlak. De rijkwijde van de intermoleculaire krachten is maximaal 30 Å (1 Å = 10⁻⁷ mm). Daar het hoogteverschil tussen de toppen en dalen van een zeer fijn mechanisch bewerkte oppervlak in de orde van 250 Å ligt, is het voor het optreden van specifieke adhesie nodig dat de lijm in de onregelmatigheden van het oppervlak kan dringen.

Voor een goede lijmverbinding is niet alleen adhesie maar ook cohesie nodig. Hoog-polaire lijmen die in situ polymeriseren voldoen goed aan deze eisen.

Het berekenen van een lijmverbinding

Hiervoor wordt uitgegaan van een analogiemodel, dat wil zeggen dat de lijmlaag wordt beschouwd als een verbinding tussen twee platen die bestaat uit een groot aantal puntlassen of bouten. Achtereenvolgens worden verbindingen berekend met twee, drie en met vier bouten (of puntlassen) in lijn. Hierbij worden de invloeden van kantelmomenten verwaarloosd. Aangenomen wordt tevens dat tussen de bouten alleen plaatrek optreedt en geen gat-ovalisatie plaatsvindt.

* Dit artikel is door Ir. L.P.V.M. van Rijn geschreven naar aanleiding van zijn voordracht op de Leergang Lijmtechnologie, gehouden op 3 september 1985, georganiseerd door de Vereniging Mikron en het Mikrocentrum Nederland, het artikel is ongeveer in deze vorm eerder geplaatst in Kunststof en Rubber, nr. 1-1986.

F = kracht die wordt uitgeoefend tussen twee verbindingpunten van de platen 1 en 2.

L = lengte tussen twee verbindingpunten van de platen 1 en 2

A = oppervlak van de dwarsdoorsnede van de platen 1 en 2, resp A_1 en A_2 .

E = elasticiteitsmodulus van de platen 1 en 2, resp. E_1 en E_2 .

ε = relatieve rek = $F/(A \times E)$; resp $\varepsilon_1 = F/(A_1 \times E_1)$ en $\varepsilon_2 = F/(A_2 \times E_2)$

P = kracht waarmee de verbinding wordt belast.

F_A, F_B, F_C , enz. = kracht die resp. de bouten A, B, C, enz. overbrengen van de ene plaat op de andere

- **Twee bouten in lijn**; zie figuur 1.

De verlenging van de platen 1 en 2 tussen bout A en bout B is evengroot, dus geldt:

$$\Delta L_1 = \Delta L_2, \text{ dus } \varepsilon_1 L_1 = \varepsilon_2 L_2$$

$$F_1 = P - F_A \text{ en } F_2 = F_A, \text{ dus}$$

$$\frac{P - F_A}{A_1 \cdot E_1} \cdot L_1 = \frac{F_A}{A_2 \cdot E_2} \cdot L_2$$

Als $A_1 = A_2$ en $E_1 = E_2$, en omdat $L_1 = L_2$ volgt hieruit.

$$P - F_A = F_A, \text{ dus } F_A = \frac{1}{2} P$$

$$\text{Aangezien } P = F_A + F_B, \text{ is } F_B = \frac{1}{2} P$$

- **Drie bouten in lijn**; zie figuur 2

De verlenging van de platen 1 en 2 tussen de bouten A en B, en tussen de bouten B en C, is evengroot, dus geldt:

$$\Delta L_1' = \Delta L_2', \text{ dus } \varepsilon_1 L_1' = \varepsilon_2 L_2'$$

$$F_1' = P - F_A \text{ en } F_2' = F_A, \text{ dus}$$

$$\frac{P - F_A}{A_1 \cdot E_1} \cdot L_1' = \frac{F_A}{A_2 \cdot E_2} \cdot L_2'$$

Als $A_1 = A_2$ en $E_1 = E_2$, en omdat $L_1' = L_2'$ volgt hieruit:

$$P - F_A = F_A, \text{ dus } F_A = \frac{1}{2} P$$

$$\Delta L_1'' = \Delta L_2'', \text{ dus } \varepsilon_1 L_1'' = \varepsilon_2 L_2''$$

$$F_1'' = P - F_A - F_B \text{ en } F_2'' = F_A + F_B, \text{ dus}$$

$$\frac{P - F_A - F_B}{A_1 \cdot E_1} \cdot L_1'' = \frac{F_A + F_B}{A_2 \cdot E_2} \cdot L_2''$$

Als $A_1 = A_2$ en $E_1 = E_2$, en omdat $L_1'' = L_2''$, volgt hieruit:

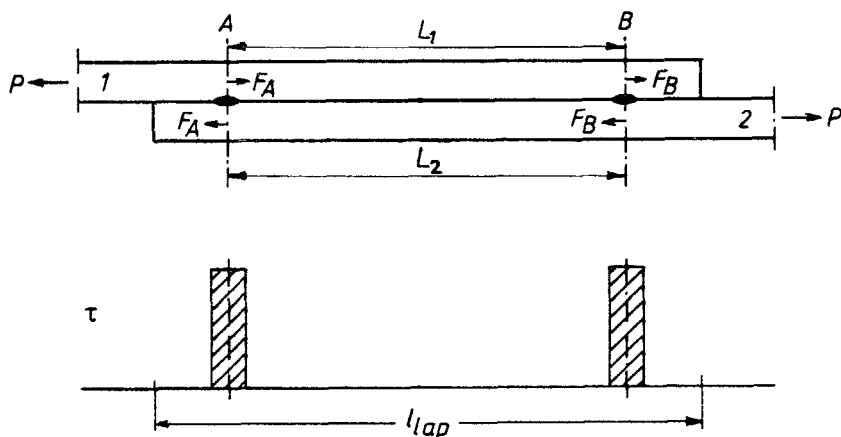
$$P - F_A - F_B = F_A + F_B, \text{ dus } P = 2F_A + 2F_B.$$

$$\text{Omdat } F_A = \frac{1}{2} P \text{ is dus } F_B = 0$$

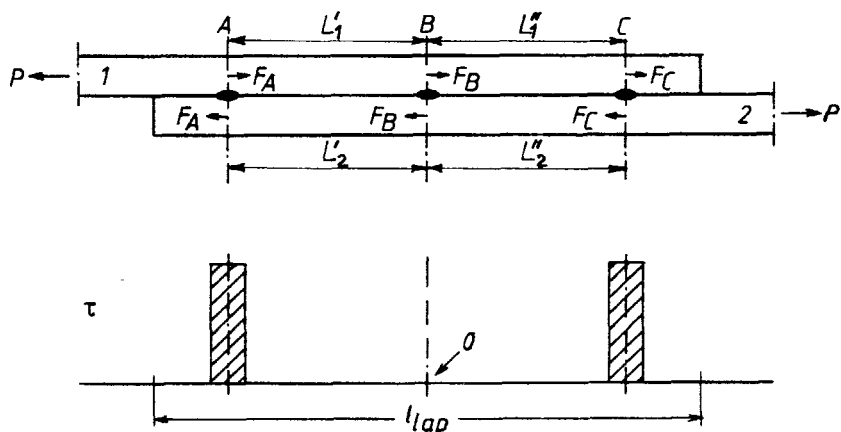
$$\text{Aangezien } P = F_A + F_B + F_C, \text{ is dus } F_C = \frac{1}{2} P.$$

- **Vier bouten in lijn**; zie figuur 3

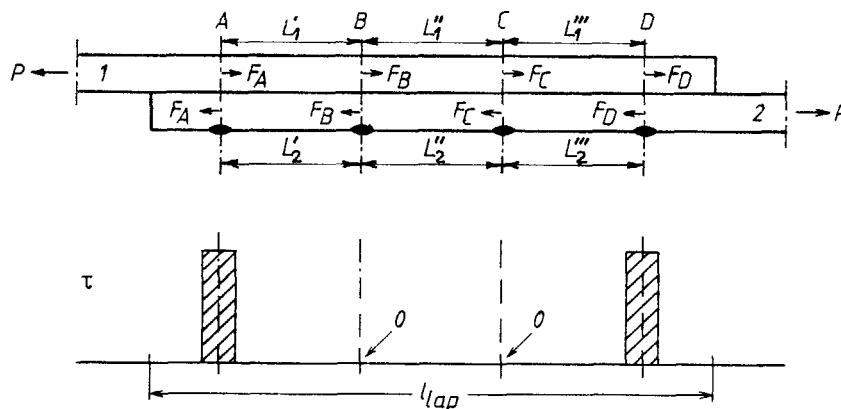
De verlenging van de platen 1 en 2 tussen de bouten A en B, tussen B en C, en tussen de bouten C en D, is evengroot.



Figuur 1 Verbinding van twee platen door middel van twee bouten in lijn; τ is de optredende schuifspanning



Figuur 2 Verbinding van twee platen door middel van drie bouten in lijn; τ is de optredende schuifspanning



Figuur 3 Verbinding van twee platen door middel van vier bouten in lijn; τ is de optredende schuifspanning

De berekening van de plaatdelen tussen de bouten A en B en tussen de bouten C en D is identiek aan die van "drie bouten in lijn", dus $F_A = \frac{1}{2}P$ en $F_B = 0$.

$\Delta L_1''' = \Delta L_2'''$, dus $\epsilon_1 L_1''' = \epsilon_2 L_2'''$
 $F_1''' = P - F_A - F_B - F_C$ en $F_2''' = F_A + F_B + F_C$, dus

$$\frac{P - F_A - F_B - F_C}{A_1 \cdot E_1} \cdot L_1''' = \frac{F_A + F_B + F_C}{A_2 \cdot E_2} \cdot L_2''',$$

dus $P = 2F_A + 2F_B + 2F_C$

Omdat $F_A = \frac{1}{2}P$ en $F_B = 0$, is dus $F_C = 0$

Aangezien $P = F_A + F_B + F_C + F_D$, is dus $F_D = \frac{1}{2}P$

Uit deze berekeningen blijkt dat alleen de eerste en de laatste bout de belasting overbrengen. De tussenliggende bouten – ook als het aantal bouten of puntlassen in lijn zeer groot wordt – zijn onbelast, hetgeen in de praktijk ook (vrijwel) het geval blijkt te zijn.

Wanneer de bouten of puntlassen door een lijmmaad worden vervangen, gebeurt hetzelfde. Aan het begin en het einde van de lijmmaad treden hoge schuifspanningspieken op. Tussen deze pieken wordt de lijn nauwelijks belast.

Voor de verdeling van de schuifspanning $\tau(x)$ in een lijmmaad is door Goland en Reissner [2] afgeleid:

$$\tau(x) = \frac{G T}{t_a \lambda \sinh \lambda l} \left(\frac{\cosh \lambda x}{t_2 E_2} + \frac{\cosh \lambda(l-x)}{t_1 E_1} \right)$$

waarin:

$t_{1,2}$ = de dikte van de plaat (1,2)

$E_{1,2}$ = de elasticiteitsmodulus van de plaat (1,2)

t_a = de dikte van de lijmmaad

G = de glijdingsmodulus van de lijn

l = de lengte van de lapnaad

x = de plaats op de lapnaad (0...l)

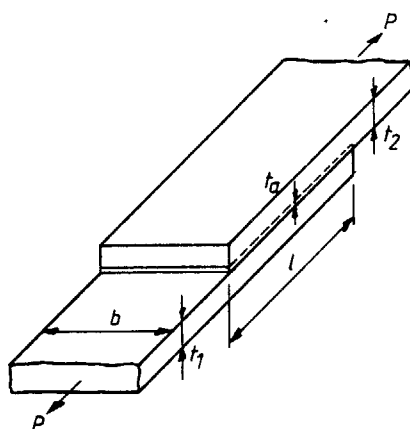
$$\lambda = \sqrt{\frac{G}{t_a} \left(\frac{1}{t_1 E_1} + \frac{1}{t_2 E_2} \right)}$$

T = belasting per plaatbreedte: zie figuur 4.

Bij het afleiden van de vergelijking is aangenomen dat:

- de trekspanningen in de platen homogeen zijn verdeeld,
- zowel lijn als plaatmateriaal lineair elastisch zijn,
- geen spanningen optreden tengevolge van buigmomenten,
- de hechting van de lijmmaad aan het materiaal ideaal is.

Opgemerkt dient te worden, dat de vergelijking alleen toepasbaar is voor schuifspanningsverdelingen in lapnaden die uit constante materiaaldoorsneden bestaan.



Figuur 4 Belasting per plaatbreedte t

l = lengte van de lapnaad

t_1 = plaatdikte plaat 1

t_2 = plaatdikte plaat 2

t_a = dikte van de lijmmaad

De gemiddelde schuifspanning in de lijn

$$\tau_{gem} = P/(b \cdot l)$$

De schuifstroom (kracht per mm breedte) $T =$

$$P/b = \tau_{gem} \cdot l$$

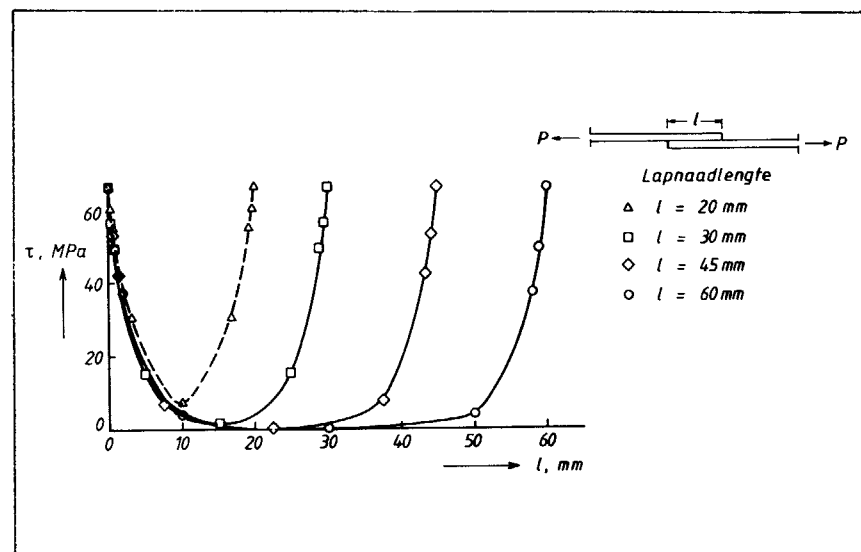
Rekenvoorbeelden

Allereerst wordt opgemerkt dat het hier rekenmodellen betreft die een illustratief doel hebben. In de praktijk zullen ook nog altijd trekspanningen (afspanspanningen) optreden, die in dit verband geen verdere aandacht krijgen. Het gaat om de invloed van de lengte van de lapnaad, de dikte van de lijmlaag, enz., op de verdeling van de schuifspanning.

Variatie in de lengte van de lapnaad

Twee platen (vliegtuig)aluminium, elk 1 mm dik, worden aan elkaar gelijmd. De invloed van de lengte van de lapnaad op de verdeling van de schuifspanning wordt onderzocht. De aangebrachte belasting is 450 N per mm plaatbreedte. De spanning in het aluminium bedraagt 450 MPa (450 N/mm^2), een hoge waarde (net onder de breukgrens). De lijn is een tweecomponentensysteem met een hoge mechanische sterkte. De glijdingsmodulus (G) van de lijn is 300 MPa, de dikte van de lijmmaad $t_a = 0,1$ mm. De verdeling van de schuifspanning werd berekend bij laplengten van 20, 30, 45 en 60 mm. De resultaten zijn uitgezet in figuur 5.

De gemiddelde schuifspanning bedraagt 22,5, 15, 10 en 7,5 MPa. De theoretische piekschuifspanning aan het begin en het eind van de lapnaden varieert nauwelijks: 66,25 resp. 65,87 MPa. Het verlengen van de lapnaad heeft geen invloed op de sterkte van de verbinding. Er zal moeten worden gezocht naar een optimale lengte van de lapnaad. Het verkorten van de lapnaad brengt de schuifspanningspieken dichterbij elkaar. Het "profiel" van de schuifspanning wordt "voller". De grootte van de pieken neemt ook langzaam toe, maar de krachtoverbrengende lengte neemt af, zodat de totale belasting afneemt. In de praktijk bestaat er een optimale lengte van de lapnaad, waarbij vergroting van de lengte geen vergroting van de breuklast P te zien geeft [3].



Figuur 5 De invloed van de lapnaadlengte op de schuifspanningsverdeling

De belasting is gelijk, zodat τ_{gem} resp. 22,5; 15, 10 en 7,5 MPa bedraagt.

$t_a = 0,1$ mm; $G = 300$ MPa

Variatie in de dikte van de lijmlaag

Het vorige rekenvoorbeeld wordt aangehouden. De laplengte is 30 mm. De verdeling van de schuifspanning in de lijmlaag wordt berekend bij de dikten van de lijmlaag van 0,1, 0,15, 0,2 en 0,3 mm. De resultaten zijn weergegeven in figuur 6.

Hieruit blijkt, dat een dikkere lijmlaag de schuifspanningen reduceert. De verbinding zal dus een zekere dikte (t) van de lijmlaag moeten hebben om te hoge schuifspanningen te voorkomen. In de praktijk wordt wel een sterk doorlatend vlies in de lijmlaag opgenomen om een homogene dikte van de lijmlaag te verkrijgen.

Door een te dikke lijmlaag kunnen afpelverschijnselen optreden aan het begin en aan het eind van de lijmlaagverbinding. Dit probleem kan worden opgelost door aan het begin en het eind van een gelijmde verbinding klinknagels aan te brengen, die de afpelkrachten opnemen. Een lijmlaagverbinding mag in principe alleen op afschuiven worden belast.

Variatie in de glijdingsmodulus van de lijm

Bij eenzelfde proefstuk wordt de invloed van de glijdingsmodulus van de lijm op de verdeling van de afschuifspanning berekend. Bij de berekening is uitgegaan van glijdingsmoduli (G) van 200, 300, 450 en 600 MPa. De resultaten zijn weergegeven in figuur 7. De grootte van de schuifspanningspiek is afhankelijk van de glijdingsmodulus.

Voorlopige conclusie

Deze is:

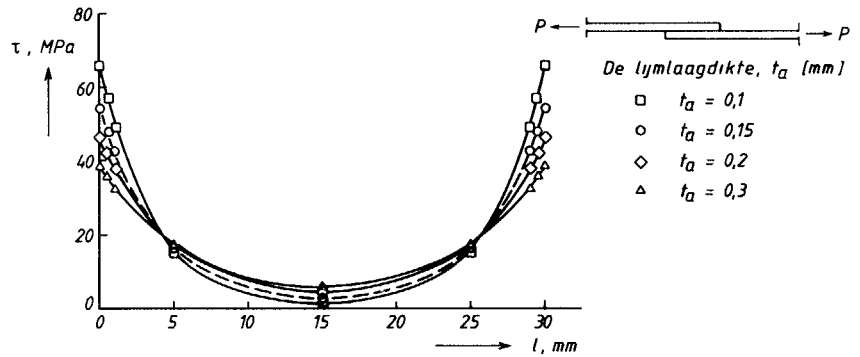
- elke lijmlaag heeft een optimale lengte;
- elke lijmlaag heeft een optimale dikte;
- de optimale lijm moet zowel een grote afschuiflengte als een lage glijdingsmodulus hebben.

Lijmfabrikanten vullen of modificeren daarom hun lijmen met flexibele componenten.

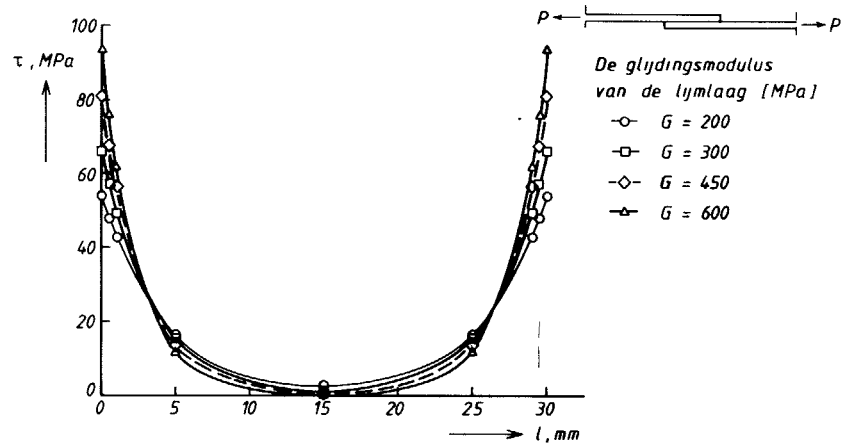
Variatie in de dikte/stijfheid van de plaat

Wanneer twee platen met een ongelijke stijfheid (E_t) met elkaar worden verbonden, levert dit een niet-symmetrische verdeling van de schuifspanning op. Bij het uitoefenen van een kracht blijft deze lang in de dikkere (of stijvere) plaat en vloeit bij de overgang in de dünnere plaat over. In de overgang treedt dan ook de grootste schuifspanningspiek op.

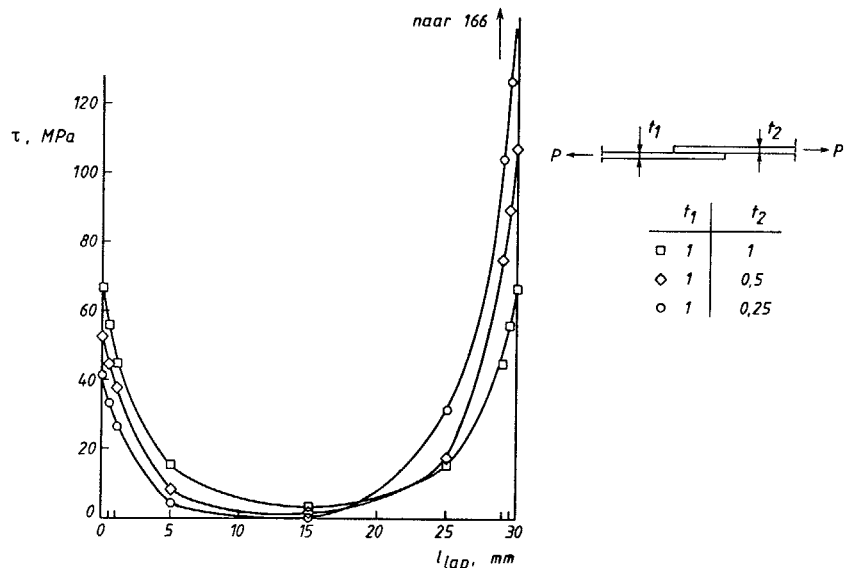
De verdeling van de schuifspanning is berekend voor een combinatie van drie dikten. Uit figuur 8 blijkt, dat het terugbrengen van de plaatdikte de schuif-



Figuur 6 De invloed van de lijmlaagdikte op de schuifspanningsverdeling
 $l_{lap} = 30 \text{ mm}$, $G = 300 \text{ MPa}$, $\tau_{gem} = 15 \text{ MPa}$



Figuur 7 De invloed van de glijdingsmodulus van de lijmlaag op de schuifspanningsverdeling
 $l_{lap} = 30 \text{ mm}$, $t_a = 0,1 \text{ mm}$, $\tau_{gem} = 15 \text{ MPa}$



Figuur 8 De schuifspanningsverdelingen in lijmnaden tussen materiaal van verschillende diktes
 $G = 300 \text{ MPa}$; $t_a = 0,1 \text{ mm}$; $P = 450 \text{ N/mm}$

spanning bij de eerste overgang reduceert. Bij nadere bestudering blijkt dat het verschil in stijfheid maatgevend is voor de grootte van de schuifspanning. Een kleiner verschil in stijfheid levert al geringere schuifspanningen op.

Wanneer de stijfheid van de platen ($E_1 t_1$ en $E_2 t_2$) door verschillen in materiaaleigenschappen te ver uiteenligt, treden grote schuifspanningen op. Dit is het geval bij gelijmde verbindingen tussen rubber en metaal.

Berekend is de sterkte van een lijmverbinding tussen 1 mm dikke aluminium plaat en een 5 mm dikke rubberplaat, zie figuur 9. In de praktijk treedt geen erg hoge schuifspanning op, omdat rubber een super-elastisch materiaal is en niet meer aan de voorwaarden van de formule voldoet. Toch moet met hoge spanningen bij de overgang van het ene materiaal naar het andere rekening worden gehouden.

Afwijkingen

In de praktijk wordt vrijwel nooit aan alle aannamen voldaan waarmee het rekenmodel is opgesteld

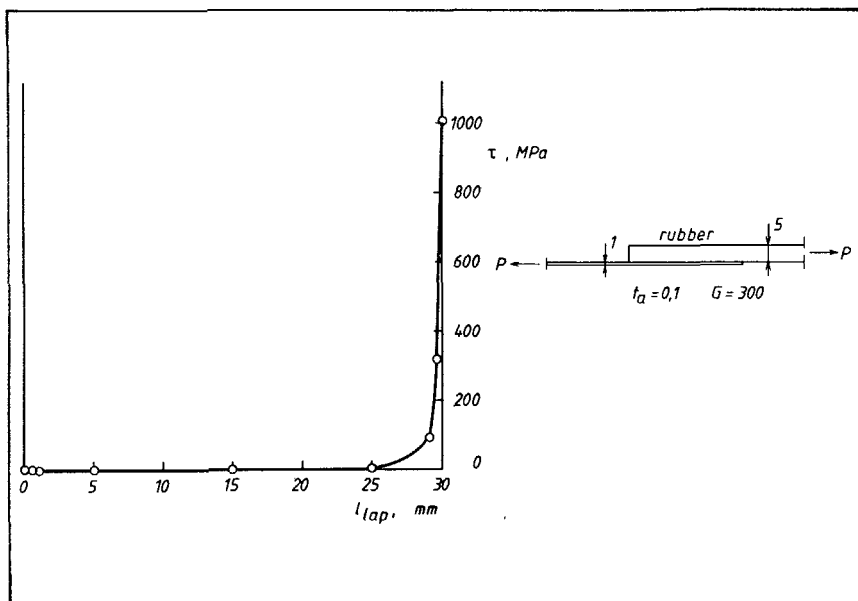
- Het asymmetrisch aangrijpen van belastingen veroorzaakt trekspanningen in de lapnaad, vooral aan de hoog belaste uiteinden van de naad. Berekend is dat de trekspanningen klein blijven wanneer dunne plaatdikten en naar verhouding lange lapnaden worden toegepast.
- Er wordt van uitgegaan dat lijm zich lineair elastisch gedraagt. In de praktijk is dit niet zo. De meeste lijmen zijn bij grote rek "zachter" dan bij geringe rek. De piekschuifspanningen zullen in de praktijk kleiner zijn dan in theorie.
- De theorieën over de verdeling van de schuifspanningen geven verschillende uitkomsten. Het is raadzaam bij berekeningen aan de veilige kant te blijven.

Conclusies en aanbevelingen

Het toepassen van hoogbelaste gelijkde verbindingen vereist kennis van de lijmnaadmechanica. De optredende schuifspanning in een lijmverbinding kan worden geschat. Wie zeker wil zijn dient praktijkproeven uit te voeren, die als volgt verlopen.

Bepaling van de maximale schuifspanning van de lijm

1. Produceer een standaard proefstuk onder werkplaatsomstandigheden volgens voorschrift van de lijmfabrikant.



Figuur 9 Een **theoretische** schuifspanningsverdeling in de lijmnaad tussen een aluminium- en een rubberplaat.

$t_{Al} = 1 \text{ mm}$, $t_{rubber} = 5 \text{ mm}$, $t_a = 0,1 \text{ mm}$; $G = 300 \text{ MPa}$

2. Test het proefstuk tot de lijm bezwijkt en meet de dikte van de lijm laag aan het begin en aan het eind van de lijm laag
3. Bereken met de formule van Goland en Reissner vervolgens de verdeling van schuifspanning en bepaal de piekschuifspanning die tot bezwijken heeft geleid. Hierdoor is de hechting van de lijm (of de lijm breuk) nu bepaald.
4. Bereken met deze gegevens de sterkte van het gelijkde produkt.

Ontwikkeling van een gelijkde produkt

1. Kies het meest geschikte lijmsysteem
Remvoeringen bijvoorbeeld, vereisen een lijm die bestand is tegen hoge temperaturen
2. Ontwerp de onderdelen zodanig, dat de schuifspanning bij de hoogst optredende (schok-)belasting onder de ontwerpspanning blijft. De ontwerpspanning is de maximaal toelaatbare schuifspanning van de lijm gedeeld door een veiligheidsfactor

Houdt bij het bepalen van deze veiligheidsfactor rekening met de tijdsinval, het milieu, enz.

Productieproces

1. Voer het lijmproces zorgvuldig uit
De voorbehandeling, de verdeling van de lijm, de uitharding, enz., zijn belangrijk voor het verkrijgen van een goede lijmverbinding
2. Let op de kwaliteit van de lijm.
Door veroudering en het aantrekken van vocht kan deze achteruit gaan.
3. Zorg voor een goede bewaking van het lijmproces.

Literatuur

- [1] Gelijkde metalen constructies R J Schliekelmann Agon Elsevier 1970
- [2] Journal of applied mechanics The stresses in cemented joints M Goland, E Reissner. No 2 1944
- [3] Lijmverbindingen in UD koolstofvezel versterkte epoxyharsen J Olthoff. T.Z verslag 1982, TH Delft, afdeling LR