

## Optimalisatie van kleine cilindrische lijmverbindingen

## Lijmen van kleine onderdelen (3)

J.A. Poulis, J.C. Cool, E.H.P. Logtenberg

De sterkte van kleine cilindrische lijmverbindingen (oppervlakte: 1,5 tot 27 mm<sup>2</sup>) kan worden geoptimaliseerd door het ontwerp van de lijmconstructie zodanig aan te passen dat spanningspieken in de lijmlaag worden verlaagd. Singulariteiten als luchtbellens in de lijmlaag blijken eveneens van invloed op de spanningsverdeling in de lijmlaag.

De invloed van de dimensionering op de sterkte van de verbinding is experimenteel onderzocht. De resultaten wijzen in dezelfde richting als die van spanningsberekeningen met de eindige elementen methode.

Naast de lengte van de overlap blijkt de oppervlakte van de doorsnede van de te verlijmen delen van grote invloed op de sterkte. Dit geeft de constructeur mogelijkheden om de sterkte van de lijmverbinding te beïnvloeden door de vormgeving van de te verlijmen delen aan te passen.

Miniatuur-lijmverbindingen worden steeds vaker toegepast als gevolg van een verdergaand miniaturiseringsproces bij het ontwerpen van produkten.

Om de kwaliteit van deze verbindingen te optimaliseren is gedurende de afgelopen jaren een intensief onderzoekpro-

gramma uitgevoerd naar het verlijmen van heel kleine roestvaststalen cilindrische onderdelen door de vakgroep Instrumenten van de Technische Universiteit Delft. In deze vakgroep wordt al sinds enkele tientallen jaren wetenschappelijk onderzoek verricht naar lichtere en beter bedienbare kinderprothesen en orthoses. Vanwege de steeds nauwere toleranties van de onderdelen en het toenemend gebruik van kunststoffen was lassen of solderen vaak niet mogelijk. Daardoor werden onderdelen steeds vaker verlijmd. De aanvankelijk geconstrueerde lijmverbindingen bleken niet betrouwbaar en begaven het vaak al tijdens een eerste test.

Ter verbetering van de reproduceerbaarheid en optimalisatie van de verbindingen, werd een intensief onderzoek- en testprogramma opgezet.

Figuur 1 is een schets van de onderzochte verbinding, die in roestvaststaal is uitgevoerd. Daarin zijn de aanvoerkanaalen voor de lijm zichtbaar die bedoeld zijn om luchtinluitsels in de lijmlaag te voorkomen. De keuze van de lijm en de toegepaste reinigingsmethode zijn beschreven in Mikroniek 33(1993)5 en 34(1994)1.

## Belasting van de lijmlaag

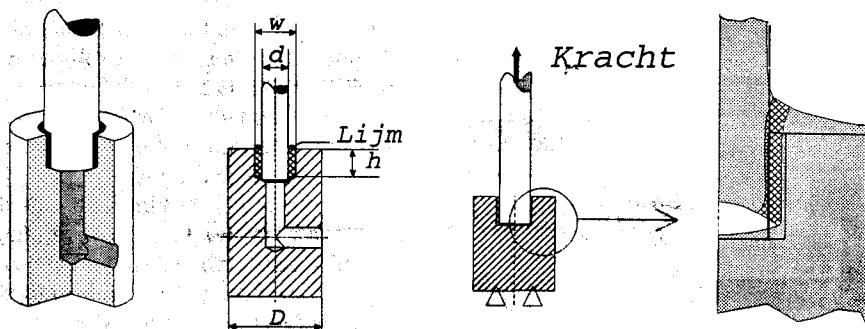
Voor een analyse van de oorzaak van het falen van een lijmverbinding is een onderzoek naar de verdeling van de

spanningen van belang. Het verloop van de spanningen is berekend met de eindige elementen methode.

De hiervoor gebruikte modellen zijn in feite een  $(1/2\pi)^{de}$  rotatiesymmetrische plakje (taartpunt) van de verlijmd doorsnede. Om de spanningen in de modellen te berekenen moeten deze tekenteknisch worden opgedeeld in zoveel mogelijk op elkaar gelijkende 'bouwstenen' (elementen). De lijm-elementen kregen een oppervlak van 0,125 mm<sup>2</sup>, terwijl die van het roestvaststaal een 25 tot 100 maal groter oppervlak kregen. De lengte van de staf werd gereduceerd tot een kwart van zijn ware lengte om het aantal te analyseren elementen te reduceren en daarmee de rekentijd tijdens de analyses te verkorten. De bovenzijde van de staf werd hiertoe voorzien van een fictief materiaal met een 100 maal zo hoge elasticiteitsmodulus (E) om de spanningen goed homogeen door het stafmateriaal naar de dop te leiden.

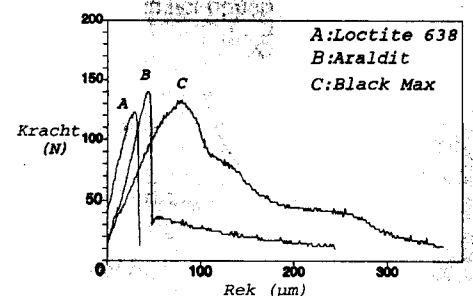
Figuur 2 toont de verandering van een vervormde doorsnede ten opzichte de onvervormde doorsnede.

De dimensies van de gebruikte roestvaststalen onderdelen waren: stafdiameter 2,0 mm, lijmspleetbreedte 0,05 mm, en overlaplengte 1,5 mm. Voorafgaande aan het verlijmen werd een lossingsmiddel aangebracht op de onderzijde van de staf om de overeenkomst met de eindige elementen modellen te



Figuur 1. Schets van de onderzochte proefstukken, met stafdiameter  $d$ , dopdiameter  $D$ , lijmspleetbreedte  $w-d$  en overlaplengte  $h$ .

Figuur 2. Een 50 miljoen maal vergrote weergave van de vervormingen die optreden wanneer aan de lijmverbinding van figuur 1 in axiale richting getrokken wordt.



Figuur 3. De kracht-rek grafieken van de drie bij de experimenten gebruikte lijmen; anaërobe: Loctite 638, twee componenten epoxy: Araldit HY991/ AW136 en cyanoacrylaat: Black Max 380.

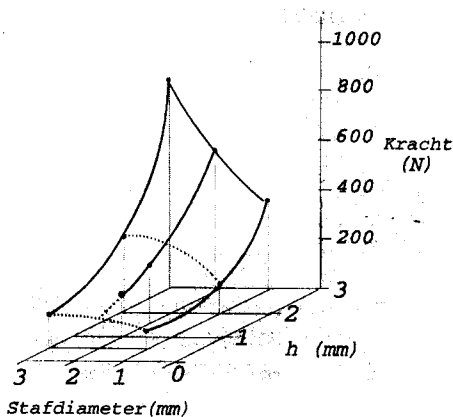
## Optimalisatie van kleine cilindrische lijmverbindingen

vergroten. Hierbij wordt namelijk slechts de krachtoverdracht via de zijwanden van de cilinder in rekening gebracht. Na 12 uur voordrogen van de lijm op kamertemperatuur volgde een warmtebehandeling van 2 uur op 80°C.

### Stijfheid van de verbinding

De stijfheid van de complete constructie (staf en dop) zal grotendeels worden bepaald door de elasticiteitsmodulus van de gebruikte lijm, omdat  $E_{\text{staal}} \approx 200 \cdot E_{\text{lijm}}$ . Ter illustratie zijn in figuur 3 de op een trekbank gemeten kracht-rekgrafieken afgebeeld van drie lijmen die in het onderzoek zijn gebruikt. De gekozen lijmsorten zijn: Twee componentenlijm (Araldit), een anaërobie lijm (Loctite 638), en een "rubber gevulde" cyanoacrylaatlijm (Black Max 380).

De drie gepresenteerde curves, zie figuur 3, laten heel duidelijk het verschil zien tussen de elasticiteitsmoduli van de geteste lijmen. De "rubber gevulde" cyanoacrylaatlijm (Black Max 380) bezit duidelijk de laagste elasticiteitsmodulus, terwijl die van de anaërobie Loctite 638 de hoogste waarde vertoont. Deze laatste lijm werd, gezien de benodigde constructiestijfheid en het verwerkingsgemak, gebruikt voor het maken van de proefstukken.



Figuur 4. De hechtsterkte als functie van de overlappende lengte en stafdiameter. De grafiek is het resultaat van 207 proeven.

### Sterkte van de verbinding

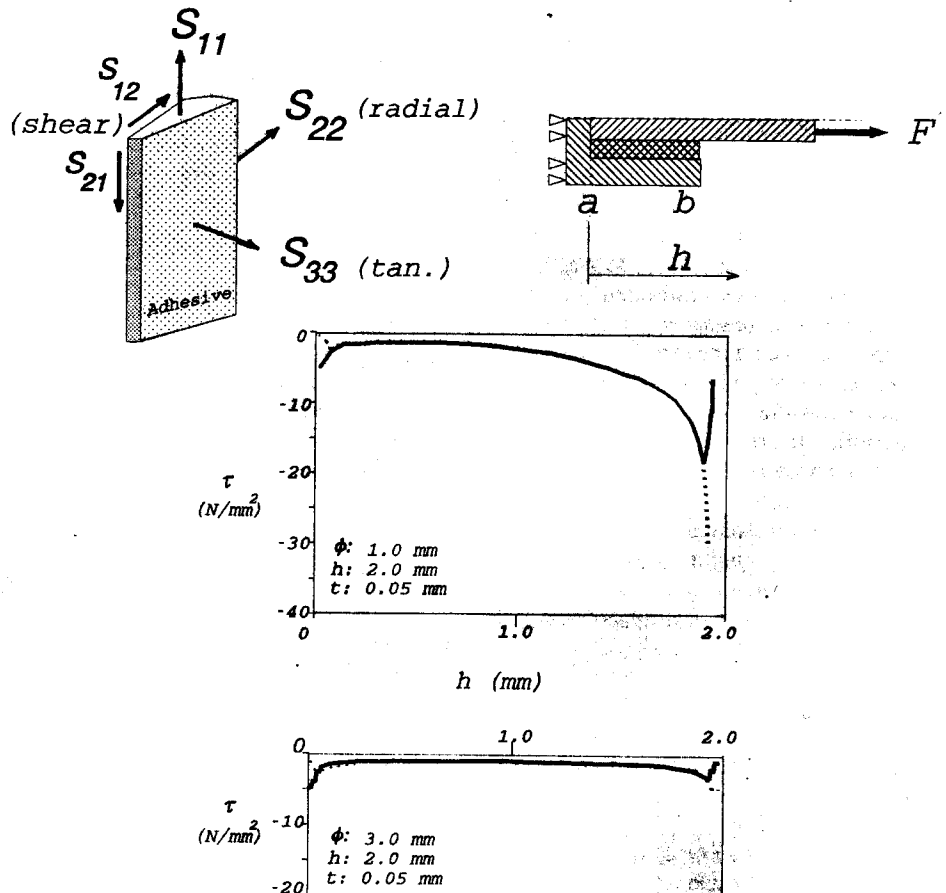
Uit een groot aantal proeven blijkt dat de sterkte van de verbinding afhangt van de diameterverhouding van staf en dop. Ook de lengte van de overlap is van invloed. Dit blijkt uit figuur 4 die het resultaat is van 207 individuele metingen. Met eindige elementen berekeningen is geprobeerd hiervoor een verklaring te vinden.

### Diameterverhouding

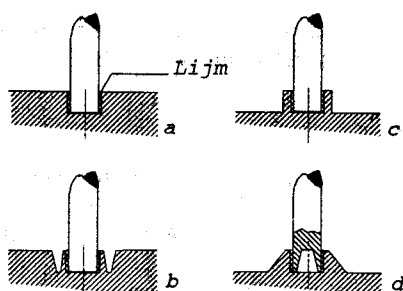
Uit berekeningen blijkt een hoge piekspanning te ontstaan aan het "open" uiteinde van de lijmlaag waar de dop overgaat in de staf. Uit figuur 5 blijkt

dat de schuifspanning (maar evenzo de niet getoonde radiale spanning) bij een stafdiameter van 1 mm een veel hogere piek heeft dan bij een stafdiameter van 3 mm en overigens gelijke omstandigheden. Het grote verschil in piekspanning kan aanleiding zijn tot het inscheuren van de lijmlaag met het uiteindelijk verbreken van de verbinding tot gevolg. In de testresultaten van figuur 4 valt eveneens de invloed van de stafdiameter op de sterkte van de verbinding af te lezen.

Het ontstaan van deze piek wordt grotendeels toegeschreven aan het grote verschil in stijfheid van de staf ( $\phi$  1 mm) vergeleken met de wanddikte van



Figuur 5. De invloed van stafdiameter op de schuifspanningsverdeling. De bovenste grafiek geeft het effect weer bij de staf van 1 mm doorsnede, de grafiek eronder die bij het gebruik van een stafdiameter van 3 mm.



Figuur 6. a) Een niet-elegante constructie om een staf in een massief lichaam te verlijmen vanwege de hoge spanningen welke hierdoor in de lijmmaad ontstaan. b,c) verbeterde versie die lokaal de stafstijfheid vermindert. d) voorbeeld van het reduceren van piekspanningen aan beide zijden van de lijmmaad.

de dop (1,95 mm dik) waardoor grote verschillen in elastische rek ontstaan. Op het uiteinde van de dop waar deze overgaat naar de staf, is de belasting (en dus de rek) op de dop tot nul gereduceerd, terwijl deze in de staf maximaal is. De lijmlaag moet dit verschil in rek kunnen overbruggen wat een zeer hoge spanningspiek in de lijmlaag tot gevolg heeft.

De stijfheden van staf en cilinder kunnen, volgens Hooke, worden gerelateerd aan de oppervlakte van hun doorsneden: respectievelijk  $\pi d^2/4$  en  $\pi(D^2-d^2)/4$ . In feite is dus de verhouding  $(D^2-d^2)/d^2$  van belang, omdat deze het verschil in rek karakteriseert. Deze veronderstelling is met berekeningen en proeven geverifieerd, waarbij de waarden uit tabel 1 zijn gebruikt.

Wanneer met de eindige elementen berekeningen de wanddikte van de cilinder wordt verkleind, en wel zodanig dat het oppervlak van de cilinderdoorsnede vergelijkbaar wordt met die van de staf van bijvoorbeeld 1 mm diameter, dan blijkt de spanningspiek aan de open zijde van de lijmlaag zich sterk te verlagen en vergelijkbaar te worden in grootte met die aan de andere zijde van de lijmspleet, zie figuur 5.

In het centrum van de lijmlaag is de spanning laag. Dit is erg belangrijk omdat er dan geen kruip zal optreden. Zo'n vrijwel spanningsloos gedeelte heeft daarmee een stabiliserende invloed op

stafdiameter d mm	dopdiameter D mm	$(D^2-d^2)/d^2$
1	5	24
2	5	5,3
3	5	1,8

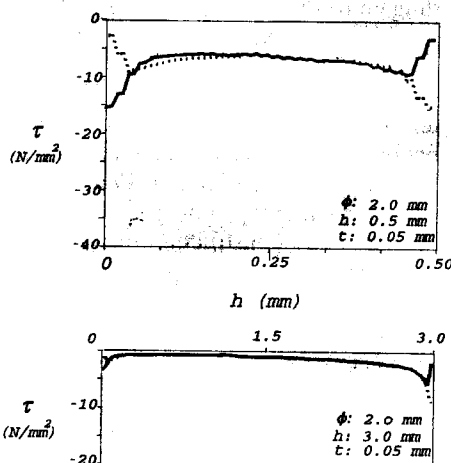
Tabel 1. Het verschil in stijfheid van staf- en dopwand, gekarakteriseerd door  $(D^2-d^2)/d^2$ , kan reeds bij kleine stafdiameterverschillen sterk oplopen. Het gevolg is een minder sterke lijmvverbinding.

de verbinding.

Uit proeven is gebleken dat wanneer de wanddikte van de cilinder wordt teruggebracht tot 0,2 mm er ook een piek ontstaat aan de gesloten zijde. Dit bevestigt eens te meer dat de spanningspieken aan de uiteinden van de lijmlaag primair worden veroorzaakt door het verschil in stijfheid van de verlijmdede delen.

De invloed van de stafdiameter op de gemeten sterkte van de verbinding, zie figuur 4, vertoont een grote mate van overeenstemming met de hoogte van de door berekening gevonden spanningspieken.

In het geval van een axiaal belaste gelijkde verbinding moet de dimensionering van staf en dop zodanig gekozen worden, dat de doorsnede van het oppervlak van staf en dopwand gelijk is.



Figuur 7. Invloed van de overlappende op de schuifspanningsverdeling. De bovenste grafiek laat de berekende spanning zien bij 0,5 mm, de onderste die bij 3,0 mm overlappende.

Constructieve voorbeelden van lijmvverbindingen worden gegeven in figuur 6.

### Overlappende

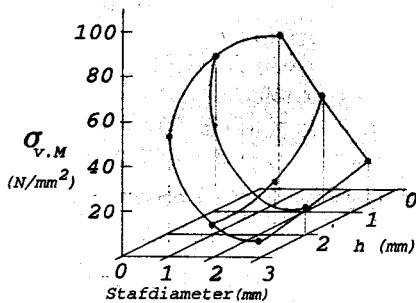
Figuur 7 toont de invloed van de overlappende bij  $h=0,50$  en  $h=3,0$  mm op de schuifspanning. Bij de kortste overlappende ( $h=0,50$  mm) is er een hoge spanningspiek aan beide zijden van de lijmlaag, die echter afneemt (met 85% en 55%) wanneer de overlappende toeneemt tot  $h=3,0$  mm. Een toename van overlappende heeft dus een positieve invloed heeft op de spanningsdistributie.

In overeenstemming met de berekeningen blijken de experimenteel bepaalde waarden van de hechtsterkte sterk te stijgen bij langere overlappende, zie figuur 5. Bij een overlappende van 2 mm blijkt een scherpe stijging van de sterkte van de verbinding. Tegen de verwachting in blijkt deze nauwelijks afhankelijk van de stafdiameter. Dit betekent dat de gangbare berekeningsmethode die uitgaat van een lineaire relatie van de verbindingsterkte met de grootte van het oppervlak *niet* juist is. Ook wordt bij de gangbare berekeningsmethode geen rekening gehouden met stijfheids(rek)verschillen tussen dop en staf.

### Invloed van stafdiameter en overlappende

Wanneer figuur 5 opnieuw in beschouwing wordt genomen, dan blijkt dat de lijmvverbindingen hun optimale sterkte verkrijgen bij een lange overlappende ( $h=3$  mm) en een grote stafdiameter. De vergelijking van deze experimentele

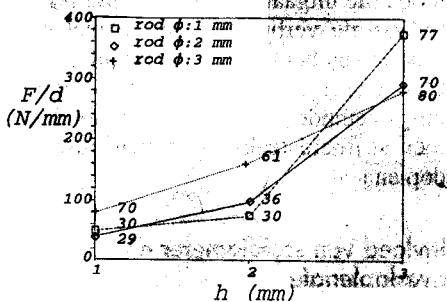
## Optimalisatie van kleine cilindrische lijmverbindingen



Figuur 8. De ideale spanning (Von Mises) aan de open zijde van de lijmlaag als functie van de overlappende dikte en de stafdiameter.

waarden met de berekende ideale spanning (Von Mises) in de lijmlaag bij deze afmetingen aan zowel de open als de gesloten zijde van de lijmlaag zijn te vinden in figuur 8. Lage spanningspieken blijken dus inderdaad overeen te komen met een hoge verbindingsterkte en vice versa.

Men moet echter oppassen, want vanzelfsprekend speelt het dragend lijmoppervlak van de verbinding eveneens een voornaam rol. Hoe groter dit oppervlak, des te sterker de verkregen verbinding zal zijn. Om deze reden is de gemeten uittrekkraft van de destructieve tests gedeeld door de stafdiameter, zie figuur 9.



Figuur 9. Wanneer het invloed van de overlappende ( $h$ ) en de stafdiameter ( $d$ ) vergeleken moet worden doet men het beste het relatief verlijmd oppervlak in beschouwing te nemen. De gemeten hechtsterkte wordt dan gedeeld door de stafdiameter. De getallen bij de meetpunten geven de standaarddeviatie in de gemeten waarde.

Ook hier blijkt dat een overlappende groter dan 2 mm zeer ten gunste van de sterkte van de verbinding werkt, in het bijzonder bij kleine stafdiameters. Maar zoals uit de grafiek valt af te lezen, geeft een overlappende van 3 mm een nog sterkere verbinding.

## Lijmlaagdikte

De dikte van de lijmlaag wordt als belangrijke ontwerpparameter beschouwd. De hieronder besproken experimenten bevestigen dat en laten zien dat een dikke lijmlaag bij de beschouwde verbindingen in het algemeen resulteert in een afname van de verbindingsterkte.

De eindige elementen analyse toont aan dat een dikke lijmlaag de radiale spanningspieken doet toenemen met bijna 30% in vergelijking met eenzelfde verbinding met een veel dünnere lijmlaag, zie figuur 10. Dit is het gevolg van een sterkere buiging van de dikke lijmlaag aan de uiteinden. Als gevolg daarvan maken de spanningslijnen een scherpe bocht van het ene metaaloppervlak naar het andere.

De experimentele gegevens in figuur 11 laten zien dat er inderdaad een relatie bestaat tussen de sterkte van de verbinding en de dikte van de lijmlaag. Deze resultaten doen vermoeden, dat een nog kleinere lijmspleetdikte de sterkte van de verbinding zal doen toenemen. Echter, nog nauwere spleetdikten vereisen nauwere toleranties en doen de kosten van de onderdelen stijgen. Een dikke lijmlaag daarentegen doet de stijfheid van de totale constructie afnemen en heeft hogere spanningspieken aan de rand tot gevolg, die als pelspanning werken met over het algemeen desastreuze gevolgen voor de lijmverbinding.

## Luchtinsluitels

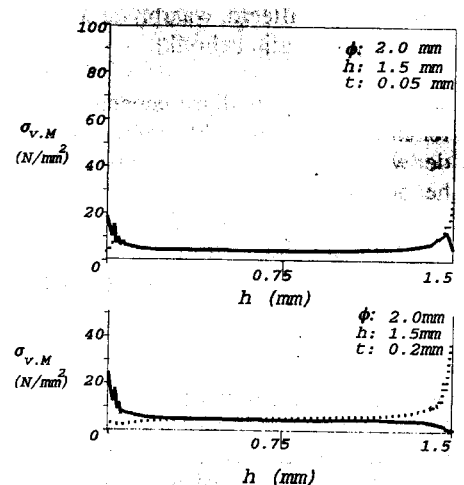
Om het effect van luchtinsluitels op de spanningsverdeling te bestuderen, zijn twee eindige elementen modellen ontworpen en geanalyseerd. Deze waren

wederom gebaseerd op de kleine cilindrische verbinding van figuur 1. Een van deze twee modellen bevat een ring van aaneengesloten luchtbellens. In figuur 12 is het plaatsafhankelijke effect waar te nemen die luchtbellens hebben op de spanningsverdeling in de lijmlaag. De luchtbel in het centrum van de lijmlaag geeft slechts een kleine verstoring en lijkt dus een ongevaarlijke invloed te hebben op de ideale spanning. Hierbij moet echter wel in acht worden genomen, dat de verstoringen worden berekend op macroniveau.

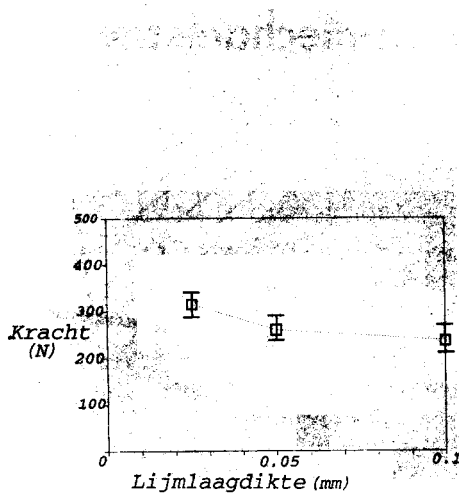
Een lokaal verstoord spanningscurve ten gevolge van de luchtbel die de lijmlaag plaatselijk een hogere flexibiliteit geeft, is te vinden aan het gesloten uiteinde van de lijmlaag. De spanningsconcentratie aan het open uiteinde van de lijmlaag is echter licht gestegen.

In Griffith's theorema [13] wordt aangenomen, dat het falen van een lijmverbinding al bij relatief laag aangelegde spanningen kan plaatsvinden wanneer er insluitels (singulariteiten) in de lijmlaag aanwezig zijn, of wanneer er sprake is van plaatselijk slechte hechting tussen lijmlaag en metaal. Dit ten gevolge van plaatselijk sterk verhoogde spanningsconcentraties op moleculair niveau.

Wanneer er van wordt uitgegaan dat



Figuur 10. De invloed van de lijmlaagdikte op de ideale spanning (Von Mises).



Figuur 11. De invloed van de lijmlaagdikte op de experimenteel gemeten hechtsterkte ( $d=2,0$  mm,  $h=1,5$  mm).

aan het uiteinde van de lijmlaag de hoogste spanning staat, is het heel goed mogelijk dat op microscopisch niveau de spanningen ten gevolge van deze singulariteiten veel hoger oplopen dan die van de hier getoonde berekeningsresultaten. Bovendien kan een luchtbel functioneren als waterbuffer in vochtige omgevingen, hetgeen de duurzaamheid van de verbinding verlaagt. Diverse experi-

mentele resultaten en berekeningen hebben dit ook aangetoond. Daarom valt het sterk aan te raden om voorzorgen te treffen die de kans op het ontstaan van luchtbelllen in de lijmlaag te gengan.

**Conclusie**

Het doen van een realistische voorspelling van de uiteindelijke sterkte van een lijmvverbinding is ook met eindige elementen berekeningen nog niet mogelijk. Wel kunnen er kwalitatieve richtlijnen aan ontleend worden door vergelijking van resultaten, wat praktisch is voor de optimalisatie van de verbindingen.

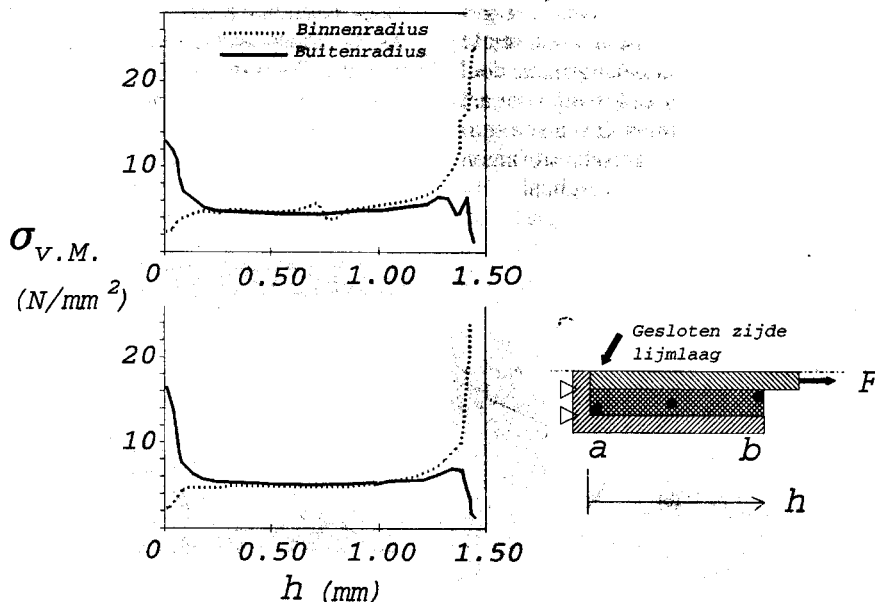
Naast de dikte van de lijmmaad blijken de lengte van de overlap en de relatieve stijfheid van staf en dopwand van grote invloed op de lijmmaadsterkte. Een constructeur kan grote invloed uitoefenen op de sterkte van een lijmvverbinding door de dimensionering van te verbinden delen handig te kiezen.

**Literatuur**

[1] D.v Gemert, F. Norre; Berekening van gelijmde verbindingen; De constructeur, (1990)3, pp 56-63.  
 [2] NASA-CR-112235; Adhesive-Bonded Double Lap Joints; Douglas Aircraft Co. Inc. Feb 1974.  
 [3] R.D. Adams; Stress Analysis: A finite-Element Analysis approach; Dep. of Mech. Eng. University of Bristol, UK.  
 [4] R. Houwink, G. Salomon; Adhesion and Adhesives; 2nd. Ed., Elsevier 1965.  
 [5] L.J Hart-Smith; Stress Analysis: A continuum Mechanics Approach; Douglas Aircraft Comp., California, USA., Science Vol.16, pp 1901-1909, 1972.  
 [6] T. Wang; Effect of Bonding Defects on Shear Strength in Tension of Lap Joints Having Brittle Adhesives; Journ. of Polymer Science, Vol.16, pp1901-1909, J. Wiley & Sons, 1972.  
 [7] H. Schlegel; Berechnung von geklebten Rundverbindingen; Plaste und Kautschuck, (1965)8 pp 469- 472.  
 [8] W. Althof, Braunschweig; Adhäsion; (1966)12 pp 493-496.  
 [9] G. Habenicht; Kleben; Springer-Verlag 1986, ISBN 3-540- 15893- 6 (Berlin..).  
 [10] N.K. Benson; The mechanics of adhesive bonding; Appl. Mech. Rev., Feb, 1961.  
 [11] S. Wu; Polymer interface and adhesion; Marcel Dekker, ISBN 0 8247 15330 pp 571-612, 1982.  
 [12] A. Matting; Grenzflächen-reaktionen und Spannungs-verteilung in Metallklebverbindungen; Kautschuck und Gummi Kunststoffe 7(1963)16.  
 [13] A.A Griffith; Phil. Trans. Roy. Soc., A221, 163, 1920.  
 [14] Algor Finite Element Analysis System; Algor Inc., 260 Alpha Drive, Pittsburgh, Pennsylvania 15238, USA.  
 [15] J.A Poulis; Small Cylindrical Adhesive Bonds; Delft University of Technology, Fac. of Mech. Eng., Mekelweg 2, 2628 CD Delft, Holland, ISBN 90-370-0082-7, 1993.

**Auteursnoot**

J.A. Poulis en J.C. Cool zijn werkzaam bij de Technische Universiteit Delft, Faculteit Werktuigbouw en Maritieme Techniek, Mekelweg 2, 2628 CD Delft, E.H.P. Logtenberg is werkzaam bij het Hechtings Instituut, Kluyverweg 3, 2600 GB Delft. Het proefschrift "Small cylindrical adhesive bonds" behandelt het hier beschreven onderwerp vollediger en is verkrijgbaar door hfl 40,- over te maken op postgiro nr 3195292 ten name van J.A. Poulis, Ververstraat 20 Leiden, onder vermelding van naam, adres, en de opmerking "Proefschrift".



Figuur 12. Invloed van drie luchtbelllen in de lijmlaag (boven) van een cilindrische verbinding vergeleken met een defect-vrije lijmlaag (onder).