

# De invloed van de E-modulus op de sterkte van gelijmde overlapverbindingen

Het berekenen van de sterkte van een lijmverbinding is nog altijd niet goed mogelijk. Dat wordt vooral veroorzaakt door het feit dat er voor deze verbindingen geen algemeen geaccepteerd breukcriterium beschikbaar is [1]. Dat wil echter niet zeggen dat het gedrag van lijmverbindingen volledig onvoorspelbaar is. In tegendeel zelfs. De invloed van parameters als het type lijm, de overlappende lengte van de verbinding en de mechanische eigenschappen van het te verlijmen materiaal is zelfs relatief eenvoudig te begrijpen. In dit artikel wordt dit nader uitgelegd voor enkelvoudige overlapverbindingen. Als basis hiervoor zullen de resultaten dienen van een onderzoek dat bij Corus Research, Development & Technology is uitgevoerd. De E-modulus van de lijm blijkt daarbij een belangrijke factor te zijn. Daarom zal onderscheid worden gemaakt tussen lijmen met een hoge en lijmen met een lage E-modulus.

24  
Ir. Jurgen Vrenken, Corus Research, Development & Technology, IJmuiden

**B**ij het onderzoek is gekeken naar de sterkte van lijmverbindingen in diverse staal-, aluminium- en rvs-kwaliteiten (tabel 1).

Daarbij is gebruikgemaakt van een tweetal geheel verschillende lijmtypes, een lijm met een hoge en een lijm met een lage E-modulus. De lijm met de hoge E-modulus is Betamate 1496 van Dow Automotive, een één-component epoxy lijm die veel in de auto-industrie wordt gebruikt en die behoort tot de nieuwste crashbestendige generatie. De lijm met een lage E-modulus is ISR 70-05, een één-component MS polymeer

van Bostik. Vanwege hun flexibiliteit zijn dit soort lijmtypes zeer geschikt voor gebruik in verbindingen waar een zekere beweging moet worden opgenomen. De lage E-modulus verzekert dan een relatief lage spanningsopbouw in de verbinding. Tabel 2 geeft van beide lijmtypes een aantal materiaal- en verwerkingseigenschappen. Afbeelding 1 toont de geometrie van de in het onderzoek gebruikte proefstukken. Tenzij anders is aangegeven is er telkens een overlappende lengte van 10 mm gebruikt. In tabel 1 zijn tevens de belangrijkste resultaten uit het

Tabel 1. Overzicht van de onderzochte materialen en van een aantal van de belangrijkste testresultaten.

Eigenschappen substraatmaterialen					Sterkte lijmverbindingen <sup>1</sup> (kN)	
Materiaal	Dikte (mm)	Vloeiëgrens (Mpa)	Treksterkte (Mpa)	'Vloeiesterkte' <sup>2</sup> (kN)	met Betamate 1496	met ISR 70-05
<b>Staal</b>						
HSLA350	1,5	406	458	15,2	10,7	0,9
DP600	1,8	407	673	18,3	12,3	0,7
BH180GI	0,7	219	321	3,8	5,1	niet getest
<b>RVS</b>						
304LN	1,0	319	669	8,0	8,2	0,7
<b>Aluminium</b>						
5018	1,2	142	266	4,3	5,4	0,8
5083 (1 mm)	1,0	158	295	4,0	4,4	0,8
5083 (4 mm)	4,1	156	301	16,0	8,5	0,7
6016	1,1	142	245	3,9	5,8	niet getest

<sup>1</sup> Overlappende lengte van 10 mm; testsnelheid van 10 mm/min.

<sup>2</sup> Met 'vloeiesterkte' wordt de kracht bedoeld waarbij een 25 mm breed proefstuk van dit materiaal en deze dikte plastisch gaat vervormen.

	Betamate 1496	ISR 70-05
<b>Eigenschappen lijm</b>		
Volgens standaard:	DIN / ISO 527-1	DIN 53504 / ISO 37
E-modulus (MPa)	1600	4,8
Treksterkte (MPa)	32	3,5
Rek bij breuk (%)	10	200
<b>Toepassing in dit onderzoek</b>		
Uithardingscondities	45 min, 180°C	> 1 week KT
Lijmnaaddikte (mm)	0,1	1

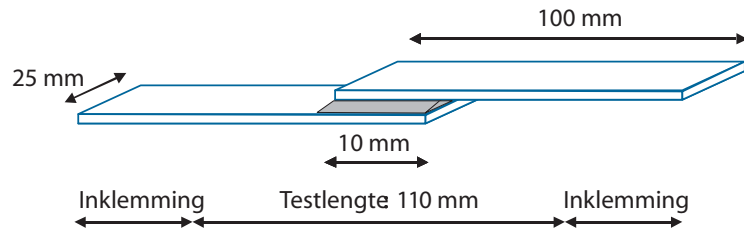
Tabel 2. Overzicht van de eigenschappen van de gebruikte lijmtypes (data van leveranciers) en van hun toepassing in dit onderzoek.

onderzoek opgenomen. In het kort kan daarover het volgende worden opgemerkt.

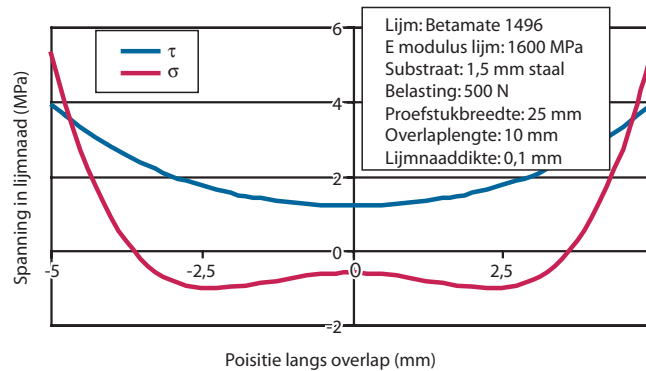
- In de eerste plaats valt op dat de verbindingen die zijn gelijmd met ISR 70-05 veel minder sterk zijn dan die met Betamate 1496 zijn gelijmd. Dat is een min of meer algemeen geldig resultaat, lijmen met een lage E-modulus zijn over het algemeen minder sterk dan lijmen met een hoge E-modulus.
- Verder valt op dat de sterkte van de verbindingen die met Betamate 1496 zijn gelijmd, sterk uiteenloopt, van zo'n 4,4 kN tot ruim boven de 12 kN, terwijl de sterkte van de verbindingen die zijn gelijmd met ISR 70-05 voor alle materialen vrijwel gelijk is. Daarbij moet worden opgemerkt dat er in alle gevallen cohesieve breuk optrad (breuk in de lijm). Daardoor kunnen de verschillen in de gevonden sterkte niet worden toegeschreven aan het hechtingsniveau maar moeten er andere oorzaken aan ten grondslag liggen.

**Hoge E-modulus versus lage E-modulus**

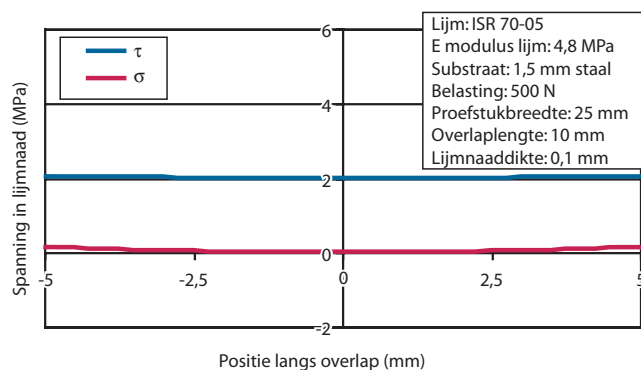
Hoewel de sterkte van een lijmverbinding dus niet goed valt te berekenen, is het berekenen van de spanningsverdeling in een lijmverbinding daarentegen relatief eenvoudig. Als een lineair elastische analyse voldoende is kan dat bijvoorbeeld met analytische berekeningsmethoden zoals die van Volkersen (1938), Goland & Reissner (1944) of Bigwood & Crocombe (1989). Met de eindige elementen methode kan eventueel ook niet-lineair gedrag worden meegenomen. In de hier gepubliceerde berekeningen is gebruik gemaakt van de methode van Bigwood en Crocombe [2]. Met de analyse van de spanningsverdeling in een lijmverbinding kan de grote invloed van de E-modulus van de lijm op het gedrag van de verbinding duidelijk worden gemaakt. Afbeelding 2 toont de spanningsverdeling ten gevolge van een belasting van 500 N in een verbinding die verlijmd is met een lijm met een hoge E-modulus. Aan de uiteinden van de overlapverbinding treden niet alleen pieken op in de afschuifspanning, maar treden ook ongunstige pelspanningen op (trek-



Afbeelding 1. De geometrie van de gebruikte proefstukken.



Afbeelding 2. De spanningsverdeling in een enkelvoudige overlapverbinding volgens de methode van Bigwood & Crocombe bij gebruik van een lijm met hoge E-modulus.



Afbeelding 3. De spanningsverdeling in een enkelvoudige overlapverbinding volgens de methode van Bigwood & Crocombe bij gebruik van een lijm met lage E-modulus.

Lijmen met lage E-modulus	Lijmen met hoge E-modulus
1 component polyurethaan	1 component epoxy
1 component MS polymeer	2 component epoxy
1 component acrylaat	2 component polyurethaan
silicone	2 component (meth)acrylaat
tweezijdige (structurele) tape	

Tabel 3. Indeling van lijmtypes in twee categorieën, op basis van de E-modulus [3].

spanningen loodrecht op het vlak van de lijmmaad). De pieken in de pelspanning zijn zelfs nog iets hoger dan die in de afschuifspanning. Afbeelding 3 toont de spanningsverdeling als gebruik wordt gemaakt van een lijm met een lage E-modulus. De spanningsverdeling is totaal anders. In dit geval is er vrijwel geen sprake van pelspanningen en zijn er ook geen pieken in de afschuifspanning, maar de afschuifspanning is constant over de verbinding. Maar, ondanks deze veel homogenere spanningsverdeling zijn lijmen met een lage E-modulus meestal toch minder sterk dan lijmen met een hoge E-modulus. Helaas valt een duidelijke grens tussen een hoge en een lage E-modulus niet precies aan te geven, hoewel analytische berekeningen ruwweg aantonen dat de grens ergens bij een E-modulus van enkele honderden MPa moet liggen. Maar omdat de E-modulus van veel lijmtypes duidelijk boven of onder dat niveau ligt is het toch goed mogelijk ze in één van de twee categorieën in te delen. In tabel 3 is dat voor een aantal veel gebruikte lijmtypes gedaan.

#### Kracht-weg verloop

In afbeelding 4 worden de trekkrommen van twee materialen vergeleken met het kracht-wegverloop van lijmverbindingen van diezelfde materialen (afbeelding 4 links toont een detail uit afbeelding 4 rechts). Opvallend is dat in het geval van de lijm met een lage E-modulus, het kracht/wegverloop van de verbindingen voor beide substraten vrijwel identiek is. Het substraatmateriaal heeft dus blijkbaar geen invloed op de sterkte van de lijmverbinding. De kracht in het substraatmateriaal blijft verder relatief klein en ruim onder de vloeigrens. De verplaatsing die is opgetreden moet dan ook voornamelijk worden toegeschreven aan rek in de lijm zelf. Het kracht/wegverloop van de verbindingen met Betamate 1496 is totaal anders. In dit geval worden de trekkrommes van de substraatmaterialen vrij nauwkeurig gevolgd. Als de vloeigrens van het substraatmateriaal wordt bereikt, zoals bij AA 5018 het geval is, wordt daarmee de sterkte begrensd die de verbinding

kan bereiken. De lijm kan op zich wel een hogere kracht aan, maar bevindt zich nu eenmaal tussen twee materialen die aan het vloeien zijn en zal mee dienen te rekken. Als de breukrek in de lijm is bereikt zal de verbinding bezwijken. In het geval van een lijm met een hoge E-modulus heeft het substraatmateriaal dus wel degelijk een grote invloed op de sterkte van een lijmverbinding.

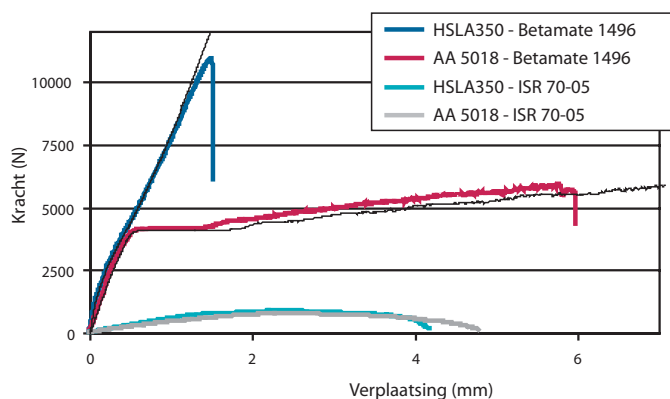
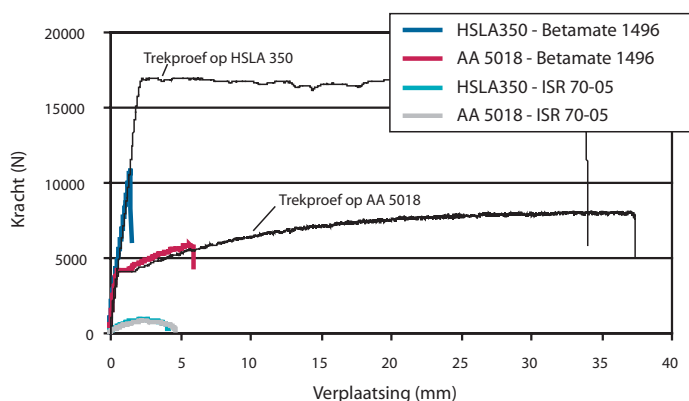
#### Invloed overlappende bij een lijm met hoge E-modulus

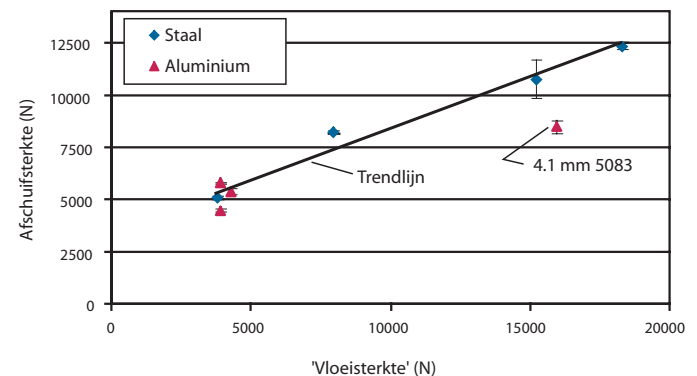
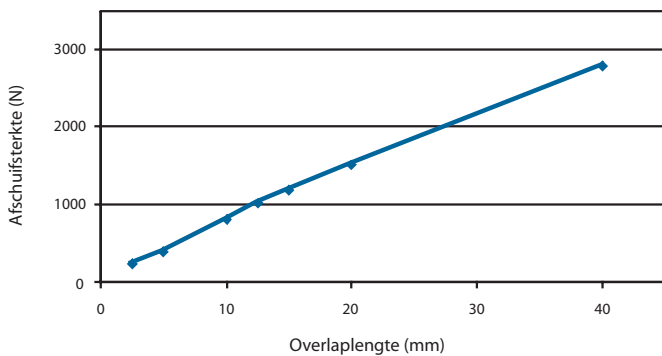
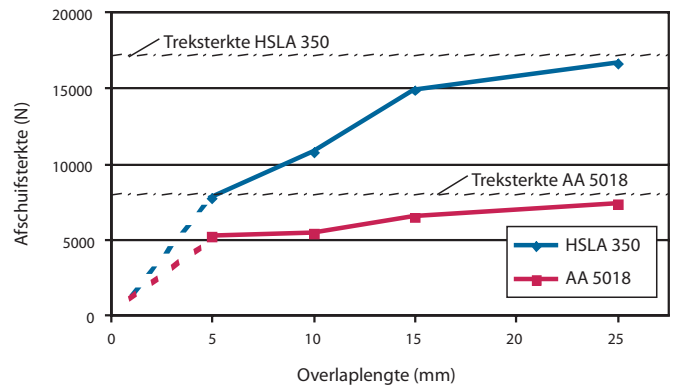
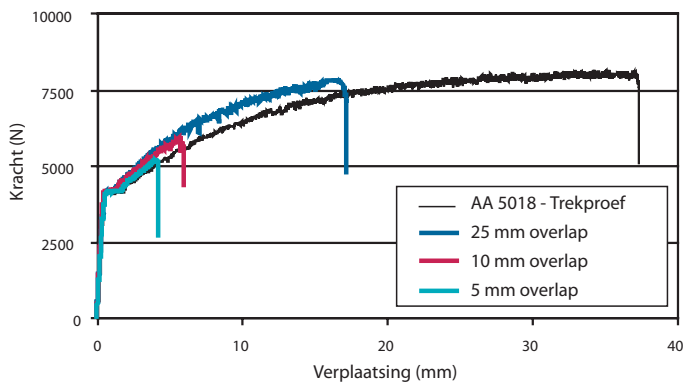
Afbeelding 5 toont het kracht/wegverloop van een trekproef op AA 5018 en van een aantal lijmverbindingen met verschillende overlappendes, maar in hetzelfde materiaal. De relatie tussen verbindingsterkte, overlappende en de mechanische eigenschappen van het substraatmateriaal kan hiermee worden verklaard. Zoals al eerder is geconstateerd, volgt het kracht/wegverloop van een lijmverbinding de trekkrome van het substraatmateriaal. De overlappende heeft vooral een effect op het moment van breuk; hoe groter de overlappende, des te groter de sterkte en de verplaatsing bij breuk. De in afbeelding 5 gevonden sterktes zijn ook uitgezet in afbeelding 6, waar tevens de resultaten van een tweede materiaal zijn toegevoegd. Voor beide materialen zijn de trends hetzelfde. Bij relatief kleine overlappendes neemt de verbindingsterkte sterk toe met toenemende overlappende, maar bij grotere overlappendes vlakt die toename af. Zoals afbeelding 6 duidelijk maakt, zal het verder vergroten van de overlappende voor deze beide substraatmaterialen nauwelijks een verdere vergroting van de sterkte geven. Bij een overlappende van 25 mm zijn de verbindingen namelijk al bijna net zo sterk als de substraatmaterialen zelf en een verbinding kan natuurlijk nooit sterker worden dan het substraatmateriaal waaruit het gemaakt is.

#### Invloed overlappende bij een lijm met lage E-modulus

Bij een lijm met een lage E-modulus blijkt de verbindingsterkte wel lineair toe te nemen met

Afbeelding 4. Vergelijking tussen het kracht-wegverloop van twee materialen en lijmverbindingen uit die materialen. De rechterafbeelding is een detail uit de linker afbeelding.





de overlappende (afbeelding 7). Dat is ook niet zo verwonderlijk. Doordat de krachtniveaus laag blijven treedt er geen plasticiteit op in de substraatmaterialen en vanwege de zeer homogene verdeling van de belasting over de verbinding (afbeelding 2) zal een verdubbeling van het gelijmde oppervlak ook een verdubbeling van de sterkte betekenen. Bij heel grote overlappendes zal deze lineaire toename van de verbindingsterkte overigens niet langer opgaan. Ook bij een lijm met een lage E-modulus kan de verbinding namelijk nooit sterker worden dan de sterkte van het substraatmateriaal.

**Invloed mechanische eigenschappen van het substraat bij een lijm met hoge E-modulus**

Zoals hierboven is vastgesteld, wordt de sterkte van een lijmverbinding ‘begrensd’ door plasticiteit in het substraatmateriaal. De kracht waarbij het substraatmateriaal plastisch begint te vervormen, wordt bepaald door de breedte van het proefstuk (die in alle gevallen gelijk was aan 25 mm), de vloeigrens en de dikte van het substraatmateriaal. Die waarde is hier ‘vloeisterkte’ gedoopt en kan eenvoudig worden uitgerekend. In tabel 1 is de ‘vloeisterkte’ van de onderzochte materialen weergegeven. In afbeelding 8 zijn de ‘vloeisterkte’ en de sterkte van de verbindingen tegen elkaar uitgezet. Er blijkt een duidelijk verband te zijn. Op één afwijkend punt na vallen alle resultaten op dezelfde lijn. Dit betekent dat, met gebruik van één bepaalde lijm en steeds dezelfde overlappende

lengte, de sterkte van een gelijmde overlapverbinding (linear) toeneemt met toenemende vloeigrens en dikte van het substraatmateriaal. Of het daarbij om staal, roestvast staal of aluminium gaat is niet belangrijk. De gevonden trendlijn zou zelfs kunnen worden gebruikt om de sterkte van een lijmverbinding in een willekeurig materiaal te voorspellen. Daarbij moet men zich echter wel realiseren dat deze specifieke trendlijn alleen geldig is voor één lijm (Betamate 1496) en één overlappende (10 mm). Voor een andere lijm of een andere overlappende zou eerst een vergelijkbare trendlijn dienen te worden geconstrueerd. Het enige meetpunt dat niet op de trendlijn valt behoort tot het 4.1 mm dikke AA 5083. Dat is het enige materiaal dat buiten de dikte range van 0,7 tot 1,8 mm valt waartoe wel alle andere materialen behoren. Een grotere substraaddikte betekent een grotere excentriciteit in de verbinding wat weer een ongunstigere spanningsverdeling tot gevolg heeft. Mogelijk verklaart dat de afwijkende waarde. De gevonden trendlijn is dan ook alleen geldig voor substraten met een dikte van zo’n 0,7 tot 1,8 mm.

**Invloed mechanisch eigenschappen van het substraat bij een flexibele lijm**

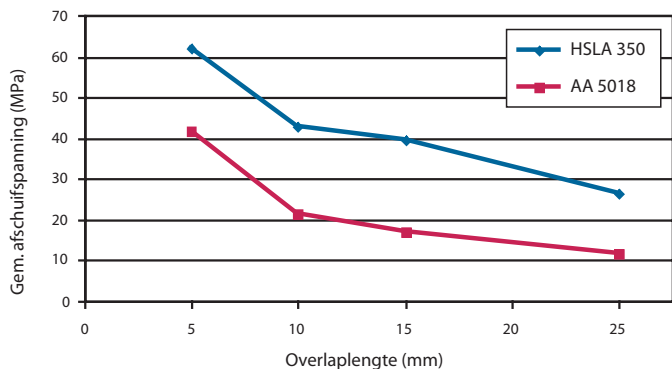
Over de invloed van de substraateigenschappen op verbindingen die gelijmd zijn met een lijm met een lage E-modulus, kunnen we kort zijn. Die invloed is er simpelweg niet. De sterkte van een flexibele lijm is onafhankelijk van het

**Afbeelding 5 (linksboven).** Vergelijking tussen het kracht-wegverloop van AA 5018 en lijmverbindingen met verschillende overlappendes van hetzelfde materiaal (bij gebruik Betamate 1496, de lijm met hoge E-modulus).

**Afbeelding 6 (rechtsboven).** Invloed van de overlappende op de verbindingsterkte bij twee materialen gelijmd met Betamate 1496, de lijm met hoge E-modulus.

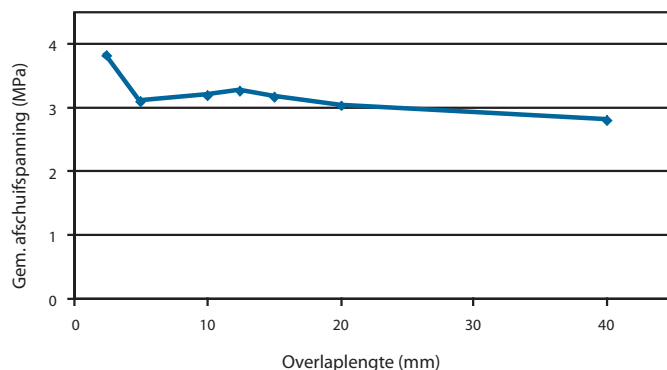
**Afbeelding 7 (linksonder).** Invloed van de overlappende op de sterkte van verbindingen van AA 5754, gelijmd met ISR 70-05 (de lijm met lage E-modulus).

**Afbeelding 8 (rechtsonder).** Relatie tussen ‘vloeisterkte’ en verbindingsterkte bij gebruik Betamate 1496 (de lijm met hoge E-modulus) en een overlap van 10 mm.



**Afbeelding 9 (links).** Invloed van de overlappende lengte op de sterkte van verbindingen gelijmd met Betamat 1496 (de lijm met hoge E-modulus), uitgedrukt als gemiddelde afschuifspanning (zelfde resultaten als gebruikt in afbeelding 6).

**Afbeelding 10 (rechts).** Invloed van de overlappende lengte op de sterkte van verbindingen in AA 5754 gelijmd met ISR 70-05 (de lijm met lage E-modulus), uitgedrukt als gemiddelde afschuifspanning (de zelfde resultaten als gebruikt in afbeelding 7).



substraatmateriaal. Ook uit afbeelding 4 en tabel 1 komt dat naar voren, hoewel er wel degelijk sprake is van enige spreiding in de resultaten.

In dit artikel is de sterkte van de lijmverbindingen steeds consequent uitgedrukt in N, terwijl het ook heel gebruikelijk is om de sterkte van een lijmverbinding als een gemiddelde afschuifspanning, in MPa, uit te drukken (de sterkte in N gedeeld door het lijmoppervlak in mm<sup>2</sup>). Volgens de auteur brengt het gebruik van een gemiddelde afschuifspanning echter het gevaar met zich mee, dat zo'n waarde als een constante materiaaleigenschap zal worden gezien. Voor een lijm met een hoge E-modulus is dat echter allerminst het geval. Ter verduidelijking zijn in afbeelding 9 dezelfde resultaten uitgezet als in afbeelding 6, maar nu niet uitgedrukt in N maar in MPa. De afbeelding ziet er volledig anders uit. Bij een kleine overlappende lengte wordt een hoge gemiddelde afschuifspanning gevonden en die waarde daalt continu met toenemende overlappende lengte. De gemiddelde afschuifspanning blijkt overduidelijk geen constante materiaaleigenschap, alleen al in deze resultaten varieert de waarde tussen de 12 en 62 MPa. In afbeelding 10 zijn de resultaten uit afbeelding 7 uitgezet als gemiddelde afschuifspanning. Lijmen met een lage E-modulus blijken zich wederom totaal anders te gedragen dan lijmen met een hoge E-modulus. In dit geval is de gemiddelde afschuifspanning wel degelijk min of meer constant. Voor een lijm met een lage E-modulus kan de gemiddelde afschuifspanning dus wel als een materiaalconstante worden gezien. Voor ISR 70-05 is de gemiddelde afschuifspanning circa 3 MPa.

### Samenvatting

Op basis van de E-modulus kunnen lijmen grofweg in twee categorieën worden ingedeeld, lijmen met een hoge en lijmen met een lage E-modulus. Een exacte grens valt niet precies aan te geven, maar zal naar verwachting bij een E-modulus van enkele honderden MPa liggen. Aangezien de E-modulus van veel lijmtypes

duidelijk boven dan wel onder die grens ligt, zullen de meeste lijmen toch goed in één van beide categorieën kunnen worden ingedeeld. Het gedrag van een lijmverbinding uit beide categorieën is volledig anders. Een verbinding die met een lijm met een hoge E-modulus is gelijmd heeft de volgende eigenschappen:

- De spanningsverdeling in de lijm is niet homogeen. Er zijn spanningspieken aan de uiteinden van de overlap.
- Lijmen met een hoge E-modulus zijn over het algemeen sterker dan lijmen met een lage E-modulus.
- Bij gelijkblijvende overlappende lengte neemt de verbindingsterkte (lineair) toe met toenemende dikte en vloeigrens van het gelijmde substraatmateriaal.
- Bij een korte overlappende lengte neemt de verbindingsterkte sterk toe met toenemende overlappende lengte. Bij grotere overlappende lengtes zwakt die toename af. Uiteindelijk zal de verbindingsterkte niet verder toenemen bij nog grotere overlappende lengtes.
- De gemiddelde afschuifspanning is geen materiaalconstante en hangt onder meer af van de gebruikte overlappende lengte en het substraatmateriaal.

Een verbinding die met een lijm met een lage E-modulus is gelijmd heeft de volgende eigenschappen:

- De spanningsverdeling in de lijm is zeer homogeen.
- Lijmen met een lage E-modulus zijn over het algemeen minder sterk dan lijmen met een hoge E-modulus.
- De verbindingsterkte is onafhankelijk van de dikte en de mechanische eigenschappen van het gebruikte substraatmateriaal.
- De verbindingsterkte neemt lineair toe met toenemende overlappende lengte.
- De gemiddelde afschuifspanning is constant en kan worden gezien als een materiaalconstante.

### Referenties

- [1] Comparative assesment of prediction models. R.D. Adams. Multimaterials technology; Solutions and oppertunities, Utrecht, the Netherlands, 24 en 25 oktober 2000.
- [2] Elastic analysis and engineering design formula for bonded joints. D.A. Bigwood, A.D. Crocombe. International Journal of Adhesion and Adhesives, vol. 9 no.4, oktober 1989.
- [3] Mechanisch verbinden en lijmen; Ontwerprichtlijn. C.C.J. Kaasschieter, J.H.J.W. van der Velden, J. Vrenken. TNO-rapport LD98-47, december 1997.