

Structurele lijmtoeepassingen in de bouwsector

Frederik Koch

Promotor: prof. Jan Moens

Begeleiders: Nathan Van Den Bossche, prof. ir.-arch. Dirk De Meester

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Architectuur en stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. Bart Verschaffel
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Academiejaar 2008-2009



Structurele lijmtoeepassingen in de bouwsector

Frederik Koch

Promotor: prof. Jan Moens

Begeleiders: Nathan Van Den Bossche, prof. ir.-arch. Dirk De Meester

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Architectuur en stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. Bart Verschaffel
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Academiejaar 2008-2009



VOORWOORD

Gedurende het laatste jaar van de masteropleiding Burgerlijk Ingenieur Bouwkunde aan de Universiteit Gent dienen studenten een thesis te schrijven. Bij de keuze van een geschikt onderwerp sprak het product lijm me aan. Vooral het gegeven dat een alledaags product zodanig onbekend is qua eigenschappen en achterliggende theorieën interesseerde me. Omdat dit werk kan opgevat worden als een soort handboek over structurele lijmtoepassingen, wordt getracht een kleine bijdrage te leveren aan de ontwikkeling van lijmtoepassingen in de bouwsector.

Graag wil ik enkele mensen hartelijk danken voor hun steun en hulp tijdens dit werk. In eerste instantie begeleider Nathan Van Den Bossche en promotor Jan Moens die me met kennis en informatie bijstonden tijdens het opstellen van dit werk.

Verder ook mijn dankbetuiging aan de vele fabrikanten en producenten die me van het nodige advies hebben voorzien.

Tenslotte wil ik ook graag mijn familie en vrienden bedanken voor hun steun en begrip tijdens dit laatste academiejaar.

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

Maandag 1 juni 2009

OVERZICHT

Naam:	Frederik Koch
Titel:	Structurele lijmtoepassingen in de bouwsector
Promotor:	Prof. Jan Moens
Begeleiders:	Ir. -Arch. Nathan Van Den Bossche Prof. Ir. -Arch. Dirk De Meester
Trefwoorden:	Lijmverbinding, Structurele beglazing, Buitengevelisolatiesysteem, Externe wapening

Structurele lijmtoepassingen in de bouwsector

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: Prof. Dr. Bart Verschaffel
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Academicjaar 2008 - 2009

Dit werk omvat een literatuuronderzoek naar structurele lijmtoepassingen in de bouwsector. Hoewel lijm een product is met vele mogelijkheden, bestaat er binnen de bouwsector nog steeds enige onduidelijkheid omtrent het gebruik ervan. Welke toepassingen kunnen gelijmd worden en wat zijn de randvoorwaarden bij gebruik is dan ook een veelgestelde vraag. In dit werk wordt hierop in zekere zin een antwoord gegeven.

In een eerste deel wordt lijm in een brede context beschreven. Zo worden vanuit een chemisch perspectief enkele hechtingsmechanismen, voorbehandelingstechnieken en constructieve aspecten besproken.

In een tweede deel worden verschillende lijmtypes geïnclassificeerd naar hun chemische reactiviteit en uithardingsmechanisme. Ook wordt voor elk lijmtypetype bekeken wat de eigenschappen zijn en voor welke toepassingen ze gebruikt worden.

Hoewel dit eerste en tweede deel niet het hoofdbestanddeel uitmaken van dit werk, is het toch noodzakelijk ze te beschrijven. De achterliggende kennis die hier wordt gegeven is immers noodzakelijk om het derde en laatste deel op een goede manier te vatten.

In dit derde deel tenslotte worden negen structurele en bouwkundige lijmtoepassingen besproken. Na een algemene inleiding wordt voor elke toepassing getracht de voorwaarden op te stellen waaraan de lijm moet voldoen. Verder worden de geschikte lijmsystemen opgesomd alsook de praktische uitvoerbaarheid beschreven. Tot slot wordt elke toepassing afgesloten met een kritische doch realistische beschouwing.

Structural applications of adhesives in the building industry

Frederik Koch

Supervisor(s): Jan Moens, Nathan Van Den Bossche, Dirk De Meester

Abstract—This article gives an insight in the application area of structural adhesive joints in the building industry.

Keywords—Adhesive joint, Structural glazing systems, External thermal insulation composite systems, Externally bonded reinforcement.

I. INTRODUCTION

HOWEVER the first applications of adhesives dates from 36.000 years ago [E. BOEDA], the product has a problem with his image. Adhesives have unsatisfactory proven to enjoy the full confidence of some profession groups. It's then also strange that the aviation and motorcar industry use adhesives a lot. So windcreens in cars and windows of planes are all stucked together. However everybody feels himself safe in planes and cars, there is a negative perception when adhesives are applied as a constructive connection in the building or metal industry. The purpose of this work is then also to create a state of the art about the use of adhesives for structural applications in general and the building industry in particular. Trough this, it's the intention to make architects and structural engineers more trusted with this technology.

II. SUBSTANCE

A. General Information

The first part of this work is a general introduction about adhesives and adhesive applications. After a short history, adhesives will be situated in the world of the connection types. This is important because adhesives are often used in substitution for mechanical connections. Furthermore, a number of adhesive theories are explained. It handles about the bond strength between the adhesive and the substrate. This chapter is especially a chemical part. The bonding strength is namely depend of the bond forces between different particles.

Next, the adhesive process is described in function of time, with the steps who need to be followed to create a qualitative adhesive joint. Finally, some advantages and drawbacks of adhesive joints are described.

Further, in the first part of this work, some preliminary treatments are described. For creating a qualitative adhesive bonding, the substrates need also a qualitative surface. Therefore, it's possible that the substrates have to be treated. Some preliminary treatment techniques

are then also explained.

Finally, some constructive properties of adhesive joints are described. A adhesive bonding will namely react different when it has loaded to respectively tensile, shear and peel stresses. In according with those constructive aspects, a single lap joint is discussed. Two theories are available within this perspective. On the one hand, there is the theory of Volkersen, on the other hand, there is the analyse of Goland and Reissner [1], [2]. Both theories are based on the internal tension distribution.

B. Adhesive Types

In the second part of this work, several adhesive types are discussed. However adhesives are in practice mostly classified by their range of application, here they will be classified on a more scientific base. So, sixteen different adhesive types are described. For each adhesive type, the definition is formulated as well as the hardening mechanism. This is important because the hardening mechanism forms the base of a good adhesive joint. Some adhesives will harden when the solvent vaporizes or they are closed off from oxygen. Other types conversely harden when they are exposed on moisture, ultraviolet, visible light or mixed with a reactive component. This implies that a specific application has a limited choice of adhesive types.

Further, for each type of adhesive, the properties are briefly described as well as the application area.

C. Structural Applications

In the third and last part of this work, nine architectural applications are discussed. However this part is the main goal of this thesis, the other two parts are necessary to fit the whole entity and support some propositions.

For each application, there is a general introduction after which the relevant test elaborations and standards -to which the adhesive joints has to satisfy- are explained. Further, the possible adhesion types who can used for this specific application are described, just as the practicability. Each application is finally concluded with a critical approach, where the author of this work gives a -sometimes more personnel- opinion. The last part of this work can consequently be seen as a kind of manual, who architects or structural engineers can con-

sult when they use adhesives to connect some constructional entities.

Structural glazing systems are the first application in this work [3]. In addition to a mechanical fixing, glass panels can also be fixed to a structure by an adhesive (Fig. 1). This technology shapes an aesthetic dimension which makes the application popular by architects.

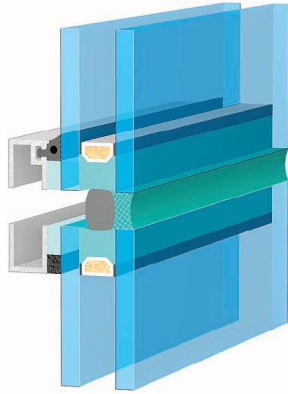


Fig. 1. Structureel glazing system [Dow Corning]

When the glass is replaced by a panel of natural stone, metal or a fibre, we come to the second application. The panels are fixed against a structure of metal sections with an adhesive (Fig. 2). Trough this, a ventilated outside front is created, what gives a lot of advantages. The blind attachment creates an optimal stress distribution, so the use of anchors or pins is unnecessary. Because of this, it's possible to make the panels thinner. All this creates a surplus value on a aesthetic, economic and practical level.

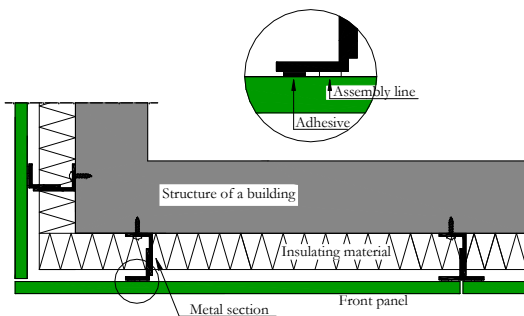


Fig. 2. Ventilated frontsystem with panels

A next application where fronts of buildings are covered contains the external thermal insulation composite systems [4]. Lagging material is fixed to the outside of a structure with an adhesive, to decorate it later with a sticking plaster or stone strips. A special case in this perspective is a lagging material of foam glass. Because this material is significantly different from the others,

just as the practical handling, it can be seen as a new application.

A last front application is the use of adhesives by composite lightweight panels. These panels compares a -mostly insulating- core which is at one of both sides adhesively bonded to a protection skin to cover external walls.

Further, externally bonded reinforcement is described. It includes a technique where steel or fibre reinforced polymers (FRP) are adhesively bonded to a structure to grade up the bearing power. With this application, actual constructions can be utilised maximal with a minimum on investments.

Also the watertightness of flat roofs is an application. Some waterproof membranes where in the past especially handled by the use of an open fire. This implies a high fire risk, so the use of adhesives are advised. Trough the fact that there is a lot of variation in waterproof membranes and their practicability, it's interesting to invest some attention to this application. Some membranes are namely totally not compatible with some adhesives.

In the wood industry, adhesives are a special appreciated product. Mostly they are used to manufacture non-structural elements like plywood or chipboards. But also structural elements like laminated beams are fabricated with adhesives. By the application of this laminated beams in the building industry as structural span, this application is briefly described in this work.

At least there is the use of mortar, reinforced with polymers for the handle of stones and bricks. Strictly examined, this product is an adhesive because his non-metal basic. Nevertheless, it's better to classify it in a separate class. However, because the use of this product and the confusion about it, the application is admit in this work.

III. CONCLUSIONS

This work can be seen as a kind of manual, which architects or structural engineers has to make more confident with the use of adhesives. For several structural applications, the possible adhesive types are enumerated and the practicability is described. It's then also the intention to promote adhesives by architects -but all the time remaining critical- and to avoid practical mistakes.

REFERENCES

- [1] KINLOCH A. J. *Adhesion and adhesives*. Chapman and Hall, New York, 1987.
- [2] VERVLOED J. / KWAKERNAAK A. / POULIS H. *The influences of overlap length, bond line thickness and pretreatment on the mechanical properties of adhesives: focussing on bonding glass*. The Adhesion Institute, The Netherlands.
- [3] ETAG 002. *Guideline for European technical approval for structural sealant glazing kits*. EOTA, 2005.
- [4] ETAG 004. *Guideline for European technical approval of external thermal insulation composite systems with rendering*. EOTA, 2000.

INHOUDSOPGAVE

HOOFDSTUK 1: INLEIDING	1
HOOFDSTUK 2: HISTORIEK	2
HOOFDSTUK 3: LIJM IN DE RUIMTE DER VERBINDINGEN	3
3.1 VERBINDINGSELEMENT	3
3.2 VORMELEMENT	4
3.3 VERBINDINGSMATERIAAL	4
3.3.1 LASVERBINDINGEN	4
3.3.2 SOLDEERVERBINDINGEN	5
3.3.3 LIJMVERBINDINGEN	5
HOOFDSTUK 4: ALGEMENE LIJMPRINCIPES	6
4.1 HECHTINGSMECHANISMEN	6
4.1.1 MECHANISCHE VERANKERING	6
4.1.2 ADSORPTIE – SPECIFIEKE ADHESIE	6
4.1.3 ELEKTRONISCHE THEORIE	9
4.1.4 DIFFUSIETHEORIE	9
4.2 LIJMPROCES	10
4.3 EIGENSCHAPPEN	11
HOOFDSTUK 5: VOORBEHANDELING	12
5.1 PRINCIPE EN DOEL	12
5.2 VOORBEHANDELINGSMETHODES	12
5.2.1 ONTVETTEN	12
5.2.2 MECHANISCH BEWERKEN	12
5.2.3 CHEMISCH BEHANDELEN	13
5.2.4 PLASMA BEHANDELEN - FYSISCH BEHANDELEN	14
5.2.5 GEBRUIK VAN PRIMERS	15
HOOFDSTUK 6: CONSTRUCTIEVE EIGENSCHAPPEN	16
6.1 ALGEMEEN	16
6.2 BELASTINGSVORMEN	16
6.2.1 TREK- EN DRUKBELASTING	16
6.2.2 SCHEUR- OF AFPELBELASTING	17
6.2.3 SCHUIFBELASTING	18
6.3 BEREKENEN VAN LIJMVERBINDINGEN	19
6.3.1 THEORIE VAN VOLKERSEN	19
6.3.2 GOLAND EN REISSNER ANALYSE	20
6.4 LEVENSDUUR VAN EEN LIJMVERBINDING	22

HOOFDSTUK 7: CLASSIFICATIE VAN LIJMEN.....	23
7.1 FYSISCH DROGENDE LIJMEN.....	24
7.1.1 DISPERSIELIJM.....	24
7.1.2 CONTACTLIJM.....	25
7.1.3 OPLOSMIDDELLIJM	26
7.1.4 SMELTLIJM.....	26
7.1.5 PVC-PLASTISOLEN	27
7.2 CHEMISCH HARDENDE LIJMEN.....	28
7.2.1 ACRYLAATLIJM.....	28
7.2.2 CYANOACRYLAATLIJM	29
7.2.3 ANAEROBE LIJM	30
7.2.4 UV-UITHARDENDE LIJM.....	30
7.2.5 EPOXYLIJM	31
7.2.6 POLYURETHAANLIJM.....	32
7.2.7 SILICONENLIJM.....	35
7.2.8 HYBRIDE POLYMEERLIJM	36
7.2.9 UREUMFORMALDEHYDELIJM	36
7.2.10 FENOL- /RESORCINOLLIJM	37
7.2.11 ANORGANISCHE LIJM	38
HOOFDSTUK 8: STRUCTURELE BEGLAZING.....	39
8.1 ALGEMEEN	39
8.2 BEVESTIGING	40
8.3 PROEFOPSTELLING EN VOORWAARDEN	41
8.3.1 INITIËLE MECHANISCHE STERKTE.....	42
8.3.2 MECHANISCHE STERKTE NA ARTIFICIËLE VEROUDERING	43
8.3.3 MECHANISCHE STERKTE NA MECHANISCHE VEROUDERING	44
8.4 DIMENSIONERING LIJMLAAG.....	45
8.4.1 BEZWIJKGRENSTOESTAND	46
8.4.2 GEBRUIKSGRENSTOESTAND	49
8.5 LIJMYPES	49
8.6 PRAKTISCHE BEOORDELING.....	50
8.7 KRITISCHE BENADERING	51
HOOFDSTUK 9: STRUCTUREEL VERLIJMEN GEVELPANELEN	52
9.1 ALGEMEEN	52
9.2 SOORTEN GEVELPANELEN	52
9.2.1 PANELEN VAN NATUURSTEEN.....	52
9.2.2 PANELEN VAN METAAL	53
9.2.3 HPL-PANELEN.....	53
9.2.4 PANELEN OP HOUTBASIS.....	53
9.2.5 VEZELPANELEN	54
9.3 PROEFOPSTELLING EN VOORWAARDEN	54
9.4 DIMENSIONERING.....	56
9.4.1 BEZWIJKGRENSTOESTAND	56
9.4.2 GEBRUIKSGRENSTOESTAND	56
9.5 PRAKTISCHE BEOORDELING.....	57
9.6 LIJMYPES	57
9.7 KRITISCHE BENADERING	58

HOOFDSTUK 10:	<u>BUITENGEVELISOLATIESYSTEMEN</u>	59
10.1	ALGEMEEN	59
10.2	PROEFOPSTELLING EN VOORWAARDEN	60
10.2.1	HECHTINGSSTERKTE LIJM - SUBSTRAAT	60
10.2.2	HECHTINGSSTERKTE LIJM – ISOLATIEPANEEL	61
10.3	LIJMYPES	61
10.4	PRAKTISCHE BEOORDELING	62
10.5	KRITISCHE BENADERING	63
HOOFDSTUK 11:	<u>VERLIJMEN ELEMENTEN UIT CELLENGLAS</u>	64
11.1	ALGEMEEN	64
11.2	PRAKTISCHE BEOORDELING	64
11.3	LIJMYPES	66
11.4	KRITISCHE BENADERING	66
HOOFDSTUK 12:	<u>LIJM IN SANDWICHELEMENTEN</u>	67
12.1	ALGEMEEN	67
12.2	PROEFOPSTELLING EN VOORWAARDEN	68
12.3	LIJMYPES	71
12.4	KRITISCHE BENADERING	71
HOOFDSTUK 13:	<u>UITWENDIG GELIJMDE WAPENING</u>	72
13.1	ALGEMEEN	72
13.2	PROEFOPSTELLING EN VOORWAARDEN	73
13.2.1	AFSCHUIFSTERKTE	73
13.2.2	AFTREKSTERKTE	74
13.2.3	OVERIGE EISEN	75
13.3	PRAKTISCHE BEOORDELING	76
13.4	LIJMYPES	76
13.5	KRITISCHE BENADERING	77
HOOFDSTUK 14:	<u>DAKDICHTINGEN</u>	78
14.1	ALGEMEEN	78
14.2	LIJMYPES	79
14.2.1	BITUMINEUZE AFDICHTINGSMEMBRANEN: SBS EN APP	79
14.2.2	EPDM RUBBERDICHTINGEN	80
14.2.3	PVC DICHTINGEN	81
14.2.4	FPO DICHTINGEN	81
14.2.5	OPMERKINGEN BETREFFENDE ISOLATIES	81
14.3	PRAKTISCHE BEOORDELING	82
14.3.1	ALGEMEEN	82
14.3.2	KOUDLIJMEN	82
14.3.3	CONTACTLIJMEN	83
14.3.4	OPLOSMIDDELVRIJE POLYURETHAANLIJMEN	83
14.3.5	NAADVERBINDING	83
14.4	KRITISCHE BENADERING	84

<u>HOOFDSTUK 15: LIJM IN STRUCTURELE HOUTELEMENTEN.....</u>	<u>85</u>
15.1 ALGEMEEN.....	85
15.2 LIJMTYPES.....	85
15.3 KRITISCHE BENADERING	86
<u>HOOFDSTUK 16: LIJMEN VAN GEVELSTEEN EN VARIANTEN.....</u>	<u>87</u>
16.1 ALGEMEEN.....	87
16.2 LIJMMORTELTYPES	88
16.3 PRAKTISCHE BEOORDELING	88
16.4 KRITISCHE BENADERING	89
<u>HOOFDSTUK 17: ALGEMENE SAMENVATTING</u>	<u>90</u>
<u>REFERENTIES.....</u>	<u>91</u>

HOOFDSTUK 1: INLEIDING

Hoewel de eerste lijmtoeepassingen dateren van 36.000 jaar geleden en lijm een ideaal product vormt voor allerlei toepassingen, kampt het met een imagoprobleem. Lijm heeft immers nog onvoldoende bewezen om reeds het volle vertrouwen te genieten van enkele vakgroepen. Het is dan ook merkwaardig dat de vliegtuigindustrie of automobielsector veel gebruik maken van lijmverbindingen. Zo wordt de voorruit van hedendaagse auto's gelijmd en geldt hetzelfde voor vliegtuigramen. Hoewel iedereen zich veilig voelt in wagens of vliegtuigen, heerst er toch een negatieve perceptie wanneer lijm als constructief verbindingselement wordt toegepast in de bouw- of metaalsector.

Het doel van dit werk is dan ook een literatuurstudie samen te stellen van structurele lijmtoeepassingen in de bouwsector, zodat architecten of bouwkundig ingenieurs meer vertrouwd worden met dit product.

Het eerste deel zal een algemene inleiding geven over lijm en lijmtoeepassingen. Hierin wordt onder meer ingespeeld op de theoretische achtergrond van een lijmverbinding. Zo worden enkele hechtingsmechanismen, voorbehandelingstechnieken en constructieve aspecten behandeld.

In een tweede deel worden vervolgens enkele courante lijmtypes beschreven. Dit met de bedoeling meer inzicht te verkrijgen in de eigenschappen van de verschillende lijmsorten.

Hoewel het eerste en tweede deel niet het hoofddoel uitmaken van dit werk, is het toch belangrijk ze op te nemen. Het is immers noodzakelijk voldoende kennis op te bouwen zodat de begrippen van het derde gedeelte ondersteund worden.

In dit derde en laatste gedeelte tenslotte worden structurele lijmtoeepassingen uit de bouwsector besproken. Na een algemene inleiding wordt nagegaan waaraan de lijmtypes moeten voldoen. Vervolgens wordt een opsomming gemaakt van de geschikte lijmtypes om nadien af te sluiten met een kritische beschouwing. De toepassingen die in dit werk zijn opgenomen worden weergegeven in onderstaande lijst.

- STRUCTURELE BEGLAZING
- STRUCTUREEL VERLIJMEN GEVELPANELEN
- BUITENGEVELISOLATIESYSTEMEN
- VERLIJMEN ELEMENTEN UIT CELLEGLAS
- LIJM IN SANDWICHELEMENTEN
- UITWENDIG GELIJMDE WAPENING
- DAKDICHTINGEN
- LIJM IN STRUCTURELE HOUTELEMENTEN
- LIJMEN VAN GEVELSTEEN EN VARIANTEN

HOOFDSTUK 2: HISTORIEK

De eerste lijmtoeepassingen dateren van 36.000 jaar geleden [E. BOEDA – 1]. Houten handvaten werden aan vuurstenen gekleefd door gebruik te maken van natuurlijke bitumen. Omstreeks 4.000 v. Chr. werd plantaardige lijm gebruikt voor het verlijmen van vazen en het afwerken van standbeelden. De eerste dierlijke lijmen, waarbij gelatine dienst doet als uithardingsmiddel, dateren van 2.000 v. Chr. De gelatine werd verkregen door het urenleng koken van beenderen of huiden, waarbij eiwitten een hydrolyse ondergaan.

Ook de Egyptenaren maakten gretig gebruik van lijm. Zo vertonen allerhande voorwerpen en schilderijen er sporen van. De graftombe van farao Toetanchamon was met lijm afgedicht en aardewerken potten werden hersteld met hars. Ook de Grieken en Romeinen gebruikten in hun ontwikkeling vormen van lijmproducten. Zo werd vanaf de 1^e eeuw na Chr. lijm toegepast bij fineertechnieken en het waterdicht maken van schepen. Na de 11^e eeuw werden steeds meer bevolkingsgroepen vertrouwd met lijm. Zo gebruikte het Mongoolse leger onder leiding van Djengis-Khan (1162-1227) gelamineerde handbogen, waarbij laagjes hout, zijde en hoorn werden verbonden door lijm [2]. Deze techniek werd later ook overgenomen door Antonio Stradivari (1644-1737) voor het vervaardigen van zijn violen (Figuur 1).



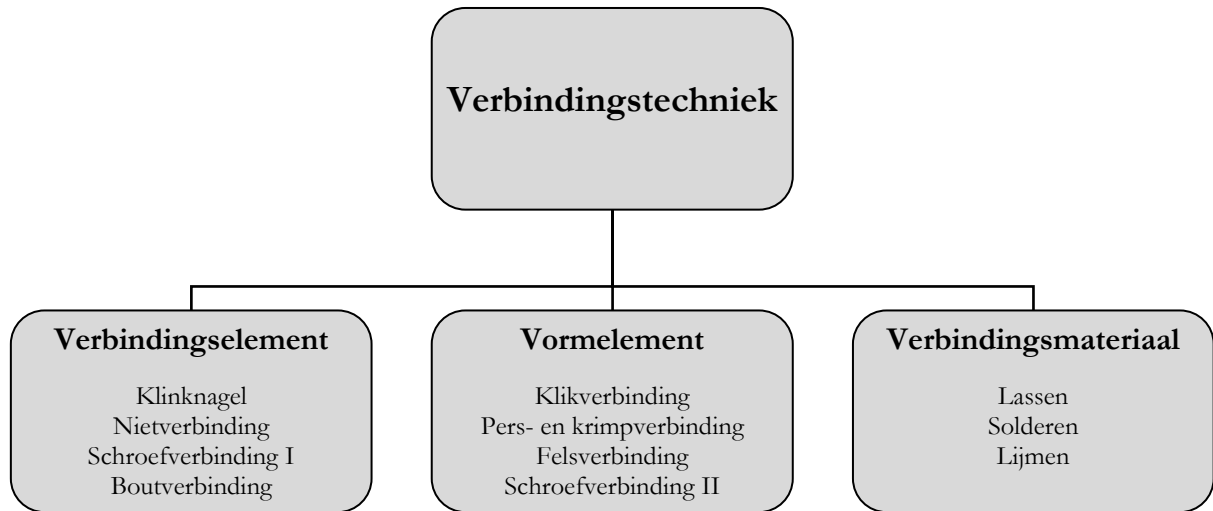
Figuur 1: Antonio Stradivari (© www.altontobey.com)

Vanaf het midden van de 18^e eeuw volgt lijm de weg van de industriële revolutie. In Engeland worden de eerste patenten uitgeschreven, om vervolgens omstreeks 1900 op verschillende plaatsen in de wereld industrieel te worden geproduceerd.

Vanaf 1920 werden de eerste synthetische lijmen ontwikkeld, om na Wereldoorlog II uit te groeien tot een wereldwijd gebruikt product.

HOOFDSTUK 3: LIJM IN DE RUIMTE DER VERBINDINGEN

Wanneer verschillende onderdelen aan elkaar worden verbonden, kan een classificatie worden opgesteld naar het verbindingsprincipe. Zo wordt onderscheid gemaakt tussen een verbinding door middel van een verbindingselement, vormelement en verbindingsmateriaal (Figuur 2). De eerste twee groepen worden in de literatuur [3] ook wel omschreven als mechanisch verbinden.



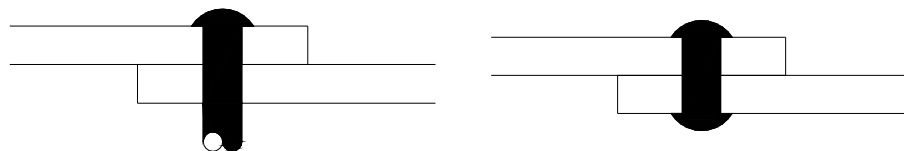
Figuur 2: Organigram verbindingstechniek

3.1 VERBINDINGSELEMENT

Bij deze verbindingstechniek wordt gebruik gemaakt van een extern element, welke door het al dan niet plastisch vervormen twee of meerdere delen met elkaar verbindt.

Verbindingselementen die een plastische vervorming ondergaan zijn bijvoorbeeld klinknagelverbindingen of nietverbindingen. De eerste bezit een massieve kop en gladde, massieve steel. De klinknagel wordt in een gat van het plaatmateriaal geplaatst, waarna de voorverwarmde steel plastisch wordt vervormd en zijn uiteindelijke vorm verkrijgt (Figuur 3).

Verbindingselementen die geen plastische vervorming ondergaan zijn bijvoorbeeld schroefverbindingen of boutverbindingen. Het verschil tussen beiden zit hem in de wijze van aandraaien. Bij een schroefverbinding gebeurt aandraaien door middel van een rechte sleuf, kruissleuf, binnenvierkant of zeskant in de kop. Een bout daarentegen bezit een kop welke aan de buitenkant wordt aangedraaid.

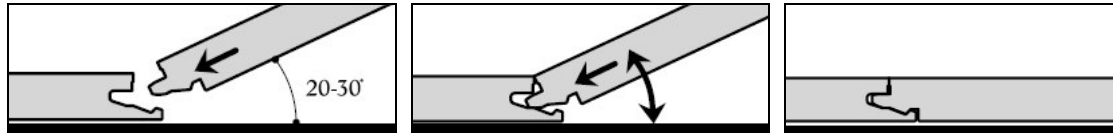


Figuur 3: Klinknagelverbinding: Links: onbewerkt - Rechts: plastisch vervormd

3.2 VORMELEMENT

Bij deze techniek zijn de te verbinden elementen van een speciale vorm voorzien, waardoor ze verankering vinden in elkaar. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een klikverbinding, pers- en krimpverbinding, felsverbinding en schroefverbinding.

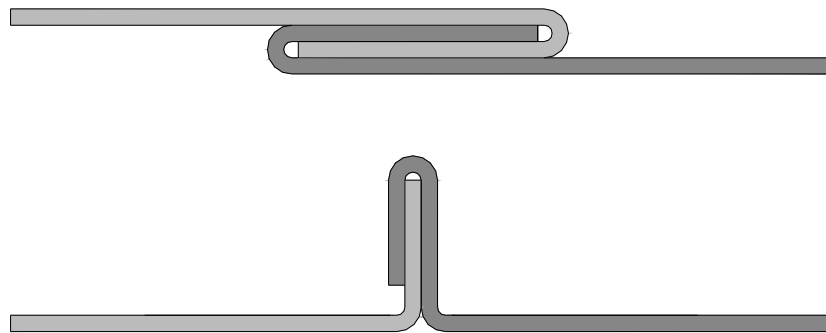
Een klikverbinding vinden we bijvoorbeeld terug bij laminaatparket. Door de plaatranden van een nok en snaphaak te voorzien kunnen deze eenvoudig in elkaar worden geklikt (Figuur 4).



Figuur 4: Plaatsingswijze laminaatparket met kliksysteem (© www.quick-step.com)

Een krimpverbinding wordt deels teruggevonden bij klinknagels. Door het afkoelen van de steel krimpt het staal en treedt er een verkorting op. Dit veroorzaakt een spanning in de nagel welke op het plaatmateriaal wordt overgedragen en de verbinding deels op wrijving doet baseren.

Een felsverbinding komt tot stand door het basismateriaal om te buigen, in te haken of samen te drukken (Figuur 5). Deze techniek heeft als grote voordeel de mogelijkheid thermische zettingen op te nemen.



Figuur 5: Felsverbinding

De schroefverbinding in deze categorie verschilt met deze uit de categorie *verbindingselement* (paragraaf 3.1). Hier bezitten de elementen zelf een schroefdraad, in tegenstelling tot de vorige categorie waar met externe schroeven wordt gewerkt. Een voorbeeld hiervan is een biljartkeu, welke uit twee delen bestaat en is voorzien van respectievelijk inwendige en uitwendige schroefdraad.

3.3 VERBINDINGSMATERIAAL

Bij deze verbindingstechniek wordt een extern materiaal gebruikt welke de te verbinden delen aan elkaar hecht. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een lasverbinding, soldeerverbinding en lijmverbinding.

3.3.1 LASVERBINDINGEN

Bij deze verbindingstechniek worden twee delen van hetzelfde materiaal samengesmolten. De warmte, nodig voor samensmelten, kan op verschillende manieren geleverd worden: mechanisch, thermisch, elektrisch en via straling.

Lasverbindingen worden vaak gebruikt ter verbinding van metalen, waarbij de las minstens even sterk dient te zijn als de te verbinden delen. Nadeel is dat er een hoeveelheid warmte in de materialen wordt ingebracht, die ongunstige effecten zoals vervormingen of weggloeien van eigenspanningen kunnen teweegbrengen.

3.3.2 SOLDEERVERBINDINGEN

Deze verbindingstechniek sluit nauw aan bij de lasverbindingen. Het enige verschil is de aard van het vulmateriaal. Bij lassen is dit immers hetzelfde materiaal als de te verbinden elementen, bij solderen is dit een metallische tussenstof.

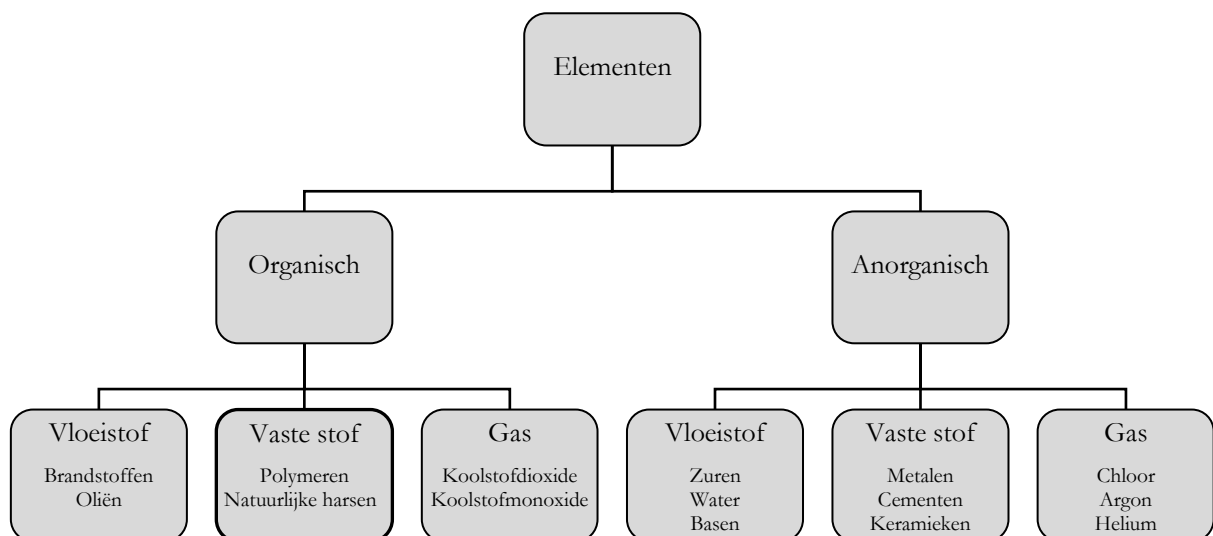
Wanneer het vulmateriaal een laag smeltpunt heeft ($<538^{\circ}\text{C}$), wordt de term solderen of zachtsolderen gebruikt. De legering is meestal op basis van lood en zink.

Heeft het vulmateriaal daarentegen een hoge smeltemperatuur ($>538^{\circ}\text{C}$), doch steeds lager dan het smeltpunt van de te verbinden materialen, is de term brazeren of hardsolderen aan de orde. Deze verbindingstechniek heeft een merkkelijk hogere sterkte dan zachtsolderen. De gebruikte legeringen zijn meestal op basis van koper, zink en zilver.

3.3.3 LIJMVERBINDINGEN

Bij een lijmverbinding worden twee elementen met elkaar verbonden door gebruik te maken van een niet-metallische tussenstof [3]. Deze tussenstof, lijm, hecht zich aan beide materialen en bezit zelf ook enige sterkte. Een lijmverbinding kan dus aanzien worden als de tegenhanger van een soldeerverbinding, waarbij de chemische aard van de tussenstof voor een onderscheid zorgt.

Deze definitie dient echter genuanceerd te worden. Volgens bovenstaand opzicht kunnen verbindingen op calciumhoudende basis zoals cement geclassificeerd worden als lijm. Cement is namelijk opgebouwd uit verschillende oxides zoals calciumoxide en siliciumoxide, welke niet-metallisch zijn. Doch worden cementverbindingen meestal niet als lijm aanzien [Prof. Dhooghe A., Universiteit Gent]. In de wereld van de kunststoffen spreekt men dan ook slechts van lijm wanneer de stof organisch is en polymeren bevat (Figuur 6). Desgevallend kunnen ook organische bindmiddelen met een basis van natuurlijke harsen als lijm worden bekeken. Dit impliceert echter dat alle anorganische verbindingsmiddelen zoals anorganische lijmen (zie paragraaf 7.2.11) en kalk- en cementhoudende producten niet als lijm worden geclassificeerd. Deze theorie wordt in dit werk overgenomen, hoewel sommige anorganische producten ter volledigheid zullen worden beschreven.



Figuur 6: Overzicht van alle elementen [4]

HOOFDSTUK 4: ALGEMENE LIJMPRINCIPES

Een lijmverbinding wordt gekenmerkt door twee te verbinden onderdelen (substraten) en een lijm laag. In de literatuur [5] [6] wordt ook vaak van een grenslaag of interface gesproken. Hiermee wordt de lijm bedoeld welke raakt aan het substraat, en mogelijk een andere uitharding kent dan de rest van de lijm.

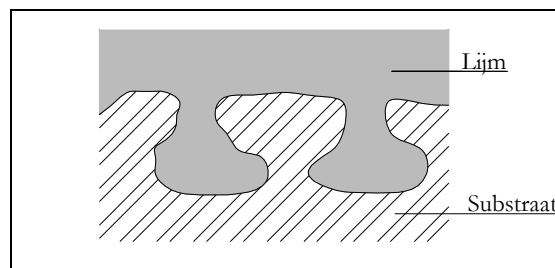
4.1 HECHTINGSMECHANISMEN

Bij een lijmverbinding zijn twee begrippen van primordiaal belang: adhesie en cohesie. Adhesiekrachten treden op tussen de moleculen van twee verschillende materialen. Cohesiekrachten daarentegen zijn aanwezig tussen de moleculen van één materiaal. Wanneer we dit toetsen aan een lijmverbinding zullen de adhesiekrachten optreden tussen lijm en substraat, terwijl cohesiekrachten in de lijm zelf aanwezig zijn. Wanneer één mechanisme faalt, wordt de hele lijmverbinding verbroken. Het principe dat de sterkte wordt bepaald door de zwakste schakel is hierbij van toepassing.

Cohesie is afhankelijk van de eigenschappen van de lijm zelf. Adhesie daarentegen is een wisselwerking tussen de eigenschappen van het substraat en de lijm, waardoor er verschillende hechtingsmechanismen te onderscheiden zijn.

4.1.1 MECHANISCHE VERANKERING

Mechanische verankering of interlocking is het hechtingsmechanisme waarbij de lijm in de onregelmatigheden van het substraatoppervlak dringt en vervolgens uithardt [6] (Figuur 7). De mate van indringing is zeer belangrijk bij deze theorie en afhankelijk van enkele factoren zoals oppervlakteruwheid en lijmviscositeit. Bij de oppervlakteruwheid zijn de parameters poriënvorm, -diepte en -diameter van belang. Het is dan ook noodzakelijk voor de verlijming het substraatoppervlak grondig te reinigen teneinde alle poriën zuiver te maken. Hierdoor zijn ze toegankelijk voor het binnendringen van de lijmspecie. De lijmviscositeit wordt vooral bepaald door de temperatuur. Bij een hoge temperatuur wordt de lijm minder stroperig waardoor ze meer vloeit en beter in de poriën dringt.



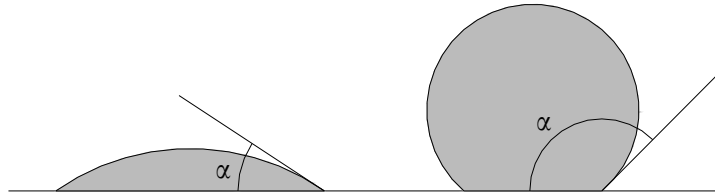
Figuur 7: Mechanische verankering – interlocking

4.1.2 ADSORPTIE – SPECIFIEKE ADHESIE

Deze theorie is de meest belangrijke adhesie-theorie [6]. Bij adsorptie hechten de moleculen van een gas of vloeistof zich aan het oppervlak van een vaste stof of vloeistof. Voorwaarde om een goede adsorptiekracht te genereren is de gelijkmatige verdeling van de lijm op het substraatoppervlak [5]. Aangezien de krachten maar over een kleine afstand actief zijn, moet de lijm het substraat zo dicht mogelijk benaderen.

Een belangrijke parameter binnen dit kader is de oppervlaktespanning, welke het natuurlijk verschijnsel is waarbij een vloeistofoppervlak zich als een veerkrachtige laag gedraagt [7]. Deze oppervlaktespanning is een samentrekkende kracht welke de vloeistofmoleculen wil samenhouden. Hiertegenover heeft een vaste stof een aantrekkende kracht of vrije oppervlakte-energie, welke de vloeistof aantrekt en haar

samentrekkende kracht probeert te doorbreken. Wanneer een vloeistofdruppel op een vast materiaal wordt geplaatst, zullen oppervlaktespanning en vrije oppervlakte-energie, samen met de vorming van een contacthoek een evenwicht bereiken. Deze contacthoek is de hoek die zich instelt tussen de horizontale en de raaklijn tegen de vloeistofdruppel (Figuur 8).



Figuur 8: Voorstelling contacthoek: Links: goede bevochtiging – Rechts: slechte bevochtiging

Wanneer de vrije oppervlakte-energie van het vaste materiaal groter is dan de oppervlaktespanning van de vloeistof, worden alle samentrekkende krachten doorbroken en treedt er een totale benatting (*wetting*) op. De contacthoek is in dit geval gelijk aan nul. Een voorbeeld hiervan is siliconenlijm met een oppervlaktespanning van $21\text{MJ}/\text{m}^2$ op een glasoppervlak met een vrije oppervlakte-energie van $100\text{MJ}/\text{m}^2$.

Wanneer de vrije oppervlakte-energie van het vaste materiaal kleiner is dan de oppervlaktespanning van de vloeistof, stelt er zich een contacthoek in. Indien deze contacthoek kleiner blijft dan 90° wordt het oppervlak alsnog benat. Is de contacthoek daarentegen groter dan 90° , dan is er geen benatting en worden er vloeistofdruppels gevormd. Substraten met een kleine vrije oppervlakte-energie zoals teflon ($18,5\text{MJ}/\text{m}^2$) zullen de lijm dus mogelijk slecht bevochtigen. Bovendien zorgt deze kleine vrije oppervlakte-energie voor weinig aantrekkingskracht met de lijmoleculen.

In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van de vrije oppervlakte-energie en oppervlaktespanning van respectievelijk enkele vaste stoffen en vloeistoffen [7] [8].

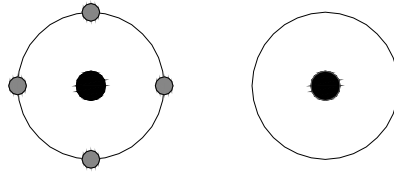
Vaste stof	Vrije oppervlakte-energie (MJ/m^2)	Vloeistof	Oppervlaktespanning (MJ/m^2)
Teflon (PTFE)	18,5	Silicone	21
Silicone	24	Acryl polymeer	40
Polyethyleen (PE)	31	Water	72,2
Polyproppeen (PP)	31		
PVC	39		
Glas	100		
Metalen	> 500		

Naast de oppervlaktespanning is ook de viscositeit van de lijm belangrijk voor een goede bevochtiging [5]. Zoals reeds besproken in paragraaf 4.1.1 laat een minder viskeuze lijm zich makkelijker uitspreiden.

Tussen het substraatmateriaal en de lijm zijn moleculaire krachten aanwezig. Deze moleculaire krachten worden in twee hoofdgroepen ingedeeld. Een eerste groep zijn de sterke **intramoleculaire krachten**, waarbij er een krachtwerking optreedt tussen atomen in eenzelfde molecule. Deze intramoleculaire krachten worden in de literatuur ook primaire krachten genoemd, en zijn onder te verdelen in drie groepen: ionische-, covalente-, en metaalbindingen.

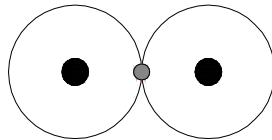
- Een *ionische binding*, elektrovalente binding of kortweg ionbinding is een zeer sterke binding tussen atomen t.g.v. de elektrostatische aantrekking tussen een negatief en een positief geladen ion (bv. MgO). De binding treedt meestal op tussen atomen met een metaalkarakter en atomen met een niet-metaalkarakter. De bindingsenergie bedraagt 590 à $1050\text{kJ}/\text{mol}$ [6].

Hoewel de ionbinding wordt ingedeeld onder een intramoleculaire kracht is dit niet geheel waar. Er worden namelijk geen moleculen gevormd, dus kan er ook geen krachtswerking in optreden. Doch wordt de ionbinding in de literatuur [6] vaak onder de intramoleculaire krachtswerking geïnclassificeerd.



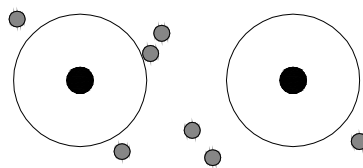
- Een *covalente binding* of atoombinding is een sterke binding tussen atomen waarbij deze één of meer gemeenschappelijke elektronenparen hebben (bv. H_2). De elektronen worden als het ware 'gedeeld' door twee atomen. Covalent gebonden atomen vormen samen een molecule en treden op tussen niet-metalen. De bindingsenergie bedraagt 63 à 710kJ/mol [6].

In de lijmwereld treden covalente bindingen op ter vorming van ketens macromoleculen. Ook tussen lijmoleculen en primermoleculen, beide meestal polymeren en dus niet-metallisch zijn covalente bindingen aanwezig.



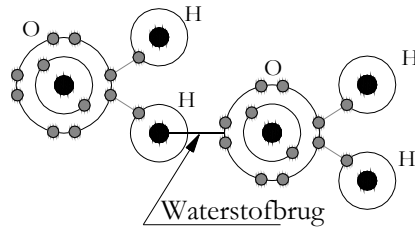
- Een *metallische binding* of metaalbinding is een sterke binding tussen atomen van elektropositieve elementen (metalen). De elektronen van de buitenste schil worden gemeenschappelijk gebruikt, doch is de aantrekking tussen elektronen en atoomkern klein. Hierdoor kunnen de elektronen vrij bewegen tussen de atomen (bv. koper). De bindingsenergie bedraagt 113 à 347kJ/mol [6].

Ook hier worden, conform de ionbinding, geen moleculen gevormd, waardoor de indeling onder intramoleculaire krachten strikt genomen foutief is. Doch wordt de metaalbinding in de literatuur [6] vaak onder deze noemer geïnclassificeerd.



Een tweede groep moleculaire krachten zijn de **intermoleculaire krachten**, waarbij er een zwakke krachtswerking heerst tussen de atomen van verschillende moleculen. Deze intermoleculaire krachten, in de literatuur [6] soms ook secundaire krachten genoemd, worden op zich weer onderverdeeld in twee soorten: waterstofbruggen en Van der Waalskrachten.

- Een *waterstofbrug* is de krachtswerking tussen een elektronenpaar op een sterk elektronegatief atoom (bv. zuurstof, zwavel of fluor) en een naburig waterstof-atoom, gebonden aan een ander sterk elektronegatief atoom (Figuur 9). Het sterk elektronegatief atoom mag geen metaal zijn. De bindingsenergie is relatief klein en bedraagt slechts 10 à 30kJ/mol [6].

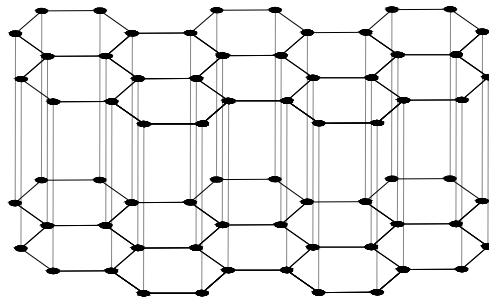


Figuur 9: Waterstofbrug tussen twee watermoleculen

- *Van der Waalskrachten* treden op tussen moleculen met een gesloten elektronenschil, en worden opgesplitst in London dispersiekrachten en dipool-dipool krachten. In de lijmwereld worden ze teruggevonden als de zwakke binding tussen ketens macromoleculen.

London dispersiekrachten zijn aanwezig tussen alle atomen, meer bepaald tussen de kern van het ene atoom en de elektronen van het ander atoom. De bindingsenergie is zeer klein en bedraagt slechts 0,08 à 42kJ/mol. In onderstaande Figuur 10 wordt de chemische structuur van grafiet weergegeven, waarbij de koolstoflagen verbonden zijn door Van der Waalskrachten.

Bij dipool-dipoolkrachten heerst er een zwakke krachtswerking tussen twee dipolen (bindingsenergie = 4 à 42kJ/mol). Een dipoolmolecule wordt gekenmerkt door twee polen met tegengestelde polariteit, waardoor de zwaartepunten van de positieve en negatieve ladingen niet samenvallen. Zo is een watermolecule (H_2O) een voorbeeld van een dipool.



Figuur 10: Van der Waalskrachten tussen twee koolstoflagen

4.1.3 ELEKTRONISCHE THEORIE

Deze theorie [6] is enkel geldig wanneer substraat en lijm verschillende materialen zijn. De theorie berust op het feit dat er een elektronenoverdracht optreedt tussen lijm en substraat op het moment de twee materialen met elkaar in contact komen. Dit mechanisme is echter zelden van toepassing.

4.1.4 DIFFUSIETHEORIE

Deze theorie [6] is enkel geldig wanneer zowel lijm als substraat polymeren zijn. Er treedt een diffusie¹ op van deeltjes in de grenslaag, waardoor polymeerketens worden gevormd en lijm en substraat als het ware samensmelten tot één geheel. Een voorbeeld hiervan is terug te vinden bij het verlijmen van PVC met PVC-plastisolen (paragraaf 7.1.5).

¹ Diffusie: Beweging van deeltjes ten gevolge van de kinetische energie die ze bezitten.

4.2 LIJMPROCES

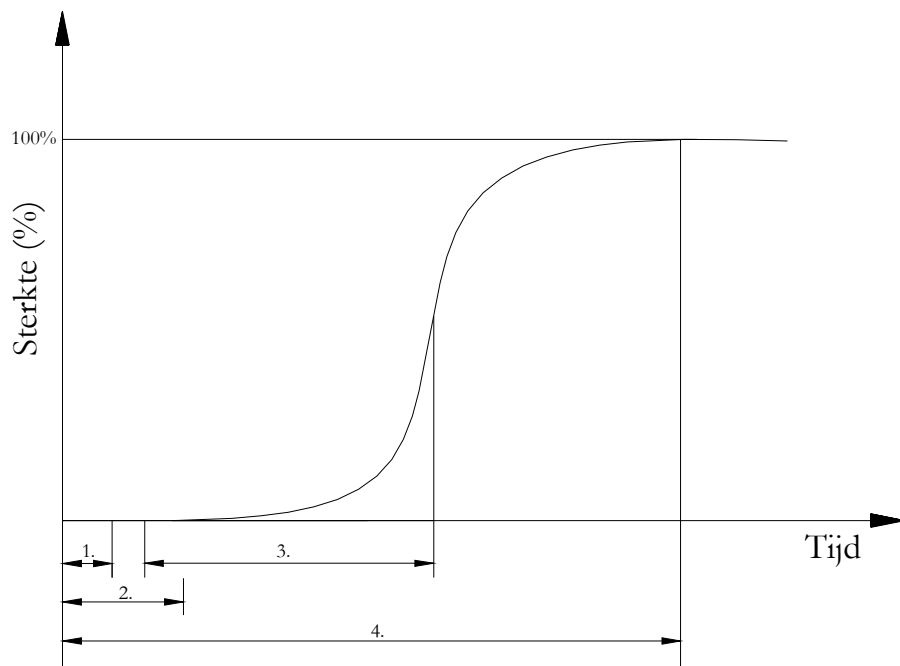
Een lijmp proces wordt gekarakteriseerd door verschillende fases [3] [9].

De **opbrengtijd (1.)** wordt aanzien als de tijd welke nodig is om de lijm op het substraatoppervlak aan te brengen. Het begin van deze fase wordt als het nulpunt aanzien.

De **open tijd of verwerkingstijd (2.)** is de tijd waarbinnen de lijm niet reageert. De opbrengtijd dient dus volledig binnen het gebied van de open tijd gelegen te zijn. Indien dit niet het geval is, zal de lijmverbinding zijn maximale eindsterkte niet bereiken.

De **perstijd of aanvangssterkte (3.)** is de minimale tijd waarbinnen de lijmverbinding op zijn plaats moet blijven. Na deze periode is er genoeg sterkte bereikt waardoor de lijmverbinding zelfstandig zal uitharden tot zijn eindsterkte. De perstijd is van vele factoren afhankelijk. Zo spelen de inwerkende krachten een bepalende rol, maar zijn ook de porositeit, luchtvochtigheid en temperatuur van belang. Het begin van de perstijd dient in de open tijd gelegen te zijn.

De **afbindtijd of uithardingstijd (4.)** tot slot is de tijd die het gehele lijmp proces in beslag neemt tot de verbinding zijn maximale sterkte heeft bereikt. Het nulpunt wordt aanzien als het beginpunt van deze fase.



Figuur 11: Verloop lijmp proces in functie van de tijd

Bovenstaande Figuur 11 geeft een theoretische voorstelling van een lijmp proces. Er dient wel te worden opgemerkt dat de vorm van de grafiek afhankelijk zal zijn van het lijmtyp e. Zo zal een cyanoacrylaatlijm of secundelijm (paragraaf 7.2.2) zeer snel zijn aanvangssterkte bereiken, terwijl de uithardingstijd relatief lang is. Dit lijmtyp e zal dan ook een aangepast grafiekverloop vertonen.

4.3 EIGENSCHAPPEN

Een lijmverbinding bezit verschillende voordelen in gebruik [2] [3] [5] [6]. Zo treedt er in de lijmlaag een quasi gelijkmatig spanningsverloop op. Dit in tegenstelling tot verbindingen met een vormelement, waar piekspanningen aanwezig zijn die het materiaal verzwakken (bv. klinknagelverbinding). In vele gevallen wordt bovendien de materiaalstructuur van het substraat niet gewijzigd of beschadigd. Het is soms mogelijk de verbinding ongedaan te maken zonder het substraat te beschadigen. Doordat de lijmlaag de twee materialen van elkaar scheidt kan er geen contacterosie optreden, hetgeen ook een belangrijk voordeel is.

Het is tevens mogelijk verschillende materialen met elkaar te verbinden, zonder dat er een verband bestaat tussen de substraatoppervlakken. Deze substraatoppervlakken mogen zeer klein zijn, zodat in de wereld van de miniaturisatie lijm een gekend product is. Ook een lijmverbinding voorzien welke elektrisch en thermisch geleidend of isolerend is vormt geen probleem.

Overige voordelen van een lijmverbinding zijn: gas- en vloeistofdichtheid in vele gevallen, elasticiteit in beperkte mate, de mogelijkheid grote oppervlakken te verbinden, lage kostprijs, lichte verbinding qua gewicht en de mogelijkheid tot trillingsdempende en transparante eigenschappen. Tot slot vormt een lijmverbinding een esthetisch gewaardeerde verbindingstechniek. De verbinding op zich is immers niet zichtbaar van buitenaf.

Niettegenstaande een lijmverbinding vele voordelen bezit zijn er ook enkele nadelen aanwezig. Zo is een lijmverbinding niet altijd constructief inzetbaar. Voor het overbrengen van grote krachten dient namelijk een groot lijmoppervlak beschikbaar te zijn, wat niet steeds aanwezig is. Ook door de inwerking van statische en dynamische krachten enerzijds, en chemische (zouten en zuren) en fysische (temperatuur, trillingen en straling) invloeden anderzijds is er een beperkt toepassingsgebied.

Tevens moeten er enkele moeilijkheden in het lijmproces overwonnen worden. In eerste instantie is de lijmverbinding moeilijk te berekenen, hetgeen leidt tot overdimensioneringen. Verder dient er een geschikte lijmkeuze te gebeuren, hetgeen relatief complex is daar dit afhankelijk is van het type materiaal, de toepassing en de omgeving. Voorts kan het noodzakelijk zijn het substraatoppervlak aan een voorbehandeling te onderwerpen om de kwaliteit van de verbinding tot een maximum te leiden. Ook wordt de totale sterkte van de verbinding niet onmiddellijk bereikt. Dit impliceert dat er gedurende het lijmproces aanbrengeapparatuur noodzakelijk is om de onderdelen op de juiste plaats te houden tot een voldoende sterkte is bereikt. Het gehele lijmproces dient hierdoor nauwkeurig te worden gecontroleerd, waarbij de parameters tijd, temperatuur en druk van cruciaal belang zijn. Bij het lijmproces dienen er overigens ook voldoende persoonlijke beschermingsmaatregelen aanwezig te zijn, daar sommige lijmen toxische bestanddelen bevatten.

Tot slot bezitten sommige lijmen het nadeel onderhevig te zijn aan krimp bij uitharden en kruip, hetgeen kan leiden tot hoge interne spanningen

HOOFDSTUK 5: VOORBEHANDELING

5.1 PRINCIPE EN DOEL

Een voorbehandeling van het substraatoppervlak is in vele gevallen noodzakelijk. Dit kan enerzijds betrekking hebben op de kwaliteit van de lijmverbinding. Anderzijds kunnen hierdoor materialen verlijmd worden waar dat aanvankelijk was uitgesloten.

De substraten voorzien van een voorbehandeling heeft volgende zaken tot doel [5].

- Het verwijderen van de oppervlaktelaag van het substraat, welke kwalitatief onvoldoende is of onvoldoende hecht op het onderliggende gedeelte. Voorbeelden hiervan zijn vetten of oliën welke op het oppervlak liggen, of een losliggende oxidehuid bij metallische onderdelen.
- Het maximaliseren van het contactoppervlak tussen lijmlaag en substraat, door het opruwen van het substraat.
- Ervoor zorgen dat de toestand van het substraatoppervlak ongewijzigd blijft tussen een bepaalde voorbehandeling en het eigenlijke lijmp proces. Zo kunnen metalen substraatoppervlakken sterk actief worden wanneer ze een voorbehandeling hebben ondergaan, waardoor er stof wordt opgenomen. Om dit probleem te vermijden kan er vlak na de voorbehandeling een primer worden aangebracht, zodat deze delen geen stof meer opnemen en langer kunnen gestockeerd worden. Dit zorgt voor een meer flexibel productieproces.

5.2 VOORBEHANDELINGSMETHODES

5.2.1 ONTVETTEN

Meestal vormt het ontvetten een standaardprocedure bij een lijmp proces. In vele gevallen volstaat deze voorbehandeling als enige techniek. Wanneer overige voorbehandeling noodzakelijk is, wordt het substraatoppervlak toch eerst ontvet. Biologisch afbreekbare, niet-brandbare reinigingsmiddelen op waterbasis worden wegens milieuredenen veel gebruikt.

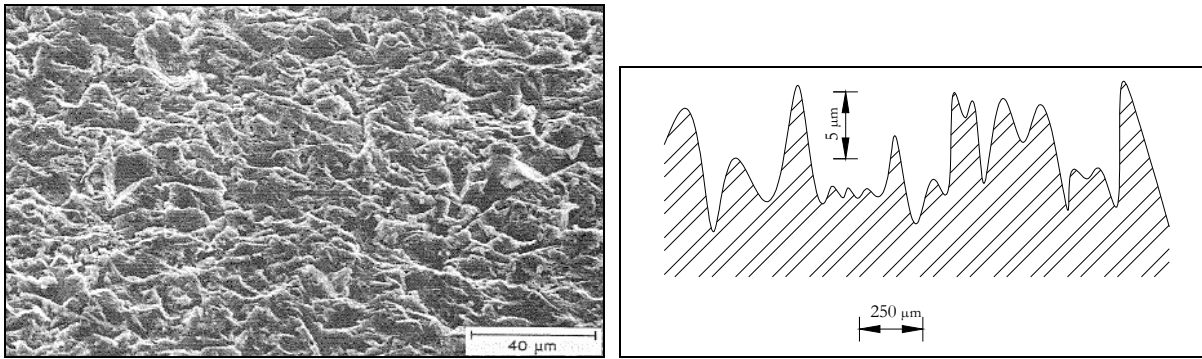
Ontvetten kan enerzijds gebeuren door het substraatoppervlak te borstelen, besproeien of wrijven met een vochtige doek. Anderzijds kan het substraat gedompeld worden in een ontvettingsbad, gevolgd door een spoeling met leidingwater en gedemineraliseerd water.

5.2.2 MECHANISCH BEWERKEN

Eerst wordt het substraat ontvet, zodat verontreinigingen niet dieper in het materiaal dringen. Het doel van een mechanische voorbehandeling is het verwijderen van zwakke oppervlaktelagen, het opruwen van het substraat en het creëren van een groter contactoppervlak. Algemeen kunnen vier technieken beschouwd worden: stralen, slijpen, schuren en borstelen.

Dikwijls wordt waargenomen dat mechanisch opruwen de adhesieve bindingssterkte verhoogt [7]. De oorzaak hiervan is echter niet de mechanische verankering, want er worden geen holten of poriën in de oppervlaktestructuur gecreëerd. Daarentegen stijgt de beschikbare oppervlakte met 5 à 30%, waardoor er een grotere adsorptie is tussen lijmlaag en substraat.

Een voorbeeld hiervan wordt gegeven door staal. Opperuwd staal vertoont een zeer piekerige oppervlaktestructuur, waarbij echter geen holten aanwezig zijn waar de lijm zich in kan nestelen (Figuur 12). Hoewel de oppervlakte microscopisch gezien ruw is, is er dus weinig sprake van mechanische verankering.



Figuur 12: Oppervlaktestructuur staal (© Kinloch [7])

Na deze behandeling dient het substraatooppervlak opnieuw ontvet te worden of gespoten met perslucht ter verwijdering van overgebleven straalmiddel of schuurstof.

5.2.3 CHEMISCH BEHANDELEN

In vele gevallen volstaat ontvetten, mechanisch behandelen en opnieuw ontvetten als totaal voorbehandelingsproces. Indien er echter bijkomende eisen worden opgelegd, wordt overgegaan tot een chemische behandeling. Etsen, beitsen en anodiseren zijn de meest voorkomende technieken.

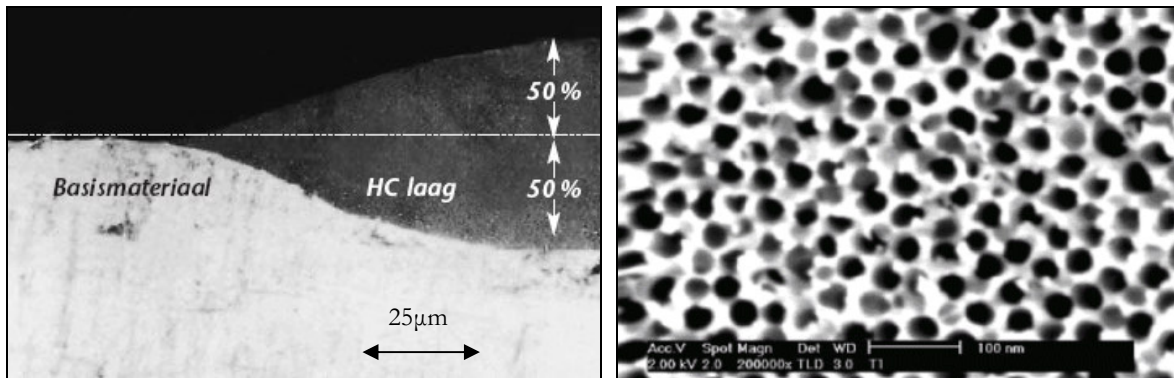
Bij *etsen* wordt het basismateriaal aangetast, waardoor de oppervlaktestructuur wijzigt. Hierdoor wordt enerzijds een betere mechanische verankering verkregen omdat er zich kraters in de oppervlaktestructuur vormen [5]. Anderzijds wordt een groter contactoppervlak verkregen, waardoor de adsorptiekracht verhoogt.

Beitsen is het aanbrengen van een sterk zuur of base op het substraatooppervlak, zodat zwakke oppervlaktelagen en oxiden worden verwijderd. Er dient echter op gelet het substraat niet te lang te beitsen, daar anders het zuiver basismateriaal wordt aangetast. Veel gebruikte zuuroplossingen zijn salpeterzuur (HNO_3) en fluorwaterstofzuur (HF).

Anodiseren wordt veelal na het beitsen toegepast, waarbij het substraat als anode wordt geschakeld. Het proces vindt plaats in een zuurelektrolyt (meestal zwavelzuur) bij temperaturen die net onder kamertemperatuur liggen. Tijdens de elektrische behandeling wordt atomaire zuurstof gevormd welke een oxidelaag vormt op het metaal. Deze beschermende microporeuze oxidehuid is hard, dicht en slijtvast en heeft wegens zijn poreuze structuur een goede mechanisch verankering met lijm [5]. Ze mag echter niet te groot worden of los komen te liggen, hetgeen een degradatie van het materiaal betekent. De oxidehuid vormt zich gedeeltelijk op het substraatooppervlak, en voorts in het metaal. Wanneer de deklaag dun is ($< 25\mu\text{m}$) komt de oxidehuid voor een derde boven het oorspronkelijk oppervlak te liggen en tweederde daaronder. Is de deklaag echter dikker ($> 50\mu\text{m}$), dan verdeelt de oxidehuid zich voor de helft boven en voor de helft onder het oorspronkelijk oppervlak. Deze opmerking is noodzakelijk om rekening te houden met de mate van volumetoename en maattoleranties [4]. De vorming van een poreuze eindlaag impliceert wel dat schadelijke stoffen uit de omgeving door deze laag heen kunnen dringen om vervolgens het basismateriaal te bereiken [10]. Hierdoor is er nog steeds gevaar voor corrosie, hetgeen vermeden moet worden. Daarom is het in vele gevallen noodzakelijk het materiaal te sealen, waarbij de poriën worden afgesloten. Na dit proces stijgt de corrosieweerstand aanzienlijk en wordt vuilopname voorkomen. Dit betekent echter wel dat de mogelijkheid tot mechanische verankeren voor een lijm verloren gaat. Hierdoor is het mogelijk om metalen welke later verlijmd worden niet te sealen. De lijm zorgt immers toch voor een dichte afsluiting van de omgeving.

Op Figuur 13 wordt een hard geanodiseerde oxidelaag (Hart Coat[®]) weergegeven op een aluminium substraat. Op de linkse figuur is duidelijk te zien dat de oxidelaag met dikte $50\mu\text{m}$ voor de helft boven en voor de helft onder het oorspronkelijk basismateriaal ligt. Op de rechtse figuur wordt het oppervlak van de oxidelaag microscopisch weergegeven na een SEM-opname (Scanning Electron Microscope). Deze

foto is ongeveer 200x meer uitvergroet dan de linkse foto, waardoor de poreuze structuur duidelijk zichtbaar wordt.

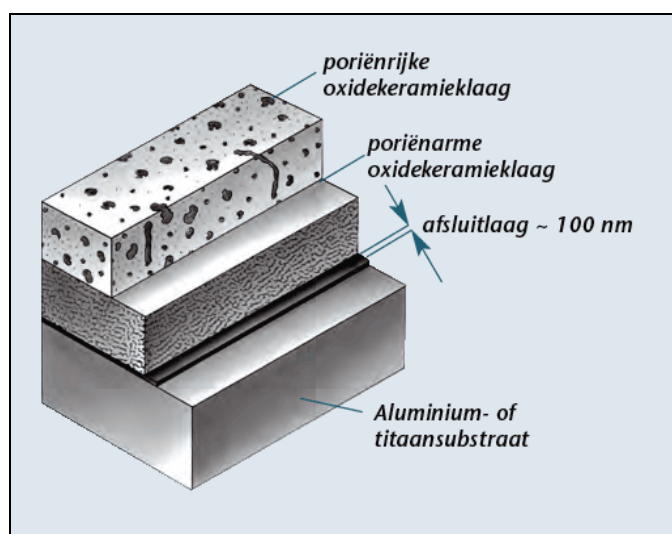


Figuur 13: Oppervlaktestructuur geanodiseerd aluminium (© www.aimt-group.com)

5.2.4 PLASMA BEHANDELEN - FYSISCH BEHANDELEN

Plasma is een gas waarvan de deeltjes geïoniseerd zijn. Het genereren van dit plasma kan in de lucht plaatsvinden (corona-ontladen) of bij een gereduceerde druk (gloeiontladen) [5]. Het bevat in beide gevallen atomen, moleculen, vrije elektronen en metastabiele deeltjes die naar een hogere energietoestand worden gebracht zodat moleculen dissociëren² en atomen ioniseren³. Het substraatoppervlak wordt hierdoor geactiveerd, waardoor een betere verbinding met de lijm wordt verkregen [11]. Er bestaan verschillende manieren om plasma te gebruiken: schoonmaken en etsen, met UV of ozon behandelen, polymeriseren van een primer, ionenimplantatie en plasma sprayen.

Bij *schoonmaken* bezitten de plasmadeeltjes genoeg energie om verontreinigingen met een laag moleculair gewicht te verwijderen. Bovendien bezit plasma de mogelijkheid het substraatoppervlak te *etsen* (of *anodiseren*). Deze laatste toepassing vormt dus een wisselwerking tussen chemisch en fysisch behandelen. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van een zoutoplossing als elektrolyt. Voor de anodisatie ontleedt zich zuurstofplasma op het oppervlak van het substraat, waardoor de randzone kortstondig smelt en twee oxidekeramieklagen vormt die zich hechten aan het oppervlak. De buitenste oxidekeramieklaag is poreus, waardoor de mechanische verankering aanzienlijk verbetert (Figuur 14). Deze toepassing komt onder andere voor bij het behandelen van aluminium, titaan en magnesium.



Figuur 14: Plasma anodiseren (© www.aimt-group.com)

² Dissociëren: Het splitsen van een molecule in atomen.

³ Ioniseren: Het toevoegen of verwijderen van een elektron bij een molecule of atoom.

Organische vervuiling is voornamelijk opgebouwd uit koolstof-koolstof bindingen. Deze bindingen verbreken wanneer ze in contact komen met de hoge energie van kortgolvig *UV-licht*. Blootstelling aan *ozon* geeft een gelijkaardig effect.

Bij het *plasmapolymeriseren van een primer* aan het substraat wordt het substraatooppervlak gereinigd door de plasmadeeltjes. Bovendien gebeurt de polymerisatie van de primer niet op basis van thermische effecten, maar door de aanwezigheid van plasma.

Bij een *ionenimplantatie* worden vreemde atomen of ionen door middel van een plasmabehandeling in het oppervlak geïnjecteerd.

Een laatste vorm van plasmagebruik is het *plasma sprayen*. Het komt erop neer metaalsubstraten van een metallische of keramische deklaag te voorzien. Dit gebeurt door poederdeeltjes te verwarmen en te versnellen, en ze vervolgens op het substraat te laten botsen.

5.2.5 GEBRUIK VAN PRIMERS

Primers hebben een tweedelig doel, waarbij in eerste instantie de lijmverbinding verbeterd wordt, en in tweede instantie het productieproces een meer flexibele vorm krijgt.

Het verbeteren van de lijmverbinding spitst zich toe op verschillende principes. Het meest voorkomende doel van een primer is een laag voorzien tussen substraat en lijm, welke goed hecht aan beide materialen. Voorts kunnen primers worden gebruikt om het substraatooppervlak vochtwerend te maken, waardoor het niet wordt aangetast door vocht en oxidatie. De duurzaamheid van de lijmverbinding zal bijgevolg sterk verhogen. Tenslotte worden primers gebruikt om het substraatooppervlak beter te bevochtigen.

Voor het creëren van een meer flexibel productieproces worden tevens primers gebruikt. Nadat substraten zijn voorbehandeld, kunnen ze opnieuw verontreinigingen opnemen voordat de lijmlaag wordt aangebracht. Dit zou betekenen dat de periode tussen voorbehandelen en lijmen zeer kort dient te zijn, hetgeen een moeilijk productieproces met zich meebrengt. Om een grotere tijdspanne tussen de twee fases te creëren kan vlak na de voorbehandeling een primer worden aangebracht die geen verontreinigingen opneemt. Dit laat vervolgens toe de substraten maandenlang te bewaren vooraleer ze worden verlijmd.

Primers kunnen op verschillende manieren worden aangebracht. Zo is het mogelijk het substraat kathodisch te dompellakken. Het werkstuk wordt als kathode geschakeld, en vervolgens in een lakbad met positief geladen lakdeeltjes gedompeld. Het negatief geladen werkstuk trekt de anodische deeltjes aan en zorgt voor een gelijkmatige film aan het oppervlak. Deze methode wordt vooral gebruikt bij complex geometrische toepassingen. Een tweede methode omvat het natlakken, waarbij de vloeibare primer op het werkstuk wordt gespoten. Tot slot is er het poedercoaten, waarbij elektrisch geladen lakdeeltjes aan een geaard metaal werkstuk worden aangebracht. Deeltjes en substraat hebben een tegengestelde lading, waardoor de lakdeeltjes gelijkmatig worden verspreid en hechten aan het oppervlak. Het geheel wordt in een oven verwarmd waardoor de deeltjes vloeibaar worden en definitief hechten aan het substraatooppervlak. Poedercoatings zijn veelal op basis van epoxy, polyester en polyurethaan. Epoxy wordt vooral gebruikt voor het creëren van een betere chemische resistentie, terwijl polyester en polyurethaan meer geschikt zijn voor buitentoeepassingen.

HOOFDSTUK 6: CONSTRUCTIEVE EIGENSCHAPPEN

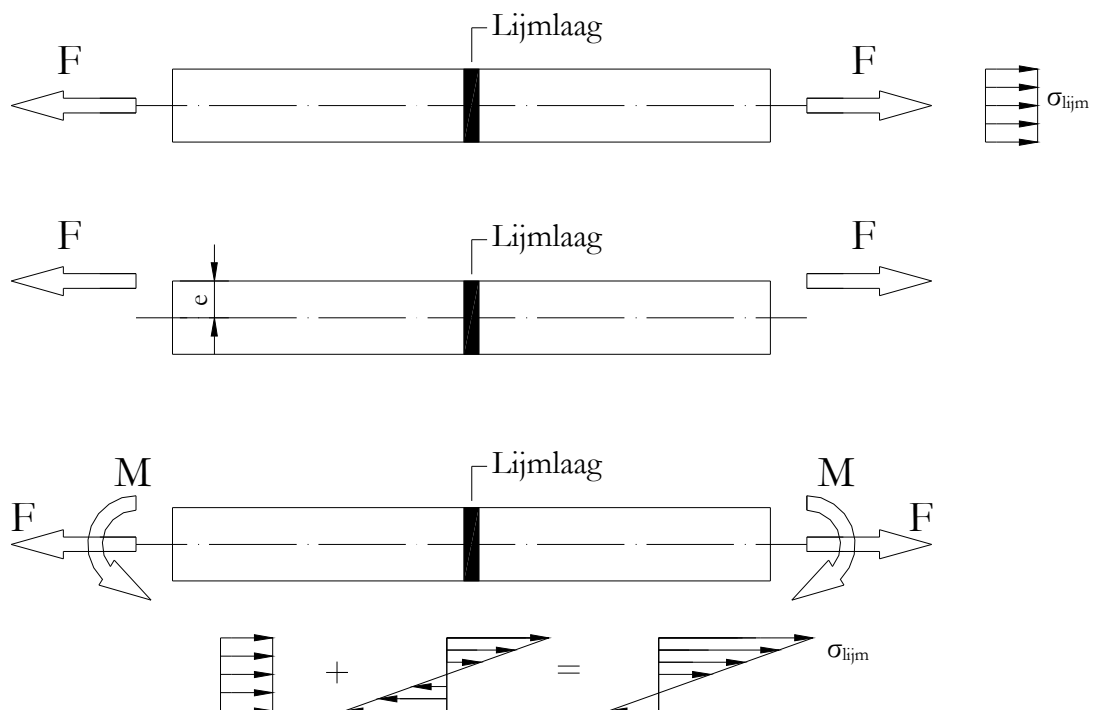
6.1 ALGEMEEN

Het is van primordiaal belang de lijmverbinding zodanig te belasten dat de lijm laag optimaal wordt benut [5]. Dit impliceert dat de vormgeving van de verbinding zodanig moet zijn dat er een schuif-, druk-, of centrische trekbelasting wordt aangelegd. Een excentrische trek- en scheurbelasting daarentegen dient vermeden te worden. Voorts moet de vormgeving ook de praktische uitvoering toelaten. Het moet immers mogelijk zijn een correcte voorbehandeling uit te voeren, de lijm laag aan te brengen en een lijm druk te voorzien. Het komt er dus op neer het ontwerp zodanig aan te passen dat er zich geen kwaliteitsproblemen stellen.

6.2 BELASTINGSVORMEN

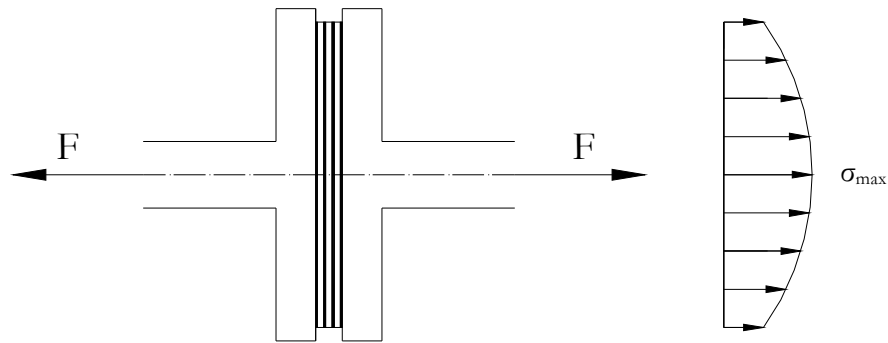
6.2.1 TREK- EN DRUKBELASTING

Wanneer een lijmverbinding zuiver op trek wordt belast, kan worden gesteld dat de sterkte van de verbinding gelijk is aan de sterkte van het lijm materiaal (Figuur 15: boven). In de praktijk is het echter moeilijk, zometer onmogelijk, een zuivere trek te genereren. In vele gevallen zijn de aangrijpende krachten asymmetrisch (Figuur 15: midden), waardoor er naast een normaalbelasting ook een moment aangrijpt (Figuur 15: onder). Dit impliceert dat er plaatselijk een hogere spanning wordt gegenereerd, waardoor de sterkte van de verbinding verlaagt.



Figuur 15: Boven: centrische trek – Midden: excentrische trek – Onder: componenten excentrische trek

Het is aangewezen trekkrachten te vermijden in een lijmverbinding. Wanneer dit echter niet mogelijk is, kan het raadzaam zijn het contactoppervlak te vergroten, zodat een sterkere verbinding wordt gegenereerd.



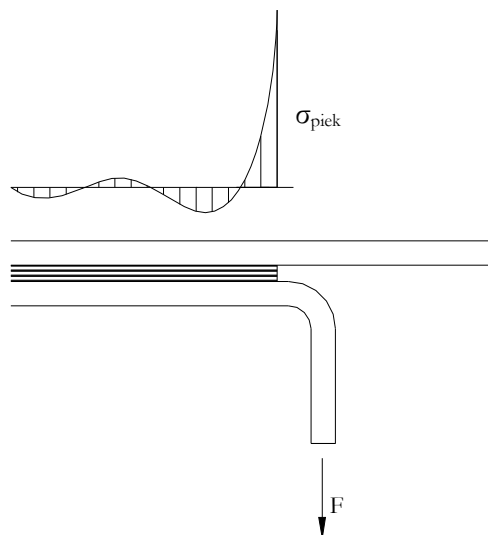
Figuur 16: Gelijmde flens

Wanneer er gebruik wordt gemaakt van een flens verhoogt de spanning echter niet lineair (Figuur 16). Dit is te wijten aan de eindige buigstijfheid van de flens, waardoor er een bepaalde vervorming optreedt en er ter hoogte van de centrale as een grotere spanning heerst. De maximale kracht welke de lijmverbinding kan weerstaan wordt gevonden door de aanwezige spanning te integreren over het flensoppervlak. De maximale aanwezige spanning σ_{\max} bedraagt hierin de treksterkte van de lijm. Er dient opgemerkt dat de maximale kracht kan worden vergroot door een vlakker spanningsverloop te creëren, dus door de flens te verstijven.

Een drukbelasting veroorzaakt meestal weinig problemen bij een lijmverbinding.

6.2.2 SCHEUR- OF AFPELBELASTING

Wanneer een lijmverbinding excentrisch op trek wordt belast, ontstaat er een piekspanning aan de rand, waardoor de verbinding op deze plaats eenvoudig bezwijkt. De verbinding wordt hierbij op scheuren of afpellen belast (Figuur 17). Deze belastingswijze dient in de praktijk te worden vermeden.

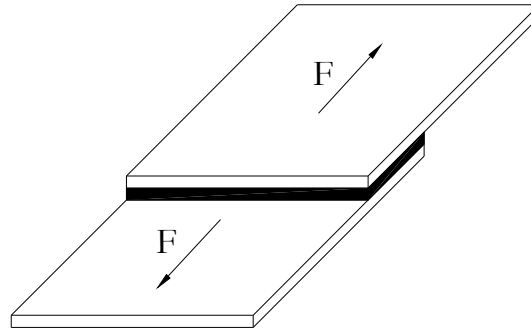


Figuur 17: Afpelbelasting

De piekspanning kan worden verlaagd door een taaiere lijm te kiezen, de overlappende lengte te vergroten, de lijm laag dikker te nemen of een stijvere constructie te voorzien. Doch zijn vermelde aanpassingen noodoplossingen en kan beter worden geopteerd voor een T-verbinding, waardoor het probleem bij de bron wordt aangepakt.

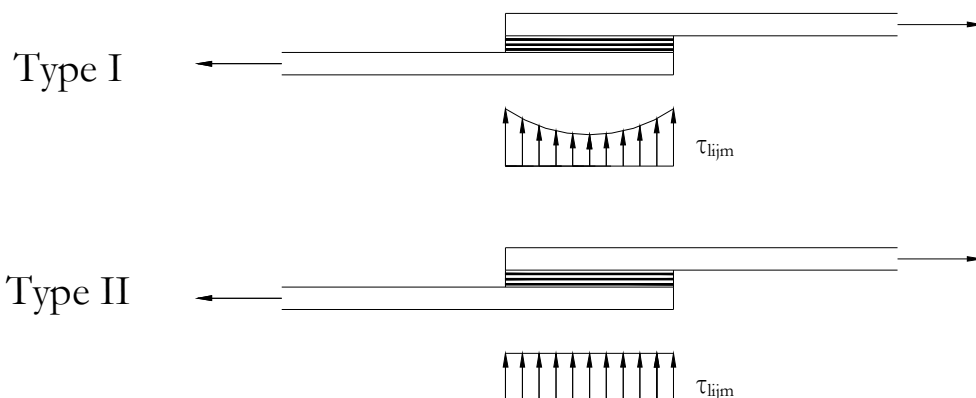
6.2.3 SCHUIFBELASTING

Wanneer de lijmmaad axiaal wordt belast (afschuiving), presteert de lijm maximaal. De over te dragen kracht wordt immers door het gehele lijmoppervlak overgedragen. In de praktijk worden dan ook vooral enkelvoudige lapnaden aangewend, welke enkel op afschuiving werken (Figuur 18).



Figuur 18: Schuifbelasting

De spanningsverdeling in de lijmlaag is afhankelijk van de elasticiteit van de lijm en de substraten [1]. Bij taaie lijmen (Figuur 19, Type I) zal aan de uiteinden een hogere spanningsverdeling aanwezig zijn. Flexibele lijmen daarentegen creëren een constante schuifspanning over de gehele lengte (Figuur 19, Type II). Bij taaiere lijmen is het zelfs mogelijk dat bij grote overlappenden geen spanningen optreden in het middenstuk van de verbinding. Alle spanningsoverdracht gebeurt immers aan de uiteinden. Het drastisch vergroten van de overlappende lengte ter verhoging van de sterkte heeft dan ook weinig effect bij taaie lijmen.



Figuur 19: Spanningsverdeling afhankelijk van taatheid lijm

Door de kleine excentriciteit tussen de aangelegde krachten zal er in werkelijkheid een hoeveelheid buiging aanwezig zijn in de constructie, waardoor aan de randen trekspanningen ontstaan.

6.3 BEREKENEN VAN LIJMVERBINDINGEN

Vanaf het ontwerp is het belangrijk de sterkte van de constructieve lijmverbinding te kennen. Deze wordt berekend uitgaande van de geometrische eigenschappen van de verbinding, aanvaardbare belastingscombinaties en aangewende materiaaleigenschappen. Binnen dit kader zijn twee berekeningsmethodes beschikbaar. In eerste instantie is er de analytische methode, waarbij door middel van een stelsel differentiaalvergelijkingen het probleem wordt opgelost. Verder bestaan er numerieke methodes, waarbij door eindige elementenprogramma's het fysisch probleem wordt ingedeeld in een eindig aantal elementen. Uitgaande randvoorwaarden kan een veranderlijke worden opgelost in een aantal discrete punten: knooppunten. In dit werk worden enkel twee analytische methoden beschreven voor het berekenen van een enkelvoudige lapnaad [5] [7] [12].

6.3.1 THEORIE VAN VOLKERSEN

De theorie van Volkersen is geldig indien de lijm een elastisch materiaal is en enkel vervormt in de afschuifrichting.

In eerste instantie wordt een onbelaste lapnaad ondersteld (Figuur 20, Model A). Wanneer deze verbinding wordt belast, en de substraten onvervormbaar zijn, zal een lineair spanningsbeeld worden verkregen over de gehele overlappende (Figuur 20, Model B).

$$\tau_0 = \frac{F}{b \cdot l_a}$$

τ_0	Gemiddelde schuifspanning [N/mm ²]
F	Optredende trekkracht [N]
b	Breedte lijmlaag [mm]
l_a	Lengte lijmlaag [mm]

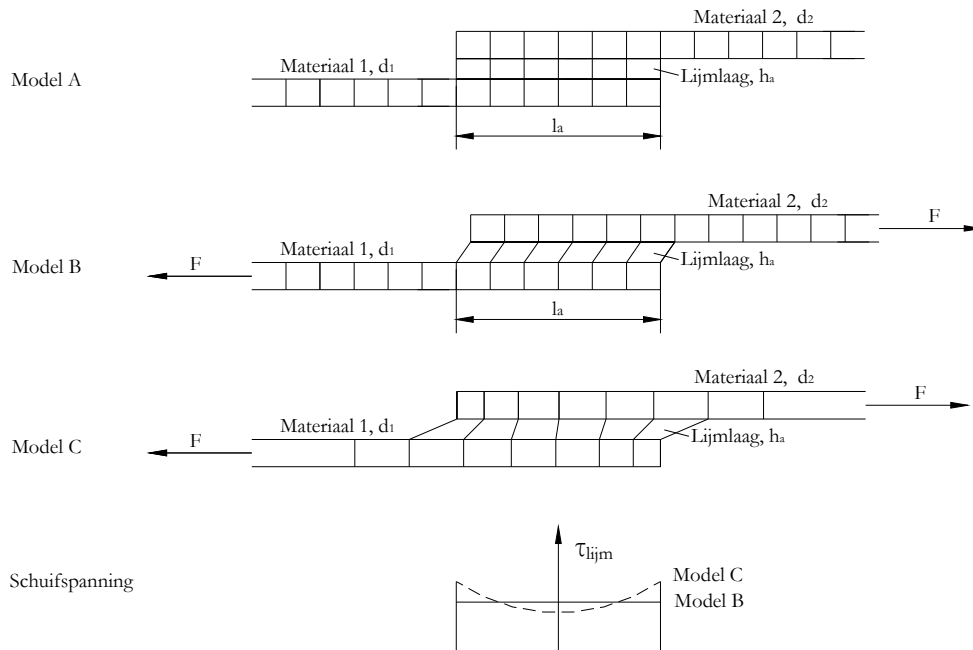
Dit is echter een theoretische benadering, daar in werkelijkheid het materiaal steeds zal vervormen. De rek is het grootst aan de randen, waardoor na inpassen van de wet van Hooke kan besloten worden dat hier een grotere spanning heerst (Figuur 20, Model C).

De maximale schuifspanning wordt gevonden uitgaande onderstaande betrekking, waarbij wordt ondersteld dat beide substraten dezelfde elasticiteitsmodulus bezitten.

$$\tau_{max} = n_{c,max} \cdot \tau_0$$

τ_{max}	Maximale schuifspanning [N/mm ²]
$n_{c,max}$	Spanningsconcentratie, gelijk aan volgende formulering
$n_{c,max} = \frac{\omega}{2} \cdot \left[\coth\left(\frac{\omega}{2}\right) + \left(\frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2}\right) \cdot \tanh\left(\frac{\omega}{2}\right) \right]$	
$\omega^2 = \left(1 + \frac{d_1}{d_2}\right) \cdot \Delta$	
$\Delta = \frac{G_a \cdot l_a^2}{E_s \cdot d_2 \cdot h_a} \quad (d_1 \geq d_2)$	
E_s	Elasticiteitsmodulus substraat [N/mm ²]
d_1	Dikte materiaal 1 [mm]
d_2	Dikte materiaal 2 [mm]
G_a	Glijdingsmodulus lijm [N/mm ²]
h_a	Dikte lijmlaag [mm]

Er wordt opgemerkt dat bij flexibele lijmlagen, met een lage elasticiteitsmodulus en glijdingsmodulus, de dimensieloze coëfficiënt Δ kleiner wordt, en er bijgevolg lagere piekspanningen zijn. Dit komt overeen met de conclusies van paragraaf 6.2.3.

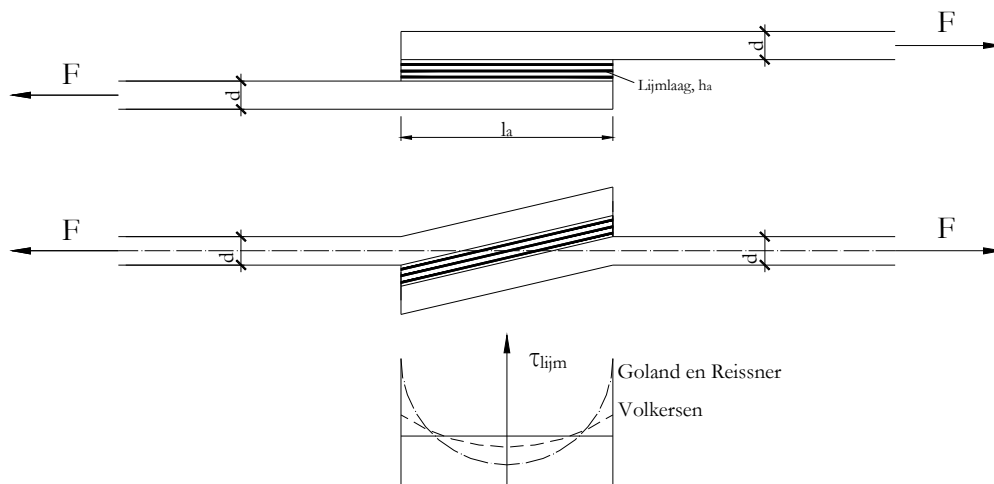


Figuur 20: Opbouw spanningsverdeling Volkersen

Ook door het inspelen op de overlappende lengte l_a en lijmdikte h_a is het eenvoudig de piekspanning te doen dalen. Een dikkere lijmlaag of een kleinere lijmlengte hebben immers beiden het effect $n_{c, \max}$ naar één te leiden waardoor de piekspanning vermindert.

6.3.2 GOLAND EN REISSNER ANALYSE

De theorie van Volkersen houdt geen rekening met de kleine excentriciteit die aanwezig is tussen beide krachten. Deze excentriciteit zorgt er namelijk voor dat naast de algemene afschuiving ook een kleine trekspanning aanwezig is aan de uiteinden [5]. Deze trekkracht werd door Goland en Reissner wel in rekening gebracht. Het komt erop neer dat het model van Goland en Reissner grotere piekspanningen aan de uiteinden heeft, en kleinere spanningen in het middenstuk van de lapnaad in vergelijking met Volkersen (Figuur 21).



Figuur 21: Spanningsverdeling volgens Volkersen en Goland en Reissner

Goland en Reissner stelden een buigend momentfactor κ op die afhankelijk is van de geometrie van de verbinding en de elasticiteitseigenschappen van het materiaal. In dit werk wordt enkel een vereenvoudigde formulering opgenomen, waarbij beide substraten identiek zijn en dezelfde elasticiteitsmodulus bezitten.

$$\frac{1}{\kappa} = 1 + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \tanh \left[\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot (1 - \nu_s^2) \cdot \frac{l_a}{2d} \cdot \sqrt{\frac{F}{E_s \cdot b \cdot d}} \right]$$

κ	Buigend momentfactor [-]
d	Dikte van de identieke substraten [mm]
ν_s	Poisson-ratio van het substraat [-]
E_a	Elasticiteitsmodulus lijm [N/mm ²]

Opmerking: Voor de verklaring van de overige parameters wordt verwezen naar paragraaf 6.3.1.

Vervolgens worden door Goland en Reissner twee gevallen onderscheiden [7].

- In het eerste geval is de lijmlaag extreem dun. Bovendien is de elasticiteitsmodulus van de lijm vergelijkbaar met deze van het substraat, zoals bij gelijmde houtverbindingen. Hierdoor zijn de vervormingen minder belangrijk en kan gesteld worden dat $h_a \ll \frac{E_a}{E_s} \cdot d$. Het spanningsverloop wordt vervolgens afgelezen uit grafieken welke in de literatuur beschikbaar zijn [5] [7].

- In het tweede geval is de lijmlaag nog steeds dun. Ditmaal is er echter wel een verschil tussen de elasticiteitsmodulus van de lijm en het substraat, waardoor kan worden gesteld dat $h_a \gg \frac{E_a}{E_s} \cdot d$. Een voorbeeld hiervan zijn gelijmde metaalverbindingen. Hierdoor zijn de vervormingen in de lijmlaag wel belangrijk en zullen ze een invloed hebben op de spanningsherverdeling. Met behulp van de buigend momentfactor κ en onderstaande formule wordt vervolgens de verhouding gevonden tussen de maximale en gemiddelde spanning.

$$\tau_{max} = n_{c,max} \cdot \tau_0 = \left\{ \left[\frac{1 + 3\kappa}{4} \cdot \sqrt{2\Delta} \cdot \coth \sqrt{(2\Delta)} \right] + \frac{3}{4} \cdot (1 - \kappa) \right\} \cdot \tau_0$$

Een kleine wiskundige berekening, waarbij de buigend momentfactor κ gelijk wordt gesteld aan 1 (belasting minimaal), de overlappende lengte l_a relatief groot is ($\coth \sqrt{\Delta/2} \approx \coth \sqrt{2\Delta}$) en de substraten even dik zijn en uit hetzelfde materiaal bestaan, leert dat de maximale spanning volgens Goland en Reissner dubbel zo groot is als deze volgens Volkersen.

Opmerking: Bovenvermelde theorieën van Volkersen enerzijds en Goland en Reissner anderzijds gaan er steeds vanuit dat de adhesieve sterkte tussen substraat en lijm groter is dan de cohesieve sterkte in de lijm zelf. Het is immers mogelijk dat een lijm de inwendige spanningen perfect kan opnemen, maar niet hecht op één of beide substraten. In dat geval zijn de modellen theoretisch geldig, maar zullen ze in werkelijkheid falen.

6.4 LEVENSDUUR VAN EEN LIJMVERBINDING

Een lijmverbinding wordt quasi nooit blootgesteld aan zijn ideale omstandigheden. Tijdens gebruik zijn er steeds externe factoren aanwezig die zorgen dat een lijmverbinding minder presteert of de levensduur beperkt is [7].

Wanneer een lijmverbinding onderhevig is aan een statische belasting kan er kruip of statische vermoeiing optreden. Dit impliceert een blijvende vervorming van de lijm wanneer de verbinding onderhevig is aan trek. Tengevolge dit fenomeen kan de lijmverbinding bezwijken, hoewel de maximale spanning van de lijm nooit werd overschreden.

Dynamische vermoeiing is een meer gekend begrip. De lijmverbinding zal in dit geval bezwijken ten gevolge een fluctuerende belasting. Voor een gegeven belastingsamplitude zal bij een dynamisch combinatie de verbinding op een vroeger tijdstip begeven dan dezelfde belastingsamplitude bij een monotone combinatie. Het aantal belastingswisselingen bepaalt samen met de aangrijpende spanningsvorm de levensduur van een verbinding. Doch is, in tegenstelling tot andere verbindingstechnieken zoals een boutverbinding, een lijmverbinding relatief goed bestand tegen dynamische belastingen.

Niet enkel de belastingen zorgen voor een beperkte levensduur. Ook aantastingen door vocht of overige negatieve invloeden uit de omgeving zijn van groot belang. Het is immers onmogelijk de lijmverbinding steeds in de ideale omstandigheden te laten plaatsvinden doordat er externe, negatieve randvoorwaarden aanwezig zijn.

Bovenvermelde zaken in acht genomen dient een lijmverbinding een zekere levensduur te garanderen onder werkelijke gebruiksomstandigheden.

HOOFDSTUK 7: CLASSIFICATIE VAN LIJMEN

De classificatie van lijmen kan op verschillende manieren gebeuren. In de handel worden deze vooral op basis van het toepassingsgebied ingedeeld. Hierbij wordt de lijm vernoemd naar het substraat, zoals bij rubberlijm, papierlijm en houtlijm.

Op wetenschappelijk en industrieel niveau daarentegen gebeurt de classificatie op een andere manier. In eerste instantie kunnen lijmen worden onderverdeeld naar hun chemische reactiviteit, waarbij fysisch drogende en chemisch hardende lijmen worden onderscheiden. In deze groepen volgt dan een verdere classificatie op basis van het uithardingsmechanisme en de chemische samenstelling [2] [3].

Bij *fysisch drogende lijmen* gebeurt de uitharding van de vloeibare lijm door verdamping van het oplosmiddel of door stolling. Er treden geen chemische veranderingen op in de lijmlaag of het substraat.

Bij *chemisch hardende lijmen* gebeurt de overgang van vloeibare naar vaste toestand door chemische reacties tussen de verschillende componenten in de lijm of eventuele stoffen daarbuiten.

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van enkele lijmtypes en hun eigenschappen. Deze opsomming vormt echter geen definitieve afbakening van alle lijmsorten. Wel zijn de meest courante lijmen in onderhavige tekst opgenomen.

7.1 FYSISCH DROGENDE LIJMEN

7.1.1 DISPERSIELIJM

A. DEFINITIE

Dispersielijmen of ‘witte lijmen’ bestaan uit een kunsthars gedispergeerd in water. Het kunsthars is een thermoplast, welke goed oplost in het oplosmiddel en voor ongeveer 50 à 65% vertegenwoordigd is in de lijm.

Een thermoplast is een polymeer dat bij voldoende temperatuursverhoging week wordt. Het kan opgevat worden als lange ketens macromoleculen, welke quasi geen dwarsvertakkingen hebben en als het ware verstrengeld zitten door elkaar [4]. De macromolecule zelf bestaat uit sterke covalente bindingen, terwijl de macromoleculen onderling gebonden zijn door zwakke Van der Waalsbindingen. Deze Van der Waalsbindingen verbreken bij opwarming en zorgen voor het thermoplastisch effect.

B. UITHARDINGSMECHANISME

De lijm hardt uit doordat het oplosmiddel (water) verdamppt. De vaste lijmdeeltjes blijven over en zorgen voor een vaste verbinding. Dit lijmtypen heeft een open tijd van 25 à 45 minuten bij normale omstandigheden. Na ongeveer 24u is de lijmverbinding reeds in zekere mate verhard en is de krimprijke lijmfilm bestand tegen bepaalde vervormingen. De verhardingstijd is vooral afhankelijk van de omgevingstemperatuur omdat het dispersiewater moet verdampen, en bedraagt 2 à 3 dagen. Een verhoging van de temperatuur leidt dan ook tot een snellere uitharding. Het is echter wel noodzakelijk dat één of beide substraten de eigenschap bezitten vocht op te nemen of door te laten. Het dispersiewater moet namelijk geëvacueerd worden. Dit proces zal gepaard gaan met een volumevermindering van de lijm laag, waardoor er tijdens het lijmproces steeds een druk moet worden voorzien op de lijmverbinding.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

De lijm vormt een elastisch-plastische verbinding, waardoor ze weinig bestand is tegen hoge statische belastingen. De treksterkte bedraagt ongeveer 5 à 10MPa. Verder is dit lijmtypen opgewassen tegen temperaturen tot 100°C. Een betere vochtbestendigheid kan worden gecreëerd door het gebruik van vernetters. Deze vernetters zullen een bijkomende binding vormen tussen de ketens macromoleculen, waardoor het thermoplastisch materiaal elastischer wordt. De structuur is nu zeer gelijkaardig aan deze van elastomeren (zie paragraaf 7.1.2).

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Het substraatoppervlak dient ontvet te worden alvorens de lijm aan één of beide kanten van het substraat wordt aangebracht. Apolaire⁴ kunststoffen daarentegen (oa. polypropreen, teflon en siliconen) dienen een aparte voorbehandeling te ondergaan.

E. TOEPASSINGSGEBIED

In de bouwsector kent dispersielijm zijn toepassing bij het verlijmen van cellenglas tegen een achterliggende poreuze structuur zoals baksteen of beton. Voorts worden ze ook veel gebruikt om hout of papier te verlijmen.

⁴ Apolair: Een apolair materiaal omvat apolaire verbindingen waarbij de elektronen zodanig verdeeld zijn dat het zwaartepunt van de negatieve lading samenvalt met het zwaartepunt van de positieve lading. Hierdoor wordt een positief deeltje niet aangetrokken of afgestoten.

7.1.2 CONTACTLIJM

A. DEFINITIE

Contactlijmen bestaan uit een samenstelling van rubbers (elastomeren) en synthetische of natuurlijke harsen, opgelost in water of een organisch oplosmiddel.

Een elastomeer is een polymeer met rubberachtige eigenschappen [4]. Het bezit de mogelijkheid om bij een trekkracht ten minste 200% uit te zetten, om na het verdwijnen van deze belasting terug te keren naar zijn oorspronkelijke –spanningsloze- toestand. Op moleculaire schaal kunnen elastomeren omschreven worden als ketens macromoleculen, welke vertakt zijn en verbonden met elkaar door vernettingen (cross links) en zo een driedimensionaal grofmazig netwerk vormen. Wanneer het aantal vernettingen stijgt, zijn er meer bindingen en zal de elasticiteit dalen.

B. UITHARDINGSMECHANISME

Het uithardingsmechanisme van contactlijmen komt overeen met dat van dispersielijmen. Er dient evenwel een verschillende aanbrengmethode te worden voorzien. In tegenstelling tot dispersielijm wordt de lijmlaag op beide substraatoppervlakken aangebracht. Wanneer het oplosmiddel is verdampt, worden de twee delen tegen elkaar gedrukt. De wachttijd (open tijd) voor aandrukken is afhankelijk van het substraat, de temperatuur en de dikte van de lijmlaag, en bedraagt ongeveer 10 minuten bij normale kameromstandigheden. De rubberdeeltjes van de twee lijmlagen vernetten in elkaar, waardoor de lijmsterkte wordt verkregen. Het uithardingsprincipe van contactlijm impliceert dat de substraten niet meer vochtdoorlatend dienen te zijn, daar het oplosmiddel vrij kan verdampen. Water als oplosmiddel verdampt echter trager dan organische stof als oplosmiddel. Hierdoor is het verwarmen van lijmen op waterbasis aan te raden.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Doordat al het oplosmiddel voor het samenbrengen van de substraten reeds is verdampt, vindt de lijmverbinding onmiddellijk na samenpersen zijn sterkte. Voorts wordt een zeer elastische, schokbestendige verbinding gecreëerd, welke goed bestand is tegen water, zuren en loog⁵. De temperatuurbestendigheid ligt in het brede interval van -40 tot 120°C.

Als nadeel kan worden gesteld dat een bepaalde wachttijd nodig is tussen het aanbrengen van de lijmlaag en het samenpersen van de delen. Ook kunnen de vluchtige oplosmiddelen een bepaalde milieubelasting vormen.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Het substraatoppervlak dient ontvet te worden en stofvrij gemaakt alvorens de lijm aan beide kanten wordt aangebracht.

E. TOEPASSINGSVOORBEELD

Contactlijmen worden in de bouwsector veel gebruikt om dakdichtingen te verkleven aan de ondergrond. Ook vloerbekledingen van allerhande vormen (laminaat, linoleum, vinyl en tapijt) worden verkleefd met contactlijm.

⁵ Loog: Geconcentreerde oplossing.

7.1.3 OPLOSMIDDELLIJM

A. DEFINITIE

Een oplosmiddellijm omvat een lijmstof (rubber of hars) die door een oplosmiddel (vluchtige organische stof of water) in oplossing is gebracht.

B. UITHARDINGSMECHANISME

Wanneer het oplosmiddel verdampt of door het substraat wordt opgenomen, komt de lijmstof terug in zijn oorspronkelijke vorm. Oplosmiddellijmen zijn dus nauw verwant met contactlijmen. Contactlijmen kunnen zelfs als een oplosmiddellijm worden beschouwd, maar de omgekeerde vergelijking gaat niet steeds op.

Oplosmiddellijmen kunnen op verschillende manieren worden verwerkt. Een mogelijke techniek is de contactverlijming, waarbij een oplosmiddellijm aan beide substraten wordt aangebracht, en er vervolgens wordt gewacht tot het oplosmiddel volledig is verdampt. Op dat moment worden de twee delen met elkaar in contact gebracht en aangedrukt. De druk zorgt voor de eigenlijke verbinding. Deze oplosmiddellijm is bijgevolg een contactlijm.

Er zijn echter ook andere verwerkingstechnieken. Zo kan gebruik worden gemaakt van een natte verlijming, waarbij de substraten met elkaar worden verlijmd zonder dat het oplosmiddel reeds is verdampt. Voorts bestaat er de open tijd verlijming, welke tussen voorgaande twee methodes wordt gepositioneerd. De lijm wordt aangebracht op de twee substraten en er wordt gewacht tot quasi al het oplosmiddel verdwenen is (de open tijd is net niet verstreken). Op dat moment worden de twee delen samengebracht en zorgt de verdamping van het weinig resterende oplosmiddel voor de uitharding.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Oplosmiddellijmen hebben over het algemeen een goede flexibiliteit en afpelsterkte. De treksterkte is daarentegen klein (0,5 à 1MPa) en de weerstand tegen kruip beperkt.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Eenvoudige voorbehandelingsmethodes zoals ontstoffen, opruwen en ontvetten volstaan meestal.

E. TOEPASSINGSGBIED

Bitumenlijm of koudlijm is een typische oplosmiddellijm, die frequent wordt gebruikt bij het verwerken van platte daken.

7.1.4 SMELTLIJM

A. DEFINITIE

Smeltlijmen of hot melts komen bij kameromstandigheden voor als vaste stof in de gedaante van korrels of staafjes. Bij opwarming smelten ze tot een vloeibare lijm, waarna ze op het substraat worden aangebracht. De temperatuur welke noodzakelijk is om een voldoende lage viscositeit te creëren bedraagt 150 à 170°C.

B. UITHARDINGSMECHANISME

Zoals bij de definitie reeds werd vermeld wordt de lijm vloeibaar onder hoge temperaturen. De verbinding komt dan ook tot stand door afkoelen van de lijm, zodat deze door een langzame kristallisatie van de polymeerketens terugkeert naar zijn vaste toestand.

Wanneer het substraat goed warmtegeleidend is (bv. metalen) dient er te worden opgelet voor een te snelle afkoeling van de lijmlaag, met een slechte hechting als mogelijk gevolg. Dit probleem kan opgelost worden door het substraat voor te verwarmen.

Naast de niet-reactieve smeltlijm bestaat er ook een reactieve variante. Deze dankt zijn aanvangssterkte aan het stollen van de lijm. Vervolgens vindt er een reactie met de luchtvochtigheid plaats, welke niet herstelbare elastomeren vormt. Deze variante behoort door zijn chemische activiteit strikt genomen niet tot de groep fysisch uithardende lijmen, hoewel het fysische proces een schakel vormt tot de totale sterkte. De treksterkte van dit lijmtypen bedraagt ongeveer 2 à 5MPa.

C. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Het substraattoepervlak dient ontvet te worden en stofvrij gemaakt alvorens de lijm wordt aangebracht.

D. TOEPASSINGSGBIED

Smeltlijm wordt vooral gebruikt voor het verwerken van verpakkingen, het aanbrengen van etiketten en het samenbinden van boeken.

7.1.5 PVC-PLASTISOLEN

A. DEFINITIE

PVC-plastisolen zijn een mengsel van PVC-poeder, gedispergeerd in een vloeibare weekmaker. Er worden echter drie toeslagstoffen aan toegevoegd. Een eerste toeslagstof bevat een hechtmiddel ter bevordering van de aanhechting. Een tweede toeslagstof bevat een stabilisator ter voorkoming dat het chloor-molecul van PVC zich bij hoge temperaturen zou afsplitsen tot chloorwaterstof. De derde toeslagstof tenslotte zorgt voor de gewenste viscositeit. PVC-plastisolen mogen niet verward worden met contactlijmen op basis van PVC. Deze laatste worden soms omschreven als PVC-lijm, maar horen niet thuis binnen dit kader.

B. UITHARDINGSMECHANISME

Het uithardingsmechanisme vangt aan bij een temperatuursverhoging. Wanneer een temperatuur wordt bereikt van 120°C, zwellen de PVC-deeltjes door opname van de weekmaker. Wanneer vervolgens wordt overgegaan tot een temperatuur van 160°C, smelten de gezwollen deeltjes tot een gel. Deze gel wordt minder visceus naargelang de temperatuursverhoging blijft aanhouden. Wanneer tenslotte het geheel wordt afgekoeld, verstijft de gel en wordt een vaste lijmverbinding gecreëerd.

PVC-plastisolen worden vaak gebruikt ter verlijming van PVC-substraten. Hierbij zal gedurende de tweede fase (160°C) de lijm en het bovenste laagje substraat versmelten tot één geheel.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

PVC-plastisolen bezitten een hittebestendigheid tot 230°C, terwijl bij lage temperaturen (-40°C) nog steeds een flexibele verbinding wordt gegarandeerd. Voorts is dit lijmtypen goed bestand tegen veroudering.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Het substraattoepervlak dient schoon te zijn, hoewel ontvetten meestal niet nodig is.

E. TOEPASSINGSGBIED

PVC-plastisolen worden veel gebruikt in de auto-industrie ter afdichting van de metalen onderdelen van de carrosserie.

7.2 CHEMISCH HARDENDE LIJMEN

7.2.1 ACRYLAATLIJM

A. DEFINITIE

De acrylaatlijmen welke in deze paragraaf worden bedoeld omvatten een tweecomponentenlijm, bestaande uit organische verbindingen van acrylzuur. Naast dit lijmtypen hebben ook cyanoacrylaatlijm (paragraaf 7.2.2), anaerobe lijn (paragraaf 7.2.3) en sommige UV-uitthardende lijmen (paragraaf 7.2.4) een basis van acryl, doch zijn deze typen significant anders waardoor ze apart worden vermeld. Tot slot bestaan er ook dispersielijmen op basis van acrylaat, welke vooral worden toegepast bij de verwerking van vloerbekledingen [13].

Globaal gezien zijn er twee typen acrylaatlijm op de markt. Enerzijds zijn er de pre-mix acrylaatlijmen, waarbij twee componenten voor de applicatie worden vermengd en op een substraat worden aangebracht. Vervolgens treedt er een chemische reactie op tussen de twee componenten waardoor het systeem uithardt. Anderzijds zijn er de no-mix acrylaatlijmen, waarbij twee componenten separaat op de substraten worden aangebracht. Samenvoegen van de substraten brengt de lijmcomponenten samen waarna het systeem eveneens uithardt.

Voorts kunnen acrylaatlijmen worden gemodificeerd door het toevoegen van rubberdeeltjes. Door het creëren van een tweefasensysteem gaan deze rubberdeeltjes een discrete tweede fase vormen in de reeds verharde matrix [2]. Deze tweede generatie acrylaatlijmen of toughened adhesives zijn beter bestand tegen afpel-, slijt- en schokbelastingen.

B. UITHARDINGSMECHANISME

Bij no-mix acrylaatlijmen wordt op één substraat een mengsel van hars en versneller of initiator geplaatst. Op het andere substraat wordt de ontbrekende component aangebracht, zijnde de niet gebruikte versneller of initiator. Eenvoudigweg kan gesteld worden dat initiator en versneller op een apart substraat aangebracht moeten worden. De hars kan op één van beide delen worden aangebracht. Na samenvoegen van de twee delen wordt een kettingreactie of radicaalpolymerisatie opgestart, waarbij in eerste instantie een reactie optreedt tussen initiator en versneller. Eenmaal dit proces loopt, wordt een tweede fase in gang gezet, waarbij de hars uithardt. In tegenstelling tot andere lijmtypen voegen initiator en versneller niets toe aan de sterkte van de lijmverbinding, hoewel ze noodzakelijk zijn om het proces op gang te brengen.

De meeste acrylaatlijmen bezitten een open tijd van 10 à 20 minuten, terwijl de uithardingstijd 12 à 24 uur bedraagt bij normale omstandigheden.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Acrylaatlijmen bieden een hoge sterkte (20 à 30MPa), waarbij de tweede generatie acrylaatlijmen vooral worden gebruikt bij hoogwaardige, structurele verbindingen.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Het substraatoppervlak dient ontvet te worden alvorens de lijm wordt aangebracht. Apolaire stoffen dienen een polariteitsverhogende voorbehandeling te ondergaan.

E. TOEPASSINGSGBIED

Tweecomponenten acrylaatlijm wordt vooral als montage- of constructielijm gebruikt, variërend van micro-toepassingen tot het structureel verlijmen van dragende structuren.

7.2.2 CYANOACRYLAATLIJM

A. DEFINITIE

Cyanoacrylaatlijmen bestaan in hun vloeibare vorm uit monomeren van cyanoacrylaatmoleculen. Na contact met zwak basisch reagerende stoffen zoals water(damp) en alcohol harden ze uit.

B. UITHARDINGSMECHANISME

Zoals bij de definitie reeds werd besproken harden cyanoacrylaatlijmen uit wanneer ze in contact komen met stoffen zoals water(damp) en alcohol. Vocht uit de lucht, of aanwezig in het substraat is reeds voldoende om een polymerisatiereactie te starten, waarbij het vloeibare monomeer op basis van cyanoacrylaatmoleculen wordt omgezet in een vast polymeer. Het uithardingsproces start zeer snel, waardoor cyanoacrylaatlijm ook wel bekend staat als secondelijm. Na 1 à 60 seconden wordt de aanvangsterkte reeds bereikt, terwijl de uithardingstijd hiertegenover relatief lang is en ongeveer 1 dag bedraagt.

Indien de relatieve vochtigheid van de omgevingslucht 50% bedraagt, komt het uithardingsmechanisme traag op gang. Bedraagt de relatieve vochtigheid daarentegen 75%, dan starten de chemische reacties zodanig snel dat de molecuulketens zich onvoldoende kunnen ontwikkelen. Een relatieve vochtigheid van 60% wordt als ideaal omschreven.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Cyanoacrylaatlijmen harden snel uit bij kamertemperatuur, hetgeen zijn grootste troef is. Verder zijn de lijmen kleurloos, waardoor de lijmnaad helder en transparant blijft en dus kan gebruikt worden voor esthetische doeleinden. Voorts worden ze gekenmerkt door een goede weerstand tegen oplosmiddelen en weersinvloeden. De treksterkte bedraagt ongeveer 15MPa, hoewel dit bij sommige types kan oplopen tot 35MPa.

Ook dient vermeld te worden dat het lijmtypen zelf geen oplosmiddelen bevat, waardoor de gehele lijmlaag uithardt. Dit heeft als gevolg dat een hoge mechanische stabiliteit wordt gecreëerd, waarbij geen krimp optreedt.

Er dienen wel voldoende persoonlijke beschermingsmaatregelen te worden getroffen bij de verwerking van cyanoacrylaatlijm. Vluchtige lijmdeeltjes kunnen in contact komen met oogvocht, waardoor de oogleden zich als het ware aan de oogbol vasthechten.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Apolaire materialen zoals polyethyleen, polypropreen en siliconen dienen te worden voorbehandeld door een plasma- of coronabewerking. Overige materialen moeten ontvet worden.

E. TOEPASSINGSGEBIED

Cyanoacrylaaatlijmen hebben een ruim toepassingsgebied, waarbij zowel metalen als niet-metalen gelijmd kunnen worden. Zeer poreuze materialen zoals hout en weefsels kunnen daarentegen niet met dit type worden gelijmd. Een typisch voorbeeld van cyanoacrylaatlijm in de bouwsector is het verlijmen van naden bij EPDM rubberdichtingen, waar een hoge aanvangsterkte belangrijk is. Een ander typisch en gekend toepassingsgebied is de modelbouw.

7.2.3 ANAEROBE LIJM

A. DEFINITIE

Anaerobe lijmen omvatten polyesteracryl-harsen die enkel bij afwezigheid van zuurstof uitharden.

B. UITHARDINGSMECHANISME

Wanneer de lijm niet meer in contact staat met zuurstof, veranderen de peroxiden (dit is de verbinding tussen twee gebonden zuurstof-atomen) na contact met een actief metaaloppervlak in vrije radicalen (atoom met ongepaard elektron). Deze vrije radicalen zetten het polymerisatieproces in gang waarbij monomeren omgevormd worden tot lange ketens. Na ongeveer 30 minuten is de lijmverbinding handvast, terwijl de volledige sterkte na 3 à 24u wordt bereikt.

Wanneer het substraatoppervlak geen metaal is, of het metaaloppervlak weinig actief is, dient een activator te worden toegevoegd waardoor het systeem een tweecomponentenlijm wordt. Door de verharding bij hogere temperaturen te laten verlopen (120 à 150°C), versnelt de uitharding en verhoogt de sterkte.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Anaerobe lijmverbindingen zijn in staat een hoge statische belasting op te nemen (20 à 40MPa). Verder bezitten ze een hoge chemische bestendigheid. Anaerobe lijm heeft wel het nadeel dat sommige thermoplastische kunststoffen zoals vinyl, PVC of polystyreen geen weerstand bieden aan de chemische inwerking van de activator.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

De substraatoppervlakken dienen ontvet te zijn en mogen geen oxide, verontreinigingen of verf bevatten.

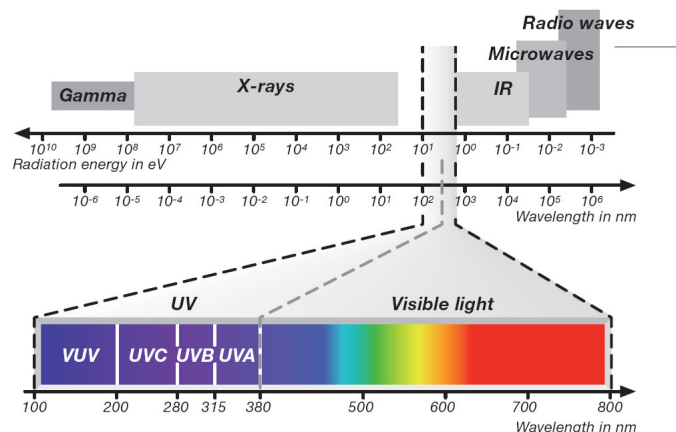
E. TOEPASSINGSGEBIED

Voor het zelfstandig werken van anaerobe lijm en het vormen van vrije radicalen dienen metaalionen beschikbaar te zijn. Hierdoor wordt dit lijmtypet veel gebruikt bij verbindingen tussen dicht opeengeklemd metaaloppervlakken zoals pijpafdichtingen, flens koppelingen en schroefdraadborgingen.

7.2.4 UV-UITHARDENDE LIJM

A. DEFINITIE

UV-uithardende lijmen verharderen zodra ze in contact komen met UV (40 à 400nm) [14] en/of zichtbaar licht (Figuur 22).



Figuur 22: Spectrum UV en zichtbaar licht (© www.delo.de)

Deze lijmsort heeft als voordeel dat de gebruiker zelf bepaalt wanneer de lijm uithardt door al dan niet UV ter beschikking te stellen. Zo kan de verbinding zeer nauwkeurig en zonder tijdsdruk worden gepreciseerd. De belichtingstijd is afhankelijk van de intensiteit van de UV-straling, de dikte van de lijmlaag en de transmissie van het UV door het substraat. Het spreekt voor zich dat substraten welke weinig licht doorlaten langer aan UV dienen blootgesteld te worden dan transparante materialen.

B. UITHARDINGSMECHANISME

Het uithardingsmechanisme van UV-lijm komt voor onder verschillende vormen.

Bij een eerste vorm heeft de lijm een basis van acrylaat en bevat het een foto-initiator welke onder invloed van UV ontbindt in vrije radicalen [14]. Deze vrije radicalen zorgen voor de uitharding van het hars gedurende enkele seconden.

Bij een tweede vorm heeft de lijm een basis van epoxy en bevat het eveneens een foto-initiator welke onder invloed van UV ontbindt in een lewis-zuur hetgeen zorgt voor de uitharding. Het voordeel ten opzichte van de eerste variante is dat ook na de belichting het uithardingsproces nog blijft voortduren. Hierdoor kunnen ook niet-transparante substraten worden verlijmd met UV-uithardende lijm. De lijm blijft immers na belichting nog een tijdlang vloeibaar waardoor het niet-belijmde substraat pas na de belichting kan worden geplaatst.

Een derde vorm bevat een dubbel uithardingsmechanisme. Enerzijds hardt de lijm uit door blootstelling aan UV, anderzijds bezit ze ook de mogelijkheid uit te harden door de opname van warmte of vocht, of het ontbreken van zuurstof.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

UV-uithardende lijmen vertonen een hoge treksterkte (20 à 30MPa).

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

De substraten dienen grondig gereinigd te worden en moeten vrij zijn van stof, olie, vet, siliconen en andere verontreinigingen. Apolaire materialen zoals polyethyleen en polypropreen dienen een speciale voorbehandeling te ondergaan zoals een plasma- of coronabewerking.

E. TOEPASSINGSGEBIED

Doordat er een enorme precisering mogelijk is bij het gebruik van dit lijmtyp, vinden we de toepassingen vooral terug bij de elektronica en optica. Voorwaarde voor het gebruik van UV-uithardende lijmen op basis van acrylaat is dat minstens één substraat transparant is voor de toegang van UV of zichtbaar licht. Ook het verlijmen van glas/glas of glas/metaal kan gebeuren met behulp van UV-lijmen.

7.2.5 EPOXYLIJM

A. DEFINITIE

Epoxylijm is meestal een tweecomponentenlijm bestaande uit een hars en een harder. De hars wordt bekomen door een condensatiereactie tussen bis-fenol en epichloorhydrine, en zal reageren met de harder zodra ze in contact komen met elkaar. Beide componenten worden gemengd voor applicatie en vervolgens op het substraat aangebracht.

B. UITHARDINGSMECHANISME

Zoals in de definitie reeds vermeld zal de epoxylijm uitharden zodra hars en harder met elkaar in contact komen. De uitharding vindt plaats onder kamertemperatuur, waardoor men spreekt van koudhardende

epoxylijm. De verhouding hars-harder dient oordeelkundig te worden bepaald en toegepast, omdat de harder volledig in de moleculaire structuur moet worden opgenomen. Indien één van de twee componenten in overmaat aanwezig is, zal de overmaat niet binden en een zwakke schakel vormen in de lijmlaag. De treksterkte bedraagt 15 à 25MPa.

Een variëte op de koudhardende epoxylijm is de warmhardende epoxylijm, welke onder verhoogde temperatuur (ongeveer 120°C) uithardt. Dit lijmtipe bezit geen harder, waardoor het een ééncomponentensysteem wordt. Deze warmhardende epoxylijm heeft, in vergelijking met de koudhardende variëte, een betere weerstand tegen veroudering en weersinvloeden. Bovendien is de treksterkte meestal hoger (20 à 30MPa).

Epoxylijmen hebben over het algemeen een open tijd van 1 à 2 uur en een uithardingstijd van 1 à 3 dagen.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Epoxy-lijmverbindingen vertonen een hoge sterkte, hoewel de weerstand tegen afpel- en schokbelastingen gering is. Modificatie met behulp van rubberdeeltjes kan hierin een oplossing bieden. Voorts vertonen ze een goede duurzaamheid en geen krimp.

Nadeel van dit lijmtipe is de lange uithardingstijd, waardoor de verbinding lange tijd gefixeerd dient te worden. De uitgeharde lijmverbinding is een brosse verbinding, waardoor dynamische belastingen en trillingen vermeden moeten worden.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Epoxylijmen zijn zeer gevoelig voor verontreinigingen, wat impliceert dat het substraatoppervlak steeds gereinigd en vetvrij moet zijn. Bij bepaalde gevallen kan een primer noodzakelijk zijn.

E. TOEPASSINGSGBIED

Epoxylijmen worden veel gebruikt om metalen structureel te verbinden. Ze bezitten immers naast een hoge cohesiesterkte een zeer hoge adhesiesterkte, en dit met vele materialen. Voorbeelden binnen de bouwkunde zijn het verlijmen van externe wapening aan een betonstructuur of zware gevelpanelen uit natuursteen aan een achterliggende draagstructuur.

7.2.6 POLYURETHAANLIJM

Polyurethaanlijmen kunnen onderverdeeld worden in 5 groepen:

- i Dispersielijm
- ii Oplosmiddelhoudende systemen
- iii Eencomponent oplosmiddelvrije systemen
- iv Tweecomponenten oplosmiddelvrije systemen
- v Polyurethaansmeltlijm

7.2.6.1. DISPERSIELIJM

Dit lijmtipe werd reeds besproken in paragraaf 7.1.1. Voor een verdere uiteenzetting wordt dan ook hiernaar verwezen.

7.2.6.2. OPLOSMIDDELHOUDENDE SYSTEMEN (CONTACTLIJM)

Dit lijmtipe werd reeds besproken in paragraaf 7.1.2. Voor een verdere uiteenzetting wordt dan ook hiernaar verwezen.

7.2.6.3. EÉNCOMPONENT OPLOSMIDDELVRIJE SYSTEMEN

A. DEFINITIE

Eéncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm bevat een polymeer van isocyanaat en hars, waarbij het eerste element in overmaat aanwezig is. Door het wijzigen van de onderlinge samenstelling kunnen bepaalde eigenschappen zoals sterkte, adhesie, temperatuurbestendigheid, elasticiteit en uithardingsnelheid worden aangepast.

B. UITHARDINGSMECHANISME

De uitharding vindt plaats wanneer het polymeer in contact komt met water of vocht uit de lucht. Dit lijmtypen heeft een open tijd van ongeveer 10 minuten, terwijl de aanvangsterkte na minstens één uur wordt bereikt. De lijmlaag zal echter niet uitharden wanneer ze van de lucht wordt afgesloten doordat ze te dik is of de substraten lucht doorlatend zijn, en ze dus geen vocht kan opnemen.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Doordat de treksterkte van deze lijmverbinding relatief laag is ($< 10\text{MPa}$), en de elasticiteit betrekkelijk hoog, zijn ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijmen goed bestand tegen dynamische belastingen. Verder bezit dit lijmtypen een goede weerstand tegen weersinvloeden, lage temperaturen, chemische inwerking en veroudering.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

De substraatoppervlakken dienen ontvet te worden en vrij te zijn van stof. Voor het lijmen van metalen met ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm dient best een primer te worden gebruikt, vooral indien de lijmverbinding later aan vocht wordt blootgesteld. De polymeren polyethyleen en polypropreen vereisen een aparte voorbehandelingstechniek zoals een coronabehandeling.

E. TOEPASSINGSGEBIED

Eéncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm is een typische constructielijm en dus bijzonder gewaardeerd binnen de bouwsector. Voor het verlijmen van gevelbekledingen zoals gevelpanelen en buitengevelisolatiesystemen wordt dit lijmtypen dan ook veel gebruikt. Ook binnen het vakgebied van de dakdichtingen wordt dit lijmtypen aangewend.

7.2.6.4. TWEECOMPONENTEN OPLOSMIDDELVRIJE SYSTEMEN

A. DEFINITIE

Bij een tweecomponenten oplosmiddelvrije polyurethaanlijm bezit één component een basis van isocyanaat, het andere component heeft een basis van polyol.

B. UITHARDINGSMECHANISME

Door een chemische reactie tussen het isocyanaat en de polyol wordt een onomkeerbaar netwerkstructuur gevormd. Dit lijmtypen heeft een open tijd van 20 à 60 minuten, terwijl de aanvangsterkte relatief lang is en 1 à 8 uur bedraagt. De uiteindelijke sterkte wordt na 1 à 3 dagen bereikt. Het gebruik van versnellers kan de uithardingstijd doen dalen tot 5 minuten. Ook het verhogen van de omgevingstemperatuur kan de uithardingstijd betrekkelijk verkorten.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Tweecomponenten oplosmiddelvrije systemen bezitten een hoge treksterkte (> 10MPa) en flexibiliteit, waardoor ze dynamische belastingen kunnen opnemen. Verder is dit lijmtypen goed bestand tegen lage temperaturen, chemische inwerkingen en veroudering. Het bijkomend voordeel tegenover de ééncomponentvariante is de onafhankelijkheid van vocht, zodat vochtontdoordatende substraten zoals kunststoffen en metalen eveneens verlijmbaar zijn en dit op een gecontroleerde manier. Als nadeel kan vermeld worden dat de meeste tweecomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijmen zwak bestand zijn tegen UV. Dit maakt ze niet steeds geschikt voor buitentoepassingen.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

De substraatoppervlakken dienen ontvet te worden en vrij te zijn van stof. Voor het lijmen van metalen met polyurethaanlijm dient best een primer te worden gebruikt, vooral indien de lijmverbinding later aan vocht wordt blootgesteld. De polymeren polyethyleen en polypropylen vereisen een voorbehandelingsstechniek zoals een coronabehandeling.

E. TOEPASSINGSGBIED

Tweecomponenten oplosmiddelvrije polyurethaanlijmen worden binnen de bouwsector gebruikt voor het verlijmen van enkele waterdichtingsmembranen. Ook voor het verlijmen van de metalen huidbeplating aan de kern bij sandwichpanelen kan dit lijmtypen worden aangewend.

7.2.6.5. POLYURETHAANSMELTLIJM

A. DEFINITIE

Polyurethaansmeltlijm kan opgevat worden als een combinatie van een smeltlijm en een ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm.

B. UITHARDINGSMECHANISME

De uitharding van polyurethaansmeltlijmen gebeurt in twee fasen. In een eerste fase wordt de vaste lijm verwarmd tot boven zijn verwekingstemperatuur waardoor deze vloeibaar wordt en op de substraten kan worden aangebracht. Afkoeling van de lijmlaag zorgt voor een eerste fysische uitharding, conform smeltlijmen (paragraaf 7.1.4). In een tweede fase neemt de lijmlaag vocht op uit de omgeving en/of de substraten. Er ontstaat een reactie tussen de lijm en de watermoleculen, waardoor de verbinding na enkele dagen zijn volledige sterkte bereikt.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Polyurethaansmeltlijmen vertonen een snelle uitharding, en zijn goed bestand tegen chemische inwerking en hoge temperaturen.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Het substraatoppervlak dient ontvet te worden. Apolaire kunststoffen zoals polyethyleen en polypropylen dienen een speciale voorbehandeling te ondergaan. Metalen worden best voorverwarmd zodat de verwarmde lijmspecie goed kan worden uitgestreken en er geen te snelle afkoeling is.

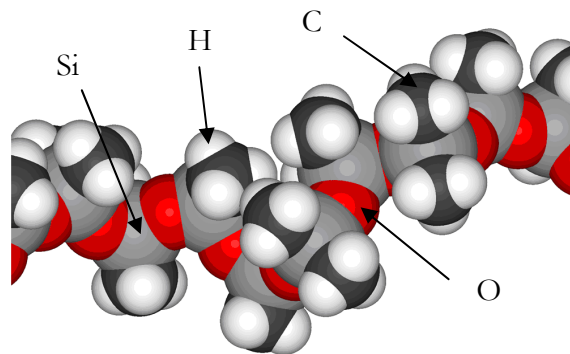
E. TOEPASSINGSGBIED

In de bouwwereld wordt dit lijmtypen zelden gebruikt. Voor het verwerken van verpakkingen, het aanbrengen van etiketten en het samenbinden van boeken is dit lijmtypen daarentegen wel geschikt.

7.2.7 SILICONENLIJM

A. DEFINITIE

Silicone wordt gewonnen door zand te vermalen en te destilleren, om er vervolgens siliconenerts uit te halen. Via enkele chemische bewerkingen wordt een siliconenpolymeer verkregen dat helicoïdale ketens bevat met afwisselend silicium- en zuurstofatomen (Figuur 23). De bindingslengte en bindingsenthalpie⁶ tussen een silicium- en zuurstofatoom is groter dan deze tussen een koolstof- en zuurstofatoom [15]. Dit zorgt voor meer rotatie tussen de moleculen wat van silicone een flexibel en elastisch polymeer maakt in vergelijking met een organische lijm⁷. Hoewel silicone ook koolstofatomen bevat, wordt deze toch vaak omschreven als anorganisch. De koolstofatomen komen namelijk niet voor in de helicoïdale keten, maar zijn gebonden op de silicium-atomen. Silicone kan bijgevolg aanzien worden als een product dat zich tussen de organische en anorganische classificatie bevindt.



Figuur 23: Chemische structuur silicone

B. UITHARDINGSMECHANISME

Siliconenlijm is beschikbaar in een ééncomponent- en tweecomponentensysteem. Bij ééncomponent siliconenlijm wordt water of vocht uit de lucht opgenomen hetgeen reageert met de silicone. Gedurende de hydrolyse wordt een zuur afgesplitst, waarbij de lijm uithardt.

Wanneer de lijmlaag niet kan uitharden omdat ze te dik is of de substraten luchtondoorlatend zijn, en de lijm dus geen vocht kan opnemen, wordt de tweecomponentenvariante aangewend. Hierbij wordt aan de silicone een vernetter of versneller toegevoegd, waarbij de lijmlaag uithardt zodra de componenten met elkaar worden vermengd.

Het ééncomponentensysteem heeft als grote nadeel dat de verharding zeer traag verloopt (1 à 2mm/dag). Hierdoor schakelt men reeds snel over naar een tweecomponentensysteem, waarbij de uithardingstijd betrekkelijk minder is. De open tijd van een tweecomponentensysteem bedraagt 10 à 30 minuten.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Siliconenlijmen bezitten een grote flexibiliteit, en dit in een ruim temperatuursinterval (-40 tot 150°C). Hierdoor zijn ze goed bestand tegen mechanische invloeden. Bovendien zijn ze hittebestendig en bestand tegen vocht en andere invloeden zoals UV, ozon en corrosieve gassen. Nadeel is echter dat een lange uithardingstijd nodig is bij de ééncomponentensystemen en de corrosie van metalen niet is uitgesloten. Ook de treksterkte is relatief laag (0,5 à 3MPa).

De UV-resistentie is een groot voordeel tegenover organische lijmen, daar de kwaliteit van deze laatste zal afnemen naarmate het meer aan UV wordt blootgesteld. Ultraviolet bezit immers voldoende energie ($\pm 400\text{kJ}$) om de C-O verbinding (357kJ) van organische lijmen te verbreken. De bindingsenthalpie tussen silicium en zuurstof daarentegen bedraagt meer dan 452kJ, waardoor UV te weinig energie heeft om deze verbinding te verbreken [15].

⁶ Bindingsenthalpie: De energie die nodig is om een verbinding tussen twee deeltjes te verbreken.

⁷ Organische lijm: In de chemische samenstelling zijn koolstofatomen terug te vinden. Alle vermelde lijmsorten, op de anorganische lijm (paragraaf 7.2.11) en siliconenlijm (paragraaf 7.2.7) deels na zijn organisch.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Een grondige reiniging van het substraatoppervlak volstaat meestal voor een siliconenlijm. Metalen worden best geanodiseerd (aluminium), gelakt (staal) of voorzien van een primer.

E. TOEPASSINGSGEBIED

Siliconen bezitten een grote flexibiliteit en worden dan ook aangewend voor verbindingen waar deze eigenschap belangrijk is. Bovendien zorgt de UV-resistentie van dit lijmtypen ervoor dat buitentoepassingen in het algemeen en aan zonlicht onderhevige verbindingen in het bijzonder gebruik kunnen maken van siliconenlijm. Hierdoor worden siliconenlijmen vaak gebruikt als afdichtingsmiddel en voor het structureel verlijmen van glas.

7.2.8 HYBRIDE POLYMEERLIJM

A. DEFINITIE

Hybride⁸ polymeerlijm is een lijm van gemodificeerde silaanmoleculen (SiH₄). Deze lijm wordt ook wel SMP-lijm (Silyl Modified Polymers) of MS-lijm (Modified Silane) genoemd. Door verschillende soorten polymeren te vermengen worden diverse voordelen van aparte polymeren verkregen. Zo heeft een hybride polymeerlijm vaak een basis van polyurethaan en silicium, waarbij wordt getracht de voordelen van respectievelijk polyurethaanlijm en siliconenlijm te verkrijgen, hoewel er geen silicone aanwezig is.

B. UITHARDINGSMECHANISME

Het uithardingsmechanisme is vergelijkbaar met dat van een ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm, acrylaatlijm en siliconenlijm. Opname van water of vocht uit de omgeving doet silaan polymeriseren en de lijm uitharden. Wanneer een snellere uitharding is gewenst kan overgeschakeld worden op een tweecomponenten SMP-lijm.

Een hybride polymeerlijm heeft onder normale condities een open tijd van ongeveer 10 à 20 minuten. De uithardingsnelheid bedraagt 3 à 4mm per dag.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Hybride polymeerlijmen zijn goed bestand tegen weersinvloeden zoals UV en zorgen voor een blijvende elastische verbinding. De treksterkte is daarentegen relatief laag (1 à 4MPa).

D. TOEPASSINGSGEBIED

De goede weerstand tegen weersinvloeden en UV-belasting maakt hybride polymeerlijmen uitermate geschikt voor buitentoepassingen. Voor het constructief verlijmen van gevelpanelen wordt dit lijmtypen dan ook veel gebruikt

7.2.9 UREUMFORMALDEHYDELIJM

A. DEFINITIE

Ureumformaldehydelijm is beschikbaar in poedervorm (om tijdens de verwerking op te lossen in water) of reeds opgelost in een waterige oplossing. Na een meervoudige condensatie van ureum en formaldehyde wordt een harde lijmstof verkregen.

⁸ Hybride: Nauwe vermenging van ongelijksoortige zaken.

B. UITHARDINGSMECHANISME

De lijmverbinding wordt tot stand gebracht na toevoegen van warmte en/of een versneller, waarbij de formaldehyde een polymerisatieproces inleidt. Een onderdeel van dit proces is de condensatiereactie, welke een polymeer vormt onder afsplitsing van watermoleculen. Eén van de substraten dient bijgevolg poreus te zijn, zodat deze moleculen samen met het oploswater kunnen evacueren. Om dit volumeverlies te compenseren dient de lijmverbinding wel steeds onder druk te staan.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Ureumformaldehydelijm zorgt voor een relatief zwakke verbinding en is weinig bestand tegen de inwerking van vocht en warmte. Voorts kunnen metalen corroderen t.g.v. het afgesplitste water.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Metalen dienen van een primer te worden voorzien. Hout dient geen speciale voorbehandeling te genieten, op een voorschuring na.

E. TOEPASSINGSGBIED

Ureumformaldehyde wordt vooral in de houtverwerkende nijverheid gebruikt voor de fabricatie van bijvoorbeeld triplex-, spaan- en vezelplaten.

7.2.10 FENOL- /RESORCINOLLIJM

A. DEFINITIE

Fenol- en resorcinollijmen zijn beschikbaar in poedervorm (om tijdens de verwerking op te lossen in water) of reeds opgelost in een waterige oplossing. Fenol bestaat uit een benzeenring, waarvan één waterstofatoom vervangen is door een hydroxylgroep (OH). Resorcinol daarentegen bestaat eveneens uit een benzeenring, waarvan nu twee waterstofatomen vervangen zijn door een hydroxylgroep.

B. UITHARDINGSMECHANISME

Het uithardingsmechanisme van fenol- en resorcinollijm is analoog aan dit van ureumformaldehydelijm (paragraaf 7.2.9). Na toevoegen van warmte of een versneller wordt een polymerisatieproces op gang gebracht. De condensatiereactie, welke een onderdeel is van dit polymerisatieproces, vormt een polymeer onder afsplitsing van watermoleculen. Tijdens het lijmp proces dient de verbinding steeds onder druk te staan omdat het geëvacueerde water een volumevermindering met zich meebrengt.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Fenol- en resorcinollijmen bezitten een hoge sterkte, een goede duurzaamheid en een goede hechting op metalen. Nadeel van dit lijmtyp e is de brosse verbinding, waardoor ze niet flexibel is en er scheurvorming kan optreden.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Wanneer de substraten hout zijn volstaat het deze op te schuren. Metalen daarentegen dienen wel een speciale voorbehandeling te ondergaan.

E. TOEPASSINGSGBIED

Vooral hout wordt met fenol- en resorcinollijm verlijmd ter fabricatie van triplex-, spaan- en vezelplaten. Thermoplastische kunststoffen kunnen niet met dit lijmtypen worden verlijmd, thermohardende kunststoffen daarentegen wel.

Opmerking: Ureumformaldehydelijm en fenol-resorcinollijm behoren tot de polycondensatielijmen. In beide gevallen treedt er immers een meervoudige condensatiereactie op, waarbij watermoleculen worden afgesplitst. Naast genoemde twee lijmtypen zijn er echter nog andere soorten beschikbaar, hoewel deze steeds een afgeleide vorm zijn (zie paragraaf 15.2).

7.2.11 ANORGANISCHE LIJM

A. DEFINITIE

Alle voorgaande lijmtypen, op siliconenlijm deels na, hebben een basis van organische bestanddelen. Er zijn immers steeds koolstofproducten aanwezig, meestal gebonden op zuurstof, stikstof, chloor en zwavel.

Anorganische lijmen bevatten geen koolstof, maar zijn veelal gebaseerd op een keramische of oxidebasis, zoals aluminiumoxide, siliciumoxide en magnesiumoxide. Deze oxiden zijn, hoewel de basisstof een metallische oorsprong heeft, niet-metallisch door hun geoxideerde vorm. Hierdoor voldoen anorganische lijmen aan de definitie van een lijm (zie paragraaf 3.3.3). Doch wordt met lijm meestal de organische producten bedoeld, welke bijvoorbeeld een basis hebben van polymeren of natuurlijke harsen. In dit opzicht zijn anorganische lijmen dus in een aparte tak van lijmen onder te verdelen, en zijn ze bijgevolg meer verwant met cementproducten. Hoewel deze laatste ook als lijm kan worden geclassificeerd, worden zij meestal als een andere klasse beschouwd.

Anorganische lijmen worden vooral toegepast wanneer de verbinding aan hoge temperaturen wordt blootgesteld. Organische lijmen zijn over het algemeen bestand tegen temperaturen tot ongeveer 150°C. Anorganische lijmen daarentegen kunnen zelfs temperaturen van 1000°C enige tijd weerstaan.

B. UITHARDINGSMECHANISME

De uitharding kan op verschillende manieren verlopen. Enerzijds kan de verbinding tot stand komen door het verdampen van water. Anderzijds kan de uitharding tot stand komen onder verhoogde temperatuur, waarbij de lijm overgaat naar een glasachtige toestand. De uithardingstemperaturen liggen dan meestal boven 400°C. Een derde uithardingsmechanisme berust op de reactie met vocht, waarbij meestal ook temperaturen van meer dan 150°C noodzakelijk zijn.

C. VERDERE EIGENSCHAPPEN

Zoals reeds eerder vermeld bezitten anorganische lijmen een goede weerstand tegen hoge temperaturen. Nadeel is echter dat een brosse, weinig flexibele verbinding wordt gecreëerd die weinig bestand is tegen schokbelastingen. Tevens vormt de benodigde temperatuur bij uitharding een drempel voor een vlot gebruik.

D. OPPERVLAKTEBEHANDELING

Het substraatoppervlak dient schoon en vetvrij te zijn.

E. TOEPASSINGSGBIED

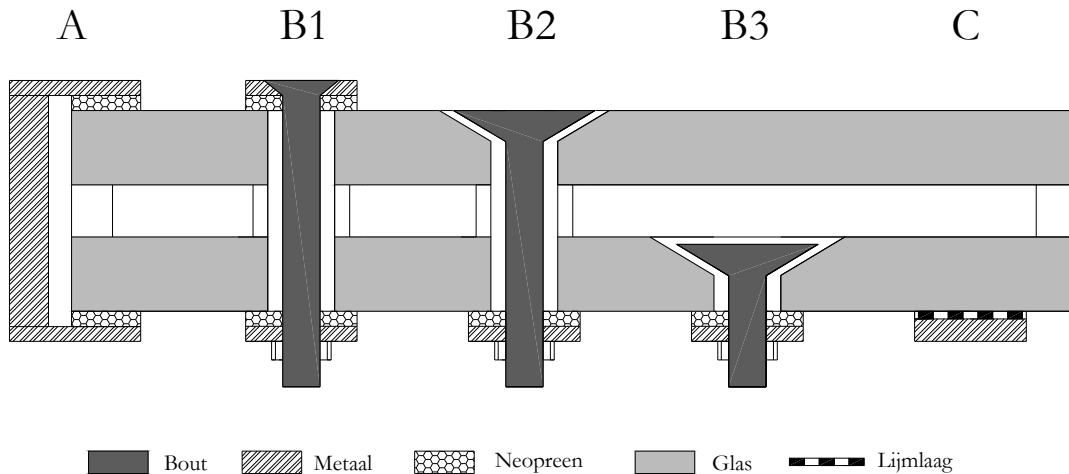
Anorganische lijmen worden vooral gebruikt om glas en keramische producten te verlijmen, en dit in een milieu waar hoge temperaturen kunnen voorkomen. Hierdoor wordt anorganische lijm veel gebruikt voor het creëren van een brandveilig systeem. Het verlijmen van steenwol is een voorbeeld binnen dit kader.

HOOFDSTUK 8: STRUCTURELE BEGLAZING

8.1 ALGEMEEN

Glas staat wegens zijn transparantie en designmogelijkheden garant voor moderniteit. Hierdoor is het materiaal dan ook bijzonder geliefd bij architecten en ontwerpers [16]. Maar glas omvat meer dan enkel design. Het comfort stijgt namelijk aanzienlijk wanneer natuurlijk licht rijkelijk aanwezig is.

Om glas aan een raamwerk uit metaal te bevestigen zijn verschillende verbindingstechnieken toepasbaar.



Figuur 24: Verbindingsmogelijkheden glas

Het meest traditionele verbindingssysteem is het gebruik van raamprofielen met glaslatten, waarbij de glazen panelen in het vast schrijnwerk worden geklemd (Figuur 24, A). Deze verbindingsmethode impliceert wel dat aan de buitenzijde een raster van raamprofielen zichtbaar is.

Wanneer wordt geopteerd voor een volledige glazen gevel, zonder het zicht van profielen aan de buitenzijde, kan gebruik worden gemaakt van een puntvormige verbinding. Hierbij wordt het glaspaneel op verschillende punten voorzien van een bout welke het paneel draagt. De bouten worden aan de binnenzijde meestal bevestigd op kruisvormige stukken, zogenaamde spiders (Figuur 25).



Figuur 25: 4-puntsbevestiging van Spider Glass (© www.anzor.co.nz)

Binnen dit kader zijn nog eens verschillende technieken beschikbaar [17]. De meest eenvoudige techniek is de traditionele boutverbinding, waarbij in eerste instantie een gat in het glas wordt gemaakt. Hierdoor

wordt een bout gestoken die het glas tegen de staalplaat klemt (Figuur 24, B1). Voor het vermijden van al te hoge piekspanningen wordt er tussen het staal en het glas een elastisch, doch sterk materiaal geplaatst zoals neopreen. Groot nadeel van dit verbindingsprincipe is het feit dat bij buiging van de glasplaten enorme wrikkrachten worden gegenereerd op de verbinding. Hierdoor bezitten de spiders meestal de mogelijkheid enige rotatie toe te laten. Om de wrikkrachten alsnog te reduceren kan verbindingsprincipe B2 worden angewend (Figuur 24, B2), waarbij de bout verzonken is en de klemkracht in de neutrale spanningslijn van de glasplaat zit.

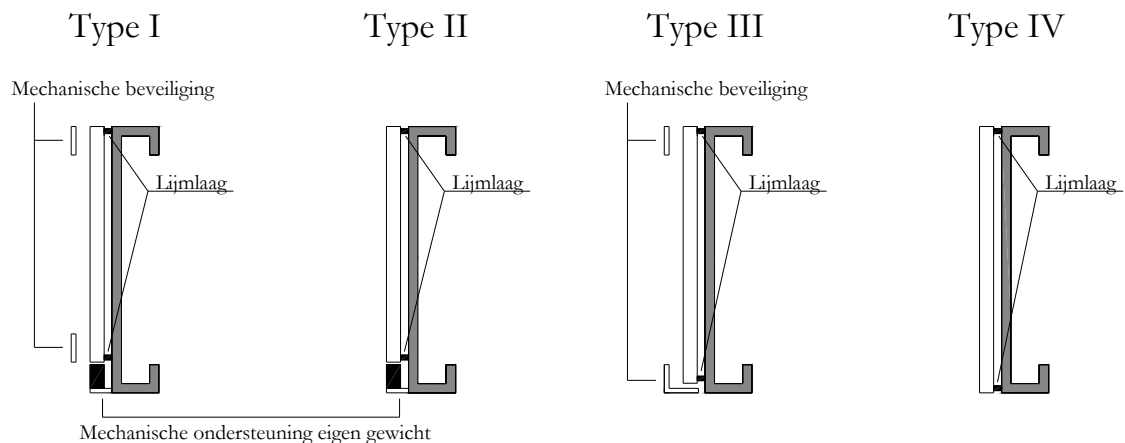
Bij verbindingstype B3 (Figuur 24, B3) klemt de bout in een wigvormig uitgefreesde ruimte. Voordeel hierbij is dat aan de buitenzijde van het glas de verbinding niet zichtbaar is, waardoor ook de waterafdichting merkelijk verbetert.

Een laatste verbindingstechniek tenslotte vormt de structurele verlijming of structurele beglazing (Figuur 24, D), waarbij het glas rechtstreeks op de achterliggende structuur wordt gelijmd.

Het grootste voordeel van het gebruik van lijm bij glazen toepassingen is het relatief grote contactoppervlak tussen glas enerzijds en profielen met een metaal of aluminiumkarakter anderzijds. Overige voordelen zijn een grotere weerstand tegen vermoeiing, geen rechtstreeks contact tussen glas en profiel en de mogelijkheid tot een esthetische uitvoering. Bovendien dient er geen gat in het glas te worden gemaakt, waardoor het risico op condensvorming sterk vermindert. Het vermijden van bouten impliceert tevens dat het geheel thermisch beter presteert. De bouwwereld kijkt echter kritisch naar dit concept omdat er weinig controle is over de uitvoering.

8.2 BEVESTIGING

Het structureel verlijmen van glas kan onder verschillende vormen voorkomen [ETAG 002 - 18]. Een belangrijke factor binnen dit kader is het eigen gewicht van het glas. Het eigen gewicht kan enerzijds door de lijmlaag zelf worden opgevangen en afgedragen naar de onderbouw. Anderzijds kunnen er ondersteuningsmechanismen worden voorzien die het eigen gewicht opvangen. Hierbij worden overige belastingen wel door de lijmlaag opgenomen. Voorts kan er een bijkomende mechanische beveiliging worden aangebracht die het glaspaneel tegenhoudt bij falen van de lijmlaag. Er vallen bijgevolg vier bevestigingstypes te onderscheiden, weergegeven in onderstaande Figuur 26.

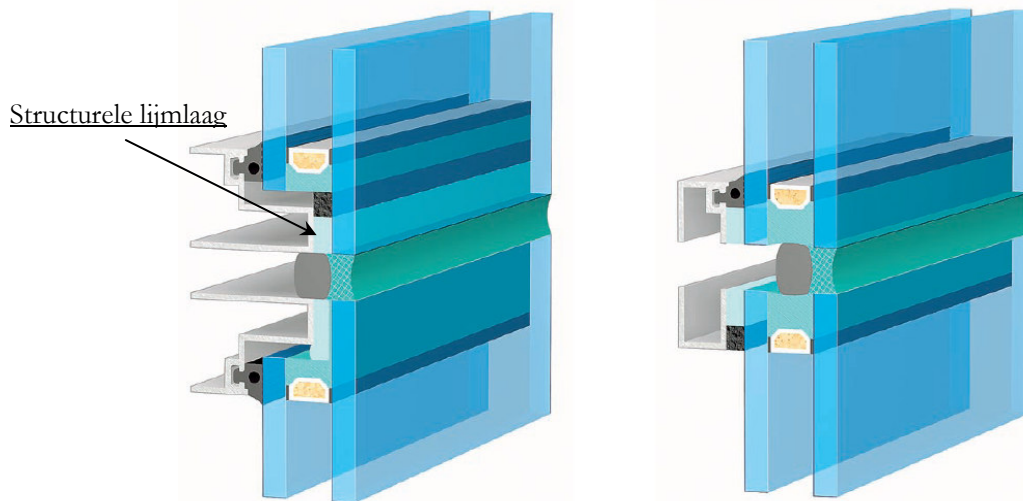


Figuur 26: Bevestigingswijzen structurele beglazing volgens ETAG 002 [18]

Volgens de Europese richtlijn ETAG 002 [18] mogen de Types III en IV enkel gebruikt worden voor enkelvoudige glaspanelen. Dubbel glas daarentegen dient steeds mechanisch ondersteund te worden (Types I en II). Nochtans zijn lijmfabrikanten overtuigd van het feit dat ook Types III en IV kunnen gebruikt worden voor dubbele beglazing. Hierbij dient het volledige lijmproces wel aan hun eisen en voorwaarden te voldoen.

Naar de praktijk toe zijn er twee verschillende soorten verbindingstechnieken voor het structureel verlijmen van glas. In het eerste geval bezit het buitenste, externe paneel van de dubbele beglazing grotere

afmetingen, zodat hier de lijmlaag op wordt aangebracht (Figuur 27, links). In het tweede geval hebben het interne en externe glaspaneel dezelfde dimensies, zodat de lijmlaag op het interne paneel wordt aangebracht (Figuur 27, rechts). Dit impliceert dat alle dynamische belastingen welke op het externe paneel aangrijpen, door de onderlinge verbinding tussen de twee panelen naar het interne paneel moeten worden overgedragen. Deze onderlinge verbinding dient deze lasten dus te weerstaan en wordt hierop gedimensioneerd.

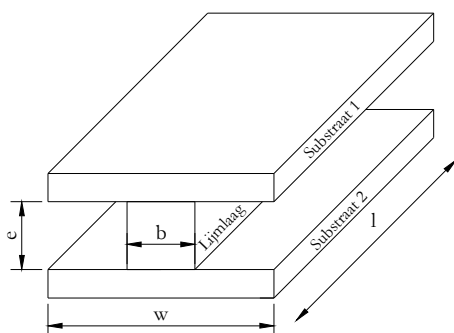


Figuur 27: Verbindingstechnieken structurele beglazing (© www.dowcorning.com)

Voorts wordt er een onderscheid gemaakt naar het aantal gelijkde zijden [19], waarbij een 4-zijdige en 2-zijdige structurele beglazing worden onderscheiden. Bij de 4-zijdige structurele beglazing worden zowel de horizontale als de verticale randen gelijmd tegen het achterliggend kader. Deze techniek wordt het meest gebruikt in Europa. Bij een 2-zijdige structurele beglazing daarentegen is de lijm enkel voorzien op twee tegenovergestelde zijden van het glaspaneel. De andere twee zijden worden mechanisch verankerd of dragen niet bij tot de krachtsoverdracht.

8.3 PROEFOPSTELLING EN VOORWAARDEN

De mechanische eigenschappen van een lijmverbinding worden proefondervindelijk bepaald. Een proefstuk bestaat uit twee plaatjes, verbonden door een lijmstrook (Figuur 28). De materialen van het proefstuk zijn identiek aan deze van de eigenlijke verbinding, hetzij glas enerzijds en staal, aluminium of een gelijkwaardig profiel anderzijds. Het is belangrijk de verbinding van het proefstuk op gelijkaardige wijze als de werkelijke verbinding tot stand te brengen, dus ook met inbegrip van een eventuele voorbehandeling. Bovendien moeten de plaatjes voldoende stijf zijn om buiging te vermijden.



Figuur 28: Voorstelling proefstuk

Symbol	Dimensie en tolerantie
b	12 ± 1 mm
e	12 ± 1 mm
l	50 ± 2 mm
w	40 ± 10 mm

Na het vervaardigen van de proefstukken worden ze 28 dagen bewaard bij een temperatuur van $23 \pm 2^\circ\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van $50 \pm 5\%$ (= labo-omstandigheden).

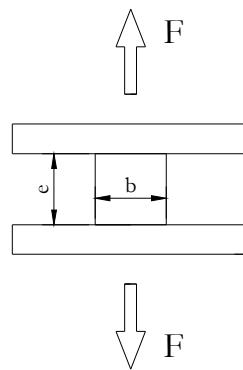
8.3.1 INITIËLE MECHANISCHE STERKTE

8.3.1.1. TREKSTERKTE

Voor het bepalen van de treksterkte wordt in totaal gebruik gemaakt van 20 proefstukken, welke onderverdeeld worden in drie groepen om de treksterkte in drie condities te bepalen. Voor het uitvoeren van de test worden ze gedurende $24 \pm 4u$ geconditioneerd onder volgende omstandigheden.

- 5 proefstukken bij een temperatuur van -20°C
- 10 proefstukken bij een temperatuur van $+23^{\circ}\text{C}$
- 5 proefstukken bij een temperatuur van $+80^{\circ}\text{C}$

De eigenlijke trekproef (Figuur 29) gebeurt door een axiale belasting aan te brengen, waarbij de proef verplaatsingsgestuurd verloopt met een snelheid van 5mm/min.



Figuur 29: Voorstelling trekproef

De trekspanning σ wordt gevonden uitgaande volgende formule, en uitgezet in een spanning - rek diagram.

$$\sigma = \frac{F}{b \cdot l}$$

Uitgaande deze proefresultaten wordt een karakteristieke treksterkte $R_{u,5}$ opgesteld.

$$R_{u,5} = \sigma_{mean,n} - \tau_{\alpha\beta} \cdot s$$

$\sigma_{mean,n}$	Gemiddelde waarde van de trekspanning bij breuk [N/mm ²]
s	Standaardafwijking van de reeks proefresultaten [N/mm ²]
$\tau_{\alpha\beta}$	Variabele, afhankelijk van het aantal proefstukken [-]

Aantal proefstukken	5	6	7	8	9	10	15	30	∞
$\tau_{\alpha\beta}$	2,46	2,33	2,25	2,19	2,14	2,10	1,99	1,87	1,64

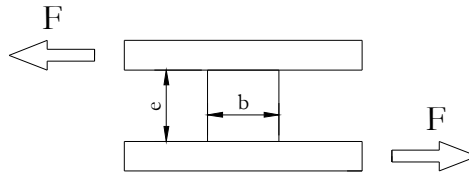
Opmerking: In de statistiek wordt het 5% fractiel van een normale verdeling gevonden met bovenstaande formule en een variabele $\tau_{\alpha\beta}$ gelijk aan 1,64. In dit geval mag de variabele van 1,64 enkel gebruikt worden bij een oneindig aantal proefstukken. Wanneer minder proefstukken worden getest, hetgeen in de praktijk het geval is, moet een grotere variabele $\tau_{\alpha\beta}$ worden gebruikt. Dit geeft een kleinere karakteristieke waarde, waardoor er veiliger wordt gewerkt.

Vervolgens worden door de norm ETAG 002 [18] volgende voorwaarden opgelegd.

$$\frac{\sigma_{mean,-20^{\circ}\text{C}}}{\sigma_{mean,23^{\circ}\text{C}}} \geq 0,75 \quad \text{en} \quad \frac{\sigma_{mean,80^{\circ}\text{C}}}{\sigma_{mean,23^{\circ}\text{C}}} \geq 0,75$$

8.3.1.2. SCHUIFSTERKTE

Voor de bepaling van de schuifsterkte worden analoge proefstukken gebruikt en bewaringsvoorschriften gesteld als bij de treksterkte. Enkel de belastingswijze verschilt daar er ditmaal een schuifspanning wordt aangelegd (Figuur 30).



Figuur 30: Voorstelling afschuifproef

De schuifspanning τ wordt gevonden uitgaande volgende formule, en uitgezet in een spanning - rek diagram.

$$\tau = \frac{F}{b \cdot l}$$

Uitgaande deze proefresultaten wordt een karakteristieke schuifsterkte $R_{u,5}$ opgesteld.

$$R_{u,5} = \tau_{mean,n} - \tau_{\alpha\beta} \cdot s$$

$\tau_{mean,n}$	Gemiddelde waarde van de schuifspanning bij breuk [N/mm ²]
s	Standaardafwijking van de reeks proefresultaten [N/mm ²]
$\tau_{\alpha\beta}$	Variabele afhankelijk van het aantal proefstukken (zie 8.3.1.1)[-]

Vervolgens worden door de norm ETAG 002 [18] volgende voorwaarden opgelegd.

$$\frac{\tau_{mean,-20^{\circ}C}}{\tau_{mean,23^{\circ}C}} \geq 0,75 \quad \text{en} \quad \frac{\tau_{mean,80^{\circ}C}}{\tau_{mean,23^{\circ}C}} \geq 0,75$$

8.3.2 MECHANISCHE STERKTE NA ARTIFICIËLE VEROUDERING

8.3.2.1. TREKSTERKTE NA ONDERDOMPELING IN WATER BIJ HOGE TEMPERATUUR

Het kunstmatig verouderen van proefstukken heeft als doel de eigenschappen van de lijm te beoordelen na blootstelling aan verschillende invloeden, welke gelijkaardig zijn aan de werkelijke omstandigheden.

De proefstukken worden analoog vervaardigd als in paragraaf 8.3, met dit verschil dat ze bewaard worden in gedemineraliseerd water bij een temperatuur van $45 \pm 1^{\circ}C$. Een eerste reeks van 5 proefstukken wordt na 21 dagen bewaring gedurende $24 \pm 4u$ geconditioneerd onder labo-omstandigheden. Hierna wordt de treksterkte bepaald zoals beschreven in paragraaf 8.3.1.1. Een volgende reeks van 5 proefstukken wordt na 42 dagen bewaring beproefd onder bovenvermelde condities.

Vervolgens worden door de norm ETAG 002 [18] volgende voorwaarden opgelegd.

$$\frac{\sigma_{mean,21 \text{ dagen}}}{\sigma_{mean,23^{\circ}C}} \geq 0,75 \quad \text{en} \quad \frac{\sigma_{mean,42 \text{ dagen}}}{\sigma_{mean,23^{\circ}C}} \geq 0,75$$

8.3.2.2. TREKSTERKTE NA OVERIGE INVLOEDEN

Niet enkel onderdompeling in water is een vorm van artificiële veroudering. Zo bestaan er nog vier andere vormen welke hier worden opgesomd. Voor een gedetailleerde beschrijving ervan wordt verwezen naar de norm ETAG 002 [18].

- Treksterkte na blootstelling aan NaCl
- Treksterkte na blootstelling aan SO₂
- Treksterkte na behandeling met reinigingsproducten
- Treksterkte na materiaalcontacten

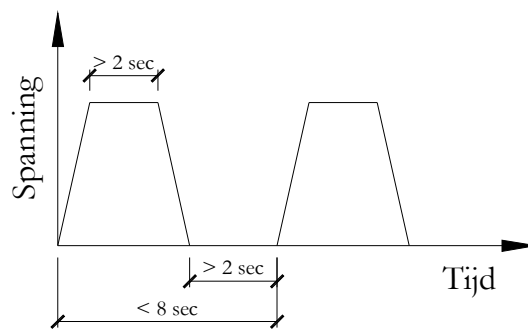
8.3.3 MECHANISCHE STERKTE NA MECHANISCHE VEROUDERING

Het mechanisch verouderen van proefstukken bestaat eruit deze te onderwerpen aan een dynamische belasting. Tien proefstukken worden gedurende 28 dagen bewaard bij labo-omstandigheden en vervolgens onderworpen aan volgende belastingscycli.

- 100 cycli met een spanning van 0,1 σ_{des} tot σ_{des} .
- 250 cycli met een spanning van 0,1 σ_{des} tot 0,8 σ_{des} .
- 5000 cycli met een spanning van 0,1 σ_{des} tot 0,6 σ_{des} .

Waarbij σ_{des} de rekenwaarde van de trekspanning voorstelt en gelijk is aan $R_{u,5}/6$. $R_{u,5}$ wordt gevonden uitgaande proefresultaten van de gewone trekproef bij een temperatuur van 23°C (paragraaf 8.3.1.1). Er wordt opgemerkt dat er een veiligheidsfactor van 6 wordt ingevoerd, hetgeen zeer groot is. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld staal (veiligheidsfactor 1,15) en beton (veiligheidsfactor 1,5).

Elke belastingscyclus wordt gekenmerkt door een belastingsfase met een tijdsduur van meer dan 2 seconden en een ontlastingsfase van meer dan 2 seconden. De totale cyclus mag echter niet meer dan 8 seconden bedragen (Figuur 31).



Figuur 31: Spanningsverloop belastingscyclus

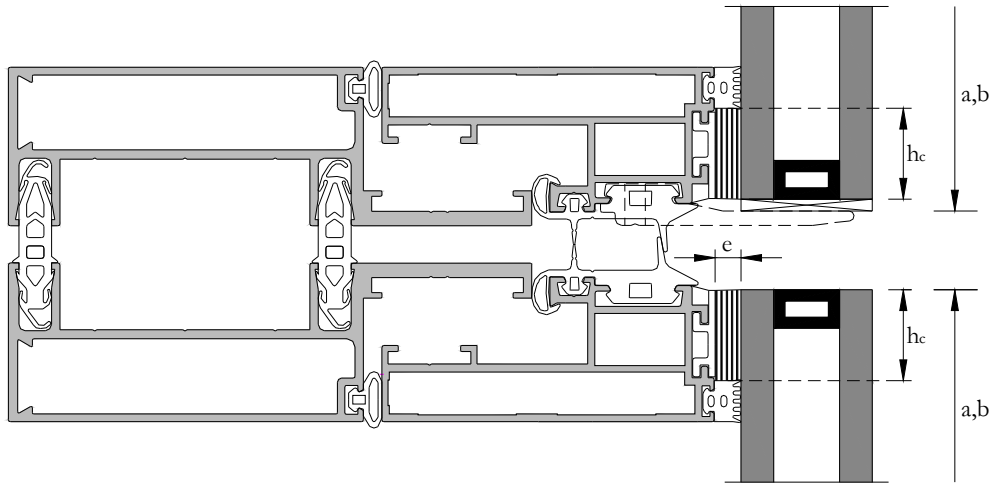
Na de totale cyclische belasting wordt het proefstuk gedurende 24 ± 4 u bewaard bij labo-omstandigheden om er vervolgens een trekproef op uit te voeren zoals beschreven in paragraaf 8.3.1.1.

Vervolgens wordt door de norm ETAG 002 [18] volgende voorwaarde opgelegd.

$$\frac{\sigma_{mean, mech\ verouderd}}{\sigma_{mean, 23^{\circ}C}} \geq 0,75$$

8.4 DIMENSIONERING LIJMLAAG

De lijmlaag tussen het glas en het profiel dient een minimale dikte en breedte te bezitten (Figuur 32). De Europese norm ETAG 002 [18] stelde hiervoor een aantal formules op voor een ontwerp levensduur van 25 jaar.



Figuur 32: Verklaring symbolen op profiel met structureel verlijmd glas (© www.reynaers.com)

In eerste instantie dient er een onderscheid gemaakt te worden naar de ontwerp toestand. Enerzijds is er de bezwijkgrenstoestand welke niet mag overschreden worden ter voorkomen van stabiliteitsevenwicht. Anderzijds is er de gebruiksgrenstoestand welke voorwaarden oplegt naar maximale doorbuiging toe.

Vooral de bezwijkgrenstoestand is in dit werk van belang, daar het eisen oplegt voor de eigenlijke lijmverbinding. In dit opzicht valt er een onderscheid te maken naar type ondersteuning. Enerzijds zijn er de mechanisch ondersteunde glaspartijen, welke in paragraaf 8.2 onder type I en II werden geclassificeerd, en waarbij de lijmlaag het eigen gewicht van het glas niet draagt. Anderzijds zijn er de types III en IV, waarbij de lijmlaag de volledige belasting, inclusief het eigen gewicht glas, draagt.

De gebruiksgrenstoestand wordt verder kort vermeld, maar niet uitgebreid besproken. Het zijn immers voorwaarden voor de glaspalen en bevestigingsprofielen, hetgeen niet tot de kern van dit werk behoort.

Onderstaande dimensioneringwijze is deze van een 4-zijdige structurele beglazing, zoals de meeste hedendaagse toepassingen in Europa.

8.4.1 BEZWIJKGRENSTOESTAND

8.4.1.1. ONDERSTEUNDE GLASPARTIJEN

De breedte van de lijmlaag wordt gevonden uitgaande van onderstaande betrekking.

$h_c \geq \frac{W \cdot a}{2 \cdot \sigma_{des}}$	$6 \text{ mm} \leq h_c \leq 20 \text{ mm}$	<p>h_c Breedte van de lijmlaag, begrepen tussen de grenzen 6 en 20mm [mm].</p> <p>W Relevante belastingscombinatie ten gevolge wind en sneeuw, waarbij vooral een negatieve winddruk relevant is [N/mm²].</p> <p>a Kortste zijde van het glaspaneel [mm].</p> <p>σ_{des} Rekenwaarde van de treksterkte, hetzij gelijk aan onderstaande formulering [N/mm²]. Door een veiligheidsfactor van 6 te aanvaarden kan σ_{des} aanzien worden als een elasticiteitsgrens. Onder deze grens reageert de lijm als een elastisch materiaal, boven deze grens is de lijmlaag onderhevig aan vermoeiing.</p>
		$\sigma_{des} = \frac{R_{u,5}}{6}$
		<p>$R_{u,5}$ Karakteristieke waarde van de treksterkte, hetzij gelijk aan onderstaande formulering [N/mm²].</p>
		$R_{u,5} = \sigma_{mean,23^\circ C} - \tau_{\alpha\beta} \cdot s$
		<p>$\sigma_{mean,23^\circ C}$ Gemiddelde waarde van de trekspanning bij breuk bij een temperatuur van 23°C [N/mm²].</p> <p>$\tau_{\alpha\beta}$ Variabele, afhankelijk van het aantal proefstukken, zie 8.3.1.1 [-].</p> <p>s Standaardafwijking van de reeks proefresultaten [N/mm²].</p>

De **dikte van de lijmlaag** wordt gevonden uitgaande van onderstaande formule.

$$e = \left| \frac{G \cdot \Delta}{\tau_{des}} \right|$$

e Dikte van de lijmlaag, met een minimum van 4mm, doch aan te raden 6mm als ondergrens te nemen [mm].

G Glijdingsmodulus van de lijm, welke wordt gevonden door volgende formule [N/mm²].

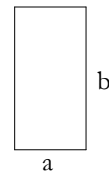
$$G = \frac{E}{3}$$

E Elasticiteitsmodulus van de lijm [N/mm²].

Δ Coëfficiënt welke de afmetingen van het glas en de temperatuursinvloeden in rekening brengt [mm].

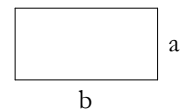
Geval 1: $b > a$ met a als ondersteunde zijde

$$\Delta = [(T_c - T_0) \cdot \alpha_c - (T_v - T_0) \cdot \alpha_v] \cdot \sqrt{(a/2)^2 + b^2}$$



Geval 2: $b > a$ met b als ondersteunde zijde

$$\Delta = [(T_c - T_0) \cdot \alpha_c - (T_v - T_0) \cdot \alpha_v] \cdot \sqrt{a^2 + (b/2)^2}$$



T_c Ontwerptemperatuur van het metalen frame, met een typische waarde van 55°C.

T_v Ontwerptemperatuur van het glas, met een typische waarde van 80°C, hoewel 100°C voor mat glas wordt voorgeschreven.

T_0 Temperatuur van de lijmlaag bij toepassing, met een typische waarde van 20°C.

α_c Lineaire uitzettingscoëfficiënt van het metalen frame [1/°C].

$$\text{Aluminium: } \alpha_c = 24 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\text{Staal: } \alpha_c = 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

α_v Lineaire uitzettingscoëfficiënt van het glas, met een typische waarde van $9 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

a, b Dimensies van het glaspaneel, waarbij a de kortste zijde is [mm].

τ_{des} Rekenwaarde van de schuifsterkte, hetzij gelijk aan onderstaande formulering [N/mm²].

$$\tau_{des} = \frac{R_{u,5}}{6}$$

$R_{u,5}$ Karakteristieke waarde van de schuifsterkte, hetzij gelijk aan onderstaande formulering (zie 8.3.1.2) [N/mm²].

$$R_{u,5} = \tau_{mean,23^\circ\text{C}} - \tau_{\alpha\beta} \cdot s$$

$\tau_{mean,23^\circ\text{C}}$ Gemiddelde waarde van de schuifspanning bij breuk bij een temperatuur van 23°C [N/mm²].

8.4.1.2. ZELFDRAGENDE GLASPARTIJEN

De **breedte van de lijmlaag** wordt gevonden uitgaande van onderstaande betrekking.

$$h_c \geq \frac{P}{\tau_\infty \cdot (2 \cdot h_v)}$$

$$\tau_\infty = \frac{\tau_{des}}{\gamma_c}$$

h_c	Breedte van de lijmlaag, begrepen tussen de grenzen 6 en 20mm [mm].
P	Eigen gewicht glas [N].
τ_∞	Rekenwaarde van de schuifsterkte onder permanente belasting, hetzij gelijk aan onderstaande betrekking [N/mm ²].
γ_c	Kruipfactor lijm ($\gamma_c \geq 10$) [-].
h_v	hoogte van het glaspaneel, hetzij a of b [mm].

Waarbij steeds moet gecontroleerd worden of $h_c \geq \left| \frac{W \cdot a}{2 \cdot \sigma_{des}} \right|$, conform de betrekking in paragraaf 8.4.1.1.

Opmerking: Indien de horizontale kaderelementen even stijf zijn als de verticale kaderelementen, kan $2 \cdot h_v$ in bovenstaande formule vervangen worden door $2 \cdot (a + b)$ [19]. Het is echter veiliger deze opmerking niet in acht te nemen.

De **dikte van de lijmlaag** wordt gevonden met onderstaande formule, waarbij wordt opgemerkt dat deze formulering analoog is als bij ondersteunde glaspartijen (paragraaf 8.4.1.1). Hoewel de richtlijn ETAG 002 een minimum van 4mm voorschrijft, raadt ze toch aan een minimale dikte van 6mm te nemen.

$$e = \left| \frac{G \cdot \Delta}{\tau_{des}} \right|$$

Waarbij de coëfficiënt welke de temperatuursinvloeden in rekening brengt met volgende uitdrukking wordt berekend.

$$\Delta = [(T_c - T_0) \cdot \alpha_c - (T_v - T_0) \cdot \alpha_v] \cdot \sqrt{(a/2)^2 + (b/2)^2}$$

Voorts dient de regel gerespecteerd dat dikte en breedte zich in volgend interval bevinden.

$$e \leq h_c \leq 3e$$

Uit zowel de berekeningsmethode van ondersteunde glaspartijen als deze van zelfdragende glaspartijen blijkt dat de dikte van de lijmlaag enkel geïnspireerd is op de thermische belasting. Er treedt namelijk een verschil in verlenging/verkorting op tussen het glas en het substraat, waardoor een schuifspanning wordt gecreëerd.

De lijmbreedte daarentegen wordt bepaald door de normaalspanning of de schuifspanning die gegenereerd worden door de meest kritieke belastingen, in dit geval respectievelijk de wind of het eigen gewicht.

Het is dus foutief te stellen dat een lijmverbinding gedimensioneerd kan worden door enkel op de lijmdikte in te spelen. Integendeel, een structurele lijmverbinding wordt enkel berekend op basis van zijn lijmbreedte, waarbij de lijmdikte enkel dienst doet als uitzettingsmogelijkheid.

8.4.2 GEBRUIKSGRENSTOESTAND

De norm ETAG 002 [18] stelt twee voorwaarden op wat betreft maximale doorbuiging.

- Het bevestigingsprofiel mag een maximale doorbuiging hebben van 1/200 van de lengte tussen de profielen.
- Het glaspaneel zelf mag in het midden een maximale doorbuiging hebben van 1/100 van de kortste zijde.

8.5 LIJMYPES

Zoals reeds vermeld in paragraaf 7.2.7 vormt siliconenlijm de ideale lijmsort voor het structureel verlijmen van glas. De goede weerstand tegen weersinvloeden zoals UV, ozon en warmte maakt het een prima geschikt lijmtyp voor buitentoepassingen. Ook de grote flexibiliteit binnen een ruim temperatuursinterval is van groot belang voor het structureel verlijmen van glas. Op deze manier worden de spanningen immers gelijkmatig verdeeld en worden differentiële uitzettingen tussen glas en metaal opgenomen. Maar de belangrijkste factor is de goede weerstand tegen veroudering [16]. Variabele belastingen zoals wind zullen namelijk een buiging van het glaspaneel veroorzaken, hetgeen door de lijmverbinding moet worden opgenomen.

Voor de beglazingstypes I en II (zie paragraaf 8.2) is het gebruik van een ééncomponent siliconenlijm toegelaten. Dit lijmtyp heeft een langere uithardingstijd, maar dit vormt geen probleem omdat het eigengewicht wordt overgedragen via een mechanische ondersteuning. Bij de beglazingstypes III en IV daarentegen wordt het eigengewicht via de lijmlaag opgenomen. Hierdoor dient de siliconenlijm een kortere uithardingstijd te bezitten, waardoor het gebruik van een tweecomponenten siliconenlijm meer aan de orde is. Dit tweecomponentensysteem kan natuurlijk ook voor de types I en II worden aangewend.

Volgens de norm ETAG 002 [18] mogen glazen panelen enkel op geanodiseerd aluminium, gepoederlakt aluminium en roestvast staal worden verkleefd.

De hecht kwaliteit tussen siliconenlijm en geanodiseerd aluminium is zeer goed. Dit ondanks het feit dat de oxidehuid bij aluminium raamprofielen meestal geseald is (zie paragraaf 5.2.3), waardoor de poriën worden afgesloten en de mogelijkheid tot mechanisch verankeren verloren gaat. In 80% van de gevallen dient zelfs geen primer te worden aangebracht, en kan na het ontvetten rechtstreeks op de profielen worden gelijmd [8]. Uitsluitel voor het al dan niet gebruiken van een primer gebeurt na een hechtingstest.

Indien de ondergrond gepoederlakt aluminium is, kan het gebeuren dat een extra primer moet worden aangebracht. Door het coaten van de aluminium ondergrond is deze beter bestand tegen verweren en UV-belasting, maar er hoeft niet noodzakelijk een verbeterd hechtvermogen te zijn. Zo zal bij het gebruik van polyestercoatings een lager hechtvermogen worden gevormd dan bij het onbehandeld materiaal, waardoor er een extra hechtprimer moet worden aangebracht.

Ook het gebruik van roestvast staal (RVS) als ondergrond laat structureel verlijmen toe. De oppervlaktestructuur van RVS is, in tegenstelling tot de gladde structuur van aluminium, microscopisch gezien nogal scherp piekend. De verlijming gebeurt dus vooral op de pieken en vloeit minder in de dalen. Hierdoor is de hechting lager dan bij aluminium, waardoor het verlijmen van glas op RVS minder is aangewezen, doch wordt toegelaten (zie paragraaf 5.2.2).

Het verlijmen van glas tegen gelakt staal is daarentegen niet toegestaan door de norm ETAG 002 [18]. De hechting tussen staal en laklaag is moeilijk te evalueren en vormt in vele gevallen een zwak punt. Ook het verlijmen van glas tegen ruw aluminium, PVC of hout is niet toegestaan [8].

Oplosmiddelvrije polyurethaanlijmen bezitten een hoge sterkte en elasticiteit, maar zijn meestal UV-onstabiel [16]. Hierdoor maakt het ze niet steeds geschikt voor glazen geveltoepassingen, daar er zeer veel UV-belasting is. Dit betekent dat de lijmverbinding tegen licht en UV beschermd moet worden. Dit kan gebeuren door een zeefdruklaag in het glas te voorzien, conform het verlijmen van autoruiten [16]. Zoals reeds vermeld vertonen oplosmiddelvrije polyurethaanlijmen een hoge elasticiteit, doch is deze meestal

lager dan bij siliconenlijm. Hierdoor kunnen polyurethaanlijmen niet steeds gebruikt worden voor het verlijmen van grote glasoppervlakken omdat de thermische uitzetting te groot is.

UV-uithardende acrylaten worden reeds lang gebruikt om glas te verlijmen [16]. De noodzakelijke UV om de uitharding te starten is immers steeds aanwezig omdat glas lichtdoorlatend is. De meeste UV-acrylaten hebben een hoge sterkte, maar zijn bros en verdelen de spanningen slechts gering. Voor het structureel verlijmen van glaspanelen dient de lijm een grote elasticiteit te bezitten omdat de thermische uitzetting hoog kan oplopen. Hierdoor zijn de traditionele UV-uithardende lijmen niet geschikt voor dit toepassingsgebied.

Na recente ontwikkelingen is de lijmwereld er in geslaagd de elasticiteit van UV-uithardende acrylaten te vergroten. Doch is deze elasticiteit in vergelijking met silicone nog steeds relatief klein (tot een factor 30 verschil [20] [21]), waardoor buitentoepassingen vermeden moeten worden [21]. Voor binnentoepassingen zoals glazen wanden daarentegen kan het lijmtypen wel worden gebruikt [16]. De thermische belasting is immers veel minder door de kleinere temperatuursfluctuaties. Een ander voorbeeld binnen dit kader zijn dragende elementen uit glas. Zo kunnen verschillende glaspanelen tegen elkaar worden gekleefd zodat een dragende ligger wordt verkregen. Hierbij is het mogelijk de uiterste glaspanelen een beetje te verschuiven tegenover de anderen, waardoor onderaan een uitsparing wordt verkregen. Hierin kan tenslotte een klein stalen profieltje worden gelijmd, waardoor een materiaal wordt verkregen dat analoog is aan gewapend beton [Reinforced Glass Cantilever Beams - 22].

8.6 PRAKTISCHE BEOORDELING

Het structureel verlijmen van glas gebeurt in de meeste gevallen in een atelier, waarbij de omgevingscondities ideaal en constant zijn. De verlijmden eenheden mogen worden getransporteerd wanneer de lijmverbinding een voldoende sterkte heeft bereikt. Slechts in uitzonderlijke gevallen is het verlijmen op de werf toegelaten. In dit geval moeten voorlopige bevestigingen worden gebruikt om het glas tijdelijk vast te houden. Het vervangen van gebroken glaspanelen kan eveneens op de werf gebeuren [8].

De verlijming moet gebeuren bij een temperatuur van 5 à 35°C in een stofvrije omgeving (DOW CORNING [20]). De opbrengtijd dient zeker binnen de open tijd gelegen te zijn, en er wordt aangeraden deze te beperken tot maximaal 10 minuten. Na de open tijd mag er geen relatieve beweging optreden tussen het glaspaneel en het metalen frame.

Bij ééncomponent siliconenlijmen mag het verlijmden geheel getransporteerd worden na 21 dagen. Zoals reeds eerder aangehaald hardt een tweecomponenten siliconenlijm sneller uit, waardoor transport gewoonlijk na 10 dagen mag gebeuren. Vroeger transport is mogelijk wanneer aan twee condities is voldaan. De trekspanning bij breuk dient hoger te liggen dan 0,7MPa en de breuk moet volledig cohesief zijn. Dit wordt getest op H-proefstukken welke dezelfde bewaringscondities hebben ondergaan als de werkelijke systemen. In de praktijk worden deze resultaten meestal reeds na 1 à 2 dagen verkregen, waardoor een meer flexibel productieproces mogelijk is. Er dient immers minder stockageruimte voorzien te worden.

Onder normale omstandigheden dienen structurele lijmvoegen uit silicone niet onderhouden te worden. Siliconenlijmen zijn immers bestand tegen UV, vocht, ozon en andere weersinvloeden. Producenten van siliconenlijmen staven de goede weerstand tegen veroudering door voorbeelden aan te halen. De eerste toepassingen met structurele beglazing dateren van ongeveer 40 jaar geleden, en de toepassing werkt tot op de dag van vandaag nog steeds. Deze opmerking is natuurlijk enkel van toepassing wanneer de plaatsing op een correcte manier gebeurt.

Hoewel er geen richtlijn bestaat die de inspectie van structurele beglazing regelt, wordt er toch aangeraden op regelmatige basis een controle uit te voeren [19]. Een eerste inspectie gebeurt best na de plaatsing, gevolgd door controles na twee en vijf jaar, om dit nadien om de 5 jaar te herhalen. Deze inspectie kan verschillende vormen aannemen, gaande van een algemene visuele inspectie tot niet-destructieve proeven. Het is dan ook nodig hierin de nodige ervaring en kennis te bezitten.

8.7 KRITISCHE BENADERING

Ondanks de vele voordelen van structureel gelijmd glas dient het ook kritisch bekeken te worden. In eerste instantie kan de Europese richtlijn ETAG 002 [18] in twijfel worden getrokken. Tijdens verouderingstesten wordt bijvoorbeeld gecontroleerd of de lijmverbinding bestand is tegen de inwerking van zout en reinigingsproducten. Er dient bijgevolg op vertrouwd dat deze producten het meest kritisch zijn voor de lijm. Misschien is een lijmtipe goed bestand tegen deze producten, maar presteert het daarentegen slecht bij andere invloeden. Het kan bijvoorbeeld zijn dat een lijmtipe niet bestand is tegen nitraten en fosfaten, beiden aanwezig in mest. Uitwerpselen van vogels kunnen namelijk op een raam terechtkomen en zo een negatieve invloed uitoefenen.

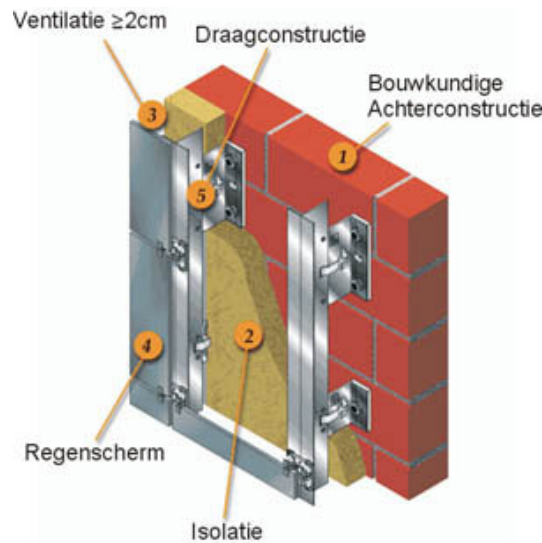
Voorts is de lijmverbinding moeilijk te controleren naar gebreken. Er kan weliswaar een visuele inspectie gebeuren, doch hiervoor is de nodige ervaring vereist en het resultaat is niet objectief. Bij een mechanische verbinding daarentegen is het eenvoudiger om een bepaalde schade te herkennen. Ook gedurende de productie is het moeilijk steeds de volledige controle te behouden. Zo dienen alle metalen substraten ontvet te worden voor verlijming. Deze voorbehandeling gebeurt manueel en het resultaat is niet zichtbaar. Een moment van onoplettendheid of vergetelheid kan er dus voor zorgen dat een profiel niet is ontvet. Dit heeft mogelijk gevolgen voor de kwaliteit van de lijmverbinding.

Tot slot blijft er de onzekerheid middels veroudering. Lijmen worden bij hun beoordeling volgens de ETAG 002 [18] kunstmatig en mechanisch verouderd, doch blijft er een perceptie van onzekerheid bestaan. Het blijft immers de vraag of de proeven wel representatief zijn voor de werkelijke veroudering tijdens gebruik. Zoals reeds eerder vermeld dient er op regelmatige basis een inspectie te gebeuren, maar het hoeft geen betoog dat dit in werkelijkheid niet steeds het geval zal zijn.

HOOFDSTUK 9: STRUCTUREEL VERLIJMEN GEVELPANELEN

9.1 ALGEMEEN

Deze toepassing kadert in het geheel van geventileerde gevelsystemen (Figuur 33). Naast het alom gekende paramentmetselwerk kunnen ook gevelpanelen gebruikt worden om gevels af te werken. Deze panelen kunnen verschillende vormen aannemen. In eerste instantie zijn er de gevelpanelen uit natuursteen, waar in dit hoofdstuk de nadruk op wordt gelegd. Maar ook overige platen zoals metaalplaten, steenvezelplaten, vezelcementplaten, thermohardende kunststofpanelen en panelen op houtbasis worden gebruikt.



Figuur 33: Geventileerde gevel met gevelpaneel (= regenscherm) (© www.sgt.nl)

De dag van vandaag worden gevelelementen nog steeds mechanisch verankerd aan de achterliggende constructie [23]. Het is echter ook mogelijk de elementen blind te bevestigen door ze te verlijmen. Dit creëert een optimale spanningsverdeling in het paneel en maakt het gebruik van ankers, klemmen of pennen overbodig. Hierdoor kunnen de panelen aanzienlijk dunner en dus lichter worden uitgevoerd. Naast de economische voordelen gebeurt de plaatsing ook soepeler en gemakkelijker.

9.2 SOORTEN GEVELPANELEN

Gevelpanelen zijn beschikbaar onder verschillende vormen en gedaantes. In dit hoofdstuk worden de meest courante panelen kort beschreven, zonder een afbakening te vormen van alle toepassingen.

9.2.1 PANELEN VAN NATUURSTEEN

Natuursteen wordt naar het ontstaanswijze ingedeeld in drie groepen: stollingsgesteente, metamorf gesteente en afzettingsgesteente. Stollingsgesteenten zijn gevormd door de stolling van magma of lava. Magma is het vloeibare gesteente dat zich onder de aardbodem bevindt. Wanneer het de aardbodem of zeebodem bereikt gaat het over tot lava. Afzettingsgesteente is ontstaan door de afzetting of bezinking van minerale deeltjes, afkomstig uit water of de atmosfeer. Metamorf gesteente tot slot is een stollingsgesteente of afzettingsgesteente dat onder invloed van temperatuur of druk is gekristalliseerd of gemetamorfiseerd. Deze ontwikkeling gebeurt op grote diepte in de aardkorst.

Het verlijmen van panelen uit natuursteen biedt door de afwezigheid van een mechanische verbinding vele voordelen. Bij een traditionele bevestiging is de anker- of penuitbreeksterkte immers het meest kritisch. Bij een gelijmde verbinding daarentegen wordt de buigtreksterkte van het materiaal maatgevend, waardoor de

panelen aanzienlijk dunner worden. Dit is een groot voordeel voor panelen uit natuursteen omdat dit materiaal een hoge massadichtheid bezit.

9.2.2 PANELEN VAN METAAL

Ook panelen uit metaal kunnen verlijmd worden tegen een achterliggend regelwerk. De meest gebruikte metalen zijn aluminium, roestvast staal en een legering op basis van zink, titaan of koper.

Panelen van metaal kunnen voorkomen onder twee verschillende vormen. Enerzijds zijn er de massieve panelen, al dan niet geprofileerd, met een dikte van grootteorde 1mm. Anderzijds zijn er de sandwichpanelen met metaalbekleding. In tegenstelling tot de traditionele sandwichpanelen zijn deze uiterst dun (grootteorde 4mm). De kern dient immers meer voor de stijfheid dan voor het isolerend vermogen. De thermische prestatie van het gevelsysteem wordt namelijk gewaarborgd door de isolatie tussen de achterliggende draagstructuur en het gevelpaneel.

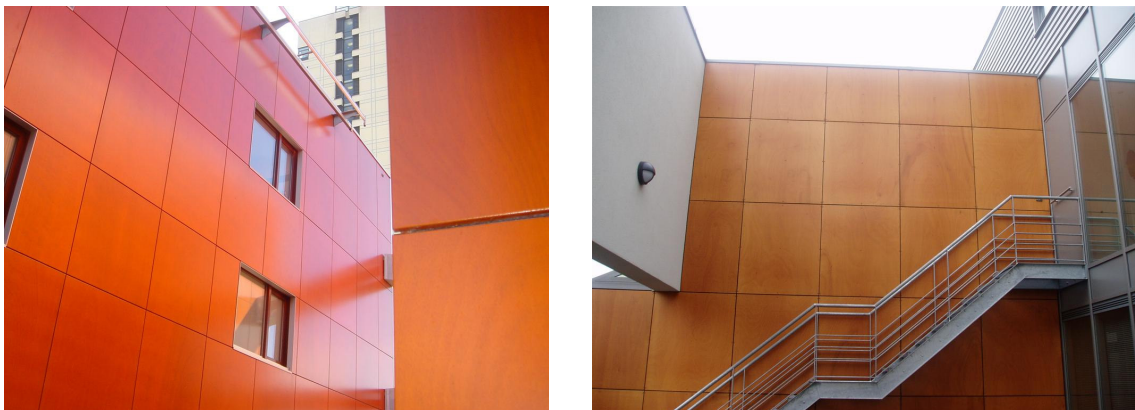
9.2.3 HPL-PANELEN

High Pressure Laminate (HPL) panelen bestaan uit vlakke homogene en massieve platen op basis van een thermohardende kunststof⁹, versterkt met houtvezels en samengeperst onder verhoogde druk en temperatuur [24]. De platen hebben meestal een dikte van 10 à 16mm, maar deze voor het structureel verlijmen zijn dunner (6 à 10mm).

Een groot voordeel van HPL-panelen is de beschikbaarheid in vele kleuren en texturen. Zo kunnen ze glanzend worden afgewerkt in metallic, waardoor de mate van lichtinval een spectrum aan kleurintensiteit geeft. Maar ook een afwerking in houtstructuur behoort tot de mogelijkheden, waarbij een houtnerf in de plaat loopt. Voorts zijn er nog tal van andere oppervlaktestructuren beschikbaar, zoals licht glooiende panelen welke een natuurlijk effect creëren. Bovendien zijn de panelen sterk, bestand tegen weersinvloeden en kunnen ze in quasi elk milieu worden toegepast.

9.2.4 PANELEN OP HOUTBASIS

Panelen op houtbasis omvatten veelal multiplex panelen, aan beide zijden afgewerkt met een kunstharcoating (onder verhoogde druk en temperatuur) voor het bevorderen van de duurzaamheid (Figuur 34). Een oneven aantal fineerlagen worden op elkaar verlijmd, waarbij de vezelrichting van een volgende laag steeds loodrecht op deze van de vorige laag staat. De panelen kunnen tot slot in de gewenste kleur worden geschilderd.



Figuur 34: Gevel met panelen op houtbasis (© www.bruynzeelmultipanel.com)

⁹ Thermoharders of duromeren hebben een fijnmazig driedimensionaal netwerk van macromoleculen. Ze hebben veel meer bindingen dan een elastomeer, waardoor de elasticiteit betrekkelijk minder is (zie paragraaf 7.1.2). In tegenstelling tot thermoplasten kunnen thermoharders niet teruggebracht worden tot hun oorspronkelijke toestand bij verwarming.

9.2.5 VEZELPANELEN

Vezelpanelen zijn onder verschillende vormen beschikbaar. In deze paragraaf worden steenvezelpanelen en vezelcementpanelen besproken, hoewel HPL-panelen ook bestaan uit samengeperst en geïmpregneerd vezelmateriaal.

Bij vezelpanelen op basis van steenvezels wordt een thermohardende kunststof gemengd met minerale steenvezels. Dit geheel hardt uit onder verhoogde temperatuur en druk. De platen worden aan de zichtzijde voorzien van een coating en aan de achterkant afgewerkt met een primer. Dit om respectievelijk bestendig te zijn tegen weersinvloeden en een goede hechting te hebben met de lijm.

Vezelcementpanelen zijn samengesteld uit cement en zand, aangevuld met natuurlijke organische vezels. De oppervlakteafwerking en overige eigenschappen zijn conform vezelpanelen op basis van steenvezels. Vezelpanelen zijn ook weer onder verschillende afwerkingen beschikbaar: metallic, houtstructuren en overige structuren zijn allen op de markt (Figuur 35).

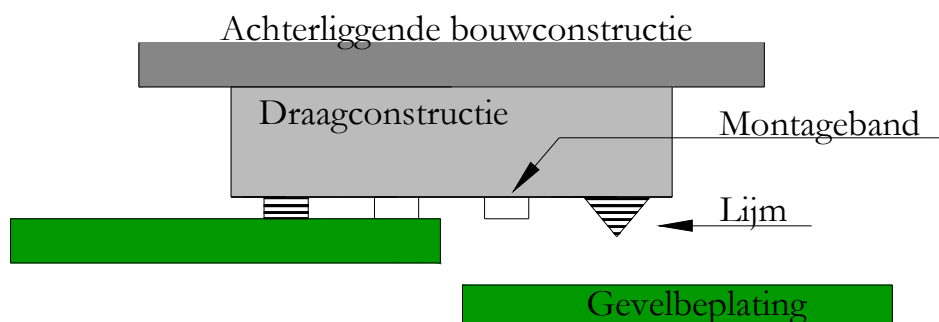


Figuur 35: Gevel met vezelcementpanelen (© www.aecinfo.be)

9.3 PROEFOPSTELLING EN VOORWAARDEN

Voor het verlijmen van gevelpanelen aan een achterliggende bouwstructuur werd een Nederlandse Beoordelingsrichtlijn opgesteld (BRL 4101 – deel 7 [25]). Deze richtlijn legt eisen op waaraan lijmen moeten voldoen binnen het toepassingsgebied gevelbeplating. Op deze norm wordt echter veel kritiek geleverd [26], daar ze onvoldoende onderbouwd is inzake duurzame veiligheid. Doch refereert ATG naar deze norm en neemt ze als het ware over [27].

Een gevelbeplating bestaat globaal bekeken uit drie onderdelen: draagconstructie, lijmverbinding en gevelbeplating (Figuur 36). De richtlijn is opgesteld voor het geval alle belastingen (inclusief eigen gewicht gevelpaneel) door de lijm worden opgenomen.

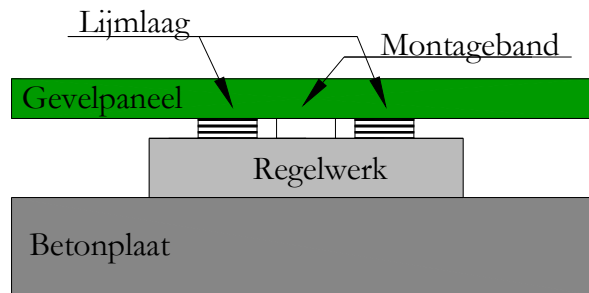


Figuur 36: Principe geventileerde gevel met afwerking in panelen

Voorts zijn er enkele opmerkingen met betrekking tot het gebruik van de richtlijn [25]. Zo is deze enkel van toepassing op lichtdoorlatende panelen, zodat de al dan niet UV-bestendigheid van de lijm geen invloed heeft. Voor lichtdoorlatende panelen wordt verwezen naar de norm ETAG 002 [18], conform het structureel verlijmen van glas. Ook moet er voldoende ventilatie tussen de draagconstructie en de gevelbeplating zijn, zodat de lijmlaag voldoende uithardingsmogelijkheden heeft. Tenslotte mag het gewicht van de gevelbeplating maximaal 100kg/m² bedragen.

Belangrijk is ook de functie van de montageband. Deze zorgt ervoor dat tijdens de montage van het gevelpaneel een tijdelijke hechting wordt verkregen. De lijm bezit in zijn aanvangsperiode immers onvoldoende sterkte om het volledige paneel te ondersteunen. Hierdoor moet de montageband gedurende de eerste 24 uur na applicatie de afschuifkracht ten gevolge van het eigen gewicht, en een trekkracht van 1kN/m² op de gevelbeplating kunnen opnemen. Bovendien zorgt de montageband ervoor dat de lijmlaag een constante dikte heeft en de uitvoering vlot verloopt. De minimale lijmdikte bedraagt 3mm, waardoor de dikte van de montageband ook minstens 3mm moet bedragen.

De voorwaarden waaraan de lijm moet voldoen worden gecontroleerd door proeven uit te voeren (Figuur 37). Gevelpanelen worden op een regelwerk gelijmd, dat identiek is aan het materiaal van de draagconstructie. Er worden twee types proefpanelen vervaardigd. Voor meer informatie hieromtrent wordt verwezen naar de richtlijn BRL 4101 – deel 7 [25].



Figuur 37: Voorstelling proefstuk

Uit deze proefpanelen worden proefstukken gezaagd welke getest worden op trek (loodrecht op het plaatoppervlak) en afschuiving na verschillende bewaringscondities. De gemiddelde treksterkte en afschuiving dient steeds aan bepaalde voorwaarden te voldoen, conform onderstaande tabel.

Conditie	Criterium	Aantal
1) Na 24u bij 20°C en 65% RV - Treksterkte - Afschuifsterkte	> 0,25 * treksterkte na 14 dagen bij 20°C > 0,25 * afschuifsterkte na 14 dagen bij 20°C	8 8
2) Na 14 dagen bij 20°C en 65% RV - Treksterkte - Afschuifsterkte	> 1N/mm ² , Rek > 250% > 1N/mm ² , Rek > 250%	16 16
3) Na 14 dagen bij 20°C en 65% RV en 24u bij -20°C - Treksterkte - Afschuifsterkte	> 0,9 * treksterkte na 14 dagen bij 20°C > 0,9 * treksterkte na 14 dagen bij 20°C	4 4
4) Na 14 dagen bij 20°C en 65% RV en 24u bij 80°C - Treksterkte - Afschuifsterkte	> 0,5 * treksterkte na 14 dagen bij 20°C > 0,5 * treksterkte na 14 dagen bij 20°C	4 4
5) Na kunstmatige veroudering - Treksterkte - Afschuifsterkte	> 1N/mm ² > 0,8 * treksterkte na 14 dagen bij 20°C > 1N/mm ² , Rek > 250% > 0,8 * treksterkte na 14 dagen bij 20°C	12 12
6) Na mechanische vermoeiing - Treksterkte - Afschuifsterkte	> 1N/mm ² > 0,8 * treksterkte na 14 dagen bij 20°C > 1N/mm ² > 0,8 * treksterkte na 14 dagen bij 20°C	12 12

Het kunstmatig verouderen omvat zes cycli waarbij het proefstuk aan volgende condities wordt onderworpen.

Conditie	Tijdsduur (h)
Bestralen met IR-lampen en oppervlaktetemperatuur $\pm 70^{\circ}\text{C}$	8
Beregenen	24
Vriezen bij temperatuur -10°C	40
Beregenen	8
Bestralen met IR-lampen en oppervlaktetemperatuur $\pm 70^{\circ}\text{C}$	8

Het mechanisch vermoeien omvat 20.000 belastingscycli tussen P_{\max} (450kPa) en P_{\min} (-290kPa). De tijdspanne tussen twee spanningspieken bedraagt 6 ± 3 seconden.

9.4 DIMENSIONERING

Structureel gelijkde gevelpanelen worden uitgaande van twee toestanden gedimensioneerd. De eigenlijke lijmverbinding wordt berekend op basis van de bezwijkgrenstoestand. De gevelpanelen en verankeringsprofielen daarentegen worden berekend volgens de gebruiksgrenstoestand. Deze legt immers voorwaarden op in verband met de maximale doorbuiging.

9.4.1 BEZWIJKGRENSTOESTAND

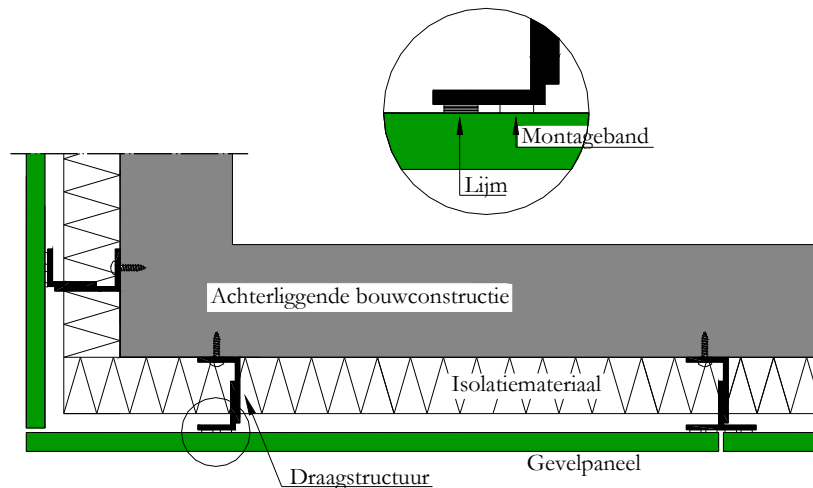
De voegbreedte wordt berekend overeenkomstig ETAG 002 [18] [27], waardoor wordt verwezen naar paragraaf 8.4.1.2 (zelfdragende glaspartijen). De lijmdikte bedraagt minstens 3mm.

9.4.2 GEBRUIKSGRENSTOESTAND

Het bevestigingsprofiel mag een maximale doorbuiging hebben van $1/200$ van de lengte tussen de profielen. Het gevelpaneel zelf mag in het midden een maximale doorbuiging hebben van $1/100$ van de kortste zijde.

9.5 PRAKTISCHE BEOORDELING

De draagconstructie of het regelwerk waarvan sprake in paragraaf 9.3 omvat in de praktijk meestal een structuur uit hout, aluminium of roestvast staal [28]. Doordat deze ondersteuning een spouw creëert tussen gevelbeplating en achterliggende bouwconstructie, is het mogelijk thermische isolatie te voorzien (Figuur 38). Het is echter noodzakelijk een geventileerde luchtspouw te laten van minstens 20mm. Hierdoor zal condens en binnendringend vocht verdampen door ventilatie, waardoor schimmelvorming en verrotting van het isolatiemateriaal wordt vermeden. In de meeste gevallen wordt een metalen ondersteuning aangebracht op de achterliggende bouwconstructie, waarbij het volstaat een verticaal profiel te plaatsen. Wanneer de draagstructuur echter uit hout bestaat, dient er een raamwerk van stijlen en regels te worden voorzien.



Figuur 38: Detail geventileerde gevel

Bij de verwerking dient vooreerst de ondergrond voldoende kwalitatief te zijn. Een houten regelwerk moet van een primer worden voorzien en stalen of aluminium dragers worden licht opgeruwd, ontvet en eventueel met een primer bekleed. Het plaatmateriaal moet droog en schoon zijn, door het bijvoorbeeld te reinigen met compatibele producten. Hierna wordt overgegaan tot de verlijming. In vele gevallen zal blijken dat een lijmdikte van 3mm voldoende is. De montageband dient bijgevolg ook een dikte van 3mm te bezitten (standaardsectie 3 x 12mm) en wordt eerst aangebracht. Vervolgens wordt de lijm in driehoekvorm op het droge en schone profiel geplaatst met een kitpistool (breedte – hoogte lijmrups: 9 – 9mm), waarna het gevelpaneel voorzichtig wordt aangebracht en stevig aangedrukt. De plaatsing van het paneel dient wel met de nodige precisie te gebeuren. Door de hoge aanvangssterkte van de montageband is corrigeren na plaatsing immers moeilijk.

Opmerking: Gezien bij brand enige onzekerheid bestaat over de reactie van de gelijmde plaatmaterialen, dienen er boven vluchtuitsgangen minimum twee bijkomende mechanische bevestigingen geplaatst te worden [27].

9.6 LIJMYPES

Meestal worden ééncomponent oplosmiddelvrije lijmen op basis van hybride polymeren (SMP) gebruikt. De uitharding gebeurt door opname van vocht uit de omgeving, en aangezien de luchtspouw geventileerd is vormt dit geen probleem. Hybride polymeren bezitten verschillende positieve eigenschappen waaronder een hoge elasticiteit. Bovendien komt een hybride polymeerlijm vaak voor onder een zeer viskeuze toestand, waardoor ze eenvoudig op de verticale draagconstructie kan worden aangebracht. Echter niet alle SMP lijmen zijn geschikt voor het verlijmen van natuursteen, hoewel er ook speciale SMP-lijmtypes op de markt zijn voor natuursteen.

Ook ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijmen worden gebruikt voor het verlijmen van gevelementen. Dit lijmtypen heeft een goede weer- en ouderdomsbestendigheid, wat ze geschikt maakt voor deze toepassing.

In de bouwwereld heerst enige kritiek op de beoordelingsrichtlijn BRL 4101 – deel 7 [25]. Deze werd aanvankelijk ontwikkeld voor traditionele gevelementen zoals vezelpanelen of panelen op houtbasis. Het product natuursteen daarentegen is significant anders dan de overige panelen, waardoor deze toepassing extra aandacht eist. Deze extra aandacht wordt door de richtlijn BRL 4101 – deel 7 echter niet gegeven, waardoor ze voor het verlijmen van natuursteen niet streng genoeg is [29].

Rekening houdend met deze kritiek worden ook epoxylijmen gebruikt voor de bevestiging van gevelementen uit natuursteen. Epoxies zijn sterker dan hybride polymeerlijmen en ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijmen. Voorts zijn ze uiterst weersbestendig en duurzaam, wat voor het verlijmen van structurele gevelementen een groot voordeel is. Epoxylijmen hechten goed op zowel natuursteen als staal en aluminium. Dit is ook noodzakelijk daar de draagstructuur meestal uit staal of aluminium bestaat.

Het is dan ook vanzelfsprekend dat panelen uit roestvast staal of aluminium tevens met epoxylijm kunnen worden verlijmd. Zowel het gevelpaneel als de draagstructuur zijn immers van hetzelfde materiaal.

9.7 KRITISCHE BENADERING

Volgens de schrijver van dit werk dient men de Beoordelingsrichtlijn BRL 4101 – deel 7 [25] kritisch te bekijken. Zo wordt weliswaar een kunstmatige veroudering en mechanische vermoeïng gegenereerd, maar dit is nooit op basis van inwerkende producten zoals bij het structureel verlijmen van glas wel het geval is. Er is bijgevolg geen enkele regel die de invloed van een zout- of zuuromgeving in rekening brengt. Verder wordt ook getwijfeld aan de doeltreffendheid van de verouderingsproeven. Voor gevelpanelen wordt een levensduur van 50 jaar geëist, maar de verouderingsproeven van de richtlijn genereren deze duur niet. Hierdoor eisen sommige gemeenten in Nederland dat naast de lijmverbinding een extra veiligheid wordt ingebouwd in de vorm van een mechanische bevestiging [30].

Ook de kritiek betreffende veroudering gaat hier op, analoog als bij structureel verlijmen van glas. Er is onvoldoende regelgeving met betrekking tot inspectie, onderhoud of herstel. De norm NEN 6700 biedt de mogelijkheid om middels inspecties de duurzame veiligheid te monitoren. Doch is het zeer de vraag of deze norm werkelijk in stand valt te houden. Een mogelijke oplossing bestaat eruit deze norm aan de bouwvergunning te koppelen, zodat deze rechtsgeldig wordt [26].

Zoals reeds eerder vermeld is er ook een discussie aan de gang omtrent de geschiktheid van de richtlijn betreffende het verlijmen van natuursteen. Dit heeft niet zozeer te maken met het hoge gewicht van natuursteen, daar dit maximaal 100kg/m² mag bedragen. De kritiek is daarentegen meer gebaseerd op de hechting. Traditionele gevelpanelen hebben steeds een basis van vezelmateriaal of metaal, hetgeen een goede hechtsterkte met de lijm waarborgt. Bij natuursteen is de structuur significant anders en dit ook tussen verschillende soorten onderling, zodat hiervoor beter specifieke richtlijnen worden opgesteld. Zo kan zaagstof de kwaliteit van de lijmverbinding negatief beïnvloeden.

Op dit moment is er dan ook een technische commissie opgesteld die de Beoordelingsrichtlijn BRL 4101-7 evalueert met betrekking tot onder andere inspectie en het verlijmen van natuursteen.

HOOFDSTUK 10: BUITENGEVELISOLATIESYSTEMEN

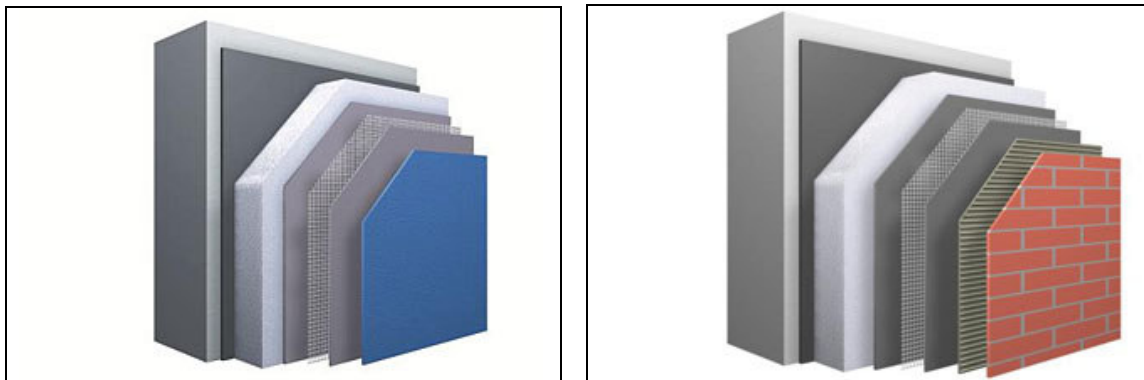
10.1 ALGEMEEN

Buitengevelisolatiesystemen of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) kunnen opgevat worden als een samengesteld systeem van isolatiemateriaal en afwerking. In principe komt het erop neer om aan de buitenzijde van een dragende structuur isolatie aan te brengen, en deze zo van een isolerende ‘jas’ te voorzien. Dit is de meest efficiënte wijze van isoleren, omdat er gebruik wordt gemaakt van de thermische massa van de dragende structuur. Het isolatiemateriaal wordt tenslotte bekleed met een wapeningsweefsel en eindlaag om het esthetisch aspect te waarborgen. Dit systeem vindt zijn oorsprong in Duitsland, maar wordt vandaag ook veel in Nederland en België toegepast.

Buitengevelisolatiesystemen zijn bijzonder veelzijdig in toepassing. Er is een enorme waaier aan kleuren en structuren in afwerkingsmogelijkheden aanwezig. Bovendien zijn ze eenvoudig te plaatsen en zorgen ze voor tijdswinst op de bouwwerf. Het systeem is zowel toepasbaar bij nieuwbouw als bij renovatie, en dit op vele ondergronden zoals baksteen, zandsteen, cellenbeton en beton [31]. Ook kunnen bij renovatieprojecten verbouwingen ‘verstop’t worden achter het isolatiesysteem, zodat het geheel een uniform uitzicht verkrijgt.

Er zijn verschillende technieken om de isolatiepanelen aan de dragende structuur te bevestigen [32]. Ze kunnen namelijk mechanisch worden verankerd of structureel verlijmd. Maar ook een combinatie van beide technieken behoort tot de mogelijkheden. Hierbij zijn twee gevallen te onderscheiden. Zo kan de lijmlaag het volledige paneel ondersteunen en dient de mechanische bevestiging enkel als veiligheid en tijdelijke ondersteuning gedurende de plaatsing. Maar ook het omgekeerde kan worden toegepast, waarbij de mechanische bevestiging het paneel volledig draagt, en de lijm enkel de effenheid van de ondergrond garandeert.

In dit werk is enkel de structurele verlijming opgenomen. Deze techniek heeft het voordeel dat er geen mechanische hulpmiddelen zoals ankers of draagprofielen worden gebruikt, waardoor er geen koudebruggen zijn en het systeem thermisch beter presteert.



Figuur 39: Buitengevelisolatiesysteem. Links: afwerking met pleister - Rechts: afwerking met steenstrips
(© www.sto.be)

De eindlaag kan verschillende vormen aannemen en bestaat meestal uit een pleisterlaag of steenstrips (Figuur 39). Deze laatste vertonen het uitzicht van klassiek parementmetselwerk, maar hebben slechts een dikte van grootteorde 10mm.

10.2 PROEFOPSTELLING EN VOORWAARDEN

De proefopstelling wordt opgesplitst in twee delen. Enerzijds wordt de hechting van de lijm op de dragende structuur (in navolging substraat genoemd) getest, anderzijds wordt de hechting van de lijm op het isolatiepaneel getest. Er is met andere woorden geen beproeving op de gehele lijmverbinding.

10.2.1 HECHTINGSSTERKTE LIJM - SUBSTRAAT

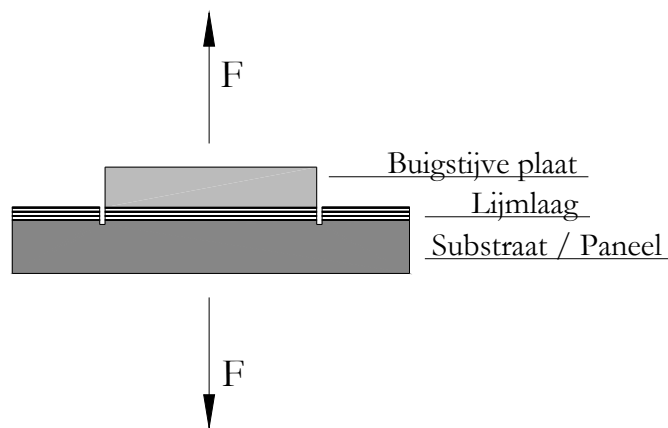
In eerste instantie wordt een genormaliseerd beton, waarvan de samenstelling wordt opgegeven door de norm ETAG 004 [32], aangemaakt ter bepaling van de hechtingssterkte. Voor niet-kalkhoudende lijmen dient een tweede substraat te worden beproefd, namelijk het meest absorberende materiaal dat de fabrikant als dragende structuur toelaat.

Er wordt een lijmlaag van 3 à 5mm op het substraat aangebracht, 15 minuten na het mixen van de lijm of binnen het einde van de open tijd. Het geheel wordt afgedicht zodat de uitharding niet te snel gebeurt.

Na 28 dagen uitharden bij een temperatuur van $23 \pm 2^\circ\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van $50 \pm 5\%$ worden 15 vierkante proefstukken met oppervlakte van 15 à 25cm² uitgesneden. Dit gebeurt door kerven te maken door de lijmlaag tot in het substraat. Metalen platen met geschikte afmetingen worden vervolgens op de verharde lijmlaag gekleefd door gebruik te maken van een gepaste lijm (Figuur 40). Tot slot wordt een verplaatsingsgestuurde trekproef uitgevoerd (1 à 10mm/min) op de 3 x 5 proefstukken na volgende condities.

- 5 proefstukken worden meteen getest in droge omstandigheden.
- 5 proefstukken worden 2 dagen in water ondergedompeld en twee uur gedroogd bij een temperatuur van $23 \pm 2^\circ\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van $50 \pm 5\%$.
- 5 proefstukken worden 2 dagen in water ondergedompeld en 7 dagen gedroogd bij een temperatuur van $23 \pm 2^\circ\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van $50 \pm 5\%$.

De gemiddelde treksterkte wordt berekend uitgaande de 5 proefstukken, en dit voor de drie condities.



Figuur 40: Voorstelling proefstuk

De gemiddelde hechtingssterkte tussen lijm en substraat dient minimaal gelijk te zijn aan:

- 0,25 N/mm² voor de test in droge condities.
- 0,08 N/mm² voor de test waarbij het proefstuk twee uur droogt nadat het uit het water werd gehaald.
- 0,25 N/mm² voor de test waarbij het proefstuk zeven dagen droogt nadat het uit het water werd gehaald.

10.2.2 HECHTINGSSTERKTE LIJM – ISOLATIEPANEEL

Er wordt een lijmlaag van 3 à 5mm op het gevelpaneel aangebracht, 15 minuten na het mixen van de lijm of binnen het einde van de open tijd, opgegeven door de fabrikant. Na 28 dagen uitharden bij een temperatuur van $23 \pm 2^\circ\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van $50 \pm 5\%$ worden 15 vierkante proefstukken met zijde 50 x 50mm (cellulaire isolatiepanelen) of 200 x 200mm (minerale wol) uitgesneden. Dit gebeurt door kerven te maken door de lijmlaag tot in het gevelmateriaal. Metalen platen met geschikte afmetingen worden vervolgens op de verharde lijmlaag gekleefd door gebruik te maken van een gepaste lijm. Tot slot wordt een verplaatsingsgestuurde trekproef uitgevoerd (1 à 10mm/min) op de 3 x 5 proefstukken onder dezelfde condities als bij paragraaf 10.2.1.

De gemiddelde hechtingssterkte tussen lijm en gevelpaneel dient minimaal gelijk te zijn aan:

- 0,08 N/mm² voor de test in droge condities.
- 0,03 N/mm² voor de test waarbij het proefstuk twee uur droogt nadat het uit het water werd gehaald.
- 0,08 N/mm² voor de test waarbij het proefstuk zeven dagen droogt nadat het uit het water werd gehaald.
- Of de breuk doet zich voor in het gevelpaneel, waarbij bovenstaande condities vervallen.

10.3 LIJMYPES

In de praktijk worden vooral mortellijmen gebruikt. Deze morteltypes hebben een bindmiddel op basis van cement of kalk, verbeterd met een hoeveelheid dispersie in poedervorm welke een polymere netwerk tot stand brengt. Mortellijm is een bijzonder geval van lijm. In HOOFDSTUK 16: LIJMEN VAN GEVELSTEEN EN VARIANTEN wordt hier dieper op ingegaan. Voor meer informatie wordt dan ook naar desbetreffend hoofdstuk verwezen.

Mortellijm wordt meestal gebruikt wanneer het isolatiemateriaal minerale wol is. Door het minerale bindmiddel van mortellijm wordt bijgevolg een volledig mineraal systeem verkregen dat geheel onbrandbaar is.

Naast mortellijmen worden ook ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijmen gebruikt [33]. De opname van vocht, nodig voor het uithardingsmechanisme is mogelijk door het meestal poreuze karakter van de isolatiepanelen en de achterliggende structuur.

Polyurethaanlijmen hebben het voordeel een laag gewicht te bezitten en goed te hechten op vele ondergronden. Bovendien hebben ze een kleinere open tijd en droogtijd dan mortellijmen. Zo bedraagt de open tijd van polyurethaanlijmen slechts een tiental minuten, daar dit voor een mortellijm één tot meerdere uren is. Dit impliceert dat er minder tijd aanwezig is voor het aanbrengen van de lijm, maar heeft als voordeel dat er sneller een volgende bewerking kan worden aangevat. Waar er bij polyurethaanlijmen reeds na 2 uur een volgende bewerking kan worden gestart, dient men bij mortellijmen 24 uur te wachten. Maar de snelle verwerking van polyurethaanlijmen moet tevens genuanceerd worden. Doordat deze lijmtypes ook na plaatsing nog expanderen, dient het isolatiepaneel tijdelijk gefixeerd te worden of moeten de isolatiepanelen tien minuten na plaatsing worden gecorrigeerd. Lijmmortels daarentegen kennen dit nadeel niet en zijn bijgevolg eenvoudiger in gebruik. Dit maakt dat polyurethaanlijmen minder handelbaar zijn dan mortellijmen, en er steeds geconcentreerd moet worden gewerkt.

In België zijn er echter weinig fabrikanten die met polyurethaanlijm werken. Het bedrijf STO N.V. daarentegen maakt wel gebruik van deze toepassing. Binnen dit bedrijf is er een quasi gelijkmatige verdeling van mortellijm en polyurethaanlijm. Andere grote marktspelers zoals Knauf beperken zich meestal tot hechtmortels en mortellijmen. In Duitsland is het gebruik van polyurethaanlijm daarentegen meer ingeburgerd.

In uitzonderlijke gevallen tenslotte kan een dispersielijm worden gebruikt [34]. Dit voor de bevestiging van EPS-isolatiematerialen op slecht zuigende oppervlakken zoals hout of spaanplaat.

10.4 PRAKTISCHE BEOORDELING

Buitengevelisolatiesystemen worden bij nieuwbouwprojecten pas aangebracht nadat de buitenzijde volledig is afgewerkt met onder andere ramen, deuren en dakafwerkingen. Dit impliceert dat het isolatiesysteem perfect aansluit tegen alle bouw delen en zo goede thermisch isolerende prestaties kan voorleggen.

Het isolatiepaneel bestaat meestal uit geëxpandeerd polystyreen¹⁰ (EPS), geëxtrudeerd polystyreen (XPS) of steenwol. In de meeste gevallen wordt geëxpandeerd polystyreen gebruikt. Minerale wol dient daarentegen de voorkeur te genieten wanneer er brandwerende eisen worden gesteld. Ook cellenglas kan als isolatiemateriaal worden gebruikt. Daar het materiaal en de verdere afwerking echter significant anders is, wordt deze toepassing apart besproken in HOOFDSTUK 11: VERLIJMEN ELEMENTEN UIT CELLENGLAS.

In eerste instantie dient de ondergrond voldoende kwalitatief te zijn [35]. Deze mag geen losliggende delen bevatten en moet draagkrachtig zijn. Vooruitstekende en labiele delen moeten verwijderd worden. Ook de oneffenheid van de ondergrond dient bekeken te worden. Tot een bepaalde graad van oneffenheid mag er immers verlijmd worden. Wanneer deze grens echter wordt overschreden, dient er een bijkomende mechanische bevestiging te gebeuren. De fabrikant zal deze grenzen opgeven. Zo laat STO N.V. verlijmen toe tot oneffenheden van 1cm, en het gebruik van lijmen in combinatie met een mechanische bevestiging tot oneffenheden van 2cm.

Het verlijmen van het isolatiepaneel op de achterliggende structuur kan op verschillende manieren gebeuren. Een hechtmortel kan worden aangebracht door gebruik te maken van een lijmkam, waarbij de hechtmortel gelijkmatig wordt uitgespreid over het isolatiepaneel. Er kan ook geopteerd worden de hechtmortel langs de plaatrand en in het midden te plaatsen door er enkele rillen mortel op aan te brengen. Tot slot kan de hechtmortel ook machinaal worden aangebracht door het gebruik van een lijmpistool. Deze techniek wordt ook gebruikt voor het uitspreiden van polyurethaanlijmen. Opnieuw worden de randen van een ril lijm voorzien, waarna het midden met een M-vormig lijmspoor wordt opgevuld (Figuur 41). De dikte van de lijmlaag bedraagt ongeveer 3 à 5mm (na plaatsing), waarbij de fabrikant de werkelijke dikte zal bevestigen.



Figuur 41: Verlijmen met lijmpistool (© www.sto.be)

De minimale hechtingsoppervlakte van de lijm wordt opgegeven door de fabrikant, en bedraagt ongeveer 60%. De panelen worden na instrijken met lijm of lijmmortel tegen de achterliggende bouwstructuur geplaatst volgens een halfsteens verband. Bij het gebruik van polyurethaanlijm dient deze verwerking echter snel te gebeuren zodat de open tijd niet verstreken is. Wanneer gebruik wordt gemaakt van een polyurethaanlijm dienen de panelen ongeveer tien minuten na de bevestiging lichtjes heringedrukt. Dit lijmtypen heeft immers het nadeel een weinig te expanderen, waardoor het paneel wordt weggeduwd.

¹⁰ Geëxpandeerd polystyreen EPS: Isolatiemateriaal van witte kunststof, in de volksmond ook wel piepschuim of isomo genoemd. Deze laatste verwijst naar het gelijknamige Kortrijkse bedrijf.

Bovenop het isolatiepaneel wordt een spanningsverdelende wapeningsmortel aangebracht, waarin onmiddellijk een wapeningsweefsel wordt ingebed. Samen vormen ze een wapeningslaag met een dikte van 3 à 8mm. De wapeningsmortel heeft meestal een minerale oorsprong, maar ook dispersiegebonden materialen kunnen gebruikt worden. Deze laatste zijn meer flexibel, waardoor ze beter bestand zijn tegen scheurvorming. Het is mogelijk dat wapeningsmortel en hechtmortel hetzelfde materiaal bevatten. De producent zal hier uitsluitsel over geven.

Tot slot wordt het geheel afgewerkt met een eindlaag. Meestal wordt gekozen voor een pleisterlaag, maar ook het gebruik van tegels of steensstrips behoort tot de mogelijkheden. De pleisterlaag valt onder te verdelen in twee hoofdgroepen. Enerzijds zijn er de kunstharsgebonden mortels, die een bindmiddel hebben van al dan niet gesiliconiseerd kunsthars. Anderzijds zijn er de mineraalgebonden mortels, waarbij het bindmiddel een cement- en/of kalkachtige oorsprong heeft. Meestal worden de kunstharsgebonden afwerklaagen gebruikt, daar ze beter bestand zijn tegen mechanische belastingen en scheurvorming. Wanneer het gehele systeem uit minerale producten bestaat wegens de brandwerende eigenschappen, dan dient ook de afwerklaag een minerale basis te hebben. Het gehele concept is bijgevolg compatibel.

10.5 KRITISCHE BENADERING

Wat de hechtkwaliteit van het isolatiepaneel tegen de achterliggende draagstructuur betreft is er weinig kritiek. De gestelde eisen in de norm ETAG 004 [32] liggen niet hoog, waardoor een traditionele polyurethaanlijm, naast de veelgebruikte mortellijm, het meest aangewezen lijmtypen is. Bovendien is er een groot contactoppervlak aanwezig, waardoor het zelfs mogelijk is de panelen slechts partieel te verkleven aan de ondergrond.

De juiste verwerkingsrichtlijnen dienen echter wel strikt te worden gevolgd. Wanneer de ondergrond bijvoorbeeld te oneffen is, kunnen de isolatiepanelen onthechten tijdens gebruik. Dit veroorzaakt vervolgens blaasvorming in het gevelsysteem.

Het buitengevelisolatiesysteem op zich is daarentegen wel voor kritiek vatbaar, maar dit heeft niets met de lijmverbinding te maken. Deze kritiek wordt dan ook niet in dit werk opgenomen.

HOOFDSTUK 11: VERLIJMEN ELEMENTEN UIT CELLENGLAS

11.1 ALGEMEEN

Cellenglas of schuimglas is een isolatiemateriaal op basis van glas. Glas wordt vermalen tot glaspoeder en vervolgens op hoge temperatuur gebracht waardoor het smelt. Aan deze vloeibare massa wordt koolstof toegevoegd, hetgeen door een chemische reactie zal oxideren en gasbelletjes creëert. Deze gasbelletjes zorgen voor miljoenen hermetisch afgesloten cellen, welke de basis vormen van de cellulaire structuur. De cellen zijn dus gevuld met een gas dat bovendien isolerende eigenschappen bezit.

Na afkoelen wordt een duurzaam en drukvast isolatiemateriaal verkregen dat volledig water- en dampdicht is. Niettegenstaande de structuur zeer poreus is, zijn de cellen onderling niet verbonden waardoor vocht niet kan migreren. Voorts is het materiaal bestand tegen zuren en bezit het een goede brandwerendheid. Een grote marktpeler van deze toepassing is FOAMGLAS. Veel informatie voor dit werk werd dan ook via hen vergaard.

11.2 PRAKTISCHE BEOORDELING

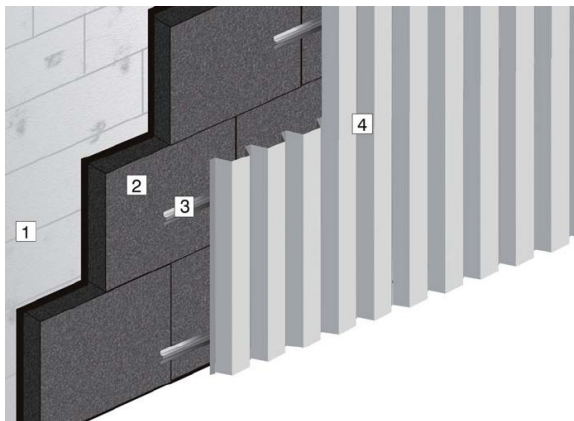
Cellenglas wordt in de bouwsector meestal gebruikt voor het isoleren van platte daken, het plaatselijk vermijden van koudebruggen en het isoleren van gevels.

Het gebruik van cellenglas als gevelisolatie overkoepelt twee systemen. Enerzijds is het perfect mogelijk een buitengevelisolatiesysteem te voltrekken met cellenglas, waarbij de isolatiepanelen afgewerkt worden met een wapeningslaag en sierpleister. Voor enkele algemeenheden omtrent deze toepassing wordt verwezen naar HOOFDSTUK 10: BUITENGEVELISOLATIESYSTEMEN. Deze toepassing wordt in de praktijk echter minder gebruikt. Vooral de hogere kostprijs tegenover traditionele isolatiematerialen zoals polystyreen en minerale wol speelt hierin een belangrijke rol.

Anderzijds kan cellenglas ook gebruikt worden voor het creëren van een geventileerd gevelsysteem. Deze toepassing wordt in de praktijk meer gebruikt en sluit nauw aan bij HOOFDSTUK 9: STRUCTUREEL VERLIJMEN GEVELPANELEN. Het grote verschilpunt zit echter in de mechanische bevestigingsprofielen. Traditioneel worden deze tegen de achterliggende draagstructuur geplaatst, en de ruimte ertussen wordt opgevuld met isolatiemateriaal. Dit creëert nog steeds een lineaire koudebrug. Bij het gebruik van cellenglas is dit echter anders. De bevestigingsrails worden immers op het drukvaste cellenglas zelf aangebracht, waardoor de lineaire koudebrug wordt vermeden en de thermische prestaties aanzienlijk verbeteren.

In beide gevallen worden de panelen uit cellenglas tegen de achterliggende draagstructuur gelijmd. Door de cellulaire structuur van cellenglas is er bovendien een goede mechanische verankering met de lijm. De oneffenheden van de achterliggende draagstructuur dienen kleiner te zijn dan 2mm [36] [37]. In de verdere tekst wordt vooral ingespeeld op de verwerking van het geventileerde systeem. Voor de afwerking volgens het buitengevelisolatiesysteem wordt verwezen naar desbetreffend hoofdstuk.

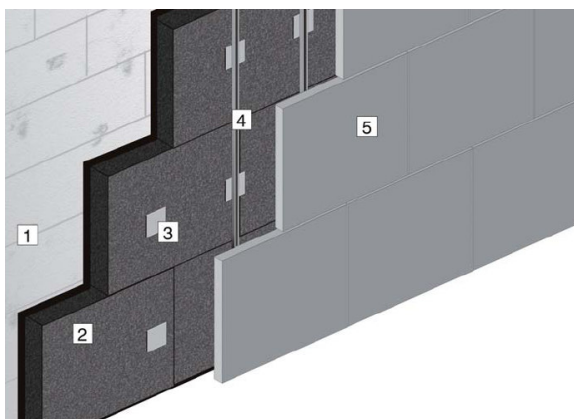
De mechanische bevestiging van de bevestigingsrail kan op twee verschillende manieren gebeuren. In eerste instantie kunnen deze geschroefd worden op de cellenwand. Dit is enkel toegelaten bij een lichte gevelafwerking ($< 120\text{kg/m}^2$) zoals panelen uit hout of metaal [36] (Figuur 42). Het gewicht van de gevelafwerking wordt dus volledig op het cellenglas afgedragen, dat op zijn beurt enkel gelijmd is tegen de achterliggende wand.



1. Achterliggende draagstructuur
2. Cellenglas, bevestigd met lijm
3. Bevestigingsrail
4. Lichte gevelbekleding

Figuur 42: Cellenwand met lichte gevelbekleding (© www.foamglas.be)

Wanneer de gevelbeplating echter zwaar is (120 à 250kg/m²), hetgeen bij natuursteenpanelen mogelijk het geval is, mag er niet meer uitsluitend op de lijmverbinding worden gerekend. In dit geval worden er drukverdelingsplaatjes (kramplaten) voorzien welke tot in de achterliggende wand reiken (Figuur 43). Hierop worden vervolgens de bevestigingsrails geplaatst, waarop later de gevelafwerking wordt gemonteerd [37] (Figuur 44). Deze methode zorgt ervoor dat de zware gevelbekleding niet meer uitsluitend op de cellenwand wordt overgedragen, maar ook verankerd zit in de achterliggende draagstructuur. Dit principe impliceert wel dat er een puntvormige koudebrug aanwezig is doordat er een verbinding is tussen de achterliggende draagstructuur en het gevelpaneel.



1. Achterliggende draagstructuur
2. Cellenglas, bevestigd met lijm
3. Drukverdelingsplaatjes
4. Bevestigingsrail
5. Zware gevelbekleding

Figuur 43: Cellenwand met zware gevelbekleding (© www.foamglas.be)

De bevestiging van de gevelpanelen op de bevestigingsrails gebeurt meestal mechanisch. Doch is het ook mogelijk deze te verlijmen zoals vermeld in HOOFDSTUK 9: STRUCTUREEL VERLIJMEN GEVELPANELEN.



Figuur 44: Voorstelling bevestigingsrail en drukverdelingsplaatjes (© www.foamglas.be)

Naast bovenvermelde toepassingen volgens het systeem geventileerde gevel en buitengevelisolatie, zijn ook andere uitvoeringstechnische mogelijkheden aanwezig. Zo kan cellenglas gebruikt worden als isolatiemateriaal bij een traditionele spouwmuur. Hierbij worden de panelen aan het binnenspouwblad gekleefd, waarna er een buitenspouwblad uit traditioneel gevelmetselwerk voor wordt getrokken.

Het cellenglas kan ook aan de binnenzijde gekleefd worden. Deze oplossing is bouwfysisch gezien niet optimaal daar de thermische massa van de dragende structuur verloren gaat. De techniek wordt echter wel gebruikt voor lokalen die snel opgewarmd moeten worden, of bij renovatiewerken waarbij het isoleren aan de koude zijde onmogelijk is.

11.3 LIJMYPES

Omdat cellenglas vocht- en dampondoorlatend is, moet speciale aandacht worden besteed aan de lijmkeuze.

Wanneer de panelen uit cellenglas enkel tegen de achterliggende draagstructuur worden bevestigd, en de onderlinge voegen open zijn, kan gebruik worden gemaakt van een dispersielijm. De achterliggende structuur bestaat veelal uit beton of metselwerk, welke poreus genoeg is om oplosmiddelwater op te nemen en nadien te evacueren naar buiten toe.

Wanneer de panelen daarentegen zowel tegen de achterliggende constructie als onderling worden verlijmd, moet een tweecomponentlijm gebruikt worden. Doordat de onderlinge voegen ook verlijmd worden, en de twee substraten dampdicht cellenglas zijn, kan er geen oplosmiddelwater verwijderd worden. Hierdoor dient de uithardingsreactie chemisch te gebeuren door gebruik te maken van een tweecomponentlijm. Meestal wordt een koudlijm op basis van bitumen gebruikt. Deze wijkt weliswaar af van de traditionele bitumineuze koudlijm (= fysisch uithardende oplosmiddellijm). Een bitumineuze component zonder oplosmiddel wordt vermengd met een component op basis van cement. Reactie van beide elementen zorgt voor de uitharding van de lijm.

Het al dan niet lijmen van de isolatiepanelen onderling (gelijmde voegen) hangt af van de klimaatklasse van het gebouw. Voor gebouwen met klimaatklasse I tot III dient dit meestal niet te gebeuren. Gebouwen met klimaatklasse IV daarentegen hebben een hoge vochtproductie (bv. zwembaden). In dit geval kan het noodzakelijk zijn de voegen onderling te verkleven, zodat een 100% dampdichte isolatielaag wordt gevormd waarbij geen risico op interne condensatie aanwezig is.

Het onderling verlijmen van de voegen is ook aan te raden wanneer er geen bescherming is tegen weersomstandigheden zoals bij een gevelbekleding met open voegen.

Wanneer de achterliggende bouwstructuur uit een dampdicht materiaal bestaat, dient in alle gevallen een tweecomponentlijm te worden gebruikt. Beide substraten zijn immers dampdicht waardoor het probleem zich herleidt zoals bij gelijmde voegen.

11.4 KRITISCHE BENADERING

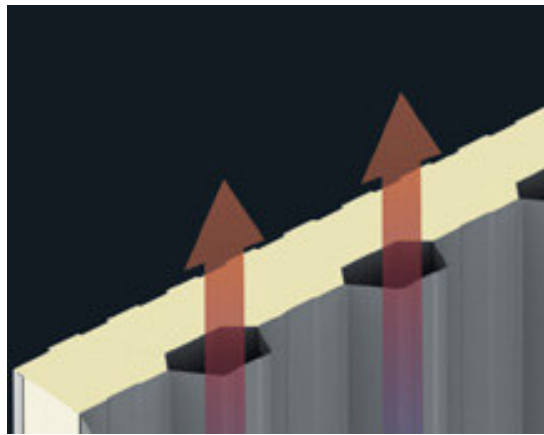
Cellenglas heeft een relatief hoge kostprijs, waardoor het meestal wordt gebruikt voor toepassingen waarbij de specifieke eigenschappen van cellenglas tot uiting komen.

Tot slot kan de vraag worden gesteld of een dampdicht gebouw is aan te raden. Bouwfysisch gezien is het voordeliger een dampopen gevel te voorzien, waardoor het geproduceerde vocht in het gebouw naar buiten kan evacueren en er een gezonder binnenklimaat aanwezig is. Bij het gebruik van cellenglas dienen dus voldoende mechanische ventilatiemogelijkheden voorzien te worden.

HOOFDSTUK 12: LIJM IN SANDWICHELEMENTEN

12.1 ALGEMEEN

Sandwichelementen kunnen omschreven worden als een samengesteld materiaal, waarbij een al dan niet isolerende middenkern aan weerszijden omgeven is door een beschermende huidbeplating. Globaal gezien worden sandwichelementen toegepast bij gevels, vloeren en daken, en dit vooral in de prefab-bouw [38]. Doordat deze panelen eenvoudig en snel worden geplaatst is er, in tegenstelling tot een traditionele gevel met binnen- en buitenspouwblad, een enorme besparing op de arbeidskosten mogelijk. Bovendien zijn sandwichelementen bijzonder gewaardeerd wat betreft isolerende en brandwerende eigenschappen. Er zijn zelfs toepassingen op de markt waarbij er door middel van verticale ventilatiekanaaltjes warme lucht wordt gewonnen door zonnestraling op wandpanelen [39] (Figuur 45). De ventilatiekanaaltjes worden achter de buitenste huid geplaatst. Bij voldoende zonnestraling warmt de lucht in de kanaaltjes op waardoor het naar boven stijgt en het gebouw wordt ingeleid. Onderaan zijn de ventilatiekanaaltjes open waardoor verse buitenlucht wordt opgenomen. Er dient wel vermeld te worden dat dit systeem enkel ter ondersteuning is van een algemeen verwarmingssysteem.



Figuur 45: Sandwichpaneel met ventilatiekanaaltjes (© www.kingspan.com)

De rol van lijm binnen het kader van sandwichelementen is tweedelig. Enerzijds dient de huid aan de kern te hechten door gebruik te maken van een lijmiddel. Anderzijds kunnen sandwichpanelen aan een mechanische ondersteuning worden gelijmd. Voor deze laatste toepassing verwijzen we naar HOOFDSTUK 9: STRUCTUREEL VERLIJMEN GEVELPANELEN.

Sandwichpanelen kunnen binnen dit perspectief zeer ruim worden bekeken. Om een duidelijke afbakening te vormen zal binnen dit hoofdstuk de nadruk worden gelegd op traditionele sandwichpanelen voor buitengevels. Voorts wordt enkel de interne lijmverbinding bekeken, namelijk de hechting tussen kern en huidbeplating.

12.2 PROEFOPSTELLING EN VOORWAARDEN

De proefopstelling en voorwaarden worden gegeven in de Europese richtlijn ETAG 016 [40]. Deze richtlijn is geldig voor zelfdragende sandwichpanelen bij een normaal gebruik zoals een gevelbekleding. In deze richtlijn zijn echter geen sandwichpanelen opgenomen met een dubbele metalen huid. Hiervoor is de norm EN 14509 [41] van toepassing, welke op enkele verschillen na analoog is aan de richtlijn ETAG 016. Panelen met een enkele huidbeplating in metaal vallen wel onder de ETAG 016.

Ter bepaling van de treksterkte van een traditioneel sandwichpaneel, waar de lijm een primordiale rol in speelt, worden vierkante proefstukken gebruikt [40]. De proefstukken worden uit een moot sandwichelement gezaagd, waarbij de breedte B gelegen is in volgend interval, doch minimaal 50mm bedraagt en best 100mm is. De dikte van het kernmateriaal wordt omschreven als d_c .

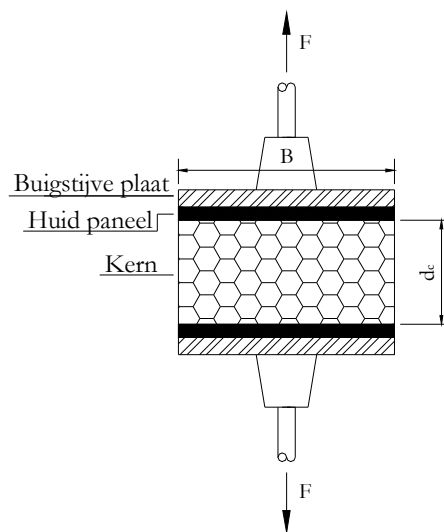
$$0,5 d_c \leq B \leq 1,5 d_c$$

Wanneer een sandwichelement geprofileerd is, dient het proefstuk zodanig gekozen dat de huid volledig op de buigstijve platen kan worden verlijmd. Het komt er dus op neer een moot vrij te maken die een constante dikte d_c heeft (Figuur 46).



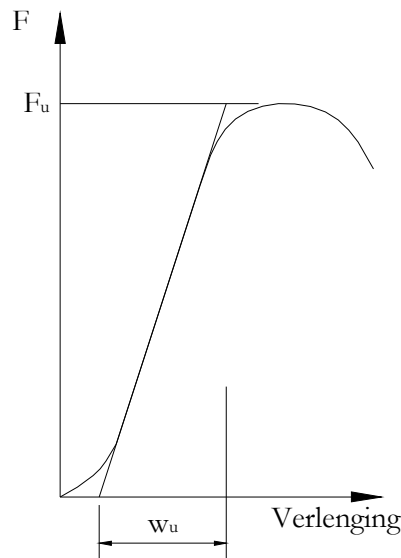
Figuur 46: Vrijmaken proefstukken

Op deze proefstukken worden buigstijve platen gelijmd, waarna een vervormingsgestuurde trekproef wordt uitgevoerd met een snelheid van 1 à 3% rek per minuut (Figuur 47). Gedurende de trekproef worden de spanningen en vervormingen nauwkeurig opgemeten. Door het gebruik van buigstijve platen wordt een constante spanning over het hele proefstuk gegenereerd. In geen geval mag er faling optreden van de lijmlaag tussen de buigstijve platen en het sandwichelement. Deze bezwijkvorm heeft immers geen invloed op het proefstuk, maar enkel op de proefopstelling. Bezwijken van de lijmlaag tussen huid en kern is daarentegen wel een bezwijkmechanisme van het element en dient in rekening te worden gebracht.



Figuur 47: Voorstelling trekproef

Uit het spanning - rek diagramma wordt vervolgens de maximale belasting F_u afgelezen, evenals de doorbuiging w_u tot deze maximale kracht, gemeten volgens het lineaire deel van de curve (Figuur 48).



Figuur 48: Grafische resultaten trekproef

Uitgaande de resultaten van deze trekproef worden volgende twee parameters opgesteld.

$$\text{Treksterkte:} \quad f_{Cr} = \frac{F_u}{B^2} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\text{Trekmodulus:} \quad E_{Cr} = \frac{F_u \cdot d_c}{w_u \cdot B^2} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Naast een proefreeks die onder normale condities wordt getest zijn er ook drie verouderingscycli beschikbaar. Elke cyclus genereert een bepaalde veroudering door het materiaal te onderwerpen aan vocht- en/of temperatuursfluctuaties. Na een cyclus worden de proefstukken genormaliseerd gedurende $24 \pm 0,5u$ bij labo-condities. Dit betekent een temperatuur van $23 \pm 5^\circ\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van $50 \pm 5\%$. Voor elke conditie bij een bepaalde cyclus worden minstens vijf proefstukken getest. De voorwaarden hebben betrekking op het gehele proefstuk, hetgeen betekent dat zowel de kern zelf als de lijmverbinding tussen kern en huid aan de trekkrachten moeten weerstaan.

Cyclus 0

In eerste instantie wordt de initiële treksterkte bepaald op zes proefstukken die 1 week werden bewaard bij labo-condities. De gemiddelde treksterkte wordt als R_0 omschreven en dient als vergelijkingswaarde voor de cycli 1, 2 en 3.

Cyclus 1

De eerste verouderingscyclus is gebaseerd op een temperatuursverhoging. De 5×5 proefstukken worden bewaard bij een temperatuur van $90 \pm 2^\circ\text{C}$, en beproefd na respectievelijk 1, 3, 6, 12 en 24 weken. De gemiddelde treksterkte uit de 5 proefstukken wordt aangeduid met respectievelijk R_1 , R_3 , R_6 , R_{12} en R_{24} . De minimale waarde van deze 5 gemiddelden bedraagt $R_{\text{cycle } 1}$. In vele gevallen stemt $R_{\text{cycle } 1}$ overeen met de gemiddelde treksterkte na een veroudering van 24 weken, maar het blijft steeds mogelijk dat een andere termijn kritischer is en een lagere waarde levert.

Volgens de norm EN 14509 (sandwichpanelen met dubbele metalen huid) gebeuren de trekproeven van de 2×5 proefstukken enkel na 6 en 24 weken.

Cyclus 2

Een tweede verouderingscyclus speelt in op de relatieve vochtigheid. De 3 x 5 proefstukken worden onder constante condities bewaard bij een temperatuur van $65 \pm 3^\circ\text{C}$ en 100% RV. Nadien worden ze getest op trek na 7, 28 en in sommige gevallen 56 dagen. De overeenkomstige gemiddelde treksterkte wordt omschreven als respectievelijk R_7 , R_{28} en R_{56} .

Cyclus 3

De derde verouderingscyclus speelt in op zowel een fluctuatie van de temperatuur als de vochtigheid. De 3 x 5 proefstukken worden achtereenvolgens 5 dagen bewaard bij een temperatuur van $70 \pm 2^\circ\text{C}$ en 90% RV, 1 dag bij $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ en 1 dag bij $90 \pm 2^\circ\text{C}$ en droge omstandigheden. Vervolgens wordt de gemiddelde treksterkte bepaald die als R_1 wordt gecatalogeerd. Bovenstaande verouderingsprocedure wordt respectievelijk 5 en 10 maal herhaald, om de overeenkomstige treksterkte R_5 en R_{10} te bekomen.

De proefresultaten dienen te voldoen aan de opgelegde eisen, weergegeven in onderstaande tabel.

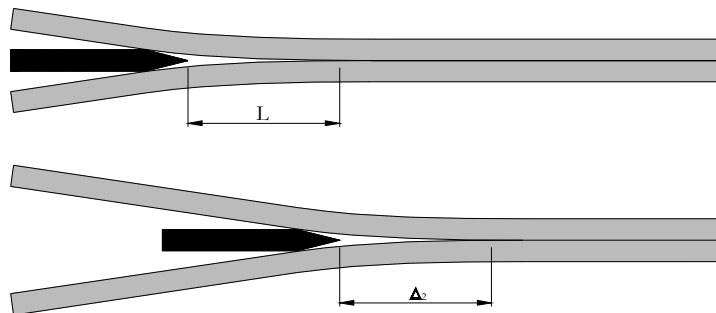
	Cyclus 1	Cyclus 2	Cyclus 3
Voorwaarde 1	$R_{\text{cycle 1}} \geq 0,5 R_0$	$R_7 - R_{28} \leq 3 \cdot (R_0 - R_7)$	$R_1 - R_5 \leq 4 \cdot (R_0 - R_1)$
Voorwaarde 2	5 % kar. $f_{Ct,24} \geq 0,04 \text{ MPa}$	$R_{28} \geq 0,4 R_0$	$R_5 \geq 0,4 R_0$
Voorwaarde 3		$R_{28} - R_{56} \leq R_7 - R_{28}$	$R_5 - R_{10} \leq R_1 - R_5$
Voorwaarde 4		$R_{56} \geq 0,4 R_0$	$R_{10} \geq 0,4 R_0$

Opmerking: De voorwaarden 3 en 4 zijn enkel van toepassing als de voorwaarden 1 en 2 niet zijn voldaan.

Bij de norm EN 14509 (sandwichpanelen met dubbele metalen huid) wordt cyclus 3 niet ingevoerd. Voorts dient bij de voorwaarde 2 van cyclus 1 de 5 procent karakteristieke waarde groter te zijn dan 0,02MPa. De overige voorwaarden zijn analoog aan de Europese richtlijn ETAG 016.

Er wordt opgemerkt dat de norm EN 14509 minder strenge eisen stelt. De 5 procent karakteristieke waarde bij Cyclus 1 mag immers de helft minder zijn als deze bij de ETAG 016.

Bij de norm EN 14509 wordt echter wel een bijkomende wigproef uitgevoerd (Figuur 49), die enkel betrekking heeft op de lijmverbinding. Dit in tegenstelling tot de trekproef, die zowel de lijmverbinding als de inwendige kern test.



Figuur 49: Voorstelling wigproef

Bij een wigproef worden 5 proefstukken vervaardigd, die bestaan uit twee gekleefde huidplaten. De wijze van kleven is analoog aan de manier waarop de huidplaten aan de kern worden gelijmd bij de werkelijke sandwichpanelen. De huidplaatjes hebben een breedte van 20mm en een lengte van 100mm. Na uitharden

van de lijmlaag wordt een wig van aluminium of roestvast staal in de lijmverbinding geduwd. Dit zorgt ervoor dat er ook voor de wig een zekere aanvangsscheurlengte aanwezig is over een lengte L . Vervolgens wordt het geheel gedurende 24 uur in een waterbad van 70°C gelegd, waarbij de wig continu is belast met een kracht van 3N. Na deze tijdsperiode wordt de toename van de scheurlengte Δ_2 gemeten.

Als voorwaarde wordt gesteld dat de aanvangsscheurlengte L en de toename van de scheurlengte Δ_2 kleiner moeten blijven dan respectievelijk 30 en 20mm.

12.3 LIJMYPES

Meestal wordt een tweecomponenten oplosmiddelvrije polyurethaanlijm gebruikt voor het verlijmen van de huid aan de kern. De lijm wordt machinaal of handmatig aangebracht, waarna de verschillende delen worden samengebracht en geperst als één geheel. In vele gevallen bestaat de huid uit een metaalbekleding die dampdicht is. Hierdoor kan een ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm geen vocht opnemen en bijgevolg onvoldoende uitharden. Bij een tweecomponenten polyurethaanlijm is dit probleem niet aan de orde. Bovendien zijn ze goed bestand tegen veroudering. Het nadeel van tweecomponenten polyurethaanlijmen is de matige weerstand tegen UV, maar doordat de huidbeplating als scherm werkt is de eigenlijke lijmlaag hier niet aan blootgesteld.

Wanneer de afmetingen van het paneel beperkt zijn en de kern poreus is (bv. minerale wol), kan daarentegen wel worden overgeschakeld op een ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm. Over de volledige omtrek van het paneel kan immers vocht indringen welke na transport door de kern de lijm tegenkomt en de uitharding regelt. Voor quasi dampdichte isolatiematerialen zoals polyurethaanschuim gaat deze stelling echter niet op. In dit geval dient dan ook een tweecomponentensysteem te worden gebruikt.

Wanneer sandwichelementen aangewend worden voor binnentoepassingen en bijvoorbeeld een houten huid bezitten kan eveneens worden overgegaan tot een ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm. De poreuze huid zal immers voldoende vocht doorlaten, noodzakelijk voor de uitharding.

In uitzonderlijke omstandigheden kan overgeschakeld worden op een ander lijmtypet. Polyurethaanlijmen zijn meestal bestand tegen temperaturen tot 100°C. Voor toepassingen bij hogere temperaturen kan een epoxylijm worden gebruikt. Sommige van deze types zijn zelfs bestand tegen temperaturen tot 200°C [42]. Deze sandwichpanelen zijn echter niet bestemd als gevelement maar voor specifieke toepassingen zoals bij een droogkamer. Dit voorbeeld is dan ook niet meteen representatief voor dit toepassingsgebied, waar enkel sandwichpanelen voor gevelbekleding worden besproken. Voor deze toepassing is de richtlijn ETAG 016 overigens ook niet van toepassing.

12.4 KRITISCHE BENADERING

De lijmverbinding tussen kern en huid is niet bijzonder kritisch. De voorwaarden met betrekking tot de treksterkte welke werden opgesteld door de ETAG 016 en EN 14509 zijn van toepassing op het gehele sandwichpaneel. Dit betekent dat zowel de lijmverbinding tussen de kern en de huid als de sterkte van de kern hieraan moeten voldoen. In de meeste gevallen is de treksterkte van de kern kleiner dan de lijmverbinding, waardoor de voorwaarden vooral de kwaliteit van de kern zullen bepalen, en in mindere mate de lijmlaag. Het is dan ook merkwaardig dat er volgens de norm EN 14509 een bijkomende wigproef moet gebeuren. De relevantie van deze proef kan immers in vraag worden gesteld omdat de randvoorwaarden en proefbelasting volledig anders zijn dan de randvoorwaarden en belasting van het werkelijke sandwichelement tijdens gebruik.

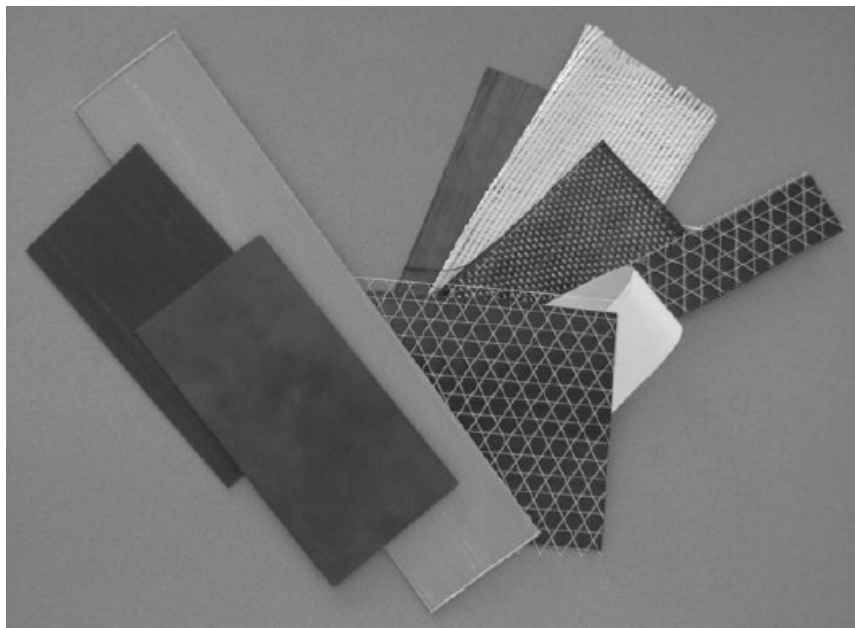
HOOFDSTUK 13: UITWENDIG GELIJMDE WAPENING

13.1 ALGEMEEN

Uitwendig gelijmde wapening of Lijmwapening (Nederlandse benaming) wordt gebruikt om bestaande constructies te versterken. Door het verlijmen van stalen strips of vezelcomposietmaterialen (Eng: FRP – Fibre Reinforced Polymer) aan beton-, hout-, staal-, of steenstructuren, worden trek-, druk- of schuifkrachten opgenomen. Vezelcomposietmaterialen zijn voornamelijk op basis van koolstofvezel, maar ook aramidevezels en glasvezels worden gebruikt. Ze komen voor in de vorm van lamellen of weefsels (Figuur 50).

De techniek werd voor het eerst toegepast in 1966 (Frankrijk) en kent zijn toepassing vooral bij betonreparaties of renovaties. Wanneer er een verandering in functie en gebruik is, waarbij een grotere belasting aangrijpt dan bij de ontwerpfase verondersteld, kunnen lijmwapeningen worden gebruikt om deze extra krachten op te vangen [43]. Voorbeelden hiervan zijn bruggen, waarbij na een bepaalde periode zwaardere verkeerslasten worden toegelaten. Ook bij het veranderen van een bestaande constructie kan lijmwapening worden toegepast. Wanneer dragende kolommen of wanden worden verwijderd om te voldoen aan een nieuw ontwerp, kan de stabiliteit worden gewaarborgd door lijmwapening. Een derde toepassingsgebied zijn beschadigde constructies. Door brand, explosie, corrosie of veroudering zijn de bestaande materialen mogelijk onvoldoende geworden. Met lijmwapening kunnen vervolgens de nodige herstellingen worden aangebracht. Een vierde gebruik is het herstellen van ontwerp- of uitvoeringsfouten. Wanneer door omstandigheden te weinig wapening werd aangebracht in de betonconstructie, kan lijmwapening de resterende hoeveelheid aanvullen. Ook bij de verandering van normen en ontwerprichtlijnen waardoor structuren niet meer aan de nodige veiligheidscondities voldoen, kan lijmwapening de oplossing bieden.

De gebruikte koolstofvezel heeft het voordeel een treksterkte te bezitten welke 10x hoger is dan deze van staal. Bovendien is het soortelijk gewicht veel kleiner dan dat van staal, zijn ze niet corrosiegevoelig en hebben ze een vergelijkbare elasticiteitsmodulus als staal. Koolstofvezel kan onder twee vormen voorkomen. Enerzijds zijn er de lamellen welke worden gebruikt ter versterking van horizontale constructiedelen zoals vloerplaten of uitkragende elementen. Ze zijn geprefabriceerd en kunnen zonder veel uitvoeringsproblemen worden geplaatst. Anderzijds bestaan er koolstofweefsels welke toegepast worden op ronde kolommen of complex geometrische structuren. Deze ‘wet lay up’-systemen worden in situ geïmpregneerd en geplaatst.



Figuur 50: Externe wapening: prefab lamellen (links) en ‘wet lay up’-weefsels (rechts) [43]

13.2 PROEFOPSTELLING EN VOORWAARDEN

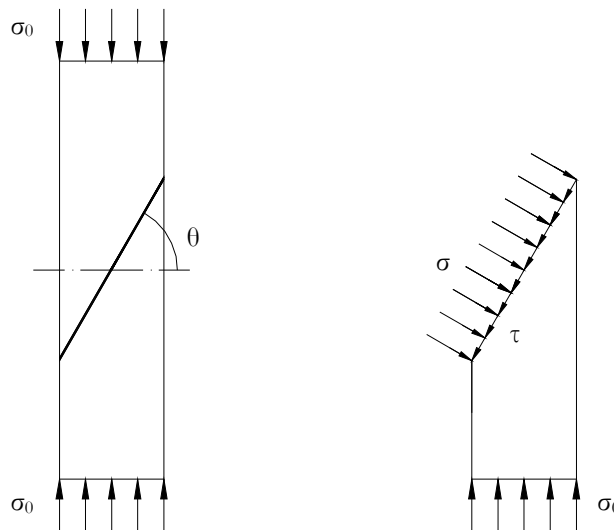
13.2.1 AFSCHUIFSTERKTE

De proefmethode voor het bepalen van de afschuifsterkte van een lijmverbinding wordt gegeven in de norm NBN EN 12188 [44]. Stalen prismatische proefstukken van 40 x 40 x 160mm worden in het midden verzaagd onder een hoek θ met de dwarsas (Figuur 51). De verzaagde oppervlakken worden ontvet en gezandstraald, zodat een betere aanhechting wordt verkregen. De twee deelprisma's worden vervolgens terug aan elkaar gelijmd en geklemd, zodat een lijmlaag van 1 à 2mm wordt verkregen.

De hoek θ bedraagt 50, 60 en 70°, en voor elke hoek moeten minstens drie proefstukken worden vervaardigd.

De proefprisma's worden minstens 16u bewaard bij een temperatuur van $21 \pm 2^\circ\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van $60 \pm 10\%$. De beproeving gebeurt tenslotte onder dezelfde condities.

De proefprisma's worden aan een drukkracht onderworpen welke spanningsgestuurd toeneemt met 0,5 à 1MPa/s. Wanneer het proefstuk bezwijkt ten gevolge een adhesieve breuk moeten de resultaten worden verworpen. Wanneer maximaal 10% van het breukvlak zich op de rand lijm-substraat bevindt is het resultaat nog aanvaardbaar.



Figuur 51: Voorstelling afschuifproef

Uitgaande de maximale drukkracht F en de netto staalsectie A_c wordt de afschuifsterkte σ_0 bepaald (bij breuk).

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_c}$$

Door het gebruik van enkele geometrische betrekkingen kan vervolgens de schuifspanning τ worden gevonden.

$$|\tau| = \sigma_0 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$$

De gemiddelde schuifspanning waaraan de proefstukken moeten voldoen is opgenomen in de norm NBN EN 1504-4 [45] en weergegeven in onderstaande tabel.

θ (°)	σ_0 (N/mm ²)	τ (N/mm ²)
50	> 50	> 24,62
60	> 60	> 25,98
70	> 70	> 22,50

Hoewel deze schuifspanningen zeer groot lijken, dient dit toch enigszins genuanceerd. Doordat er een wisselwerking is van druk en afschuiving, kan er meer schuifspanning worden opgenomen dan wanneer een lijmlaag enkel op afschuiven is belast.

13.2.2 AFTREKSTERKTE

De proefmethode voor het bepalen van de treksterkte van een lijmverbinding wordt gegeven in de norm NBN EN 12188 [44] en NBN EN 1542 [46].

De proefstukken worden vervaardigd door 5 cilindrische stalen stempels op een massieve stalen plaat te verkleven volgens de richtlijnen van de producent (Figuur 52). De stempels en staalplaat zijn gezandstraald om een betere hechting te verkrijgen. De diameter van de stalen stempels bedraagt meer dan 20mm, en bij voorkeur 50mm. De hoogte dient meer dan 50% van de diameter te bedragen.

Er wordt minstens één proefstuk met 5 stempels vervaardigd. Dit levert vervolgens 5 testresultaten op.

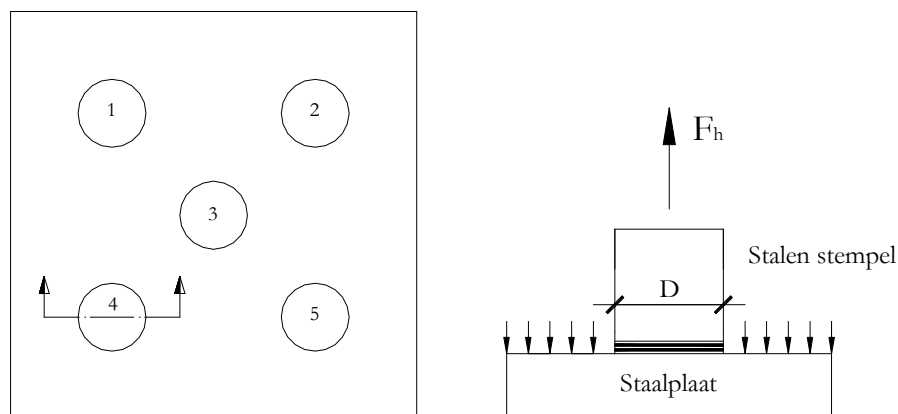
Na het maken van de proefstukken worden ze 17 dagen bewaard bij een temperatuur van $21 \pm 2^\circ\text{C}$ en $60 \pm 10\%$ relatieve vochtigheid.

Tot slot wordt een spanningsgestuurde trekproef uitgevoerd met een snelheid van $0,05 \pm 0,01\text{MPa/s}$, waarbij de maximale trekkracht F_h wordt opgemeten.

Uitgaande van deze maximale trekkracht F_h en de diameter van de stalen stempel D wordt tenslotte de overeenkomstige trekspanning f_h bepaald.

$$f_h = \frac{4 \cdot F_h}{\pi \cdot D^2}$$

Na minstens 3 goed uitgevoerde proeven kan vervolgens de gemiddelde aftreksterkte f_t worden bepaald, welke volgens de norm NBN EN 1504-4 [45] groter moet zijn dan 14N/mm^2 .



Figuur 52: Voorstelling aftrekproef

13.2.3 OVERIGE EISEN

De aangewende lijm dient een koudhardende tweecomponentenlijm te zijn die aan volgende eisen voldoet [45] [47].

- De gebruikte lijm moet thixotroop¹¹ zijn en zowel horizontaal als verticaal toepasbaar¹².
- De maximale krimp van de lijm bedraagt 0,1%.
- De elasticiteitsmodulus van de lijm is groter dan 2000N/mm².
- De thermische uitzettingscoëfficiënt is kleiner dan $100 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.
- De lijm moet goed bestand zijn tegen kruip.
- De lijm dient alkalibestendig te zijn.
- De minimale open tijd bedraagt 40 minuten bij 20°C.
- De minimale opbrengtijd bedraagt 20 minuten bij 20°C.

Bovendien dienen enkele uitvoeringsregels gerespecteerd te worden [47].

- De verwerkingstemperatuur ligt tussen 5 en 35°C.
- De maximale relatieve luchtvochtigheid tijdens uitvoering bedraagt 80%.
- Het vochtgehalte van het beton mag niet hoger liggen dan 4%.

Het falen van een externe wapening kan op verschillende plaatsen gebeuren [48].

- Onthechting in het beton, langs de inwendige wapening.
- Onthechting in het beton, dichtbij het oppervlak.
- Onthechting in de lijmlaag.
- Breuk van de externe wapening (breuk van de interlaminaire verbinding).
- Onthechting ter hoogte van het contactvlak tussen beton en lijm of lijm en wapening.

In de meeste gevallen zijn de trek- en afschuifsterkte van de externe wapening en lijm groter dan deze van het beton. Dit maakt dat een onthechting in de lijmlaag of breuk van de wapening zelden voorkomt.

Ook het laatste bezwijkpatroon van bovenvermelde lijst komt weinig voor. Een onthechting van de lijmlaag kan enkel voorkomen wanneer de substraatoppervlakken onvoldoende behandeld (mechanisch opgeruwd) zijn of de lijm niet voldoet. Wanneer de lijm echter aan de norm NEN EN 1504-4 beantwoordt is dit meestal niet het geval.

Het falen van een externe wapening is dus meestal te wijten aan een onthechting in het beton. De betonsterkte is bijgevolg het meest kritisch bij een lijmwapening, waardoor de lijmsterkte niet wordt opgenomen in het berekeningsmodel.

¹¹ Thixotroop: Eigenschap van een vloeistof, waarbij de viscositeit ten gevolge van een constante schuifspanning afneemt. Na het wegnemen van de schuifspanning keert de viscositeit terug naar zijn oorspronkelijke toestand.

¹² Deze eis geldt voor Prefab-lamellen. Voor het 'wet lay up'-systeem is een lijm met lage viscositeit gewenst voor de impregnatie van de weefsels [43].

13.3 PRAKTISCHE BEOORDELING

Volgende praktische regels zijn algemene bepalingen. In werkelijkheid dient steeds rekening te worden gehouden met de voorschriften van de producent.

In eerste instantie dient de ondergrond voldoende kwalitatief te zijn [43]. Bij beton en metselwerk moeten slechte zones verwijderd worden en potentiële schademechanismes zoals scheuren worden hersteld. Vervolgens wordt het oppervlak opgeruwd door het bijvoorbeeld te zandstralen en stofvrij te maken. Houten ondergronden dienen vooral droog, vet- en olievrij te zijn en worden eventueel geschaafd of geslepen. Ook stalen ondergronden moeten droog, vet- en olievrij zijn en worden gezandgestraald. Eventuele oneffenheden dienen uitgevlakt te worden door onder andere gebruik te maken van een uitvlakmortel bij ondergronden uit beton of metselwerk. Dit dient vooral te gebeuren bij het 'wet lay up'-systeem, daar de lijmlaag dun is. Bij het gebruik van lamellen mag de oneffenheid van het betonoppervlak groter zijn daar de thixotrope lijm dikker is en zelf enig nivellerend vermogen bezit. De toegelaten toleranties volgens de CUR-Aanbeveling 91 zijn weergegeven in onderstaande tabel [47].

	Oneffenheid ¹³ over 2m [mm]	Oneffenheid over 0,3m [mm]
Prefab lamellen > 1mm	10	4
Prefab lamellen ≤ 1mm	6	2
Wet lay up	4	2

Ook de externe wapening wordt voorbehandeld. Zo dient staal gezandstraald te worden en FRP licht opgeschuurd. In alle gevallen dienen ze stof- en vetvrij te zijn.

Bij geprefabriceerde lamellen wordt er met een spatel lijm op het beton en de lamellen aangebracht, en bij deze laatste in dakvorm zodat er middenin meer lijm aanwezig is. Dit om eventuele luchtinsluitingen te voorkomen. Vervolgens worden de elementen verlijmd en aangedrukt tot de overtollige lijm vrijkomt. De producent zal steeds de minimale en maximale lijmlaagdikte opgeven welke ongeveer 1 à 5mm bedraagt. Het geheel wordt tenslotte aangedrukt met een geschikte roller.

Bij het 'wet lay up'-systeem wordt enkel lijm op het beton aangebracht, waarna vervolgens de weefsels in de lijmlaag worden gerold en nadien verder geïmpregneerd.

Tot slot wordt het geheel afgewerkt om te voldoen aan esthetische en brandveilige voorwaarden.

13.4 LIJMYPES

Voor het structureel lijmen van wapening heeft de lijm een hoge schuifweerstand nodig. Er dient immers een volledige fixatie van de wapening te zijn alvorens deze een bijdrage tot de spanningsopname levert. Wanneer de lijmlaag vervormt zal de wapening immers geen effect hebben.

Voor het verlijmen van structurele wapening dient een koudhardende tweecomponentenlijm te worden gebruikt [43]. In vele gevallen omvat het een epoxylijm. Dit lijmtypen bezit immers een hoge sterkte en is bovendien zeer duurzaam. Zo behoudt een epoxylijm zijn sterkte bij invloeden van buitenaf zoals vocht. Wat epoxylijmen nog meer geschikt maakt voor het verlijmen van externe wapening is dat er quasi geen krimp aanwezig is, hetgeen een vereiste is.

Het nadeel van epoxylijm is de beperkte brandweerstand [47]. Bij een temperatuur van ongeveer 60°C verweekt de lijm en verliest het zijn hechtvermogen. Dit maakt dat de lijmverbinding de zwakste schakel vormt bij brand en de constructie snel zijn evenwicht kan verliezen. Wanneer voor de constructie een bepaalde brandweerstand wordt geëist moeten de laminaten een warmte-isolerende beschermingslaag krijgen. Deze beschermingslaag is tevens nuttig voor het esthetische aspect en ter voorkoming van vandalisme.

¹³ Deze oneffenheid wordt opgemeten door gebruik te maken van een stalen rei van respectievelijk 2 en 0,3m.

13.5 KRITISCHE BENADERING

Het gebruik van extern gelijkde wapening is zeker aan te raden bij het herstellen van bestaande constructies. Door een minimum aan investeringen kan een constructie maximaal worden benut, hetgeen economisch gezien zeer interessant is. Lijmwapening kan opgevat worden volgens twee perspectieven. In eerste instantie kan de externe wapening aanzien worden als een secundaire wapening, waarbij de constructie niet begeeft bij falen van deze wapening. Hierbij is de veiligheid maximaal en dient er minder aandacht te worden besteed aan bijzondere ontwerpaspecten zoals brand [43]. Anderzijds kan de externe wapening als volwaardige wapening aanzien worden, waarbij de constructie bezwijkt bij falen van de externe wapening. In dit geval dient er wel aandacht besteed te worden aan de bijzondere ontwerpaspecten.

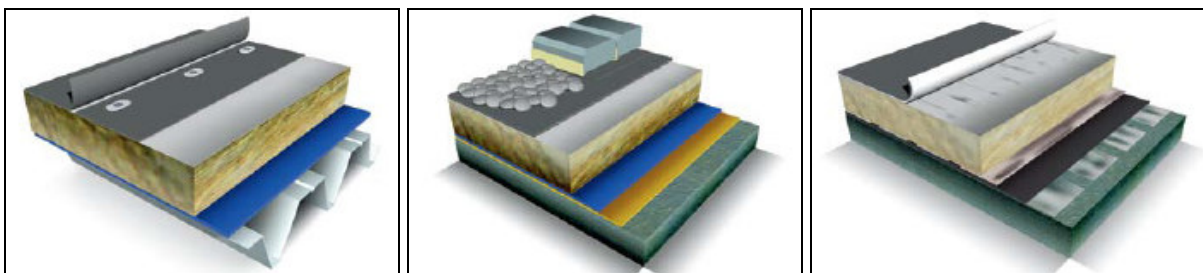
De schrijver van dit werk is van oordeel dat deze tweede ontwerpvisie relevant is, doch dient er in dit geval voldoende aandacht te worden besteed aan een correcte uitvoering en kwalitatieve materialen. Verder zijn in dit kader beschermende maatregelen tegen brand en andere factoren onontbeerlijk en dient er voldoende controle en onderhoud te gebeuren tijdens de gebruiksfase.

HOOFDSTUK 14: DAKDICHTINGEN

14.1 ALGEMEEN

Het meest traditionele horizontale daksysteem is een ‘warm dak’. Dit betekent dat het isolatiemateriaal aan de bovenzijde van de draagconstructie wordt geplaatst, afgewerkt met een waterkerende laag.

Voor de bevestiging van de waterkerende laag zijn verschillende opties mogelijk [49] (Figuur 53). In eerste instantie kan dit gebeuren door een mechanische verankering. Een tweede methode bestaat eruit de waterkerende laag te balasten met grind of tegels. Hierdoor wordt voldoende tegendruk voorzien om de windbelasting te compenseren. De waterdichte lagen worden onderling wel verlijmd ter hoogte van de overlapnaad. Een laatste verbindingstechniek tenslotte vormt de volledige of partiële verlijming, waarbij de lijmverbinding dient te weerstaan aan de optredende zuigkrachten.



Figuur 53: Constructiemogelijkheden dakdichting: mechanisch verankerd, gebalast en gekleefd
(© Renolit [49])

Bitumineuze dakdichtingen kunnen verwerkt worden door ze te verwarmen met een open vlam en zo plastisch te vervormen. Er is echter een tendens merkbaar dat het gebruik van een open vlam steeds vermindert. Dit impliceert eveneens een kleiner brandrisico, waardoor een verlijmde verbinding zeker de voorkeur geniet bij het onderhoud van schooldaken, ziekenhuisdaken of andere daken waar veiligheid een belangrijk begrip is. Bij industriële panden kan een open vlam op daken zelfs verboden zijn.

Wat betreft de waterdichte lagen is het belangrijk een onderscheid te maken naar de verschillende types. Deze verschillen namelijk bijzonder in hun eigenschappen, waardoor een andere verwerking mogelijk is. In dit werk worden de meest voorkomende dakdichtingen besproken, zonder echter een afbakening te vormen van alle producten.

- SBS bitumineuze afdichtingen
 - APP bitumineuze afdichtingen
 - EPDM rubberdichtingen
 - PVC afdichtingen
 - FPO afdichtingen
- SBS (Styreen-Butadiën-Styreen) bitumineuze afdichtingen bezitten een hoge elasticiteit en goede weerstand tegen temperatuurvariaties. Deze eigenschappen maakt het elastisch polymeer bijzonder geschikt voor bitumineuze daktoepassingen. SBS heeft bovendien het voordeel bijzonder soepel te zijn, waardoor het zich gemakkelijk laat verwerken. De levensduur bedraagt ongeveer 20 jaar [50].
- APP (Atactische PolyPropyleen) bitumineuze afdichtingen bezitten eveneens een hoge elasticiteit en temperatuurbestendigheid. Bovendien zijn ze sterk UV-bestendig waardoor ze goede verouderingseigenschappen bezitten. Het materiaal is vergelijkbaar met SBS, waardoor de geschikte lijmtypes analoog zijn aan die van SBS. De levensduur bedraagt ongeveer 20 jaar [50].

- EPDM (Ethyleen-Propyleen-Dieën Monomeer) is een synthetische rubber. Het wordt bekomen door een polymerisatie van drie monomeren. Na deze polymerisatie wordt het polymeer gevulkaniseerd¹⁴, waardoor een zeer elastisch materiaal (tot 400% rek) wordt bekomen, en dit in een groot temperatuursbereik. Voorts is er een goede weerstand tegen ozon en UV-straling. Hierdoor bezitten EPDM systemen een goede weerstand tegen veroudering en hebben ze een levensduur van ongeveer 50 jaar [51]. Hoewel producenten van bitumineuze afdichtingen erin slagen om het materiaal steeds meer dampopen te maken, kan algemeen worden gesteld dat EPDM rubbersystemen een kleiner dampdiffusieweerstandgetal¹⁵ μ hebben. Dit maakt de waterdichte laag meer dampopen [52 - IRS International Roof Systems], waardoor het een effect zal hebben op de geschikte lijmtypes.

- PVC (PolyVinylChloride) dichtingen hebben een goede weerstand tegen UV, ozon en andere weersinvloeden. Het soepele materiaal is eenvoudig aan te brengen. De levensduur bedraagt ongeveer 20 jaar [52 - IRS International Roof Systems].

- FPO (Flexibele POlyolefinen) dichtingen zijn op hun beurt onder te verdelen in twee types [53]. Enerzijds zijn er de thermoplastische polyolefinen (TPO), anderzijds de gevulkaniseerde thermoplastische polyolefinen (TPV). Deze laatste soort heeft een vulkanisatie ondergaan waardoor ze elastischer en soepeler is, en bijgevolg beter verwerkbaar. FPO dakdichtingen zijn goed bestand tegen UV, ozon en andere weersinvloeden. De levensduur is meestal hoger dan bij PVC dichtingen en bedraagt ongeveer 30 jaar [53].

14.2 LIJMTYPES

14.2.1 BITUMINEUZE AFDICHTINGSMEMBRANEN: SBS EN APP

Voor een volledige verlijming van bitumineuze afdichtingsmembranen wordt in de praktijk meestal bitumineuze koudlijm (= oplosmiddellijm) of warm bitumen gebruikt. Deze lijmtypes vormen bovendien op zichzelf reeds een waterdichte laag, waardoor er bij een volvlakkige verkleving een bijkomende veiligheid tegen lekkage aanwezig is.

Een bitumineuze koudlijm heeft het voordeel snel verwerkbaar en goed toepasbaar te zijn op vele ondergronden. Bovendien worden kleine oneffenheden in de ondergrond weggewerkt en zijn er tijdens de verwerking correcties toepasbaar. Bij bepaalde koudlijmen worden elastische kunststofvezels toegevoegd om het geheel te versterken. Het gebruikte oplosmiddel omvat een organische stof, welke door zijn vluchtige eigenschappen de mogelijkheid bezit door het afdichtingsmembraan te evacueren. De evacuatie gebeurt ook naar onderen toe wanneer op een poreus isolatiemateriaal wordt verlijmd.

De verbinding van de waterdichte lagen onderling is van het grootste belang voor de kwaliteit van de volledige dakdichting. Wanneer dit onzorgvuldig gebeurt kan er snel water binnendringen hetgeen een kettingreactie aan problemen veroorzaakt. Het is bijgevolg belangrijk dat de naden perfect met elkaar verbonden zijn. Hiervoor wordt een gemodificeerde bitumineuze lijm gebruikt die snelhardend is. De snelhardende eigenschappen zorgen er immers voor dat de verbinding niet loskomt tijdens de uitvoering of meteen erna, waardoor op een gecontroleerde manier kan gewerkt worden.

¹⁴ Vulkanisatie: Het proces waarbij dwarsverbindingen tussen de monomeerketens worden bijgemaakt.

¹⁵ Dampdiffusieweerstandsgetal μ : In welke mate biedt een materiaal meer weerstand tegen dampdiffusie dan vrije lucht.

14.2.2 EPDM RUBBERDICHTINGEN

Voor het verlijmen van EPDM rubberdichtingen is het belangrijk een onderscheid te maken naar het type. Dit is immers noodzakelijk omdat er voor elke soort andere lijmtypes worden aangewend.

- Ongewapend en intern gewapend EPDM
 - EPDM met een polyesterdoek onderaan
- Ongewapend en intern gewapende EPDM rubberdichtingen mogen in geen geval met een bitumineuze koudlijm worden gekleefd. Vooreerst is de hechting tussen EPDM en bitumen onvoldoende. Bovendien kunnen de oplosmiddelen van koudlijmen het EPDM aantasten [54]. Hierdoor mag enkel een aangepaste contactlijm worden gebruikt met niet-schadelijke oplosmiddelen [54] [55] [56]. De elastische en goede waterbestendige eigenschappen maken dit lijmtype geschikt voor daktoepassingen.
- EPDM rubberdichtingen met een polyesterdoek onderaan mogen verlijmd worden met meerdere lijmtypes. In eerste instantie kunnen bitumineuze lijmen opnieuw gebruikt worden [54]. Doch worden binnen dit kader bitumineuze producten weinig gebruikt.
- Voor een volvlakkige verkleving worden veelal contactlijmen gebruikt, overeenkomstig de toepassing bij ongewapend en intern gewapende EPDM dichtingen. Ook ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm wordt dikwijls gebruikt om EPDM rubberdichtingen met een polyesterdoek onderaan te verkleven [57]. Dit lijmtype hardt uit wanneer het in contact komt met vocht. Doordat EPDM relatief dampopen is vormt dit echter geen probleem en kan er net voldoende waterdamp uit de omgeving worden opgenomen. De verkleving met het ééncomponentensysteem kan zowel partieel als volvlakkig zijn. Partieel verkleven wordt echter afgeraden omdat de windweerstand sterk vermindert. Er kan immers een delaminatie van het polyesterdoek optreden.
- In sommige gevallen kan ook geopteerd worden voor een tweecomponenten oplosmiddelvrije polyurethaanlijm. Dit lijmtype wordt volvlakkig verlijmd waardoor er een bijkomende waterdichting wordt verkregen.
- De gebruikte polyurethaanlijmen mogen niet te sterk opschuimen tijdens de uitharding. Het drukt de dakdichting immers omhoog en er ontstaan ribbels [54].

Zoals reeds eerder vermeld bij bitumineuze afdichtingssystemen dienen de naden en verticale opstanden (helling van 70° of meer) zorgvuldig te worden verlijmd, en dit met een snelle uitharding. Hiervoor wordt quasi steeds een aangepast lijmtype gebruikt. Polyurethaanlijmen mogen hiervoor niet gebruikt worden omdat de aanvangssterkte onvoldoende is. Meestal wordt een aangepaste contactlijm, MS polymeerlijm of cyanoacrylaatlijm gebruikt [55]. Deze cyanoacrylaatlijm of secundelijm genereert gedurende enkele seconden een grote aanvangssterkte, waardoor een snelle productie mogelijk is. Daarentegen is de open tijd dusdanig kort dat er na enkele seconden geen correcties of wijzigingen meer kunnen worden aangebracht. Cyanoacrylaatlijmen harden enkel uit wanneer ze in contact komen met vocht of een zwak basisch reagerende vloeistof. Zoals reeds vermeld is EPDM relatief dampopen en kan er waterdamp uit de omgeving worden opgenomen.

Naast de volledige of partiële verlijming waarbij de waterdichte laag op de ondergrond wordt gekleefd, kan ook worden gekozen voor een losse plaatsing [56]. Het komt erop neer enkel de naden van de membranen te verlijmen, om nadien een balastlaag aan te brengen. Deze balastlaag (bv. grind) zorgt ervoor dat voldoende weerstand tegen de negatieve winddruk wordt geleverd, en de waterdichte membranen niet worden weggezogen. Ook in dit geval worden de naden verlijmd met een cyanoacrylaatlijm of geschikte contactlijm of MS polymeerlijm.

14.2.3 PVC DICHTINGEN

Ook bij PVC-dichtingen dient er vooreerst een onderscheid gemaakt te worden naar het al dan niet gecacheerd¹⁶ zijn van de onderkant [54].

- Ongewapend en intern gewapende PVC-membranen
- PVC-membranen met een polyesterdoek onderaan

- Ongewapend en intern gewapende PVC-dichtingen mogen niet in contact komen met bitumen. Ze mogen enkel met een contactlijm op basis van nitril worden verlijmd.

- PVC membranen met een polyesterdoek onderaan kunnen met meerdere lijmtypes worden gekleefd. Meestal wordt gebruik gemaakt van een ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm. Deze mag niet te sterk opschuimen, daar ze anders het waterdichtingsmembraan omhoog duwt en ribbels doet ontstaan. De incompatibiliteit met bituminen vervalst bij PVC membranen met een polyesterdoek. Doch worden bitumineuze lijmen afgeraden omdat de oplosmiddelen de PVC kunnen aantasten. De afdichting wordt best volvlakkig verkleefd, omdat er bij een partiële verkleving gevaar is voor delaminatie van het polyesterdoek.

14.2.4 FPO DICHTINGEN

Ook bij FPO-dichtingen dient er vooreerst een onderscheid gemaakt te worden naar het al dan niet gecacheerd zijn van de onderkant [54].

- Intern gewapende FPO-membranen
- FPO-membranen met een polyesterdoek onderaan

- Intern gewapende FPO-membranen hebben onvoldoende kleefkracht met lijmen, waardoor ze niet mogen gekleefd worden op een ondergrond [54].

- FPO-membranen met een polyesterdoek onderaan mogen daarentegen wel verlijmd worden. De gebruikte lijmen en opmerkingen zijn overeenkomstig aan PVC-membranen met een polyesterdoek onderaan (zie paragraaf 14.2.3).

14.2.5 OPMERKINGEN BETREFFENDE ISOLATIES

Alle lijmtypes die hierboven werden beschreven zijn compatibel met de desbetreffende dakafdichtingen. Anderzijds dienen deze lijmen ook compatibel te zijn met de onderliggende isolatielaag. Ook hier dient de lijm namelijk voldoende op te hechten. Hierdoor zijn enkele opmerkingen in acht te nemen [54].

- Bij polyurethaan isolatiemateriaal met een cachering van polyethyleen of metaal wordt polyurethaanlijm afgeraden. De bekleding is immers te glad voor een verlijming met polyurethaanlijm.

- Op fenolschuim mag niet gekleefd worden.

- Isolatiemateriaal uit geëxpandeerd polystyreen (EPS) mag in geen geval in contact komen met koudlijm. De oplosmiddelen tasten immers het polystyreen aan. Hierdoor wordt aangeraden een ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm te gebruiken.

- Isolatiemateriaal uit geëxtrudeerd polystyreen (XPS) mag niet gekleefd worden. De gladde huid heeft immers onvoldoende hechtvermogen.

¹⁶ Cachering: Een dunne laag materiaal waarmee een ander materiaal wordt bedekt.

- Voor het verkleven van isolatiemateriaal uit minerale wol op de dragende ondergrond wordt best polyurethaanlijm gebruikt die sterk opschuimt en zo deels in het luchtige materiaal dringt. Het verlijmen van een dakdichting op naakte platen (geen gecacheerde huid) van minerale wol wordt afgeraden. De lijm zou immers volledig in het materiaal verdwijnen. Het eerst aanbrengen van een laag welke de porositeit wegneemt alvorens de lijm aan te brengen kan een oplossing bieden. Sommige panelen van minerale wol eisen een volvlakkige verkleving omdat de delaminatie-weerstand van het isolatiemateriaal gering is.
- Voor dakdichtingen met cellenglas als isolatiemateriaal dient er een speciale procedure gevolgd te worden. Vooreerst mogen de isolatieplaten enkel met warm bitumen of bitumineuze koudlijm op de ondergrond worden gekleefd. Ook de platen onderling worden met desbetreffend bitumineus product verkleefd. Op de afgewerkte isolatielaag uit naakt cellenglas mag vervolgens geen bitumineuze koudlijm worden gebruikt [54]. Enkel het gebruik van warm bitumen is toegelaten, hetgeen impliceert dat een compatibel waterdichtingsmembraan moet worden voorzien [54]. In vele gevallen omvat dit een bitumineuze laag SBS of APP. Er wordt echter wel aangeraden hierboven nog een tweede waterdichtingsmembraan te plaatsen. Dit kan echter van een ander type zijn.
- Op isolatiemateriaal van geëxpandeerd perliet mag enkel vol gekleefd worden wegens de kleine interne cohesie van het materiaal. Door het poreuze oppervlak verdwijnt echter veel lijm in het materiaal hetgeen een groot lijmverbruik teweegbrengt. Dit kan opgelost worden door eerst de porositeit weg te nemen (conform minerale wol).

Wanneer het waterdicht membraan volledig op de ondergrond wordt gelijmd, zonder gebruik te maken van een balastlaag, dienen de onderliggende delen ook verankerd te zijn. Zo kunnen de isolatiepanelen op de draagstructuur mechanisch worden bevestigd, maar ook gekleefd. Deze laatste methode zorgt ervoor dat de ondergrond en het isolatiemateriaal niet geperforeerd worden, waardoor koudebruggen worden vermeden. Voor deze toepassing wordt meestal ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm gebruikt. Door de opschuimende eigenschappen van dit lijmtypen wordt de ondergrond immers genivelleerd, waardoor ook op oneffen ondergronden kan gelijmd worden.

14.3 PRAKTISCHE BEOORDELING

14.3.1 ALGEMEEN

De praktische uitvoering van dakdichtingen dient in alle gevallen te gebeuren volgens de voorschriften van de producent. In dit werk wordt een korte toelichting gegeven over de meest gangbare verwerking van enkele populaire dakdichtingssytemen.

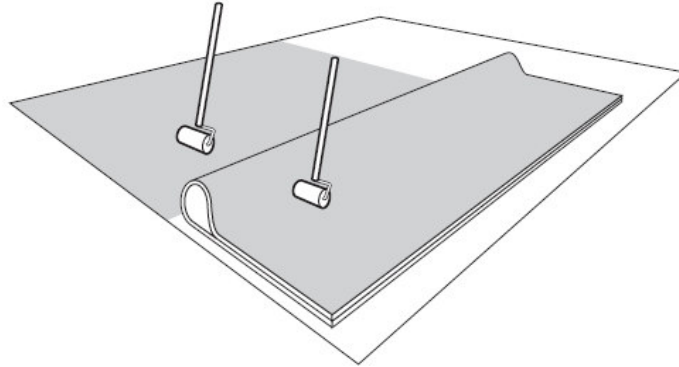
Voor alle daksystemen geldt dat de ondergrond moet worden schoongemaakt, waarbij alle vuil en losliggende delen verwijderd worden. Voorts mogen de werken niet worden uitgevoerd bij hoge vochtigheid (regen, mist of sneeuw) of bij temperaturen lager dan 5°C [58] [59].

14.3.2 KOUDLIJMEN

Bitumineuze systemen van het merk DERBIGUM worden geplaatst met bitumineuze koudlijm. In eerste instantie worden de bitumineuze dakbanen uitgerold waarbij de banen elkaar overlappen in de lengterichting. Vervolgens worden de banen voor de helft omgevouwd in de lengterichting en kan de bitumineuze koudlijm met een getande dakschraper volvlakkig worden uitgespreid over een deel van het oppervlak. Tot slot worden de omgevouwen membranen teruggelegd in de lijm, waarna hetzelfde proces gebeurt voor de andere helft van het dak. Naast deze in-vouw methode kan ook de in-roll methode worden toegepast, waarbij de lijm over het hele dakoppervlak wordt aangelegd. De bitumineuze membranen worden vervolgens direct in de lijm afgerold. Deze techniek wordt echter afgeraden bij temperaturen lager dan 10°C.

14.3.3 CONTACTLIJMEN

Voor een volvlakkige verkleving met contactlijm wordt meestal de in-vouw methode toegepast (FIRESTONE [60] - SUPERSEAL). In eerste instantie wordt aangeraden de membranen uit te spreiden en gedurende 30 minuten te laten ontspannen. Daarna worden ze opnieuw teruggevouwd, zodat zowel de dakdichting als de ondergrond met lijm kunnen worden bekleed (Figuur 54). Dit gebeurt handmatig met een rol of borstel, of mechanisch via een spuitpistool onder druk. Bij de handmatige verwerking is het aan te raden met twee personen te werken, zodat gelijke droogtijden worden bekomen aan zowel de ondergrond als de dakdichting.



Figuur 54: Uitvoeringswijze in-vouw methode met contactlijm (© Firestone [60])

Na de contacttijd (= open tijd) wordt de dakdichting op de ondergrond gekleefd, en het geheel wordt licht aangedrukt met een zachte borstel. Daar de contacttijd afhankelijk is van de weersomstandigheden is het aan te raden deze proefondervindelijk te bepalen, door met een vinger de lijm te betasten en na te gaan of deze droog aanvoelt. Gedurende de contacttijd dient er wel op gelet dat geen stof of andere verontreinigingen op de lijmlaag terecht komen. Dit kan de kwaliteit immers nadelig beïnvloeden.

14.3.4 OPLOSMIDDELVRIJE POLYURETHAANLIJMEN

Voor het verkleven met ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm wordt meestal de in-vouw methode gebruikt, zoals reeds beschreven bij koudlijmen (zie paragraaf 14.3.2) (MASTERSYSTEMS). Dit lijmtypen is meestal verpakt in blikvorm. Voor het partiel verkleven worden verschillende blikken naast elkaar in een rolwagentje geplaatst. Door vervolgens onderaan elk blik enkele openingen te maken en met de rolwagentje te rijden worden verschillende lijmschichten uitgespreid. De tussenafstand van de openingen in het blik bepalen de mate van verkleving.

Voor een volvlakkige verkleving met een ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijm wordt de lijmstof handmatig over het dakoppervlak uitgegoten, waarna deze vervolgens met een lijmspatel of borstel gelijkmatig wordt verspreid.

Na het aanbrengen van de lijm wordt de dakdichting meteen in de lijmspecie gelegd. De lijm dient in tegenstelling tot contactlijmen niet uit te dampen.

Tweecomponenten oplosmiddelvrije polyurethaanlijmen (MASTERSYSTEMS) worden daarentegen mechanisch aangebracht door gebruik te maken van een hogedruktoestel. De lijmspecie wordt op de hele ondergrond gesprayd, waardoor een extra waterdichte laag aanwezig is. Deze techniek is vooral gebruikelijk bij grote dakoppervlakken (vanaf 1000m²), waardoor er een snelle verwerking is.

14.3.5 NAADVERBINDING

Na voldoende rusttijd van de membranen worden de naden afgedicht met een aangepaste lijm. In eerste instantie moeten deze naden proper en droog zijn, waarbij desgevallend een reiniger wordt gebruikt. In de meeste gevallen wordt vervolgens een ononderbroken lijmspoor aangelegd door gebruik te maken van een lijmpistool of de lijm rechtstreeks uit de tube te duwen. De verbinding wordt vervolgens aangedrukt met een rol.

14.4 KRITISCHE BENADERING

Het verlijmen van waterdichtingen kent reeds vele jaren zijn toepassing en dient zeker te worden aangemoedigd daar het gebruik van een open vlam overbodig wordt. Bij de verwerking is echter veel ervaring nodig. Hoewel alle waterdichte lagen quasi hetzelfde uitzicht hebben, is er een groot verschil in eigenschappen. Bitumineuze afdichtingsmembranen vertonen geheel andere eigenschappen dan rubberdichtingen of PVC dichtingen. Bovendien kunnen de dichtingen al dan niet gecacheerd zijn, hetgeen opnieuw variatie in de toepassing geeft. Het is ook belangrijk de ondergrond in acht te nemen, daar sommige isolatiesystemen niet compatibel zijn met bepaalde lijmtypes. Tenslotte dienen ook de naden en andere dakdetails uiterst nauwkeurig en correct te worden afgewerkt. Het gebruik van de juiste lijmp producten is bijgevolg van groot belang, en er dient op de werf dan ook nauwlettend op te worden gecontroleerd. Problemen met de dakdichting vormen slechts de inleiding van een kettingreactie aan constructieve problemen.

Het is dan ook steeds aan te raden een volledig daksysteem van één fabrikant te gebruiken, waarbij er een bepaalde zekerheid bestaat over de compatibiliteit en verwerkingsvoorschriften. Het is immers onduidelijk hoe een bepaald lijmp product van de ene fabrikant hecht op een dakdichting van een andere fabrikant.

HOOFDSTUK 15: LIJM IN STRUCTURELE HOUTELEMENTEN

15.1 ALGEMEEN

Lijm en hout vormen al sinds hun bestaan een goede combinatie. In de houtsector wordt veel lijm gebruikt, zoals bij de fabricatie van triplex, multiplex, hardboard, zachtboard en fineertoepassingen. Naast deze niet-structurele elementen kan lijm ook gebruikt worden bij structurele toepassingen zoals spanten en gelamineerde liggers (Figuur 55).

Gelamineerde liggers worden vervaardigd uit lamellen. Deze lamellen worden bekomen door houten plankjes in de lengterichting aan elkaar te verbinden met een vingerlas. Tenslotte worden deze lamellen, evenwijdig met de vezelrichting, aan elkaar gelijmd tot een massieve doorsnede.



Figuur 55: Toepassing gelamineerde liggers (© www.hekospanten.nl)

Gelijmd hout heeft als voordeel dat de afmetingen niet meer afhankelijk zijn van de afmetingen van de boom, zodat er meer toepassingsmogelijkheden ontstaan. Voorts kunnen ook complex geometrische vormen zoals cirkelbogen en krommen worden gecreëerd.

15.2 LIJMYPES

Volgens de norm NBN EN 301 [61] zijn de gebruikte lijmen afhankelijk van de omgeving, en vallen er twee omgevingstypes te onderscheiden.

Lijmen volgens Type I zijn van toepassing wanneer de houtelementen langdurig in een warm en vochtig klimaat zijn blootgesteld. De luchttemperatuur ligt hoger dan 50°C, of deze is niet hoger dan 50°C maar de relatieve luchtvochtigheid bij 20°C ligt hoger dan 85%. Er worden door de norm NBN EN 301 twee lijmsorten voorgeschreven.

Een eerste lijmsort zijn de lijmen op basis van fenol of resorcinol. Deze lijmen bezitten een hoge sterkte en goede duurzaamheid, waardoor ze voor structurele elementen toepasbaar zijn. In vele gevallen is de lijm een vloeibaar tweecomponentensysteem, waarbij de uitharding plaatsvindt na het toevoegen van warmte of een versneller.

Een tweede lijmsort zijn de aminolijmen, of lijmen op basis van melamine. Ureumformaldehydelijm (UF) wordt veel in de houtnijverheid gebruikt bij het vervaardigen van onder andere triplex-, spaan-, en vezelplaten. Dit lijmtipe heeft echter het grote nadeel niet bestand te zijn tegen de inwerking van vocht en warmte. Hierdoor zijn ze niet geschikt voor structurele elementen van Type I, waarbij beide factoren aanwezig zijn. Daarom wordt ureumformaldehyde versterkt met melamine. De melamine reageert met formaldehyde tot de thermohardende kunststof melamineformaldehyde. Dit product is sterk, licht, hard en bestand tegen basen. Ook wordt de nodige weerstand verkregen tegen vocht en warmte.

Melamineformaldehyde kan ook als zelfstandige lijm worden gebruikt voor het verlijmen van structurele houtelementen. Bovendien werkt melamine brandvertragend doordat er stikstof vrijkomt bij verbranding. Deze eigenschap is natuurlijk ook zeer gunstig voor structureel dragende elementen.

Tot slot worden ook lijmen toegelaten welke niet onder de norm NBN EN 301 vallen, doch door hun chemische samenstelling geschikt zijn voor het gebruik bij structurele houtelementen. In vele gevallen gaat het hier over ééncomponent oplosmiddelvrije polyurethaanlijmen. Polyurethaanlijmen zijn goed bestand tegen veroudering en verwerking, wat ze geschikt maakt voor structurele buitentoepassingen. Vooral het ééncomponentensysteem wordt veel gebruikt. De opname van vocht uit de omgeving vormt geen probleem daar hout voldoende poreus is.

Lijmen volgens Type II zijn van toepassing wanneer de houtelementen aan een verwarmd en verlucht binnenklimaat zijn blootgesteld, of in een buitenklimaat waarbij de elementen beschermd zijn tegen weersinvloeden. De eisen inzake omgeving zijn minder streng, waardoor alle lijmen van Type I ook hier gebruikt mogen worden. Wanneer geen eisen in het bestek worden gesteld, zal uit veiligheidsoverwegingen steeds een lijm volgens Type I worden gebruikt.

15.3 KRITISCHE BENADERING

In tegenstelling tot de bouwwereld geniet lijm wel het volle vertrouwen in de houtnijverheid. Hout wordt onder de vorm van fineertoepassingen dan ook als sinds de oudheid verlijmd. Deze toepassing heeft bijgevolg veel krediet opgebouwd en is voor weinig kritiek vatbaar.

HOOFDSTUK 16: LIJMEN VAN GEVELSTEEN EN VARIANTEN

16.1 ALGEMEEN

De dag van vandaag vinden gelijmde gevels steeds meer en meer hun opmars binnen de bouwwereld. Zowel gevelstenen als dragende blokken kunnen verwerkt worden met lijm mortel.

Belangrijk is vooreerst een duidelijk onderscheid te maken tussen lijmen enerzijds en mortel anderzijds. Volgens de definitie is lijm een niet-metallische tussenstof welke twee materialen met elkaar verbindt. Mortel daarentegen is een mengsel van cement, zand en water.

Zoals reeds beschreven in paragraaf 3.3.3 kunnen cement- of kalkgebonden producten strikt genomen als lijm worden geïnclassificeerd. De aanwezige stoffen (meestal oxides) zijn immers niet-metallisch van aard en beantwoorden hiermee aan de definitie van lijm. Doch wordt in de praktijk dikwijls gesteld dat lijm enkel organisch mag zijn, waardoor de anorganische producten zoals cement en kalk niet meer voldoen aan de indeling. Deskundigen [Prof. Dhooche A., Universiteit Gent] zijn dan ook van oordeel dat mortel best als aparte klasse kan omschreven worden.

Lijmmortel is een combinatie van mortel en lijm, waarbij het beide voordelen tracht te combineren. Het bevat naast een fijn mengsel van zand en cement ook een watervasthoudend additief en watergedragen polymeren. Lijmmortel is bijgevolg een combinatie van organische (polymeren) en anorganische (cement) bestanddelen. Hierdoor is het moeilijk lijm mortel te classificeren, hoewel het strikt genomen een lijm is. Ook hier is het niet onverstandig lijm mortel als een aparte klasse te beschouwen. Het *lijmen* van gevelsteen of andere blokken, zoals het in de titel van dit hoofdstuk wordt beschreven, is bijgevolg een benaming welke voor discussie vatbaar is. Doch wordt het in de praktijk steeds zo genoemd, waardoor de naamgeving is overgenomen.

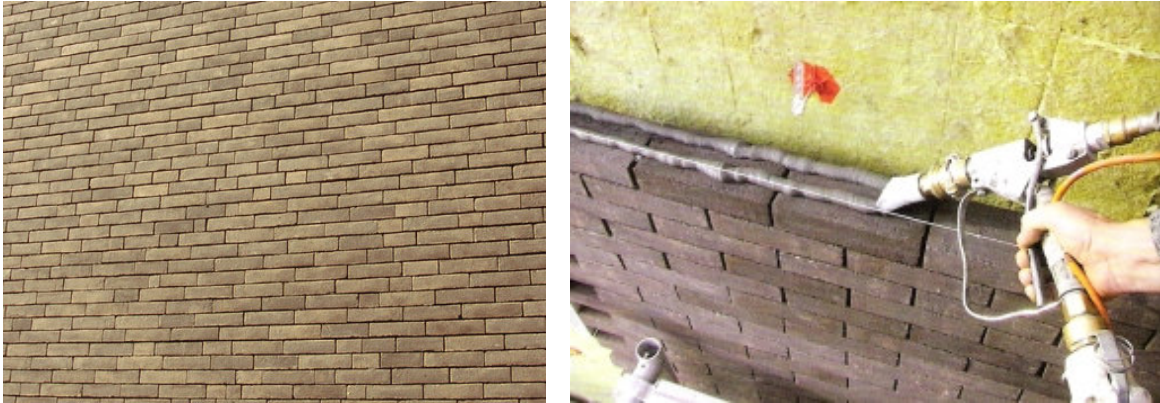
Door de opkomst van gelijmde gevels en de onduidelijkheden hieromtrent, zal deze toepassing toch in dit werk worden opgenomen. Het kan bijgevolg aanzien worden als een bijzonder geval.

Het verlijmen van een binnenspouwblad of binnenmuur is mogelijk met zowel cellenbeton, snelbouwsteen en kalkzandsteen. Het grote voordeel is het hogere rendement, waardoor het werk sneller verloopt. Ook wordt er een hogere sterkte bereikt ten opzichte van traditioneel metselwerk, en dit op een kortere tijd. Lijmmortel bezit zijn volledige sterkte immers na 24u, terwijl dit bij mortel slechts na 28 dagen het geval is. Een snellere verharding betekent dat werken sneller op elkaar kunnen volgen en er kort na de verwerking meer weerstand is tegen bijvoorbeeld windbelasting. Een bijkomend voordeel is de afwezigheid van bouwvocht, waardoor er minder kans is op vorstschade en uitbloeiingen.

Wanneer gevelstenen worden verlijmd dient in eerste instantie het esthetisch aspect benadrukt te worden. Doordat de lijmdikte kleiner is dan 6mm, wordt een egaal uitzicht verkregen waarbij de voeg visueel minder impact heeft op het gevelzicht (Figuur 56, links). Voor een modern gebouw waarbij een strakke gevel is gewenst kan dit een mooi resultaat opleveren. Al zijn er ook tegenstanders die qua esthetiek traditioneel gevelmetselwerk prefereren. Doordat de voegen dunner zijn stijgt het steenverbruik met ongeveer 10%. Anderzijds dienen de voegen niet meer opgevoegd te worden, hetgeen besparend werkt. Doch ligt de kostprijs van gelijmd werk meestal hoger dan traditioneel metselwerk. Voorts worden de stootvoegen niet gelijmd. Omdat deze smal zijn ($\pm 3\text{mm}$), is er weinig slagregen welke in de voeg dringt. Meer zelfs, de open stootvoegen zorgen voor een betere verluchting van de gevel waardoor deze na een regenbui sneller opdroogt. Hierdoor wordt een wildgroei aan algen en mossen, welke het best leven op een vochtige ondergrond, beperkt. De open stootvoegen hebben echter wel als nadeel dat dierlijke organismen de luchtpouw eenvoudig kunnen binnendringen.

Lijmmortel is meestal drie maal sterker dan traditioneel metselmortel. Dit creëert een bijkomende waaier aan toepassingsmogelijkheden. Zo dienen strekken niet meer ondersteund te worden door lateien, daar de kleefkracht voldoende hoog is. Ook zijn meerdere vormen van metselverbanden mogelijk. De stenen dienen wel voldoende maatvast te zijn. Maatafwijkingen kunnen immers moeilijk worden gecorrigeerd door de dunne lijmvoeg.

Tot slot wordt ook de toepassing dunmetselen vermeld, welke zich tussen de toepassingen verlijmen en traditioneel metselen bevindt. De gebruikte mortels bezitten enerzijds geen netwerk aan polymeren (conform traditionele mortel), maar anderzijds wordt er wel met kleine voegen (4 à 7mm) gewerkt (conform verlijmen gevelsteen). De eigenschappen van traditioneel metselwerk worden dus gecombineerd met de esthetische aspecten van gelijmde gevelsteen.



Figuur 56: Links: gelijmde gevel - Rechts: Verwerking met lijm mortelpistool
(© www.baksteen.be en www.vandemoortel.be)

16.2 LIJMMORTELTYPES

Het gebruikte lijm mortel type is in de eerste plaats afhankelijk van de omgeving. Voor gevelmetselwerk is een andere lijm mortel aan te raden dan voor binnenmetselwerk. Voorts is de wateropname van de steen een bepalende factor [62]. Zo zal cellenbeton meer water absorberen dan baksteen, waardoor de lijm mortel een hoger waterpercentage moet bezitten.

16.3 PRAKTISCHE BEOORDELING

Voor het aanbrengen van de lijm mortel dient erop gelet dat de stenen vet- en stofvrij zijn. Het aanbrengen van de lijm mortel kan op verschillende manieren gebeuren. De meest eenvoudige uitvoeringswijze bestaat uit een lijm verdeelschap waarbij de lijm mortel specie eenvoudig over een steenlaag kan worden uitgespreid. Verwisselbare lijm verdeelmesjes zorgen voor de gewenste lijm dikte. Een tweede analoge techniek is de lijm verdeelbak. Hierbij wordt de lijm mortel specie in een bak gebracht. Door deze bak vervolgens over de steenlaag te bewegen wordt een gelijkmatig lijm mortel spoor gecreëerd. Ook hier zorgen verwisselbare lijm verdeelmessen voor de gewenste lijm dikte. Deze twee technieken worden vooral gebruikt om grote gelijkmatige blokken uit kalkzandsteen of cellenbeton te verlijmen.

Voor het verwerken van gevelstenen of bakstenen wordt meestal een lijm mortel pistool aangewend. Hierbij wordt de lijm mortel machinaal gemengd en verpompt, om vervolgens middels een verdeelstuk één of twee lijm rupsen aan te brengen (Figuur 56, rechts). Deze techniek laat een snelle verwerking toe. Wanneer slechts kleine oppervlakken verlijmd moeten worden is het gebruik van een lijm mortel pistool echter niet meer economisch. In dit geval kan worden overgeschakeld op een spuitzak, waarbij de lijm mortel in een zak wordt gebracht welke voorzien is van een tuit. Door het handmatig samenpersen van de spuitzak wordt de lijm uit de tuit geduwd om vervolgens een lijm spoor te vormen.

16.4 KRITISCHE BENADERING

Buiten het feit dat lijm mortel zich in de grijze zone van lijmtoepassingen bevindt zijn er nog andere kritische punten. Bij traditioneel metselwerk worden eventuele scheuren geïnitieerd in de voegen, omdat dit het zwakste onderdeel is. Bij gelijmd metselwerk daarentegen is de voeg sterker dan de steen, waardoor de scheurvorming zich als het ware lineair gaat ontwikkelen door de stenen heen. Hoewel scheurvorming ten allen tijde vermeden moet worden, kan de schrijver van dit werk zich eerder verzoenen met scheurvorming in de voegen dan over de stenen heen. Dit onderwerp is natuurlijk voor discussie vatbaar. De sterkte van de lijm mortel impliceert ook dat alles meteen goed moet worden uitgevoerd. Het later vervangen van beschadigde stenen wordt bijvoorbeeld moeilijker.

Ook het esthetische aspect is voor discussie vatbaar, en wordt anders geïnterpreteerd van persoon tot persoon. De kleine voegen zorgen immers voor een geheel ander uitzicht tegenover traditioneel metselwerk. Over het algemeen zal het esthetisch aspect dan ook bepalend zijn voor de keuze tussen traditioneel metselwerk en gelijmd metselwerk. De overige verschillen tussen beiden zijn immers niet overtuigend genoeg.

Voor het verlijmen van metselwerk is tevens enige ervaring vereist. Door de kleine voegen kunnen maatafwijkingen moeilijk gecompenseerd worden en vallen kleine foutjes meteen op.

HOOFDSTUK 17: ALGEMENE SAMENVATTING

Algemeen kan worden gesteld dat lijm zijn plaats verdient binnen de bouwsector voor structurele toepassingen. Doch wordt er in de praktijk nog relatief weinig verlijmd. Hier zijn verschillende factoren verantwoordelijk voor.

In tegenstelling tot de meeste industrieën kan er binnen de bouwsector niet steeds in het atelier worden gelijmd. Voor bepaalde toepassingen zoals structurele beglazing is dit wel mogelijk, maar in de meeste gevallen dient er op de bouwplaats zelf gewerkt te worden. Het gebruik van lijm op de bouwplaats is echter niet ideaal. Zo kan een substraat goed hechten aan lijm wanneer het wordt uitgevoerd onder normale en ideale omstandigheden, doch blijft het steeds de vraag of deze verbinding op de bouwplaats ook wel zo presteert. De mogelijke aanwezigheid van vocht, extreme temperaturen en een stoffige omgeving kan er immers voor zorgen dat een minder kwalitatieve lijmverbinding wordt gecreëerd. In dit opzicht is het belangrijk proeven uit te voeren. De proefmethodes welke door de desbetreffende normen zijn opgesteld gaan steeds uit van hetzelfde aspect. Door proefstukken te onderwerpen aan een verouderingsproces wordt getracht de degradatie op te meten en te evalueren. Hoewel er niet steeds overeenstemming is bij de verouderingsproeven van verschillende toepassingen zijn er nog andere opmerkingen. In de meeste gevallen wordt nagegaan wat het effect is van verhoogde temperaturen, onderdompeling in water of mechanische spanningscycli. Hiermee wordt getracht de werkelijke omstandigheden na te bootsen. Maar het blijft de vraag of deze proefomstandigheden en voorschriften representatief zijn voor de werkelijke lijmverbinding. Het is misschien mogelijk dat een lijm goed presteert onder de genormeerde proefvoorwaarden, maar daarentegen slecht voor de dag komt bij de werkelijke condities. Er dient dus veel vertrouwen te zijn in de gebruikte normen. Het zou misschien nuttig zijn testen uit te voeren op lange termijn en de resultaten hiervan vervolgens aan verouderingsproeven op korte termijn te koppelen.

Een tweede reden voor het relatief weinig gebruik van lijm binnen de bouwsector zijn de grote maattoleranties. Daar er in de metaalsector tot op de millimeter kan gewerkt worden is dit binnen de bouw niet het geval. De maattoleranties bij een klassieke ruwbouw kunnen oplopen tot ongeveer 2 à 7cm. Hierdoor is het soms onmogelijk lijm te gebruiken en moet er geopteerd worden voor een andere verbindingstechniek.

Een laatste reden tenslotte is het gebrek aan kennis en ervaring over lijmen binnen de bouwsector. Vele conservatieve bouwondernemers zweren immers bij traditionele bouwmethoden en staan weigerachtig tegenover lijm. Juist door het schrijven van dit werk wordt getracht hier verandering in te brengen. Aangezien er een overzicht wordt gegeven van lijmen in het algemeen en structurele bouwtoepassingen in het bijzonder is het mogelijk meer kennis op te doen waardoor het product lijm misschien meer vertrouwen mag genieten binnen de bouwwereld.

REFERENTIES

- [1] VERVLOED J. / KWAKERNAAK A. / POULIS H. The influences of overlap length, bond line thickness and pretreatment on the mechanical properties of adhesives: focussing on bonding glass. The Adhesion Institute, Delft University of Technology, The Netherlands.
- [2] Drs. BUMA J. T. (1994). Zoveel toepassingen, zoveel lijmen. De Ingenieur, Nr. 6, p. 6-10.
- [3] VERENIGING FME-CWM (2008). Lijmen algemeen: Algemene inleiding in de kenmerken van de lijmtechniek en in de kenmerken van lijmsystemen. Nr. VM 86, p. 3-21.
- [4] BUDINSKI K. G. / BUDINSKI M. R. (1996). Materiaalkunde voor technici. 3^e druk. Uitgeverij Academic Service, Schoonheven, 882p.
- [5] VERENIGING FME-CWM (2008). Lijmen van metalen. Nr. VM 87, p. 5-35.
- [6] POULIS J. A. / COOL J. C. / LOGTENBERG E. H. P. (1993). Lijmen van kleine onderdelen. Mikroniek, Nr. 5, p. 140-147.
- [7] KINLOCH A. J. (1987). Adhesion and adhesives. Uitgeverij Chapman and Hall, New York, 441p.
- [8] DOW CORNING. Construction Industry Technical Training Program. 26 Maart 2009, Belgometal Wetteren, Belgium.
- [9] VERENIGING FME-CWM (2008). Keuren van lijmen en lijmverbindingen. Nr. VM 89, p. 6-12.
- [10] ALUMINIUM CENTRUM (2002). Oppervlaktebehandeling. Aluminium infoblad.
- [11] COOLS J. (2007). Samenvatting literatuuronderzoek naar beschikbare lijmsorten als voorbereiding van het projectmatig wetenschappelijk onderzoek DIGICON – Digitale Confidencietechnologieën voor Rapid Prototyping en Confectie van Hightech Textielmaterialen. Lijmen, p. 11-40.
- [12] DA SILVA L. / ÖCHSNER A. (2008). Modeling of adhesively bonded joints. Uitgeverij Springer, Malaysia, 335p.
- [13] RUBBER FLOORING ARTIGO. Technisch handboek.
- [14] SADECHAF TECHNOLOGY <http://www.sadechaf.eu>
- [15] DOW CORNING. Construction Industry Technical Training. 20 & 21 September 2006, Seneffe Belgium.
- [16] DELO. Clear advantages for interior designers: new acrylates for structural glass bondings.
- [17] Prof Ir. NIJSSE R. (2008). Ontwikkelingen in glasconstructies. Cement, Nr. 2, p. 38-45.
- [18] ETAG 002 (2005). Guideline for European technical approval for structural sealant glazing kits.
- [19] DOW CORNING (2006). Handboek voor structurele beglazing met silicone.

- [20] ETA 01-0005 (2006). DC 993 and DC 895: Structural sealants for use in structural sealant glazing systems.
- [21] DELO. Photo initiated curing acrylates.
- [22] BELIS J. / BOS F. / VEER F. / HOBBELMAN G. (2005). Reinforced glass cantilever beams. Glass processing days 2005, p. 430-434.
- [23] TWEHA. Verlijmen biedt ongekennde mogelijkheden. Bouwen aan Vlaanderen.
- [24] BUtgb (2005). Technische goedkeuring met certificatie. Gevelbekledingen Trespa Meteon.
- [25] BRL 4101 DEEL 7 (2003). Nationale beoordelingsrichtlijn voor het KOMO attest-met-productcertificaat voor lijm voor de bevestiging van gevelbeplatingen.
- [26] TWEHA / DE KORT M. (2008). Ronde tafelgesprek 26 juni 2008.
- [27] BUtgb (2007). Technische goedkeuring met certificatie. StoneMate, gevelplaatlijm op basis van hybride polymeren voor het bevestigen van steenachtige materialen.
- [28] TWEHA verwerkingsrichtlijn.
- [29] VAN DER HORST S. (2008). Tweha ronde tafelgesprekken. Natuursteen.
- [30] VROM-Inspectie (2007). Constructieve veiligheid gevels en glazen overkappingen: analyse van achttien incidenten, p. 28-29.
- [31] STO NV. Brochure Gevelisolatiesysteem StoTherm Classic.
- [32] ETAG 004 (2000). Guideline for European technical approval of external thermal insulation composite systems with rendering.
- [33] BUtgb (2008). Technische goedkeuring met certificatie. Buitengevelisolatie StoTherm Classic 1.
- [34] KOMO® attest (2006). STO Buitengevelisolatiesysteem: StoTherm-Classic, StoTherm-Vario, StoTherm-Mineral.
- [35] STO verwerkingsrichtlijn.
- [36] FOAMGLAS (2006). Lichte gevelbekleding: Foamglas W+F®, plaatsing met koudlijm.
- [37] FOAMGLAS (2006). Zware gevelbekleding: Foamglas W+F®, plaatsing met koudlijm.
- [38] KINGSTON (2008). Grote toekomst voor sandwichelementen. Gevelbouw.
- [39] KINGSPAN. Insulated roof & wall systems: EnergiPanel.
- [40] ETAG 016 (2003). Guideline for European technical approval of self-supporting composite lightweight panels.
- [41] EN 14509 (2006). Self-supporting double skin metal faced insulating panels.
- [42] Hechtingsinstituut Delft. Hittebestendige sandwich panelen.

- [43] MATTHYS S. / BROSENS K. Structurele versterking van betonconstructies.
- [44] NBN EN 12188 (1999). Producten en systemen voor de bescherming en reparatie van betonconstructies – Beproevingmethoden – Bepaling van de hechting van staal voor het kenmerken van dragende lijmen.
- [45] NBN EN 1504-4 (2005). Producten en systemen voor het beschermen en herstellen van betonconstructies – Definities, eisen, kwaliteitsborging en conformiteitsbeoordeling – Deel 4: constructieve hechting.
- [46] NBN EN 1542 (1999). Producten en systemen voor de bescherming en reparatie van betonconstructies – Beproevingmethoden – Bepaling van de hechtsterkte door middel van de afbreekproef.
- [47] LANGENBERG C. (2005). Versterken van bestaande betonconstructies m.b.v. uitwendig gelijmde koolstofwapening. Scriptie, Hogeschool Windesheim, 52p.
- [48] VASSEUR L. (2009). Niet-lineair gedrag van doorlopende betonliggers verstevigd met uitwendig gelijmd FRP wapening. Doctoraatswerk, Universiteit Gent, Vakgroep Bouwkundige Constructies, 319p.
- [49] RENOLIT WATERPROOFING. De ervaring in kunststofmembranen: AlkorPLAN®.
- [50] PROFAFLEX – PROFAGUM. De nieuwe generatie SBS & APP bitumen dakbanen.
- [51] ROOF BELGIUM (2005). Levensduur van EPDM-dakbedekking meer dan 50 jaar, p. 12-14.
- [52] IRS International Roof Systems <http://www.waterdicht.be>
- [53] STEENBRUGGHE H. (2003). Waarom er voor de FPO dakbanen een grote toekomst is weggelegd. Roofs, p. 16-21.
- [54] STEENBRUGGHE H. (2007). Verenigbaarheid van de diverse materialen. Cursus, Gent, 53p.
- [55] WULVA (2008). Dakdichting met UVB® EPDM rubber. Handleiding oktober 2008.
- [56] BUtgb (1998). Technische goedkeuring met certificatie. Eenlaagse EPDM-dakafdichting: UVB CODE 92640.
- [57] BUtgb (2007). Technische goedkeuring met certificatie. Eénlaags elastomeer EPDM dakafdichtingssysteem RESITRIX Classic/MB/SK/SKW.
- [58] BUtgb (2007). Dakafdichtingssysteem – bitumen – APP DERBIGUM GC 4 en 5 – DERBIGUM SP 3 FR, 4 FR en 5 FR – DERBICOLOR 4 FR – DERBICOLOR 4 WSL.
- [59] BUtgb (2006). Eénlaags elastomeer EPDM dakafdichtingssysteem Firestone Rubbergard EPDM LFR (dikte 1,14mm).
- [60] FIRESTONE EPDM. Technische richtlijnen: Hoofdstuk 3: Verwerking.
- [61] CTIB - TCHN <http://www.ctib-tchn.be>
- [62] SCHELLINGERHOUT N. W. (2001). Tekstbrochure verlijmen van baksteen.

<http://aluminium.matter.org.uk>

<http://books.google.com>

<http://celkunststoffen.khlim.be>

<http://www.akemi.be>

<http://www.aluminiumcentrum.nl>

<http://www.alural.be>

<http://www.bouwinfo.be>

<http://www.dakfabriek.nl>

<http://www.ervas.nl>

<http://www.livios.be>

<http://www.lsgi.nl>

<http://www.maxit-benelux.com>

<http://www.monoglass.nl>

<http://www.pocketgoniometer.com>

<http://www.resitrix.be>

<http://www.simson.nl>

<http://www.spanstaal.nl>

<http://www.spiderglass.be>

<http://www.tweha.nl>

<http://www.viba.nl>

