

Voorwoord

Dit verslag is geschreven door Edwin Koster, masterstudent Bouwtechniek aan de Technische Universiteit in Eindhoven. Het doel van deze afgesloten periode was de verdieping in het materiaal ETFE-folie. Deze verdieping vormt het voortraject voor de uiteindelijke afstudeeropdracht waarbij een gevelontwerp gerealiseerd zal gaan worden met luchtkussens van ETFE-folie.

Hoofdonderdeel van dit verslag is een onderzoek naar de doorvalveiligheid van een daglichtkoepel bestaand uit een ETFE-luchtkussens. Daarnaast is er in tussenliggende periode onderzoek gedaan naar de potentie van het materiaal ETFE-folie, toepasbaar als vangnetconstructie onder bovenhoofds toegepaste beglazing. Beide opdrachten zijn uitgevoerd in samenwerking met zeilmakerij *Buitink* in Duiven. Student aan de Hoge School in Arnhem Freek van den Berg, werkzaam als stagiaire bij Buitink, heeft samen met mij bovengenoemde onderzoeken uitgevoerd.

Dit verslag is een studieopdracht moet ook als zodanig worden geïnterpreteerd. Het kan daarom niet worden uitgesloten dat er enkele incorrecte uitspraken gedaan worden.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Inhoudsopgave	2
Inleiding	4
ETFE-Folie	5
<i>Eigenschappen</i>	5
<i>Productieproces</i>	5
<i>Toepassingen</i>	6
<i>Voor- en nadelen</i>	8
Onderzoek I Doorvalveiligheid	9
Probleemstelling	9
<i>Inleiding</i>	9
<i>Onderzoeksvraag</i>	9
<i>Doelstelling</i>	9
<i>Aanpak</i>	10
Methode	11
<i>Opstelling</i>	11
<i>Conditie</i>	12
<i>Situaties</i>	12
<i>Metingen</i>	13
Resultaten	14
<i>Doorbuiging</i>	14
<i>Drukverschil</i>	14
<i>Vervorming</i>	17
Conclusie & Discussie	19
Onderzoek II Glasproef	20
Probleemstelling	21
<i>Inleiding</i>	21
<i>Onderzoeksvraag</i>	21
<i>Doelstelling</i>	21
<i>Aanpak</i>	21
Glasscherven	22
<i>Bovenhoofdse beglazing</i>	22
<i>Floatglas</i>	25
Methode	27
<i>Opstelling</i>	27
<i>Situaties</i>	27
<i>Metingen</i>	28

Resultaten	28
Conclusie & Discussie	29
Vervolgonderzoek	30
Bronnen	31
Bijlagen	32
<i>Berekeningen</i>	32
<i>Treksterkte</i>	34
<i>Temperatuur</i>	35

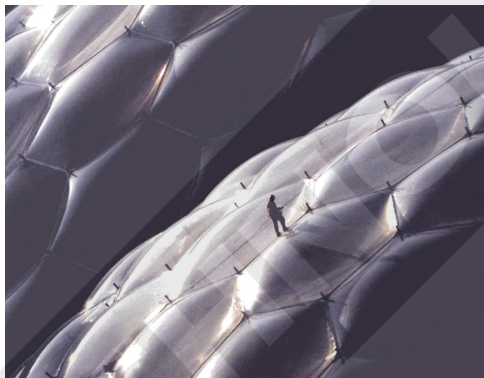
BUITINK TECHNOLOGY

Inleiding

Eén van de eerste constructieve toepassingen met het materiaal ETFE-folie was in de jaren zeventig. In dierenpark *Burgers Bush* in Arnhem werden ETFE-luchtkussens toegepast als daklichtelement. Tot aan het einde van de vorige eeuw werd de luchtkussentoepassing slechts op kleine schaal toegepast. Met de toepassing van luchtkussens in het *Eden Project* in Cornwall en het *National Space Centre* in Leicester kwam daar verandering in. Een vernieuwde interesse zorgde voor een toename in onderzoek naar deze nog relatief onbekende toepassing. Toch bleven de grote opdrachten uit en werd het materiaal voornamelijk toegepast in dakconstructies. Eén van de redenen hiervoor kan worden gevonden in het beperkte aantal aanbieders van deze toepassing en hun afgeschermd kennis en ervaring. De beperkte regelgeving en mogelijke risico's spelen ook een belangrijke rol in de keuze voor dit vernieuwende dak- en gevelmateriaal.

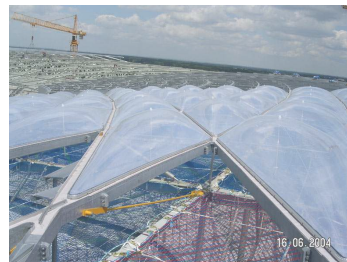


Afbeelding 1.1
Space Centre in Leicester



Afbeelding 1.2
Eden Project in Cornwall

Toch lijkt de weerstand nu eindelijk gebroken te zijn. Recent zijn twee grote bouwprojecten uitgevoerd met een opvallende luchtkussengevel van ETFE-folie. De *Allianz Arena* in München en het Olympisch zwembad *Watercube* in Peking zijn zeer aansprekende voorbeelden die met hun sterke representatieve waarde de markt voor ETFE-folie toepassingen weer kunnen laten opbloeien.



Afbeelding 1.3
Olympisch zwembad *Watercube* in Peking

Afbeelding 1.4
Allianz Stadion in München gavel & dakvlak

In dit verslag zullen twee onderzoeken worden beschreven die zijn uitgevoerd in samenwerking met zeilmakerij *Buitink* te Duiven. Het eerste onderzoek zal ingaan op de doorvalveiligheid van een daklichtkoepel met afmetingen van 3000mm x 3000mm. Bij het tweede onderzoek is geprobeerd inzicht te krijgen in de potentie die het materiaal ETFE-folie heeft als toepassing bij vangnetconstructies onder bovenhoofds toegepaste beglazing. Voordat deze twee onderzoeken behandeld zullen worden zal er nog kort worden ingegaan op het materiaal ETFE en mogelijke toepassingen.

ETFE Folie

Eigenschappen

De thermoplast ETFE, afkorting voor *Ethyl Tetra Fluor Ethyleen*, is een co-polymeer opgebouwd uit ethyleen en teflon en is een combinatie van beide materiaaleigenschappen. Het ethyleen zorgt voor goede verwerkingsmogelijkheden door de folie soepel te houden en de teflon eigenschappen dragen bij aan de goede eigenschappen op het gebied van duurzaamheid. Het hoogwaardige product ETFE-folie kwam voort uit de behoefte aan een mechanisch sterkere polymeer. Dit is bereikt door een fluoropolymeer uit te breiden met waterstofatomen.

Dichtheid en diktes

Bij de proeven beschreven in dit verslag is het *NOWOFOL AG* ETFE-folie gebruikt. Onderstaande tabel geeft de algemene mechanische eigenschappen weer van ETFE-folie.

Property	Value Range	Unit
Specific gravity	1.75	g/cm ³
Notch impact test	15	kJ/m ²
Ball hardness	31 - 33	N/mm ²
Shore hardness D	67 - 73	Shore-D
Oxygen index	35	%
Shrink at 150 °C, 10 min	2.5	%
Coëfficiënt of friction (dry with steel)	0.2 – 0.5	
Melting point	275	°C
Linear coëfficiënt of expansion 0-100 °C	11-14.10 ⁻⁵	m/m/K
Maximum working temperature	150	°C
Flexural modulus of elasticity in tension	1000	N/mm ²
Secant modulus of elasticity in tension	600 – 750	N/mm ²
Yield point at 23 °C	25	N/mm ²
Elastic yield	20	%
E-modulus at elastic yield	125	N/mm ²
Ultimate tensile strength	45	N/mm ²
Elongation at break, at 23 °C	300	%
Ultimate tensile strength at 150 °C	15 – 21	N/mm ²
E-modulus at ultimate strength	15	N/mm ²
Tear propagation force (DIN 53515, 23 °C)	180	N/mm ²

Tabel 1.1
Mechanische eigenschappen ETFE-folie
[Tensile Foil; J.W.J de Vries]

Deze eigenschappen zijn gebaseerd op andere definities als gebruikelijk in de bouw. Daarom kunnen deze eigenschappen niet zomaar worden overgenomen bij constructieve toepassingen

Materiaal opbouw	Waarde	Eenheid
Treksterkte	41 - 47	N/mm ²
Treksterkte (korte duur)	15 - 20	N/mm ²
Druksterkte	11	N/mm ²
Rek bij breuk	420 – 460	%

Tabel 1.2
Indicatieve waarden constructieve eigenschappen ETFE-folie

Productieproces

De eerste stap is het produceren van het halfproduct ETFE in korrelvorm. De ETFE-korrels bestaan uit lange ketens moleculen welke gevormd zijn uit Chloride Fluoride Methaan bij een temperatuur van 700 °C. De korrels worden vervolgens ingevoerd in een extrudeermachine. Er bestaan twee methoden om de ETFE-folie te verkrijgen. De eerste maakt gebruik van een schroef. De korrels worden door verhitting vloeibaar en de schroef perst de ETFE door een mal. De folie wordt vervolgens afgekoeld en op een spoel gewikkeld. In verband met de beperkte malbreedte is de breedte van de folie ook beperkt, maximaal 2250 mm. De standaard rolbreedte bij NOWOFOL is 1550 mm. Bij het tweede extrusieproces wordt er gebruik gemaakt van een blaasstechniek. De vloeibare ETFE wordt hier door een ringvormige mal geperst waarna door het inblazen van lucht een gecontroleerde bel ontstaat. De bel wordt vervolgens ingesneden en de folie wordt op een spoel gewikkeld. De blaasmethode heeft als voordeel dat er bredere folies kunnen worden geproduceerd. Groot nadeel is dat door het minder gecontroleerde productieproces, de eigenschappen van het materiaal minder homogeen zijn. Bij vrijwel alle constructieve toepassingen wordt ETFE-folie toegepast welke tot stand is gekomen via het eerst behandelde extrusieproces.

Om ETFE-folie in grotere afmetingen te kunnen toepassen dan de beperkte breedtemaat is het samenvoegen van lagen noodzakelijk. Dit kan worden verkregen door verlijming of door versmelting. Bij het verlijmen kan men gebruik maken van thermisch etsen of een elektrode behandeling. Door de teflon eigenschappen is de verlijming aan zeer strenge voorwaarde onderhevig en wordt voor constructieve toepassing daarom ook niet gebruikt. De standaard methode om twee lagen ETFE-folie samen te voegen is het versmelten. Met behulp van een verwarmde stempel worden de lagen ETFE-folie plaatselijk verwarmd en smelten de twee lagen op elkaar. De breedte van de las kan variëren. Bij de onderzoeken die verder in dit verslag volgen is er echter gewerkt met de meest gangbare lasbreedte van 10 mm. De verwarmde stempel kan bestaan uit onbehandeld aluminium, staal of koper.

Toepassingen

ETFE-folie kan enkellaags worden toegepast of in kussenvorm. ETFE-luchtkussens toepassingen bestaan uit minimaal twee lagen ETFE-folie, een randconstructie welke de inklemming verzorgt, en een kleine luchtpomp welke een kunstmatige overdruk in stand houdt tussen de lagen ETFE reguleert. De luchtdruk varieert van 200 tot 700 Pa en is afhankelijk van de wind- en sneeuwbelasting.

De hoogte van het kluchtkussen, gemeten van de neurale middellijn, bedraagt theoretisch gezien 10% van de overspanning. De bolling van het kussen komt mede tot stand door de elastische rek in het materiaal. Wanneer een grotere hoogte gewenst is worden de folies volgens een snijpatroon uitgesneden. Hiermee kan de bolling worden vergroot en kunnen er meer belastingen door het kussen worden opgenomen zonder dat de interne spanning te hoog oplopen.

Enkele bekende werken waarbij ETFE-luchtkussens zijn toegepast zijn de *Allianz Arena* in Munchen en het Olympisch zwembad in Peking.



Afbeelding 1.5
Allianz Stadion
in Munchen



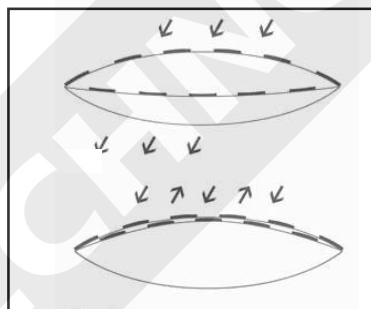
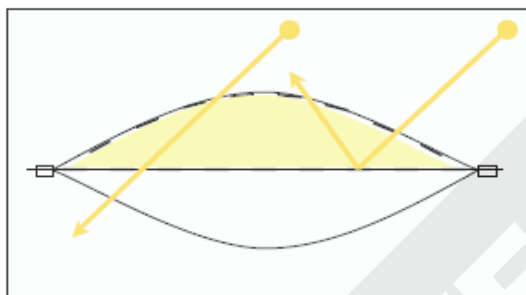
Afbeelding 1.6
Olympisch
zwembad
Watercube in
Peking

Naast een standaard luchtkussen met twee lagen zijn er verschillende varianten mogelijk. Zo kunnen er meerdere luchtkamers worden gerealiseerd door het gebruik van meerdere lagen folie. Deze toepassing biedt vooral voordelen op het gebied van de isolerende eigenschappen. Hoewel voor iedere constructie de specifieke U-waarde moet worden bepaald, kan wel worden opgemerkt dat de een ETFE-luchtkussen betere isolerende eigenschappen heeft dan normaal dubbelglas.

Materiaal opbouw	U-waarden
2 lagen folie (1 luchtkamer)	2,94 W/m ² K
3 lagen folie (2 luchtkamers)	1,96 W/m ² K
Normaal dubbelglas	3,80 W/m ² K

Tabel 1.3
Indicatie van de U-waarden
[ETFE info file, Licotec]

Een andere interessante variant is gebaseerd op de lichttoetreding. Zo is er een reflecterende zonwerende variant mogelijk waarbij een dun laagje aluminium op de folie is gedampt. Ook kan men de folie bedrukken met een patroon. Wanneer men drie lagen folie toepast, en op twee folies een tegengestelde bedrukking toepast, kan men door het opblazen of leeg laten lopen van de buitenste kamer de LTA waarde beïnvloeden. Beide bedrukte folies kunnen tegen elkaar worden gedrukt waardoor het kussen nagenoeg geen daglicht meer doorlaat.



Figuur 1.1
Beïnvloeden van LTA dmv bedrukken folie
[ETFE info file, Licotec]

Figuur 1.2
Regelen LTA met patronen
[foiltec]

Enkele voorbeelden van de toepassing van ETFE-folie in een enkele laag zijn het *Infozentre Kraftwerk* in Walchensee of een overkapping in Huttwil. Deze constructie zijn vergelijkbaar met andere membraanconstructie en hebben een grote vormvrijheid voor zowel clastische als anti-clastische vormgeving. Wel moet er bij het toepassen van ETFE-folie rekening worden gehouden met de geringere elasticiteit, treksterkte en kruipgrens in vergelijking met toepassingen van gecoate kunststoffen en glasweefsels. De detaillering van de bevestiging verdient hierbij extra aandacht.

Voor- en nadelen

Hieronder zijn de belangrijkste voor- en nadelen van ETFE-folie kort samengevat. Deze zijn grotendeels overgenomen uit het rapport *Tensile Foil* (zie bronnen).

Voordelen

- Transparant, tot 95% van het zichtbare licht. Ook een deel UV straling wordt doorgelaten (UV-A en UV-B)
- Hoge treksterkte en scheurweerstand voor een plastic folie
- Geen mechanische of visuele achteruitgang onder invloed van spanningen
- Gaat minimaal 18 jaar mee
- Zelfreinigende werking doordat vuil zich niet kan hechten aan het oppervlak, een stevige regenbui spoelt het oppervlak vanzelf schoon
- Lichtgewicht waardoor grote besparing op onderconstructie mogelijk is
- Recyclebaar
- Er kan een print op worden aangebracht en in verschillende kleuren worden geleverd
- Voldoet aan de Zwitserse norm SIA 280 voor bestandheid tegen hagel
- Niet vlamonderhoudend

Nadelen

- Het materiaal kent een grote rek
- Temperatuur heeft invloed op de eigenschappen
- Gemakkelijk te beschadigen met een scherp voorwerp
- Zicht wordt vertroebeld bij gekromde ETFE-oppervlakten
- Niet geheel transparant in vergelijking met glas, doorschijnende licht heeft een lichte blauwe kleur
- Het materiaal ondervindt een blijvende vervorming als deze onder een scherpe hoek wordt gevouwen. Bij onzorgvuldige behandeling, met name bij grotere oppervlakten, ondergaat het folie een esthetische degradatie

Onderzoek I Doorvalveiligheid

Probleemstelling

Inleiding

Zeilmakerij Buitink BV uit Duiven is momenteel bezig met het ontwikkelen van een daklicht element van 3 m x 3 m met een ETFE-luchtkussen. De grote daklicht elementen bieden optimale lichttoetreding met een minimale hulpconstructie.

Een daklicht moet voldoen aan bepaalde eisen. Zo moet deze natuurlijk voldoende draagkrachtig zijn om sneeuw- en windbelastingen op te kunnen vangen maar deze moet ook voldoen aan de eisen die betrekking hebben op de doorvalveiligheid. Deze eis garandeert de veiligheid voor arbeiders die tijdens werkzaamheden op een dakvlak ten val komen. Een daklicht moet volgens de eisen bestand zijn tegen de impact van een vallend volwassen persoon. Uit deze eis volgt de onderzoeksvraag die Buitink als opdracht stelde.

Onderzoeksvraag

Voldoet een daglichtkoepel van ETFE-folie aan de normen voor doorvalveiligheid zoals zijn voorgeschreven in NEN 6702?

Na bestudering van NEN 6702 blijkt uit §8.2.5.1 dat daklichten, afdekkingen van atria en andere vormen van transparante daken eenzelfde veiligheid moeten bieden aan personen die zich op of onder dergelijke daken bevinden als bereikt zou zijn bij de toepassing van niet-transparante daken.

Hieruit volgt dat de daglichtkoepels moeten voldoen aan de norm die beschreven staat in NEN 6702 §9.5 *stootbelasting op vloeren en daken*.

De stootbelasting op een dak of vloer is een vrije belasting die overeenkomt met de belasting die wordt veroorzaakt door een zacht stootlichaam, dat als vrije belasting op het dak of de vloer valt vanaf ten minste 0,7 m hoogte. Het stootlichaam heeft de volgende eigenschappen:

- Een leren zak gevuld met glaskogeltjes met een totale massa van (50 +/- 0,5) kg;
- De glaskogeltjes hebben een middellijn van (3 +/- 0,5) mm.

NEN 6702: §9.5
*stootbelasting
op vloeren en
daken*

Doelstelling

Het doel van de proef is het aantonen dat de ETFE-daglichtkoepel van 3m x 3m bestand is tegen een stootbelasting van 350 Joule zoals voorgeschreven in NEN 6702 §9.5, zowel in de opgeblazen als in onopgeblazen situatie.

Subvragen:

Wordt gedurende de impact de vloeigrens van de folie overschreden, dus met andere woorden, treedt er blijvende vervorming op in de ETFE-folie?

Welk deel van de daglichtkoepel kan als zwakste schakel worden beschouwd?

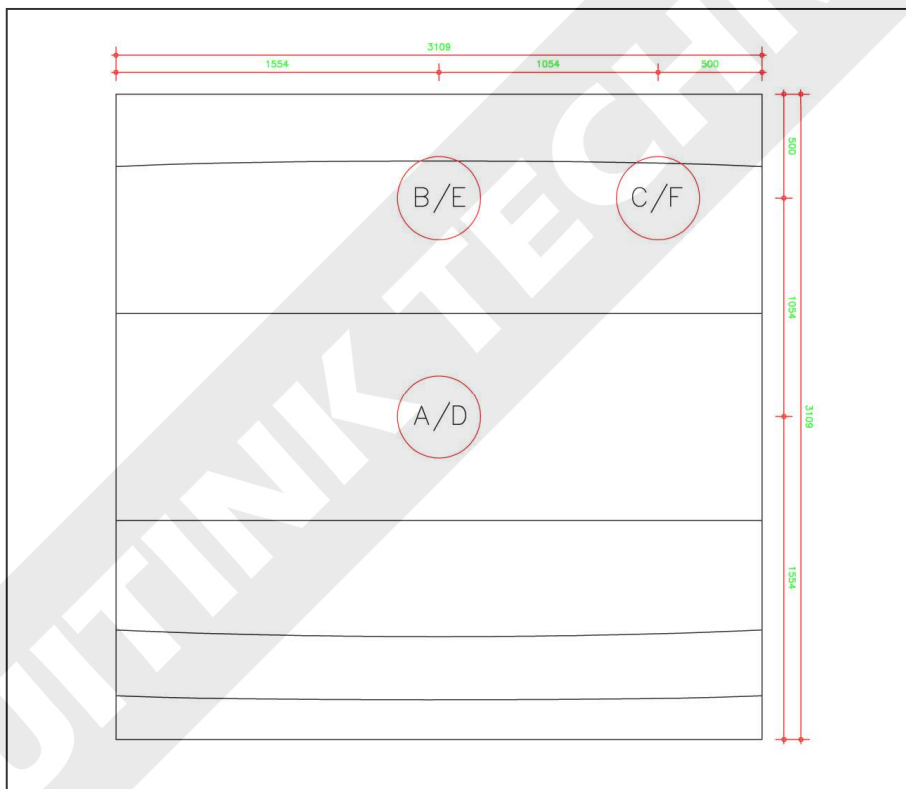
Aanpak

Zoals beschreven in de doelstelling zullen er testen worden uitgevoerd op het element in opgeblazen en in de onopgeblazen situatie. De volgende situaties zullen worden getest:

Testsituaties:

1. Het luchtkussen in opgeblazen toestand onder een druk van $0,25 \text{ kN/m}^2$ (250 Pa)
 - A Stootbelasting van 350 J in het midden van het kussen (zak vallend van $0,7 \text{ m}$ hoogte)
 - B Stootbelasting van 350 J op 500 mm van het inklemmingsprofiel
 - C Stootbelasting van 350 J op 500 mm van de hoek van het inklemmingsprofiel
2. Het luchtkussen in onopgeblazen toestand
 - A Stootbelasting van 350 J in het midden van het kussen (zak vallend van $0,7 \text{ m}$ hoogte)
 - B Stootbelasting van 350 J op 500 mm van het inklemmingsprofiel
 - C Stootbelasting van 350 J op 500 mm van de hoek van het inklemmingsprofiel

Deze situaties zullen nader worden toegelicht in paragraaf testsituaties in hoofdstuk methode.

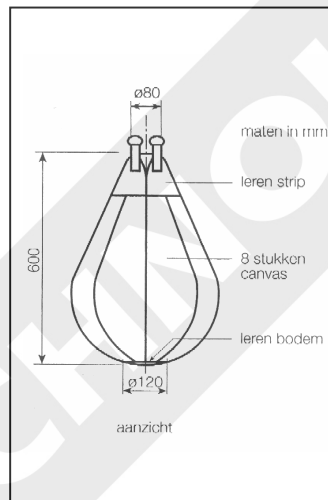
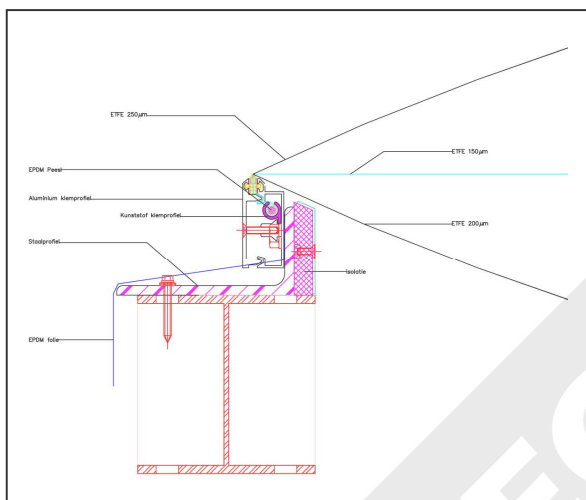


Figuur 2.1
Plaats impact
stootvolume

Methode

Opstelling

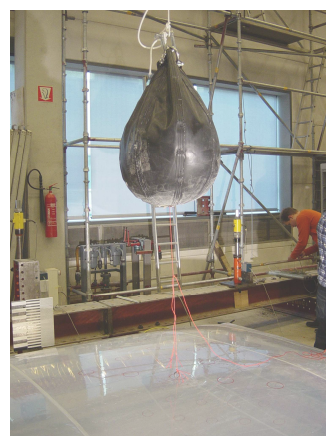
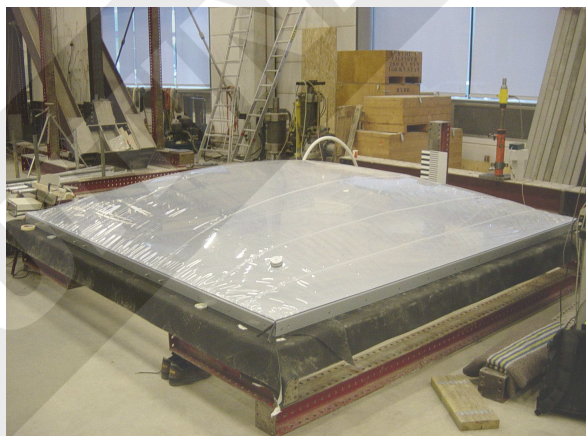
Bij het opstellen van een testmethode en opstelling is zo veel mogelijk geprobeerd de richtlijnen te volgen opgenomen in het TNO-rapport B-92-1143 *stootbelasting op constructieonderdelen*. Deze schrijft voor dat het proefstuk bestaat uit het te beproeven constructie-onderdeel (het luchtkussen) inclusief zijn bevestiging aan een hulpconstructie (klemprofiel). Het proefstuk komt dus zo veel mogelijk overeen met de werkelijkheid. De gehele constructie wordt gemonteerd op een frame van stalen liggers. Door de grote stijfheid van deze liggers kan de invloed alleen maar ongunstig zijn. Hoe stijver de constructie immers is, des te minder kan de schok worden geabsorbeerd door de constructie.



Figuur 2.2
Opbouw
proefopstelling

Figuur 2.3
Leren zak
gevuld met
glaskorrels

Het impactvolume, de leren zak beschreven in de norm, is opgehangen aan een kraanconstructie. Nadat het volume op de voorgeschreven hoogte van 0,7 m hoogte is gehesen zal deze handmatig worden losgelaten en ongehinderd het element treffen op de gewenste positie. Het frame met het luchtkussen is boven het vloeroppervlak aangebracht op een dusdanige hoogte dat de folie ongehinderd kan vervormen.



Afbeelding 2.1
Proefopstelling

Afbeelding 2.2
Leren zak
(stootvolume)

Conditie

Het luchtkussen is opgebouwd uit drie lagen ETFE-folie. In de praktijk wordt het middenfolie vaak lichter gekozen dan boven- en onderfolie. Bij dit luchtkussen is er voor het bovenste folie gebruik gemaakt van 250 μm ETFE-folie, voor het midden folie 150 μm , en voor het onderste folie is een foliedikte gebruikt van 200 μm .

Via een pomp zal het luchtkussen worden opgeblazen en op de gewenste druk van rond 250 Pa worden gehouden. Deze luchtdruk wordt bereikt door een evenwicht tussen de toegevoerde en afgevoerde lucht. Eén aansluiting is namelijk voorzien van een gat waardoor lucht kan ontsnappen. In de praktijk zal in een gesloten systeem zo worden voorkomen dat er condensatie zal plaatsvinden. Omdat het materiaal ETFE-folie onderhevig is aan kruip zal het opgeblazen luchtkussen 24 uur ongemoeid worden gelaten zodat het kussen zijn definitieve bollingscurve kan aannemen.

De proeven zullen worden uitgevoerd bij temperaturen rond de 20 °C. Deze temperatuur voldoet aan de voorgeschreven (20 +/- 5) °C beschreven in het TNO-rapport.

Situaties

Naast de opgeblazen situatie zal ook de onopgeblazen situatie worden getest. Bij onderhoud, plaatsing van, of vervanging van de luchtkussenelementen, zal het element ook bestand moeten zijn tegen de impact van een vallend persoon.

Bij de keuze van de impactplaatsen is er rekening gehouden met eis beschreven in het TNO-rapport. Deze schrijft voor dat voor de keuze van de plaatsen moet worden uitgegaan van de meest kwetsbare posities met trekking tot het bezwijken van de beschouwde bouwconstructie. Naast de impact in het midden van het luchtkussen zal er daarom ook worden getest in hoeverre het element bestand is tegen de impact in de hoek van het luchtkussen en aan de randen. De impact in de hoek van het luchtkussen is de meest ongunstige positie omdat de krachten van de impact moeten worden opgevangen over een minimale lengte van de folie.

Testsituaties:

1. Het luchtkussen in opgeblazen toestand onder een druk van 0,25 kN/m² (250 Pa)
 - A Stootbelasting van 350 J in het midden van het kussen (zak vallend van 0,7 m hoogte)
 - B Stootbelasting van 350 J op 500 mm van het inklemmingsprofiel
 - C Stootbelasting van 350 J op 500 mm van de hoek van het inklemmingsprofiel
2. Het luchtkussen in onopgeblazen toestand
 - A Stootbelasting van 350 J in het midden van het kussen (zak vallend van 0,7 m hoogte)
 - B Stootbelasting van 350 J op 500 mm van het inklemmingsprofiel
 - C Stootbelasting van 350 J op 500 mm van de hoek van het inklemmingsprofiel

Metingen

Tijdens het uitvoeren van de proeven zullen er verschillende gegevens verzameld worden. Met deze gegevens kan er naderhand een analyse van de resultaten plaatsvinden.

Drukmeter

Met een drukmeter, aangesloten op een tweede aansluiting op het luchtkussen, kunnen de drukverschillen gedurende de impact worden geregistreerd. Er zal een drukmeter worden toegepast die een bereik heeft van 2,5 kPa. Dit moet ruim voldoende zijn om de drukverandering in het luchtkussen tijdens impact te registreren. Iedere seconde zullen er 400 metingen worden verricht.

Hoge snelheids camera

De hoge snelheids camera zal de impact vastleggen. Gedurende 40 seconden zal deze opnames maken eveneens met een snelheid van 400 beelden per seconde. Naderhand kan worden bepaald wat de contacttijd was van de zak en wat de maximale doorbuiging was.

De camera zal ter hoogte van het midden van de opstelling worden geplaatst op een hoogte die net boven het klemprofiel ligt. Bij impact in de hoek van het element zal de camera van plaats veranderen. Deze zal recht voor de plaats van impact worden geplaatst.

Doorbuiging

Door aan de hand van een kalibratie-opname een bepaalde referentie lengte te palen op het luchtkussen kan er worden bepaald wat de werkelijke lengte in mm per pixel is ter plaatse van de impact. Met deze gegevens kunnen de beelden van de hoge snelheidscamera worden geanalyseerd en kan de maximale doorbuiging met een redelijke precisie worden bepaald.

Vervorming

Om goed te kunnen bepalen of de folie onder invloed van de impact van de zak blijvend is vervormd, zal er voorafgaand aan de proeven een patroon op de folie worden aangebracht met stift. Dit rooster, met cirkels met een diameter van 64 mm, zal na de test worden opgemeten. Op die manier kan de vervorming worden bepaald en in welke richting de grootste krachten zich hebben afgespeeld. Niet alleen het bovenste folie, maar ook het middenfolie, zal van dit patroon worden voorzien. Om het patroon gemakkelijk te kunnen aanbrengen zal er een houtenplaat met cirkels worden vervaardigd waardoor het patroon gemakkelijk aan te brengen is.

Spanningen

In het oorspronkelijke plan was het de bedoeling om rekstroken aan te brengen op de folie die de uitrekking gedurende de impact zouden registreren. Helaas bleek dat het verlijmen van de rekstroken nagenoeg onmogelijk was. Er is daarom voor gekozen de spanningen aan de hand van de resultaten van de proef te benaderen.

Resultaten

Doorbuiging

Zoals beschreven in de methoden kan de doorbuiging worden bepaald aan de hand van de beelden van de hogesnelheidscamera.

Aan de hand van de kalibratie-opnames is het aantal millimeters per pixel bepaald. Na bestudering van het beeld met de maximale doorbuiging van het luchtkussen volgen de volgende waarden.

	Impact A	Impact B	Impact C
Maximale doorbuiging (mm)	357	294	355

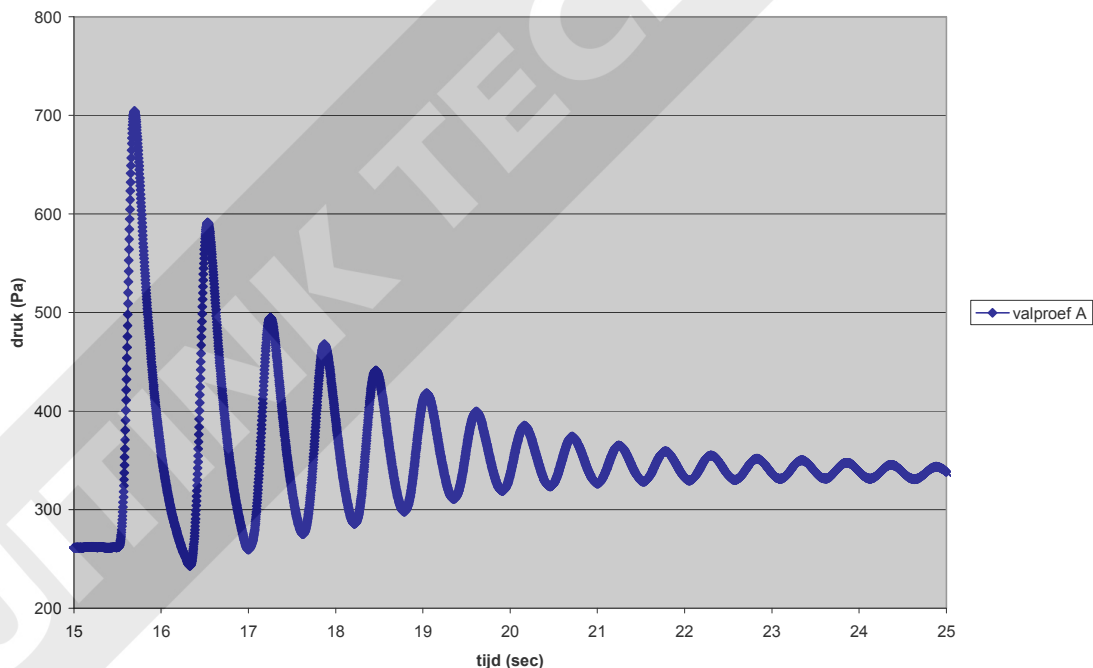
Tabel 2.1
Maximale doorbuiging element bij impact

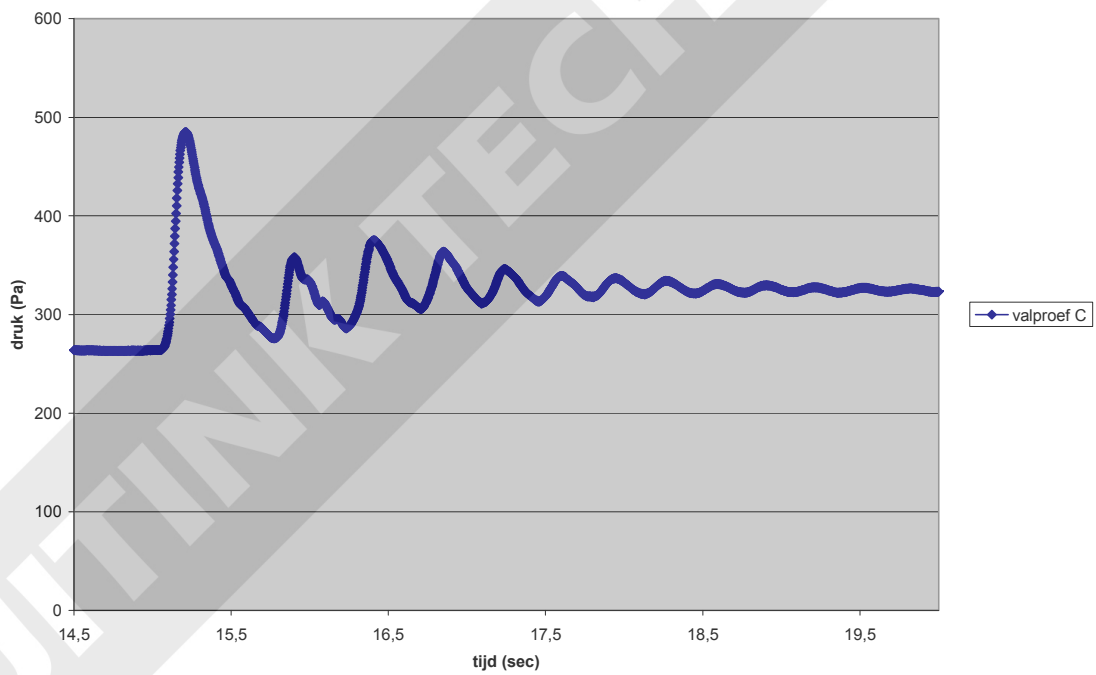
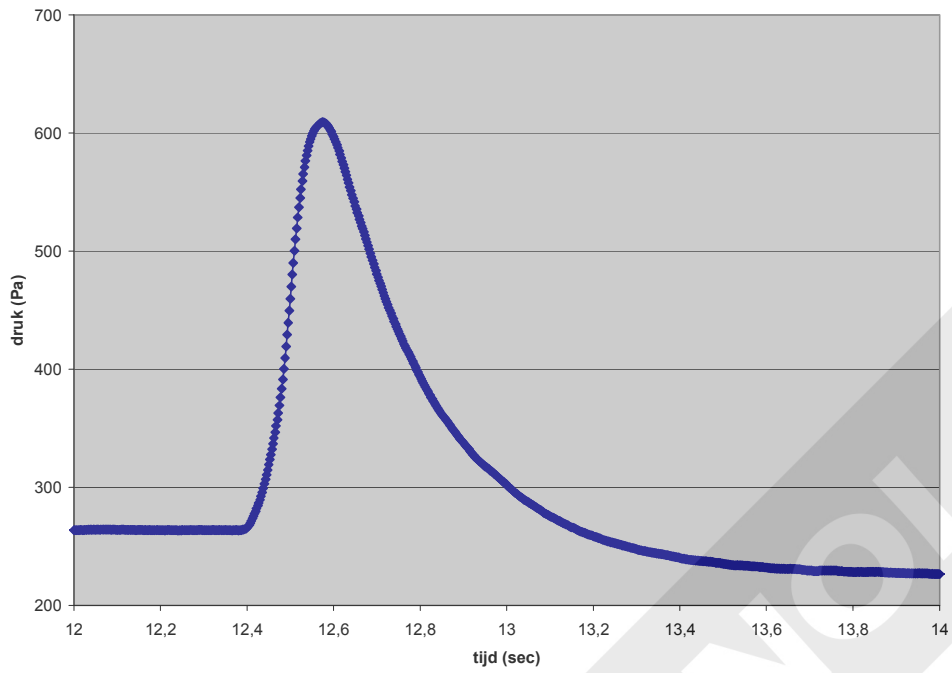
Geschatte afwijking van +/- 10 mm

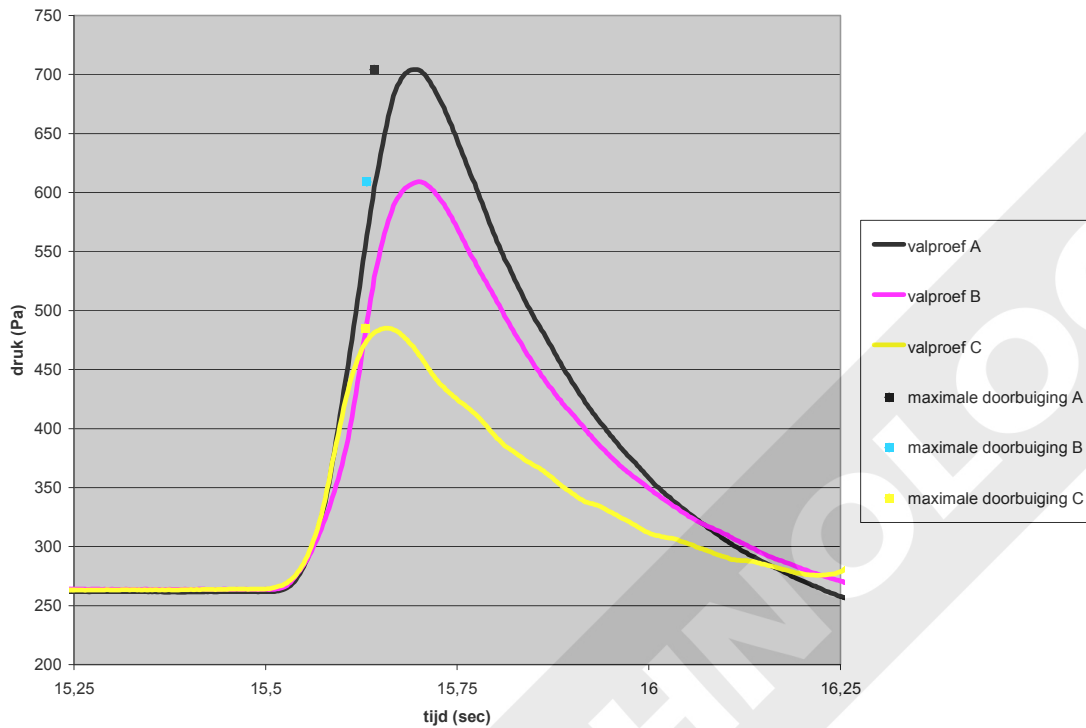
De doorbuiging tijdens de impact D, E en F zijn niet exact te achterhalen.

Drukverschil

De gegevens die de druk ten tijde van de impact weergeven, geven een goed beeld van de impact. Zoals in onderstaande figuren is waar te nemen, maakt de zak bij proef A en C een herhaaldelijke impact op het luchtkussen. Van zelf sprekend zijn de waarden voor doorbuiging en druk het grootst bij de eerste impact.







	Impact A	Impact B	Impact C
Maximale druk (Pa)	704	609	485

Tabel 2.2
Maximale druk
in element bij
impact

Ter vergelijking; een latex ballon begeeft het bij een druk van ongeveer 6 kPa (-20 °C)

Bij een maximale doorbuiging, en dus een maximale volumeverkleining van het luchtkussen, zal het drukverschil het grootst zijn. Dit blijkt ook wanneer beide meetgegevens worden vergeleken. Er is een verschil waarneembaar van gemiddeld 0,05 sec. Deze vertraging bij het meten van de druk kan worden toegeschreven aan de verplaatsingssnelheid van de drukgolf en de vertraging die optreedt bij het registreren van de metingen.

Vervorming

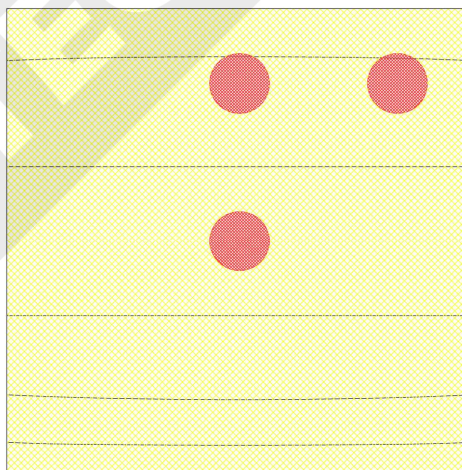
Het hoofddoel van de proef was om te bepalen of het luchtkussenelement bestand was tegen de impact van het volume. Voor het negatief beantwoorden van deze vraag zou er breuk of scheurvorming moeten optreden met een oppervlak van ten minste 0,1 m bij 0,1 m. Dit heeft in alle gevallen niet plaatsgevonden. Wel is er ter plaatse van de impact een blijvende vervorming opgetreden, in opgeblazen situatie duidelijk waarneembaar door een kleine bolling op het luchtkussen. De blijvende vervorming heeft bij alle situatie gelijkwaardige afmetingen.

Het achterhalen van de grootte van de spanningen is niet gelukt. Het aangebrachte patroon vertoonde dusdanig kleine afwijkingen dat het niet mogelijk was om aan de hand van het rekpercentage de spanningen te herleiden. Omdat de vloeigrens is overschreden, kan wel worden gesteld dat de folie plaatselijk meer dan 2% rek heeft vertoond. De blijvende vervorming rond de impactgebieden ligt ergens rond de 1%.

	Impact A	Impact B	Impact C	Impact D	Impact E	Impact F
Blijvende vervorming Bovenste folie laag	ja	ja	ja	nee	nee	nee
Blijvende vervorming Middelste folie laag	nee	nee	nee	ja	ja	ja
Scheurvorming / breuk	nee	nee	nee	nee	nee	nee

Tabel 2.3
Resultaten valproeven

Bij de proeven D, E en F is hetzelfde kussenelement gebruikt als bij A, B en C. Hierdoor had het bovenste folie al een blijvende vervorming ondergaan door de impact in opgeblazen situatie. Wanneer men logisch redeneert, lijkt vervorming van alleen het middenfolie het meest aannemelijk.



Afbeelding 2.3
Duidelijk waarneembare bolling op het luchtkussen na impact B

Figuur 2.4
Gebieden waar de vloeigrens is overschreden

Aan de hand van de contacttijd, contactoppervlak en impactgedrag moet het mogelijk zijn globaal de spanningen ter plaatse van de impact te bepalen. Deze berekeningen zijn hier niet meer meegenomen. Met een geschikt software programma zouden deze gegevens kunnen worden achterhaald. Voor de volledigheid zijn hier de gegevens weergegeven die hierbij van waarde zouden kunnen zijn.

	Impact A	Impact B	Impact C
1 ^e contact tot maximale impact (msec)	133	123	120
Contactoppervlak (cm)	27	28	28
Temperatuur (°C)	20	23	22

Tabel 2.4
Extra gegevens

Conclusie & Discussie

Uit de resultaten van de proeven kan het volgende worden geconcludeerd:

- Er vind geen doorslag plaats bij impact van het voorgeschreven volume, onder de eerder beschreven testcondities. Dit geldt voor zowel de drie opgeblazen testsituaties, als de drie onopgeblazen testsituaties.
- De vloeigrens wordt lokaal wel overschreden bij impact van het volume. Uit de proeven blijkt dat dit zich zal beperken tot een gebied rondom het contactoppervlak van de impact. Hierdoor zal er een blijvende vervorming optreden, waarneembaar als een bult op het luchtkussen in opgeblazen situatie.
- Omdat er geen doorslag heeft plaatsgevonden is het moeilijk te zeggen waar zich de zwakste schakel bevindt in de daglichtconstructie. Gezien de blijvende vervorming rondom het impactgebied lijkt dit gebied als aanname gerechtvaardigd. Bij een zwaardere impact zou het echter kunnen zijn dat er ter plaatse van de inklemming een onvoorspelbare reactie plaatsvindt.
- Dat door een toename in luchtdruk, bij een zwaardere impact, het luchtkussen zal scheuren lijkt onwaarschijnlijk. Het materiaal heeft daarvoor een te grote treksterkte. Ook zal een grote luchtdrukwaarde worden tegengewerkt door het ontsnappen van lucht in de pomp door terugslag, en door de bewust aangebrachte perforatie in de afsluitdop.

Het volgende moet worden opgemerkt:

- De invloed van temperatuur op de eigenschappen van de ETFE-folie is niet meegenomen in de proeven. Deze is echter wel van invloed op eigenschappen als treksterkte en rek. In de bijlagen is hier kort op ingegaan.
- Verschillende folie dikten hebben andere eigenschappen als gevolg. De resultaten gelden daarom voor een luchtkussen die is opgebouwd volgens de eerder beschreven foliediktes.
- De kwaliteit van het luchtkussen is afhankelijk van een aantal factoren. De kwaliteit van de lasnaden, de benadering van de optimale ontwerpmaten van de folieoppervlakten, en eventuele beschadigingen aan het folieoppervlak zijn van invloed op het gedrag van het luchtkussen tijdens de impact van het volume. Met name het middenfolie heeft een overmaat gehad die voordelig heeft kunnen zijn voor de impact in onopgeblazen situatie. Door de grotere curve heeft er een gunstigere krachtsafdracht plaats kunnen vinden ten opzichte van de opstelling in ontwerpsituatie.
- Omdat er één luchtkussenelement beschikbaar was zijn alle proeven uitgevoerd op één element. De gebieden waar blijvende vervorming is ontstaan beïnvloeden de testresultaten. Gezien de zeer minimale vervorming kan deze factor als zeer gering worden beschouwd.

Onderzoek II Glasproef

Onderstaand artikel geeft goed weer welke risico's er kleven aan glastoepassingen in dakconstructies.

43 winkels in Leidsenhage dicht na val glasplaat

Door MAAIKE KRAAIJEVELD

LEIDSCHEMENDAM - Onder toezicht oog van experts van Bouw- en Woningtoezicht van de gemeente Leidschendam-Voorburg is woensdagmorgen begonnen met het ophangen van beschermende netten onder de glazen overkapping van een deel van winkelcentrum Leidsenhage.

Gevolg van de val van één van de glazen platen uit de 300 meter lange overkapping, gistermiddag. Niemand raakte daarbij gewond, maar de winkel-'poot' Liguster van het centrum is dinsdag wel meteen gesloten voor publiek: meer dan 40 winkels bleven vanmorgen ook nog dicht, van Kruidvat tot Xenos. Naar verwachting zijn de winkels in de loop van de woensdagmiddag weer geopend voor publiek. „Maar veiligheid boven alles”, zeggen zowel loco-burgemeester Eppe Beimers als winkelcentrummanager Jos Zuidwijk. Het deel van het winkelcentrum waar de problemen zich voordoen - doordat de glazen plaat vermoedelijk is gebroken door de warmte, daarom wordt nu gezocht naar mogelijke constructiefouten - bestaat sinds 1998.

Experts en het bedrijf dat verantwoordelijk is voor de constructie hebben dinsdagavond een proef gedaan door een kiezel op de glasplaten te laten vallen. „Daaruit bleek dat de constructie is verzwakt”, zegt Zuidwijk. Hoe groot de schade is, is volgens betrokkenen nog niet te zeggen. „De juridische gevolgen zijn een zaak van de eigenaar van dit deel van het winkelcentrum, Rodamco in Amsterdam”, zegt Zuidwijk.

Loco-burgemeester Beimers noemt de situatie 'een reëel probleem'. „Als er zo'n glasplaat van 15 meter naar beneden komt vallen en je loopt daar net onder kun je behoorlijk gewond raken. Wij zijn als gemeente verantwoordelijk voor de veiligheid van het winkelend publiek in deze openbare ruimte.” Volgens Zuidwijk zijn alle gedupeerde winkeliers het eens met de tijdelijke sluiting van hun winkels. „Hoe we de schade verhalen, zien we later.”

Bron: <http://www.ad.nl/denhaag/stad/article479895.ece>

Onderstaand voorbeeld geeft ook goed aan dat het toepassen van veiligheidsglas, in dit geval gehard glas, ook niet altijd voldoet aan de hoge veiligheidseisen die worden gesteld aan situaties waarbij veel mensen onder de bovenhoofds toegepaste beglazing zullen doorlopen.

A single monolithic toughened pane (900 × 600 mm and 6 mm thick) in overhead glazing broke at a shopping centre during opening hours. Breakage was caused by an NiS inclusion within the glass, a relatively uncommon impurity. The pane broke into clumps and fell up to 11 m, hitting three boys below and causing injuries that required hospital treatment for lacerations and bruising. One boy also received treatment for a broken collarbone and shock. The HSE investigated the accident and concluded that the glazed roof did not meet the Building Regulations, because it failed to satisfy Regulation 7, which requires materials to be appropriate for their location. An improvement notice was issued, which led to the fitting of a narrow mesh underneath all the overhead glazing to catch or break up falling glass.

Bron: A.Keiller; *Guidance on glazing at height*

In dit onderzoek zal er onderzocht worden of een laag ETFE-folie, gespannen onder een bovenhoofdse glastoepassing, voldoende sterk is om brekende glasplaten op te vangen, en zodoende de beneden aanwezige personen te beschermen tegen het vallende glas.

Probleemstelling

Inleiding

In voorgaand hoofdstuk zijn de gevaren van vallend glas weergegeven. Hieruit voort vloeiend wil Buitink de mogelijkheid onderzoeken of ETFE-folie kan worden toegepast als veiligheidsnet onder bovenhoofds toegepaste beglazing. Naar aanleiding van deze interesse is dit oriënterende onderzoek opgesteld.

Onderzoeksvraag

Is een enkele laag ETFE-folie bestand tegen de impact van vallende glasscherven afkomstig van bovenhoofdse beglazing in gebouwen?

Doelstelling

Het beproeven van proefstukken ingeklemde ETFE-folie onder een impact van vallende glasscherven.

Aanpak

Als eerst zal er worden gekeken welke glasscherftypes er onderscheiden kunnen worden. Vervolgens zullen er testen worden uitgevoerd met glasscherven die van een bepaalde hoogte op een ingeklemd stuk ETFE-folie zullen vallen. De eigenschappen van de gebruikte glasscherven zullen bepaald worden aan de hand van het meest ongunstig gekozen breuktype. Na impact kan er worden bepaald of het ETFE-folie bestand was tegen de impact van het proefstuk.

Glasscherven

Bovenhoofdse beglazing

Bij het uitvoeren van de proef is het belangrijk om te weten met welke glasscherven we hebben te maken als een bovenhoofdse beglazing het begeeft. Om deze gegevens te verkrijgen moet eerst worden bepaald welke beglazing wordt toegepast in deze situaties. Vervolgens kan er worden uitgezocht aan welk breukpatroon deze beglazing onderhevig is zodat de karakteristieken van de glasscherven kunnen worden bepaald.

Dakbeglazing nieuwbouw

Na bestudering van verschillende normen blijkt dat NEN 3569:2001 bepalend is bij de keuze voor een glasoort bij dakbeglazing in gebouwen. Deze norm schrijft het volgende voor:

Ter voorkoming van lichamelijk letsel moet beglazing, afhankelijk van enerzijds de categorie bouwwerk en anderzijds de aard van de constructie waarin het is toegepast, voldoen aan tabel 1 geëiste klasse en type-indeling.

Om veiligheidsglas naar klasse en type te kunnen indelen moet het glas volgens het 2^e ontwerp NEN-EN 12600 worden onderzocht

NEN 3569:2001
Veiligheids-
beglazing in
gebouwen

TOELICHTING OP NEN 3569: VEILIGHEIDSBEGLAZING IN GEBOUWEN
KLASSE- EN TYPE-INDELING VEILIGHEIDSGLAS NAAR GEBOUWCATEGORIE EN CONSTRUCTIEDEEL IN BEGRIPPELIJKE TAAL

SVB
STICHTING VEILIGHEIDSGLASZAK

*Constructies met beglazing, inclusief het glas, moeten voldoen aan de voorgeschreven sterkte-eisen volgens NEN 4700, NEN 4702, NEN 2408, NEN 2409-2 en NEN-EN 81-1 en -2. Deze eisen gaan verder dan die van NEN 3569. Dit betekent dat in veel situaties zwaardere glasomstellingen dienen te worden toegepast.

KLASSE
Indicatie overeenkomstig NEN-EN 12600
1 Valhoogte 1200 mm
2 Valhoogte 450 mm
3 Valhoogte 190 mm

Indicative building category a 1 m f	KLASSE	TYPE	KLASSE	TYPE	KLASSE	TYPE	KLASSE	TYPE	KLASSE	TYPE	KLASSE	TYPE	KLASSE	TYPE
a	2	Gelaagd glas 33.1* 4 mm gehard glas*	-	-	1	Gelaagd glas 44.2*	-	-	1	Gelaagd glas 44.2*	1	Gelaagd glas 44.2*	2	Gelaagd glas 33.1* 4 mm gehard glas*
b	2	Gelaagd glas 33.1* 4 mm gehard glas*	3	Gelaagd glas 33.1* Draadglas*	1	Gelaagd glas 44.2*	3	Gelaagd glas 33.1* Draadglas*	1	Gelaagd glas 44.2*	1	Gelaagd glas 44.2*	2	Gelaagd glas 33.1* 4 mm gehard glas*
c	2	Gelaagd glas 33.1* 4 mm gehard glas*	3	Gelaagd glas 33.1* Draadglas*	1	Gelaagd glas 44.2*	3	Gelaagd glas 33.1* Draadglas*	1	Gelaagd glas 44.2*	1	Gelaagd glas 44.2*	2	Gelaagd glas 33.1* 4 mm gehard glas*
d	2	Gelaagd glas 33.1* 4 mm gehard glas*	3	Gelaagd glas 33.1* Draadglas*	1	Gelaagd glas 44.2*	3	Gelaagd glas 33.1* Draadglas*	1	Gelaagd glas 44.2*	1	Gelaagd glas 44.2*	2	Gelaagd glas 33.1* 4 mm gehard glas*
e	2	Gelaagd glas 33.1* 4 mm gehard glas*	-	-	1	Gelaagd glas 44.2*	-	-	1	Gelaagd glas 44.2*	1	Gelaagd glas 44.2*	2	Gelaagd glas 33.1* 4 mm gehard glas*
f	2	Gelaagd glas 33.1* 4 mm gehard glas*	-	-	1	Gelaagd glas 44.2*	-	-	1	Gelaagd glas 44.2*	1	Gelaagd glas 44.2*	2	Gelaagd glas 33.1* 4 mm gehard glas*

Bron: NEN Delft. De glasomstellingen zijn indicatief en kunnen per fabrikant of product verschillen. Aan deze tabel kunnen geen rechten worden ontleend. Voor het juiste gebruik dient de volledige NEN 3569 te worden geraadpleegd. SVB aanvaardt geen aansprakelijkheid voor zowel directe als indirecte schade ontstaan door of verband houdend met het gebruik van deze tabel.

internet: www.glasnet.nl
e-mail: svb@glasnet.nl

Tabel 3.1
Schematische
toelichting NEN
3569.
www.glasnet.nl

Uit bovenstaande blijkt dat glassoorten die voldoen aan klasse 1 (valhoogte 1200 mm volgens NEN 12600) en voldoen aan een breukpatroon B (volgens NEN 12600) mogen worden toegepast bij dakbeglazing. Bij daklichten en ramen geldt klasse 2 (valhoogte 450 mm) en het voldoen aan breukpatroon B en C.

Breukpatroon A, B en C schrijven het volgende voor:

Type A: Vele breuklijnen waardoor verschillende glasscherven ontstaan met scherpe uit stekende kanten waarvan sommige groot zijn (annealed glas volgens NEN-EN 572-1).

Type B: Breuk waarbij de scherven bij elkaar worden gehouden, waarbij geen opening ontstaat met een middellijn groter dan 76 mm (bijvoorbeeld veiligheidsglas volgens NEN-EN-ISO 12543 Deel 1,2,4,5,6; draadglas volgens NEN-EN 572-3; kunststof volgens NEN-EN 572-6).

Type C: Volledige desintegratie, met vele kleine korrels, waarbij de 10 grootste korrels niet meer wegen dan de overeenkomstige massa van 6500 mm² van het oorspronkelijke materiaal (bijvoorbeeld thermisch voorgespannen veiligheidsglas volgens NEN-EN 12150-1).

NEN 12600;
beschrijving van
breukpatronen

Uit de eisen kan het volgende over de glasscherfeigenschappen worden geconcludeerd:

Gehard glas: De 10 grootste korrels mogen niet meer wegen dan de overeenkomstige massa van 6500 mm² van het oorspronkelijke materiaal. Bovendien mag geen enkele korrel groter zijn dan 2500 mm². Dit houdt dus in dat de glasplaat in vele kleine stukjes naar beneden komt. Alle glasscherven zijn kleiner of gelijk aan de voorgeschreven 2500 mm² en mogen niet langer zijn dan 100mm. (NEN 3569:2001 en NEN-EN 12150). Uit bestudeerde literatuur is nog terug te vinden dat er een verzameling van glaskorrels naar beneden kan vallen met een gezamenlijk gewicht van hoogstens 2 kg.

Gelaagd glas: De scherven die **niet** aan het folie blijven plakken mogen een maximale middellijn hebben van 76 mm. De enkele scherven die toch naar beneden vallen hebben dus een maximale middellijn van 76 mm. (NEN 3569:2001 en NEN-EN 12600)

De realiteit is dat er tegenwoordig alleen nog maar gelaagde glasplaten worden toegepast. Veelal is dit een 6.6/2 ruit met een ongeharde onderste laag. Veel toegepaste breedte van de glasplaten is 1000 mm.

Dakbeglazing bestaande bouw

De norm NEN 3569:1993 voorziet grotendeels in de eisen voor beglazing van bestaande gebouwen. Wanneer men de norm bestudeerd kan worden geconcludeerd dat het toepassen van veiligheidsbeglazing bij daklichten niet verplicht werd. Er zal daarom ook worden gekeken naar de scherfeigenschappen van floatglas. Wel werd er een sterke aanbeveling gedaan voor de toepassing van veiligheidsglas, zeker wanneer het om ruimtes ging waar het verwachte aantal personen hoog ligt.

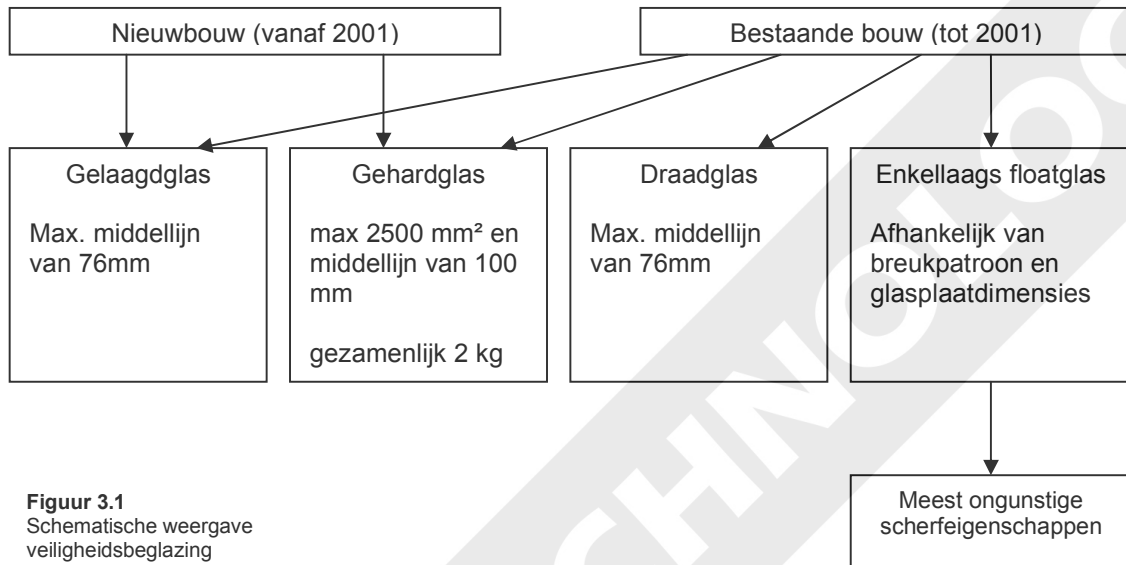
Tweede verschil met de huidige norm is dat draadglas volgens de oude norm ook onder veiligheidsbeglazing viel. Naast de scherfeigenschappen van gehard, gelaagd en floatglas, zal het breukpatroon van draadglas ook achterhaald moeten worden.

Draadglas: Bij breuk wordt het glas door de draadinleg bij elkaar gehouden. Volgens de normen valt het draadglas daarom onder breuktype B welke overeenkomt met het breuktype voor gelamineerd glas.

Floatglas: Vele breuklijnen van verschillende glasscherven met scherpe uit stekende kanten en waarvan sommige groot zijn (breuktype A volgens NEN-EN 12600).

Conclusie

Bij de uit te voeren proef is het noodzakelijk dat de meest ongunstige situatie getest wordt. Dit houdt dus in dat de grootste scherfgrootte op het folie proefstuk losgelaten zal worden van een bepaalde hoogte. Uit bovenstaande kan worden geconcludeerd dat floatglas het meest ongunstige breukpatroon vertoont. Er zal bij deze proef daarom ook gebruik gemaakt gaan worden van glasscherven afkomstig van floatglas.



Figuur 3.1
Schematische weergave
veiligheidsbeglazing

Floatglas

Nu is bepaald dat de proeven zullen worden uitgevoerd met scherven afkomstig van platen floatglas, moet er nog worden nagegaan wat de precieze eigenschappen zijn van deze scherven. Voor de dikte van de glasplaat is er uitgegaan van een plaatdikte van 6 mm, mede omdat dit de meest gangbare dikte is waarbij deze glassoort wordt toegepast.

Naast de dikte zijn de afmetingen van de scherven erg belangrijk. Om hier uitspraken over te kunnen doen is de volgende proef uitgevoerd:

Een plaat floatglas 1500 mm x 1500 mm met een dikte van 6 mm zal door een stootlichaam worden getroffen. De methode, die voor het breken van de ruiten wordt toegepast, is afgeleid van de doorvalveiligheidstests. Glasplaten worden normaal gesproken getest met een slingerproef. Omdat we hier te maken hebben met een horizontale toepassing is er gekozen voor een verticale valproef met vergelijkbare condities. Het stootlichaam, een leren zak met een inhoud van glazen kogeltjes, zal van 0,7 m loodrecht op het glasvlak terecht komen. Het glasvlak is vrij opgelegd op een houten frame. Na impact zullen de glasscherven worden opgevangen op een zachte ondergrond. De glasscherven zullen vervolgens gemeten en gecategoriseerd worden.



Afbeelding 3.1
Opstelling
valproef



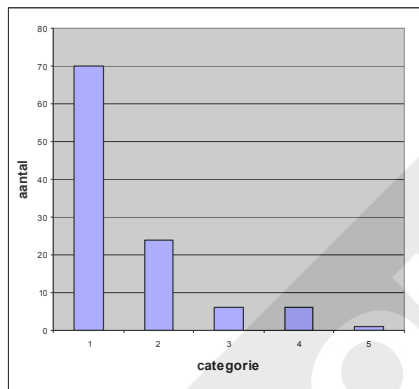
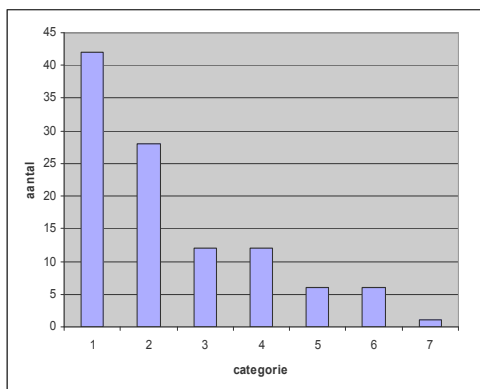
Afbeelding 3.2
Resultaat

Categoriseren glasscherven

Glasscherven worden in de normen vaak beschreven aan de hand van een oppervlak en de grootste middellijn. Er is voor gekozen om de glasscherven eerst op te delen naar grootte van de middellijn er volgens naar het gewicht. Wanneer gewicht en middellijn worden gecombineerd kan de scherpte van de glasscherf worden afgeleid

Categorie	middellijn	gram	karacterisering	aantal
1	150 - 250	< 70	smal en langwerpig	42
2	150 - 250	70 <	langwerpig maar breder dan 1	28
3	250 - 350	< 100	smal langwerpig	12
4	250 - 350	100 <	langwerpig maar breder dan 3	12
5	350 - 450	< >	grote langwerpige scherven	6
6	450 - 550	< >	grote langwerpige scherven	6
7	550 <	< >	grote langwerpige scherven	1
8	< >	< >	<i>groot opp., minder sterke lengte richting</i>	17

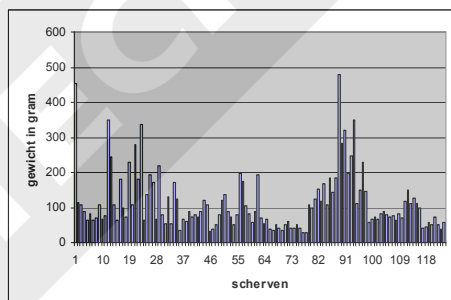
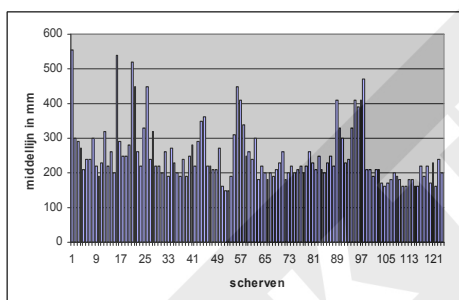
Wanneer we vervolgens de verschillende categorieën in een staafdiagram zetten is goed te zien dat de scherven volgens een exponentieel verband verdeeld zijn. Zeker wanneer categorie 0 zou worden meegenomen, alle niet gecategoriseerde kleine scherven, is de exponentiele lijn goed weer te geven. Wanneer alleen de middellijn grootte van de glasscherven als categoriseringsfaktor zou wegen, dan is er eveneens een exponentiele verdeling zichtbaar.



Figuur 3.2
Staafdiagram
categorisering
a.d.h.v.
grootste
middellijn en
gewicht

Figuur 3.3
Categorisering
a.d.h.v. grootste
middellijn

Wanneer gekeken wordt naar de gemiddelde glasscherf grootte en gewicht kan worden gesteld dat deze rond de 200 mm en 60 gram zitten, bij de gekozen grenswaarden. Alle scherven met een lengte onder de 150 mm zijn hier echter niet in meegenomen. Wanneer dit wel zou worden gedaan zullen beide gemiddelden flink naar onder moeten worden bijgesteld.



Figuur 3.4
Scherfkaracteri
stieken grootste
middellijn

Figuur 3.5
Scherfkaracteri
stieken gewicht

Conclusie

De verdeling in glasscherven kan op verschillende manieren geschieden. Feit is dat er een groot aantal kleine scherven ontstaan die niet van belang zijn bij het verdere verloop van deze proefopzet. Naar mate de scherven in lengte toenemen, zullen hun aantallen afnemen. Bij de gekozen categorisering is dit te herleiden tot een exponentieel verband. De maximale scherfgrootte is afhankelijk van de afmetingen van glasplaat. Bij de vooraf gekozen glasafmetingen van 1500 mm x 1500 mm ligt de grootste middellijn rond de 550 mm en een maximaal gewicht van bijna 500 gram. In het vervolg van deze proefopzet zal er worden geëxperimenteerd met glasscherven uit de verschillende categorieën.

Methode

Opstelling

De opstelling is simpel gehouden. Uitgesneden proefstukken ETFE-folie van 300 mm x 300 mm zijn ingeklemd tussen een houten frame en aluminium klemprofielen. De voorspanning van de folie is minimaal en is gelijk aan de spanning die wordt veroorzaakt door het eigengewicht met een doorbuiging van 1 mm.

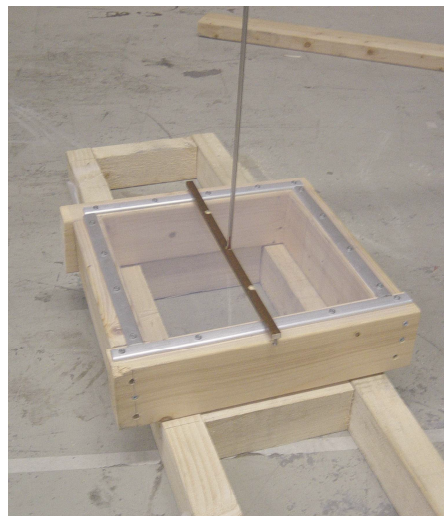
De glasscherven zijn allen voorzien van een geleidingsbuisje in de vorm van een plastic rietje. Dit rietje zal de geleiding verzorgen langs een stalen staaf. Hierdoor zal de scherf het folie op de gewenste plaats en onder een optimale hoek treffen. Nadeel is dat enige wrijving tussen de staaf en het rietje niet te voorkomen is. Om deze factor te kunnen uitsluiten zullen de valproeven met en zonder geleiding plaatsvinden.

Situaties

Nu de scherfeigenschappen bekend zijn zullen er valproeven worden uitgevoerd op ingeklemde ETFE-folie oppervlakten. Er zal worden gekeken hoe het folie zich gedraagt onder impact van de glasscherven. De valproeven zullen worden uitgevoerd vanaf 2000 mm en 500 mm. Deze waarden zijn zo gekozen dat de kans op doorslag bij de 2000 mm groot is, en bij de 500 mm laag. Uit de resultaten moet blijken of de gekozen waarden aan de veronderstelling voldeden.

Om het aantal proefstukken te beperken is er voor gekozen om het aantal categorieën terug te brengen tot vier. Hierbij zijn er vier scherven gekozen uit een selectie scherven die geselecteerd waren op hun optimale vorm, dus met een grote lengte/breedte verhouding. In onderstaande tabel zijn de eigenschappen weergegeven:

Scherf categorie	Lengte (mm)	Breedte (mm)	Gewicht (gram)	Omschrijving
1	250	39	83	smalle scherven met een middellijn van rond de 250 mm
2	360	32	108	smalle scherven met een middellijn van rond de 350 mm
3	464	40	146	smalle scherven met een middellijn van rond de 450 mm
4	543	42	180	smalle scherven met een middellijn van rond de 550 mm



Afbeelding 3.3
Geselecteerde scherven 1,2,3 en 4

Afbeelding 3.4
Proefopstelling

Metingen

De gegevens zullen worden ingevuld in het onderstaande schema. Ook zal er worden gekeken rond welke hoogte het 'kritieke' punt ligt waarbij de impact van de betreffende scherf doorslag veroorzaakt.

Scherf categorie	Valhoogte (mm)	Grootste lengte inscheuring (mm)	Met geleiding	Zonder geleiding
1	2000			
	500			
2	2000			
	500			
3	2000			
	500			
4	2000			
	500			

Resultaten

In onderstaand schema zijn de resultaten zichtbaar van de proeven:

Scherf categorie	Valhoogte (mm)	Grootste lengte inscheuring (mm)	Met geleiding	Zonder geleiding
1	2000	28	-	X
	500	21	-	-
2	2000	35	-	X
	500	8	-	-
3	2000	37	X	X
	500	22	-	-
4	2000	36	X	X
	500	19	-	-

Doorslag van de vallende scherf

Bij het bepalen van de 'kritieke' waarden kan het volgende worden gesteld; Hoe zwaarder de scherf, des te dichter ligt deze waarde aanligt tegen de 500 mm. Hoe lichter de scherf des te meer de waarde naar de 2000 mm toe zal lopen.

Conclusie & Discussie

Zoals uit de resultaten blijkt zullen glasscherven, vallend van 2000 mm, zeer waarschijnlijk door de folie heen gaan mits zij de eigenschappen bezitten van een ongunstige glasscherf, en recht naar beneden vallen. Wanneer we naar de concrete toepassing als vangnet kijken lijkt het dus niet verstandig om een vangnetconstructie ver onder de bovenhoofdse beglazing toe te passen. Mocht een groot hoogteverschil tussen beglazing en vangnet toch gewenst zijn, dan kan men denken aan verzachtende omstandigheden die deze toepassing misschien toch mogelijk zouden kunnen maken. Enkele voorbeelden:

- Door het grote oppervlak, en een verende bevestiging van de ETFE-folie, zal het folie meer meeveren onder de impact van de glasscherven.
- Bovenhoofdse beglazing van enkellaags floatglas in ruimtes waar mensen passeren, is zeer onwaarschijnlijk. Wanneer dit besproken glasscherftype wordt uitgesloten, is de kans groot dat het folie wel is bestand tegen de scherfimpact van de overgebleven glassoorten. Nieuw onderzoek zal dit echter moeten uitwijzen.
- Het toepassen van een dikkere folie, in plaats van de gebruikte 200 μm , zou met de grotere doorscheurweerstand, tot andere resultaten kunnen leiden.

Wanneer men kijkt naar de resultaten bij een valhoogte van 500 mm, dan is goed te zien dat geen enkele scherfimpact doorslag teweeg heeft gebracht. Gezien de ongunstige condities lijkt het toepassen van een ETFE-folie als vangnet onder bovenhoofdse beglazing een concept met potentie. Wanneer de afstand tussen glasvlak en de folie beperkte wordt gehouden lijkt het folie in staat de impact van ongunstige glasscherven te doorstaan.

In dit oriënterend onderzoek zijn een aantal factoren niet meegenomen die wel van invloed kunnen zijn op de resultaten. Enkele voorbeelden hiervan zijn de veranderende eigenschappen van de folie door invloed van temperatuur, invloeden van de bevestigingsmethode en impact van glasscherven vlak naast elkaar.

Ook is de invloed van het gewicht van de resterende glasscherven niet meegenomen. Wanneer men met grote glasplaten te maken krijgt kan het volume wel degelijk van invloed zijn. Door de impact van de scherven zal het folieoppervlak geperforeerd worden. Wanneer dit folie vervolgens belast wordt met het gehele gewicht van de glasplaat kan dit doorscheuring tot gevolg hebben.

Vervolgonderzoek

Het hierboven beschreven onderzoek had het doel te kijken in hoeverre er potentie zit in het materiaal ETFE-folie als vangnet. Het is heel moeilijk om te onderzoeken of het folie echt toegepast kan worden als vangnetconstructie waarbij alle risico's zijn uitgesloten en een eventuele certificering haalbaar is. Dit omdat er naar mijns inziens nog geen gecertificeerde proeven zijn ontwikkeld die vangnetconstructies testen op impact van scherpe voorwerpen. Wanneer men verder gaat met het onderzoeken van deze toepassing kan het denk ik geen kwaad eens informatie in te winnen bij verzekeraars. Hierdoor zou men een duidelijker beeld kunnen krijgen wat verzekeraars eisen om garant te staan voor een vangnetconstructie van ETFE-folie. Met deze uitkomst kan er een duidelijk doel worden gesteld waar naar toe gewerkt kan worden.

Voor een vervolgtraject zijn er twee wegen die kunnen worden ingeslagen om tot een eventuele oplossing te komen.

De eerste oplossing maakt gebruik van de eigenschap doorscheurweerstand. Deze eigenschappen zijn exact te achterhalen. Wanneer deze eigenschappen bekend zijn, is bekend welke impact kan worden weerstaan. De scherfeigenschappen van de impact volumes zijn hier naar mijn mening alleen nog niet in meegenomen. Zoals al eerder genoemd is de kans veel groter dat een lange, smalle en puntige scherp doorslag zal vertonen dan een impact met een glasscherf met grote hoek aan de impactzijde. Beide zullen toch dezelfde kinetische energie bevatten.

Een combinatie van onderzoeken op dit gebied, waarbij wederom uitgegaan wordt van de meest ongunstige situatie, zou misschien kunnen leiden tot een onderbouwd resultaat.

Een andere benadering gaat uit van 1-op-1 tests. Er kunnen verschillende situaties worden geschetst waarbij een vangnet van ETFE-folie gewenst zou kunnen zijn. Zorg dat er bij iedere beslissing weer wordt uitgegaan van de meest ongunstige situatie. Wanneer vervolgens alle randvoorwaarden bekend zijn kan een testopstelling worden gemaakt. De tests zullen uitwijzen in hoeverre de folie bestand was tegen de impact van de gebroken glasplaat. De betrouwbaarheid van de proeven ten opzichte van de werkelijke situatie zal hier altijd een belangrijke factor in blijven spelen.

Bronnen

Normen

NEN 6702; *Technische grondslagen voor bouwconstructies, belastingen en vervormingen*

NEN-EN 12600; *Glas voor gebouwen, stootbelastingsproef en classificatie voor vlakglas*

TNO rapport B-92-1143 *Stootbelasting op constructie-onderdelen*, TNO Bouw, april 1994

NEN 3568; *voorgespannen glas*

NEN 3569; *veiligheidsbeglazing in gebouwen* (zowel de originele uit 1991 als de herziene versie uit oktober 2001)

NEN 572-3; *Glas voor gebouwen, draadglas*

NEN-EN 1263-1; *Veiligheidsnetten*

NEN-EN 12150-1; *Glas voor gebouwen, thermisch gehard glas*

Literatuur

Vries de, J.W.J.: *Tensile Foil*, TU Delft, september 2003

Cremers, Eric: *ETFE-luchtkussens en binnenklimaat*, afstudeerverslag TU Delft, Maart 2004

Licotec: *ETFE information file*, Duiven

Keiller, A.: *Guidance on glazing at height*, London 2005

Loughran, Paul: *Falling Glass, problems and solution in contemporary architecture*, Basel 2003

Websites

www.licotec.nl

www.sev.nl

www.glasnet.nl

www.ad.nl

www.nen.nl

www.foiltec.de

www.membranestructures.de

www.covertex.com

www.tensinet.com

Bijlagen

Berekeningen

Om vooraf enig inzicht te krijgen in de grootte van de trekkrachten, spanningen en de doorbuiging die zich tijdens de tests zullen plaatsvinden zijn er berekeningen uitgevoerd op de testsituatie met een enkele laag ETFE-folie.

In NEN 6702 §9.5 staat beschreven dat de stootbelasting ook mag worden vervangen door een statisch equivalente belasting Frep.

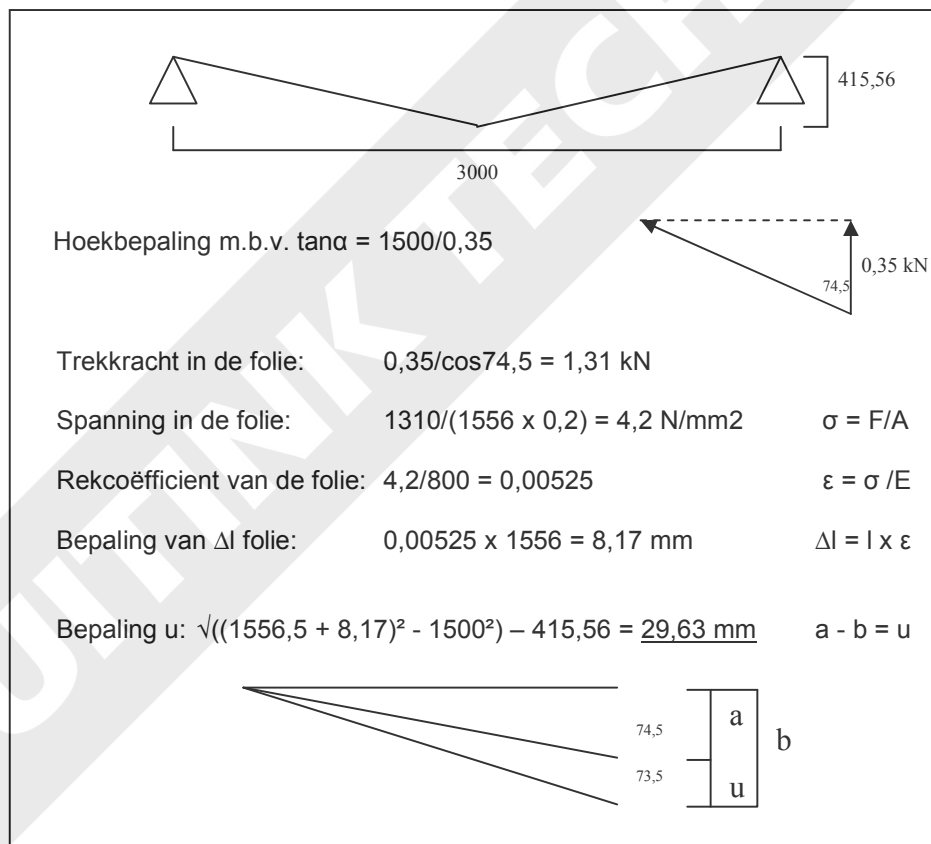
$$F_{rep} = \sqrt{(490/u)}$$

Waarin:

- U is de getalwaarde van de doorbuiging van het dak in mm, onder een rekenwaarde van de belasting van 0,7 kN, werkend op een oppervlak van 0,2 m x 0,2 m;
Frep is de getalwaarde van het statisch equivalent van de stootbelasting in kN, werkend op een oppervlakte van 0,2 m x 0,2 m.

NEN 6702; §9.5
stootbelasting
op vloeren en
daken

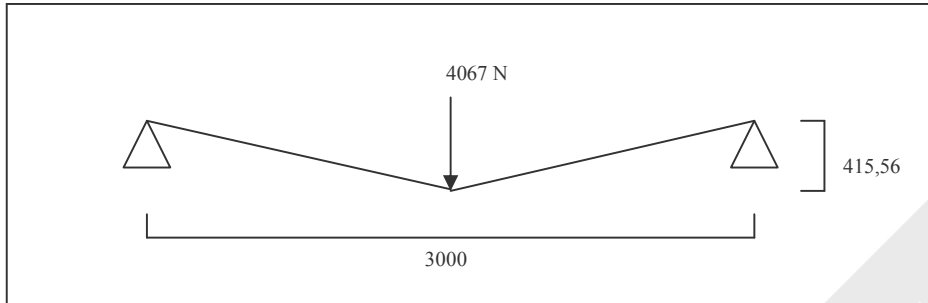
Het is dus van belang om eerst de doorbuiging u te bepalen.



Figuur 4.1
Bepaling
doorbuiging u

Uit de formule volgt nu: $F_{rep} = 4067 \text{ N}$

De testsituatie met een enkele laag ETFE-folie, ingeklemd in een volledig stijve constructie kan als volgt worden geschematiseerd:



Figuur 4.2
Schematisering
ingeklemd
enkellaags folie

Uit de berekeningen blijkt het volgende:

Trekkraft in de folie = 7,6 kN

Spanning in de folie = 24,5 mm²

In deze situatie zou de vloeigrens overschreden worden en zou de folie blijvend vervormen. De breuksterkte wordt nog niet gehaald waardoor de enkele laag ETFE-folie het niet zal begeven onder het gewicht van 50 kg vallend van 0,7 m hoogte.

Bij deze berekeningen moeten een aantal belangrijke kanttekeningen worden geplaatst:

Er is gekozen voor een volledig stijve inklemming. In werkelijkheid zal de constructie licht vervormen onder de impact van het gewicht. Deze vervorming heeft een schokdempende werking waardoor de spanning in de folie lager komen te liggen.

De formule uit de norm gaat uit van stijve materialen zoals beton of staal. Dit houdt in dat de contacttijd, meegenomen in de berekeningen zeer kort is. Omdat het ETFE-folie een veel grotere rek heeft dan de stijve materialen beton en staal, zal de werkelijke contacttijd hoger liggen. Uit onderstaande formule kan een redelijke schatting worden gedaan naar de contacttijd welke is meegenomen in de berekeningen volgens de norm:

$$F \times t = m \times v \quad \text{waarbij } v \text{ kan worden berekend volgens de formule } \sqrt{(2 \times g \times h)}$$

$$4067 \times t = 50 \times \sqrt{(2 \times 9,81 \times 0,7)} \quad t = 0,046 \text{ s}$$

Figuur 4.3
Formule impuls

Er kan dus worden gesteld dat de contacttijd langer zal zijn dan hierboven bepaalde waarde. Uit de formule blijkt ook dat een kleine toename van de contacttijd al grote gevolgen heeft voor de waarde F gezien het rechter deel van de formule een vast gegeven is.

Ook is er uitgegaan van een krachtsafdracht naar twee zijden. In werkelijkheid zullen de krachten in meerdere richtingen worden afgedragen.

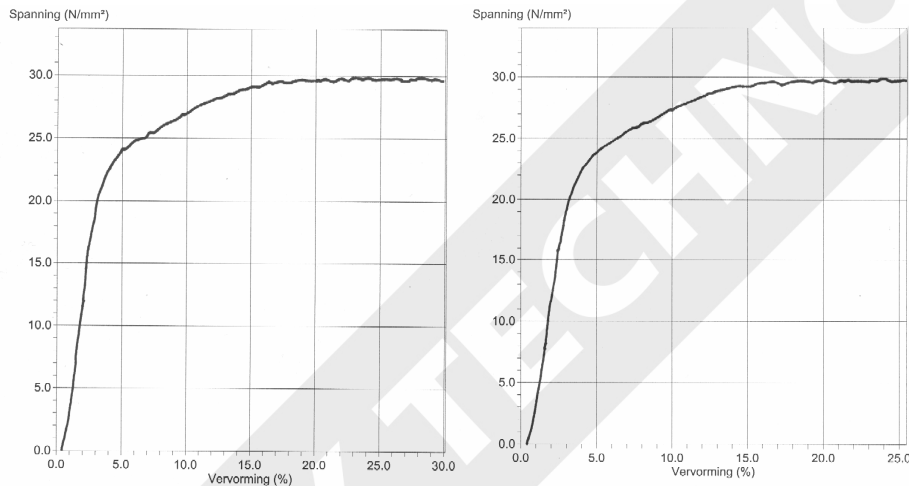
Men kan dus concluderen dat de waarden die volgen uit de berekeningen uitgaan van een ongunstige situatie. Bij het beproeven van een enkele laag ETFE-folie onder een impact van 350 Joule zullen de waarden lager uitvallen.

Treksterkte

Zoals al eerder beschreven is ETFE-folie een zeer rekbaar materiaal. De rek bij breuk kan wel oplopen tot waarden boven de 450%. Dit zijn echter waarden die zijn bepaald onder belasting die aangrijpt voor meerdere seconden. Naast de treksterkte is ook de vloeigrens van belang welke aangeeft tot waar het elastisch gebied van het materiaal loopt. Wanneer deze waarde wordt overschreden zal het materiaal plastisch vervormen en niet meer terugkeren in zijn oorspronkelijke vorm. Er treedt een blijvende vervorming op.

Uit de geraadpleegde literatuur blijkt dat de vloeigrens van ETFE-folie bij kamertemperatuur rond de 25 N/mm² ligt. Bij de valproef hebben we echter te maken met een korte duur belasting. Het materiaal zal in korte tijd onder een grote kracht worden belast. Hierdoor spelen eigenschappen als kruip en relaxatie geen rol meer.

Gegevens over de treksterkte en vloeigrens bij een korte duur belasting zijn moeilijk te achterhalen in de beschikbare literatuur. Er kan echter wel worden gesteld dat de vloeigrens van ETFE-folie een ondergrens heeft die rond de 15 N/mm² ligt. De uitgevoerde trekproeven rond kamertemperatuur op proefstukken ETFE-folie met een dikte van 200µm bevestigen deze aanname.



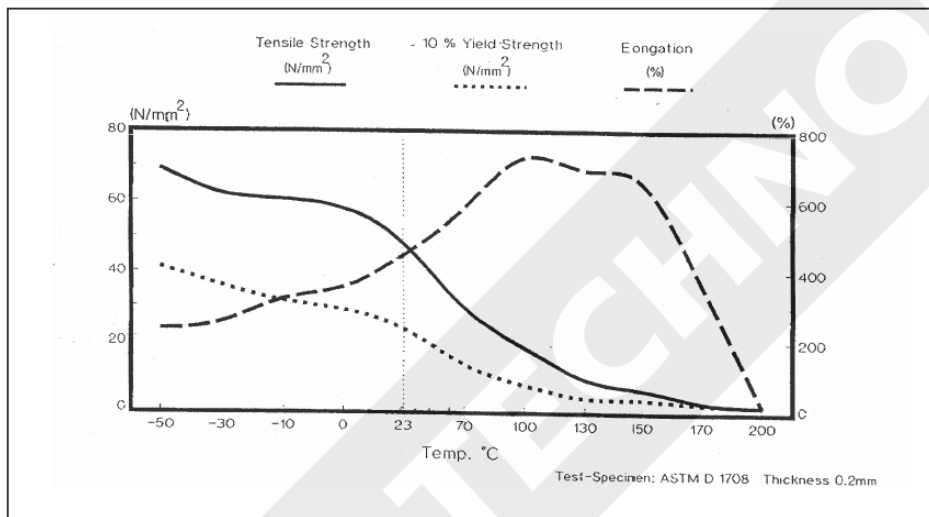
Figuur 4.4
Spanningsrek-
diagram zonder
las (links) en
met las (rechts)
bij een treksnel-
heid van 400
mm/min

Temperatuur

De temperatuur is van invloed op de treksterkte van het ETFE-folie. Uit onderstaand figuur kan het volgende worden geconcludeerd:

Bij een extreme temperatuur van 50 °C zal de treksterkte minder groot zijn. Het folie zal ook een grotere rek vertonen bij hogere temperaturen. Bij temperaturen rond de -10 °C zal het tegenovergestelde plaatsvinden. De treksterkte zal hier groter zijn en de rek zal zijn afgenomen. Het materiaal zal dus taaiër en brosser worden wanneer men de eigenschappen vergelijkt met bijvoorbeeld staal.

Wanneer men nu naar de eigenschappen kijkt tijdens een impact, dan zal een temperatuurswaarde van de folie rond de extremen ongetwijfeld een negatief effect hebben. Wel kan er worden meegenomen dat bij een grotere rek van het materiaal bij hogere temperaturen, de impact beter kan worden opgevangen waardoor de piekbelasting zal afnemen. Bij lage temperaturen is het materiaal minder rekbaar, maar ligt ook de treksterkte weer wat hoger.



Figuur 4.5
Treksterkte bij -50 °C tot 200 °C, Hostafion ET-6235, Hoechst 1991

In de norm NEN 6702 wordt verwezen naar het TNO rapport B-92-1143 voor de te hanteren testomstandigheden. In dit rapport staat dat de proef moet worden uitgevoerd bij een temperatuur van (20 +/- 5) °C. De resultaten van de proef zullen dus in principe voldoen aan de norm voor doorvalveiligheid. Dit is dus echter nog geen garantie dat het luchtkussen bestand is tegen de impact van een vallende persoon wanneer de temperaturen zich rond de extremen bevinden. In verder onderzoek zou hier verder op in kunnen worden gegaan.