

Lasien rikkoutuminen ja sen syyt

KARI HEMMILÄ, ERIKOISTUTKIJA, VTT OY
MAURI RIIKONEN, TOIMINNANJOHTAJA, SUOMEN TASOLASIIHDISTYS RY.

Lasi hauraana materiaalina rikkoutuu helposti, jos siihen kohdistuu riittävän suuri vetojännitys. Tavallinen lasi muodostaa rikkoutuneisiin palasiin veitsenteräviä leikkaavia särmiä, jotka voivat olla hengenvaarallisia. Valitsemalla tavallisen lasin sijasta jokin toinen lasityyppi vammautumiseriskä voidaan kuitenkin pienentää.

Tavallinen tasolasi materiaalina on erittäin lujaa, mutta haurasta ja sen lujuusominaisuuksiin liittyy suuri hajonta. Kun jännitys ylittää lasin lujuuden, lasi rikkoutuu yhtäkkiä palasiksi ja menettää kaiken lujuutensa. Metalleilla ja puulla jännityksen saavuttaessa lujuusrajan niihin alkaa muodostua pysyviä muodonmuutoksia, mutta ne säilyvät ehjinä ja lopullinen murtuminen tapahtuu suurien muodonmuutosten jälkeen (kuva 1).

Lasin lujuus

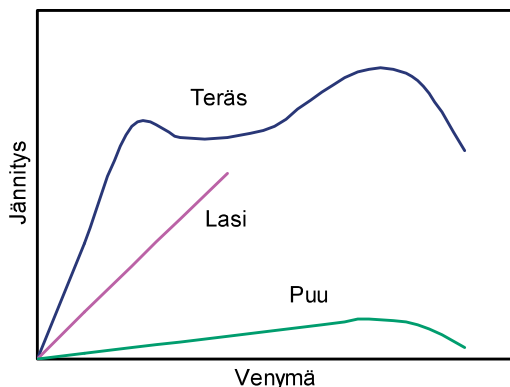
Lasin puristuslujuus on niin suuri vetolujuuteen verrattuna, että rikkoutumisen kannalta vain vetolujuudella on merkitystä. Lasin teoreettinen vetolujuus on atomien välisiin sidoksiin perustuen 21000 MPa. Juuri vedetyistä lasikuiduista on mitattu jopa 5000 MPa:n vetolujuuksia ja lujitemuovissa lasikuitujen lujuus

on noin 1200 MPa. Tasolasin vetolujuus on kuitenkin yleensä alle 100 MPa (Button).

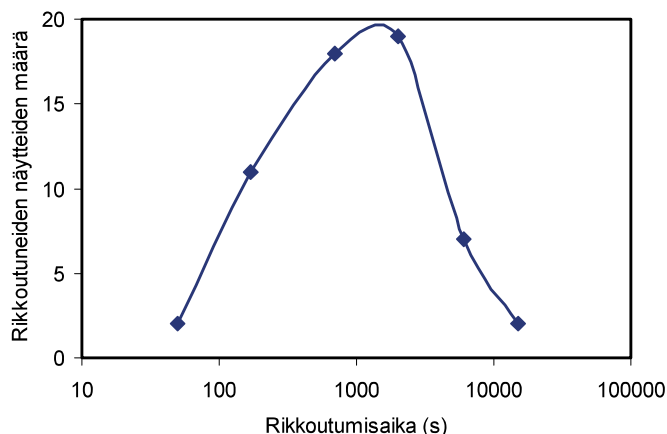
Tasolasin teoriaa huonompi vetolujuus johtuu lasissa olevista näkymättömän pienistä virheistä, Griffithin säröistä, jotka heikentävät atomien välisiä sidoksia. Näiden lisäksi lasin pinnassa on suurempia vikoja, kuten naarmuja ja lohkeamia. Lasin rikkoutuminen alkaa näistä vikakohdista ja jännityksen kasvaessa tietyssä jännitystilassa särö alkaa kasvaa suurella nopeudella, jolloin lasi rikkoutuu. Näitä säröjä esiintyy erityisesti lasin reunoissa ja niiden syntyyn vaikuttavat muun muassa lasin leikkaaminen ja käsittely. Lasin pinnalla oleva lika ja ilman kosteus heikentävät lasin atomien välisiä sidoksia ja mahdollistavat särön kasvun (lasin rikkoutumisen) alkuperäistä pienemmällä jännitystasolla. Samoin pitkäaikainen tai dynaaminen kuormitus saa säröt kasvamaan ja lasin rikkoutumaan hetkellisen kuormituksen lujuutta pienemmällä jännitystasolla.

Rawsonin mukaan lasin lujuuteen vaikuttavat lasin koko, lasin rakennevikojen esiintyminen, kuormitusaika, dynaamisen kuormituksen aiheuttama väsyminen (Rawson). Tämän lisäksi lujuuteen vaikuttavat myös valmistuksessa lasiin jääneet jännitykset.

Kuvassa 2 on 60 lasisauvan kuormituskokeen tulokset. Kaikkia lasisauvoja on kuormitettu samalla voimalla. Käyrästä havaitaan, et-



Kuva 1. Lasin, puun ja teräksen jännitys-venymä-käyrä (Button 1993).

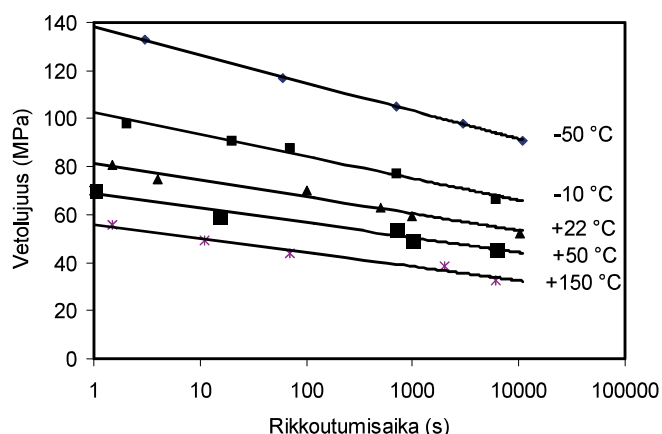


Kuva 2. Rikkoutumisaikojen hajonta (Rawson).

tä kaikki ei ole mennyt rikki yhtä nopeasti, vaan kuormitus on sellainen, että todennäköinen rikkoutumisaika on 1000 sekuntia. Vaihteluväli on kuitenkin laaja muutamasta kymmenestä yli 10000 sekuntiin. **Kuvassa 3** on tulokset usealla eri kuormitus- tasolla ja useassa lämpötilassa tehdystä kokeesta. Kuvista voidaan nähdä, että lasin vetolujuudella on suuri hajonta ja lämpötilariip- puvuus. Lisäksi on havaittavissa lujuusominaisuuksien aikariip- puvuus.

Lasin lujuuden parantaminen

Lasin kestävyyttä ja rikkoutumistapaa voidaan muuttaa laminoi- malla useampia lasia muovikalvolla yhteen, karkaisemalla lasi tai laittamalla teräslankaverkko lasilevyn sisälle. Lisäksi lasilevyn paksuntaminen pienentää siihen ulkoisen kuormituksen aiheut- tamia jännityksiä. Yhteistä kaikkien erilaisten lasien rikkoutumi- selle kuitenkin on, että rikkoutuminen alkaa siitä kohdasta, jossa lasiin aiheutunut vetojännitys ylittää lasin vetolujuuden. Tämä rik- koutumisen alkukohta voidaan jäljittää siihen pisteeseen, josta la- sissa olevat säröt lähtevät säteittäisesti (**kuva 4**). Tavallisessa lasissa oleva valmistuksesta aiheutunut jännitystilä voi aiheuttaa säröjen mutkittelun etäämmällä rikkoutumiskohdasta.



Kuva 3. Rikkoutumisajan ja vetolujuuden välinen riippuvuus eri lämpötiloissa (Rawson).



Kuva 4. Tavallisen lasin, laminoituneen lasin ja karkaistun lasin rikkoutumiskuvia. (RT 38-10901).

Rikkoutumisen aiheuttajat

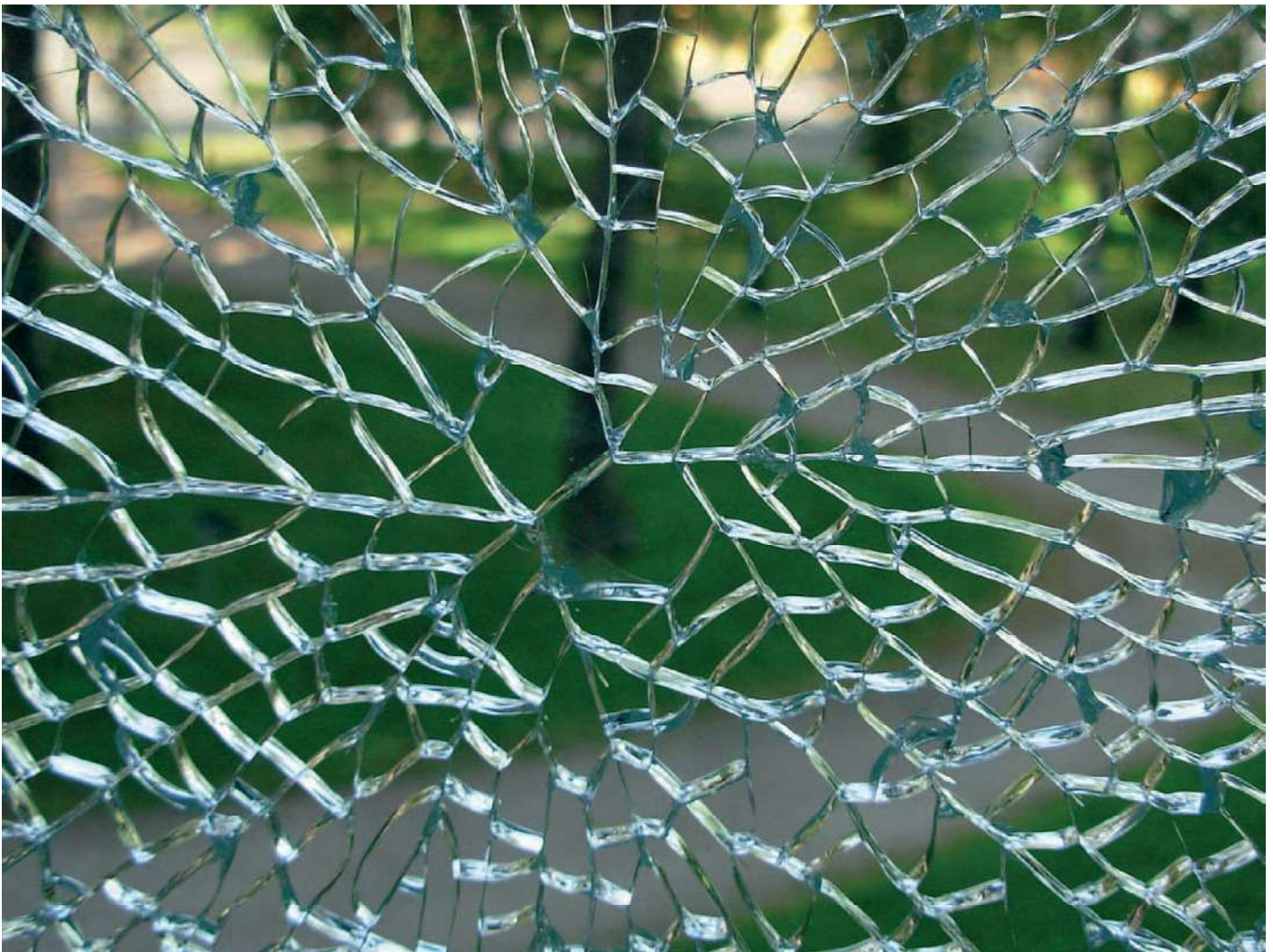
Rikkoutuminen johtuu tavallisesti useammasta samanaikaises- ti vaikuttavien kuormitusten aiheuttamien jännitystilojen yhteis- vaikutuksesta. Rikkoutumisherkkyytteen vaikuttavat kuormitus- ten aiheuttaman jännitystilän suuruuden lisäksi kuormitusaika ja lasin lämpötila. Lasit kestävät suurempia jännityksiä kylmässä ja lyhytaikaisesti. Jännityksiä aiheuttavat muun muassa:

- Lasin jäännösjännitys
- Lasin epätasainen lämpeneminen
- Eristyslaselementin lasien väliset lämpötilaerot
- Eristyslasin sisällä olevan kaasun ja ulkoilman välinen paine-ero
- Painovoima
- Tuulenpaine
- Lasin pintaan kohdistuva tasainen tai pistemäinen kuorma
- Estetyt lämpöliikkeet
- Puupuitteen tai -karmin kosteusliikkeet
- Epätasainen tuenta
- Puitteen tai karmin kierous
- Isku lasin pintaan tai reunaan

Karkaistun lasin rikkoutuminen itsestään

Edellä mainittujen jännitystilän aiheuttavien tekijöiden lisäksi kar- kaistun lasin rikkoutumisen voi aiheuttaa lasinvalmistuksen yh- teydessä lasimassan sekaan epäpuhtautena jäänyt nikkelisulfidi- hiukkanen (**kuva 5**). Tavallisessa tasolasissa nikkelisulfidista ei ole haittaa.

Nikkelisulfidi on lasissa normaalisti alle 1 mm läpimittaisena "kive- nä" eikä se liukene sulaan lasimassaan (**kuva 6**). Karkaistussa lasi- sa karkaisun kuumennusvaiheen aikana nikkelisulfidissa tapahtuu faasimuutos α -faasiin, joka ei ehdi palautua takaisin β -faasiin no- peassa jäähtyksessä. Normaalisessa käyttölämpötilassa faasi palau- tuu alkuperäiseksi hitaasti, jopa vuosien kuluessa. Muutosnopeus riippuu merkittävästi lämpötilasta ja yli 200 °C:een lämpötila no- peuttaa muutoksen muutama tuntiin (Bordeaux). Palautuvassa faasimuutoksessa nikkelisulfidihiuksien paisuu 2 - 4 % ja aihe- uttaa lasin sisällä ympärilleen vetojännityskentän ja voi aiheuttaa karkaistun lasin rikkoutumisen ilman ulkopuolista syytä.



Kuva 5. Nikkeli-sulfidin rikkoma karkaistu lasi. Nikkeli-sulfidi on kuvan keskellä olevien kahden suuremman palan välisellä rajapinnalla.

Tarkkaa arviota sille, riittääkö hiukkasen paisuminen rikkomaan lasin on mahdoton antaa, sillä se riippuu hiukkasen koosta ja lasin jännitystilasta hiukkasen ympärillä. Vaarallisin paikka hiukkaselle onkin juuri se missä puristusjännitys muuttuu vedoksi. Jännitystila puolestaan koostuu karkaisussa syntyneistä ominaisjännityksistä ja jännityksistä, jotka syntyvät ulkopuolisista kuormista, kuten esimerkiksi tuulesta, lumikuormasta ja lämpötilasta. Lähteen (Jacob) mukaan läpimitaltaan alle 110 µm (0,11 mm) olevien hiukkasten ei ole todettu aiheuttaneen murtumia ja tätä pidetään turvallisena rajana. Nikkeli-sulfidia on vain hyvin pienessä osassa lasia ja nykyisin sen esiintyminen on aikaisempaa harvempaa lasitehtaiden yhä tehokkaamman kontrollin vuoksi.

Keinot todeta nikkeli-sulfidi ehjästä lasista

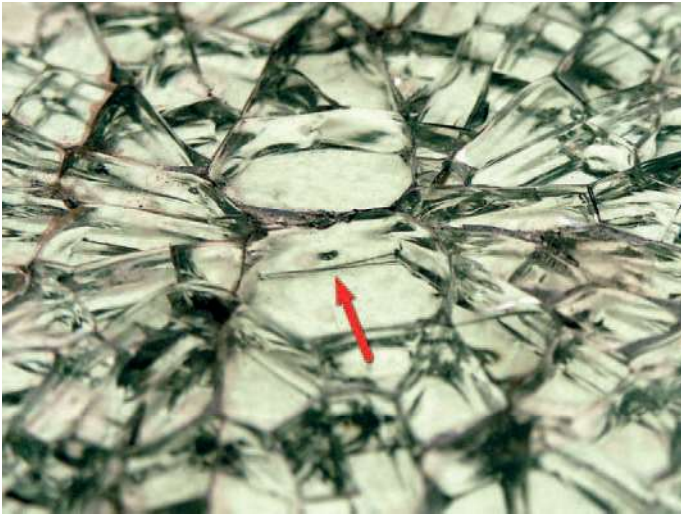
Ehjän lasin sisällä olevia nikkeli-sulfidi-hiukkasia on käytännössä mahdoton löytää, koska pienestäkin lasista on erittäin työlästä löytää millimetrin kymmenesosan kokoisia epäpuhtauksia. Epäsuorasti voidaan lasien sisältämät haitallisissa kohdassa olevat nikkeli-sulfidihiuksiset todeta ”Heat-soak”-testillä. Tässä testissä karkaistut lasit kuumennetaan muutamaksi tunniksi 250 - 300 °C lämpötilaan, jolloin nikkeli-sulfidi palaa alkuperäiseen b-faasiin ja

lasit, joissa on nikkeli-sulfidia haitallisissa kohdassa, rikkoutuvat. Täysin varma tämäkään menetelmä ei ole, mutta sillä on saavutettavissa lähes 100 %:n varmuus.

Eri lasimateriaalit

Rakennuslaseina käytetään nykyään pääasiassa soodakalkkisilikaattilaseja eli rakennus-float -laseja. Joihinkin erikoistarkoituksiin rakennuksissa ja laitteissa käytetään myös pienempinä määrinä borosilikaatti laseja sekä lasikeraameja, joiden lämpölaajenemiskertoimet ovat pienempiä kuin float-lasien. Oma lukunsa ovat pulloihin, purkkeihin, eristysvilloihin ja muihin erityistarkoituksiin käytetyt lasilaadut, joiden koostumukset poikkeavat hyvinkin paljon edellä mainituista lasista ja varsinkin peruskvarsihiekan lisäksi käytettävistä lisä- ja apuaineista.

Soodakalkkisilikaattilaseissakin on monia lasityyppejä, kuten muun muassa massavärjättyjä, pinnoitettuja, kuvioituja ja langoitettuja lasia, joiden rikkoutumismekanismi ja -käyttäytyminen voi poiketa hyvinkin paljon toisistaan. Esimerkiksi lankalasiin langat aiheuttavat lujuusteknisesti epäjatkuvuuskohtia ja siten lasin mekaaninen lujuus (taivutusvastus ja lämpötilaerojen kesto) voi olla



Kuva 6. Lähikuva nikkelisulfidi-hiukkasesta.

jopa kolmanneksen pienempi kuin tavallisella float-lasilla. Etuna lankalasi on kuitenkin, että lasin rikkoutuessa lasipalaset pysyvät toisissaan kiinni eivätkä siten aiheuta välitöntä suurten sirpaleiden vaaraa. Massavärjätyt auringonsuojalasit puolestaan absorboivat voimakkaasti lämpösäteilyä, josta voi aiheutua lasien yllättäviäkin rikkoutumisia. Tätä ennakoitavaa rikkoutumisherkkyyttä voidaan oleellisesti pienentää ko. lasien lämpölujuttamisella tai karkaisulla. Laminointi sinänsä ei estä eikä vähennä lasin rikkoutumista,



Kuvat 7 ja 8. Taivutuksen aiheuttamia lasirikkoja.

mutta laminointikalvo, yleisimmin PVB tai EVA, pitää lasisirpalet kiinni ja suurta sirpalevaaraa ei synny kuin lasin totaalisessa murskautumisessa.

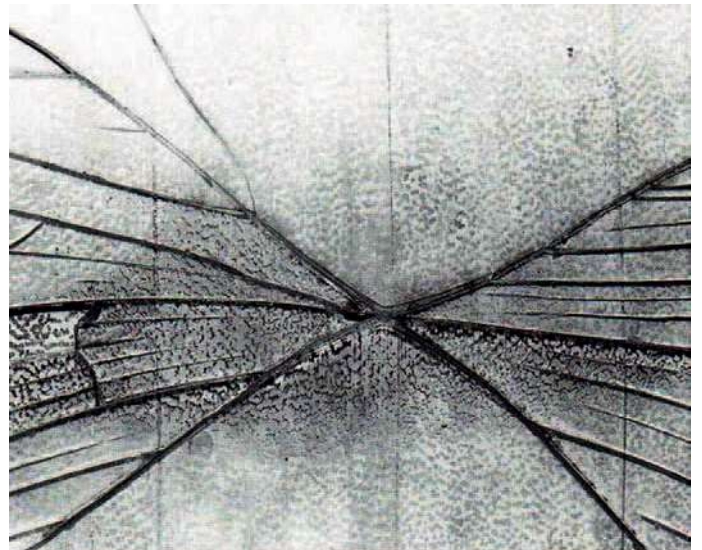
Tulipalon leviämisen estämiseen käytetyt lasit ovat pääasiassa lämpökäsiteltyjä tai erikoislaminoituja tai eristyslasirakenteisia rakennuslaseja, jotka estävät savun ja tulenlieskojen leviämisen sekä myös osin rajoittavat lämmön siirtymistä lasirakenteen läpi tietyn ajan. Mutta yhteistä on kaikille lasille, että ne kestävät jokseenkin huonosti vetojännitystä.

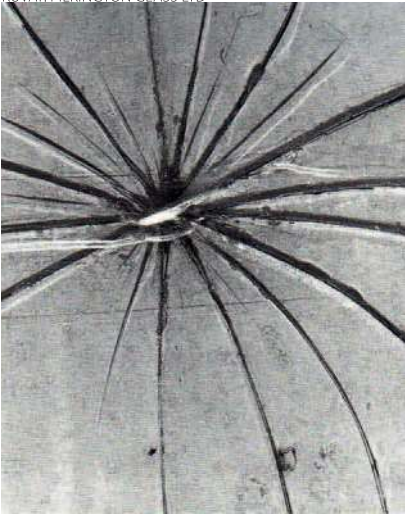
Turvallisuuskohdat

Tavallinen lasi rikkoutuessaan synnyttää muodoltaan erikokoisia ja muotoisia teräviä sirpaleita ja kappaleita. Rakentamismääräyksissämme (RaKMK osa F2 vuodelta 2003) onkin otettu huomioon näitä lasin erikoispiirteitä ja siellä on annettu joitain määräyksiä ja ohjeita muun muassa turvalasien käytöstä. Turvalaseiksi luokitellaan RaKMK:ssa laminoitu ja karkaistu lasi sekä lankalasi. Kuitenkin eurokoodit, jotka ovat olleet 1.9.2014 alkaen osa rakentamismääräyksiämme, määrittelevät turvalasit EN -standardeihin pohjautuvien testauksien perusteella. Näiden standardien mukaisten testauksien perusteella kaikki laminoidut, karkaistut ja langoitut lasit eivät täytä turvalasien vaatimuksia. Näin ollen, jos lasista käytetään nimitystä ”turvalasi”, niin siitä täytyy olla saatavilla EN-standardien mukainen testitodistus. Vakuudeksi ei riitä, että ”lasi on samanlainen kuin toisen toimittajan testattu lasi”. Lasirakenteiden lasityyppien valinnassa on otettava huomioon lasin monia ominaisuuksia, kuten mekaaninen lujuus, lämmönkestävyys, rikkoutumistapa jne. Suurimmat riskit syntyvät putoamisesta rikkoutuvan lasirakenteen läpi ja lasia päin törmätessä syntyvien lasisirpaleiden aiheuttamista viiltohaavoista.

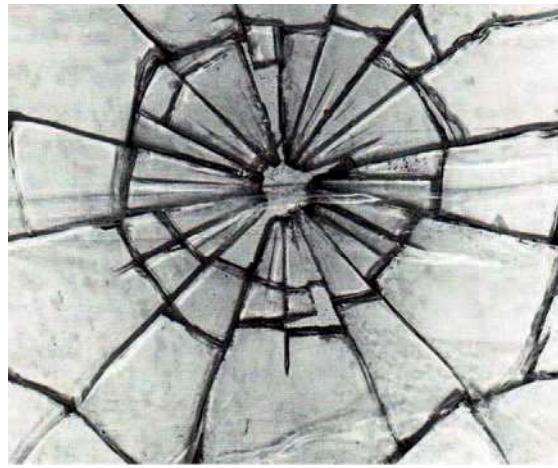
Putoamista estetään erilaisin kaiderakentein ja lasi on niissä usein mukana kaiteen levymäisenä osana. Koska karkaistu lasi menettää täysin kantokykynsä rikkoutuessaan, niin tätä lasia, vaikka se olisikin turvalasia, voidaan käyttää vain rajoitetusti kaiteis-

KUVA: PILKINGTON GLASS LTD

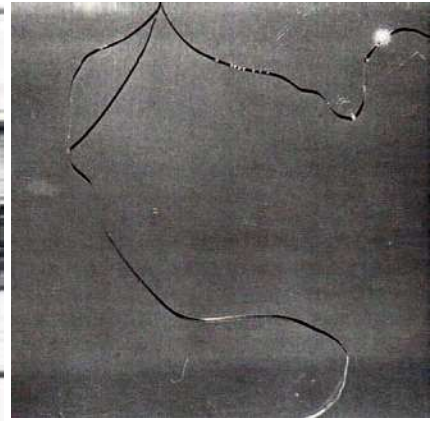




Kuva 9. Kovan esineen aiheuttama rikko.



Kuva 10. Pehmeän esineen aiheuttama rikko.



Kuva 11. Lämpöjännityksen aiheuttama lasirikko.

sa. Karkaistua lasia voi käyttää kaidelasina vain silloin, kun pu-toamiskorkeus jää alle puolen metrin. Laminoitu lasi ei yleensä menetä rikkoutuessaan täysin kantokykyään, joten sitä voidaan käyttää lähes kaikissa kaidarakenteissa. Mutta laminoitunakaan ”tavallinen lasi” ei aina ole riittävä, jos vaaditaan erityisen suurta taivutuslujuutta kaiteen levymäiseltä osalta. Näin on esimerkiksi silloin, kun kaidelasi on kiinnitetty pistemäisesti tai vain alareunastaan. Tällöin on käytettävä sellaisia laminoituja laseja, joissa lasit ovat myös karkaistuja, jotta lasirakenteen kestävyydellä on riittävä varmuus. Rakentamismääräyksien ja lasin erityisominaisuuksista johtuen Suomen Tasolasiyhdistys ry on laatinut ”Turva- ja Suojalasi 2015 -oppaan”, jossa annetaan muun muassa käytännön ohjeita lasinvalintoihin turvallisuuskäytökohtien kannalta. Lasien käytön turvallisuuteen liittyy oleellisesti myös lasien kiinnitys ympäröiviin rakenteisiin ja kiinnityksen on oltava sovelias ja oikein toteutettu käytetylle lasilaadulle. Rikkoutumisen syyinä voi olla muun muassa liian pienet asennusvarat, jolloin lasin leikkausreunat voivat osua karmirakenteisiin. Myös lasituslistojen kiinnitystarvikkeet (naulat, hakaset ruuvit tms.) voivat lasin reunaan osuessaan aiheuttaa siihen vaurioita, joista rikkoutuminen lähtee liikkeelle. Väärin valittu lasilaatukin voi pistemäisiä kiinnityksiä käytettäessä olla rikkoutumisen syy. Myös muut tekijät, kuten tummat sälekaihtimet, voivat aiheuttaa ikkunan lasien rikkoutumisen (Hemmilä, Heimonen). ■

Kirjallisuus

1. Bordeaux, F., Kasper, A., Reliable and shorter heat soak test to avoid spontaneous fracture of heat strengthened and tempered glasses. Glass Processing Days, 13-15 September '97, Tampere. p. 85 - 89.
2. Button, David, Pye, Brian, et al. 1993. Glass in building. A guide to a modern architectural glass. Oxford: Pilkington. ISBN 7506-0590-1
3. Jacob, Leon, Factors that influence spontaneous failure in thermally treated glass - nickel sulfide. Glass Processing Days, 13-15 September '97, Tampere. p. 323 - 327.
4. Hemmilä, Kari; Heimonen, Ismo, Suomalaisten ikkunoiden kestävyys. VTT Tiedotteita - Research Notes : 2285. VTT, Espoo, 2005. 59 s. + liitt. 14 s.

5. Rawson, Harold. Properties and Application of Glass. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. 1980. 318 p. ISBN 0-444-41922-5
6. RT-kortti RT 38-10901, Rakennuslasit, tasolasit. 2007. 23 s.
7. TURVA- JA SUOJALASIT 2015. Suomen Tasolasiyhdistys ry. 2014. 31 s.



VELAS -lasikaiteet





PROFIILI



RST Pyöröputki



RST Neliöputki



V.E.Lipponen

Nuottasaarentie 8, 90400 Oulu
p. 08 - 535 5300 fax. 08 - 377 811
www.lasilipponen.fi
sales@lasilipponen.fi