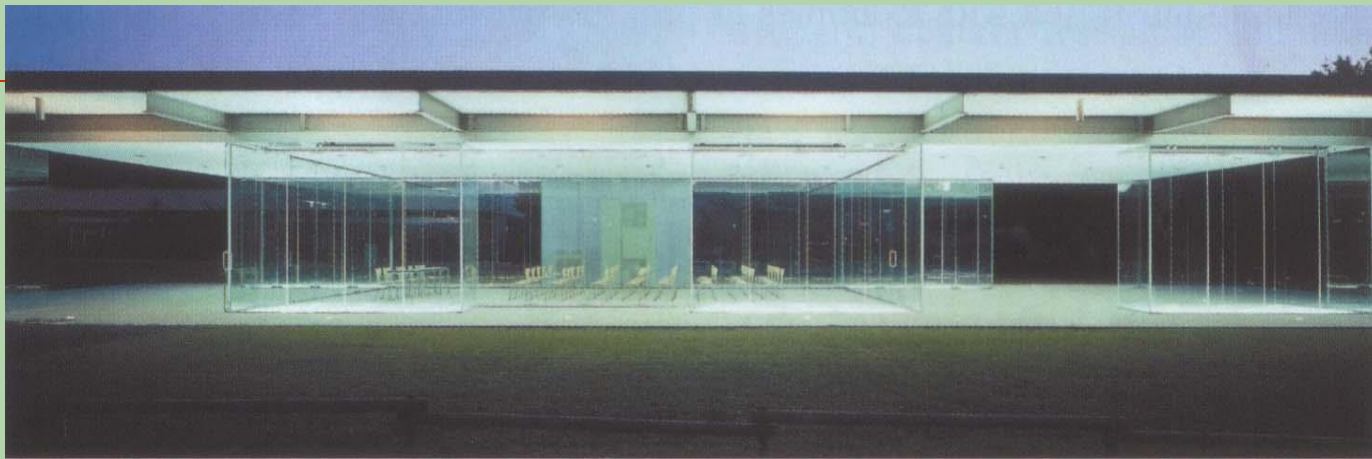




KONSTRUKCIJE OD NOSIVOG STAKLA



LAGANE KONSTRUKCIJE

1. POVIJESNI PREGLED RAZVOJA STAKLA I
KONSTRUKCIJA OD STAKLA
2. PROIZVODNJA STAKLA
3. VRSTE STAKLA U GRAĐEVINARSTVU
4. KARAKTERISTIKE STAKLA
5. PRORAČUN I PROJEKTIRANJE
6. KONSTRUKTIVNI ELEMENTI OD STAKLA
7. SPREZANJE STAKLA S OSTALIM MATERIJALIMA



1. POVIJESNI PREGLED RAZVOJA STAKLA I KONSTRUKCIJA OD STAKLA

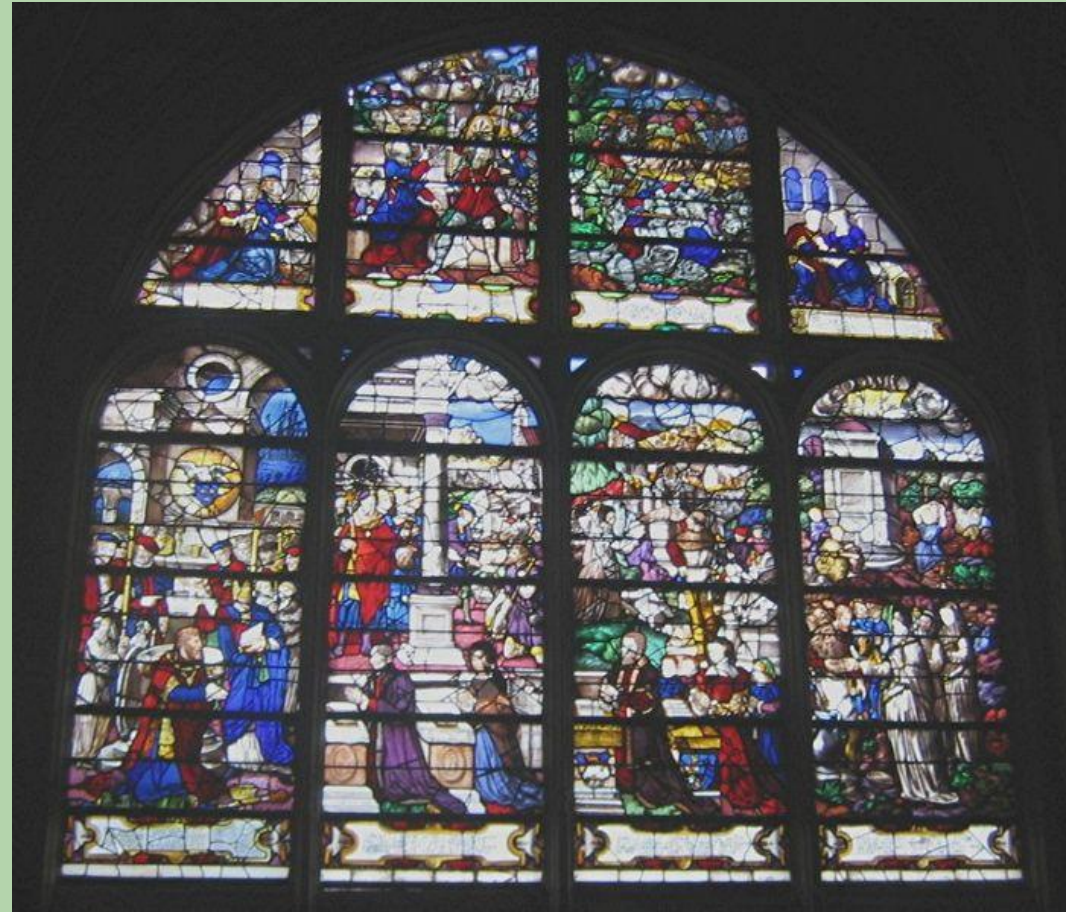




- pojam staklo potječe od pojma *glaza* - riječi germanskog porijekla – znači sjajiti, blještati, sijati, svijetliti
- rimljani za staklo koriste riječ *vitrum*, stvarajući korijen za francuski *vitre* (za prozor) i *verre* (staklo)
- proizvodnja stakla započinje već oko 4000 godina pr. K. u Mezopotamiji i Egiptu – u početku se rade samo nakit i ukrasi
- prvi zapisani “*recept*” za izradu stakla potječe od *Asurbanipala* (668-662 pr. K.)
- u Rimsko doba postoje podaci da je staklo prvi put korišteno kao ukras u građevinama (vile u Pompejima i javne kupke)
- u srednjem vijeku se razvijaju metode proizvodnje stakla koje će se zadržati do početka 20. st. (metoda cilindra i krune)

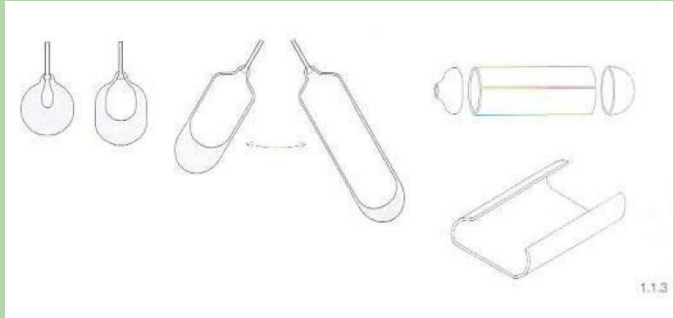


Ukrasna čaša, Rim, 4 st.

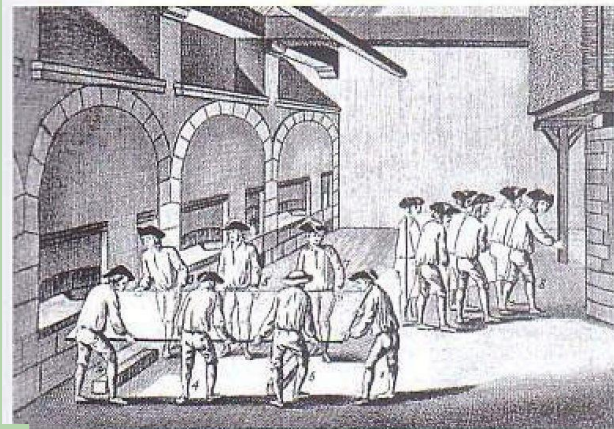


Crkva Notre Dame, Amsterdam, 16 st.

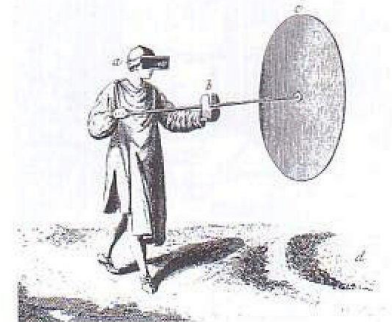
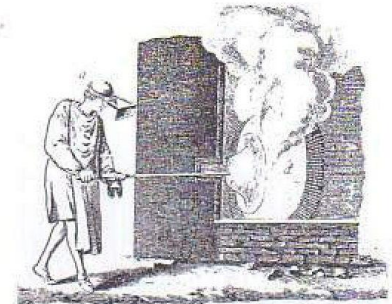
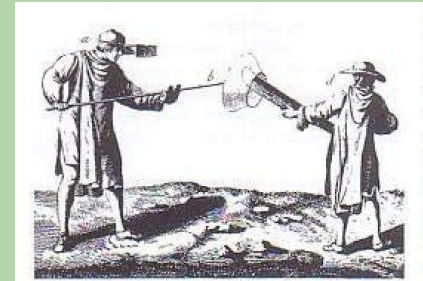
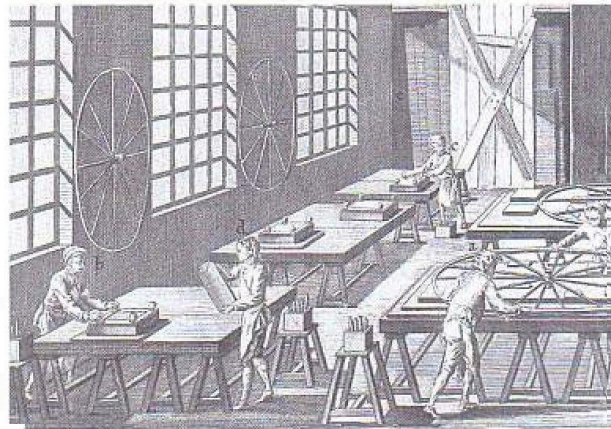




Proizvodnja stakla – metoda cilindra



Proizvodnja stakla – crteži iz enciklopedije Diderota i d'Alamberta

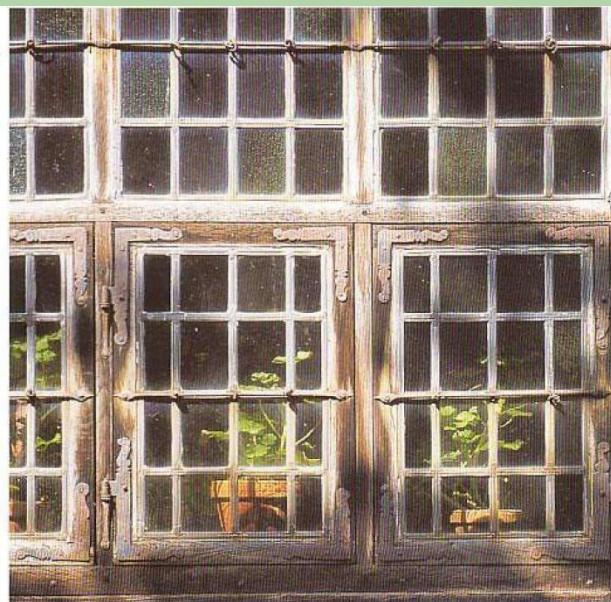


Proizvodnja stakla – metoda krune





- u razdoblju 16. i 17. st. Venecija zauzima centralno mjesto u proizvodnji stakla (*Murano staklo*)
- staklo se koristi u crkvama, manastirima i kućama kao luksuz
- 19. st. je stoljeće industrijalizacije – masovna proizvodnja stakla
- početkom 20. st. se razvijaju moderni postupci proizvodnje stakla,
- Belgijanac Emile Fourcault patentira „metodu vučenja vertikalno



Klasični prozor, Open Air Museum, Njemačka



Crkva sv. Benedikta, Njemačka (18.st.)



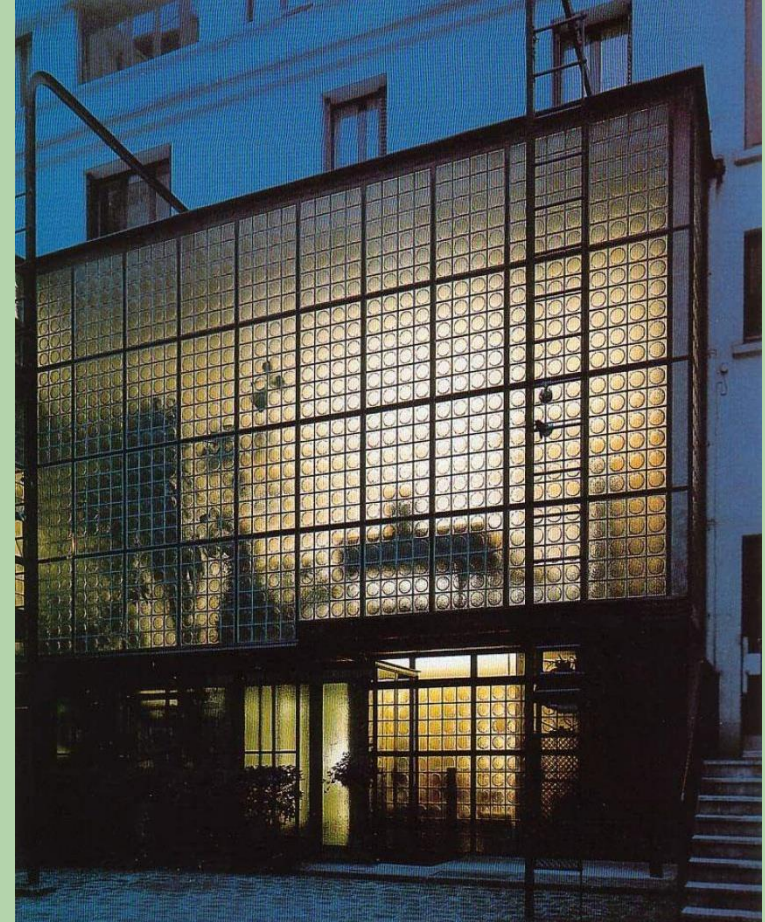
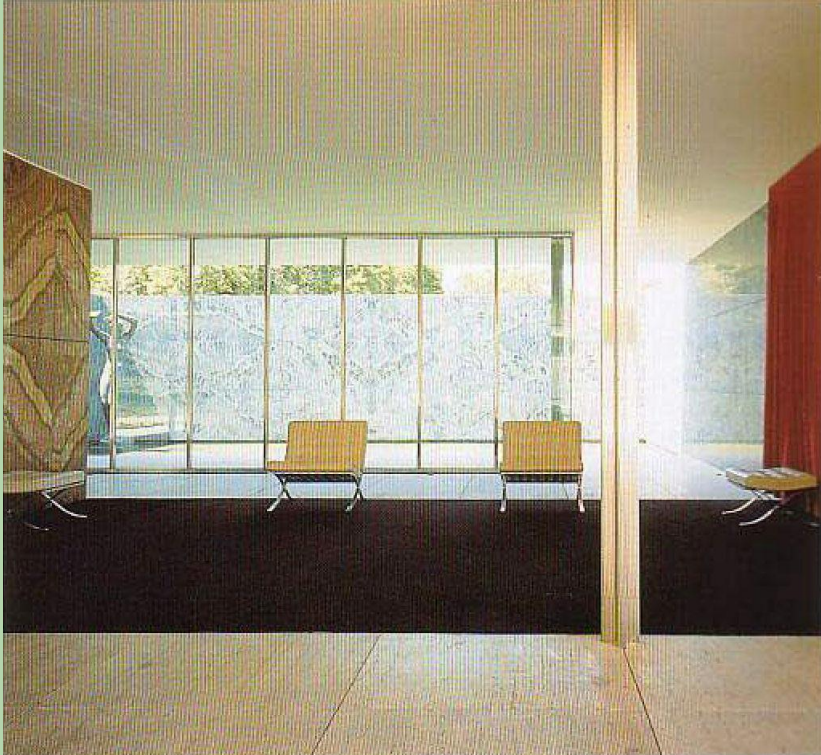
Versailles, Francuska (17. st.)

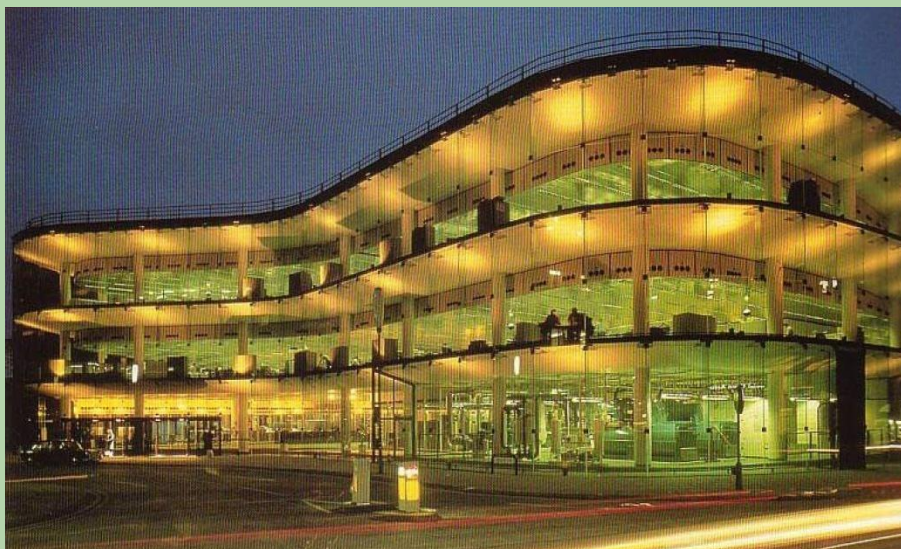
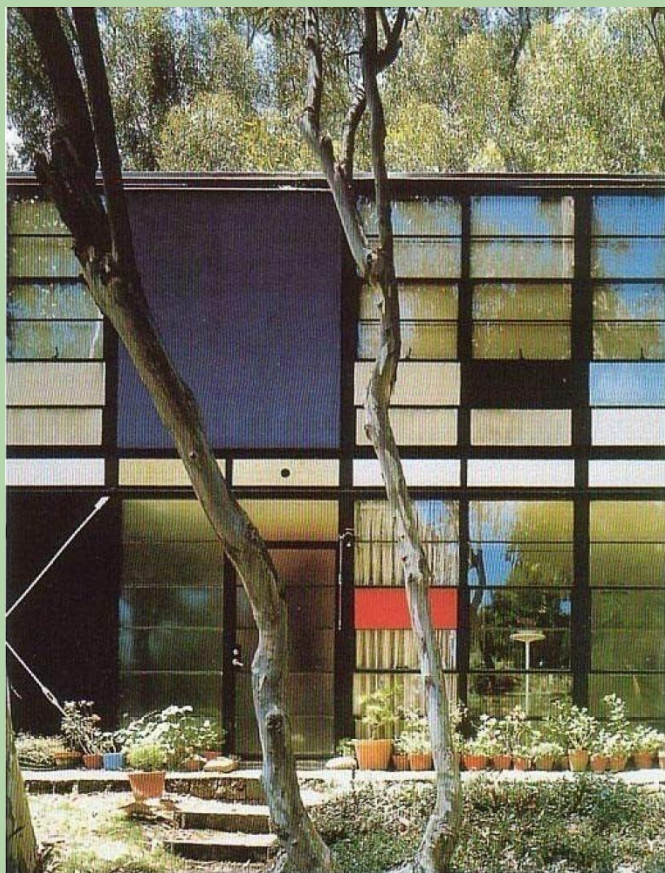


Kibble palace, Glasgow, Engleska

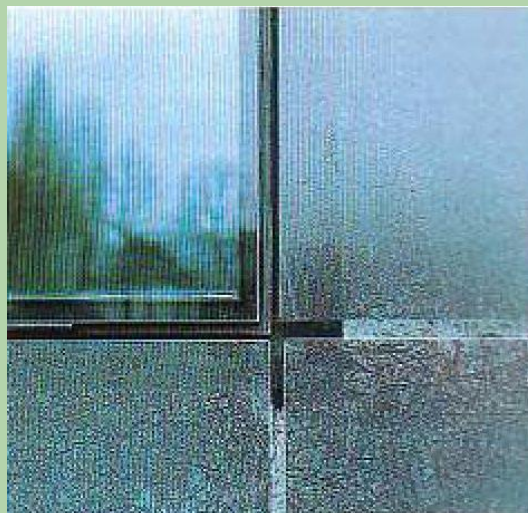


- arhitektura 20.st. intenzivno koristi staklo, ali ne još kao *konstruktivan* materijal



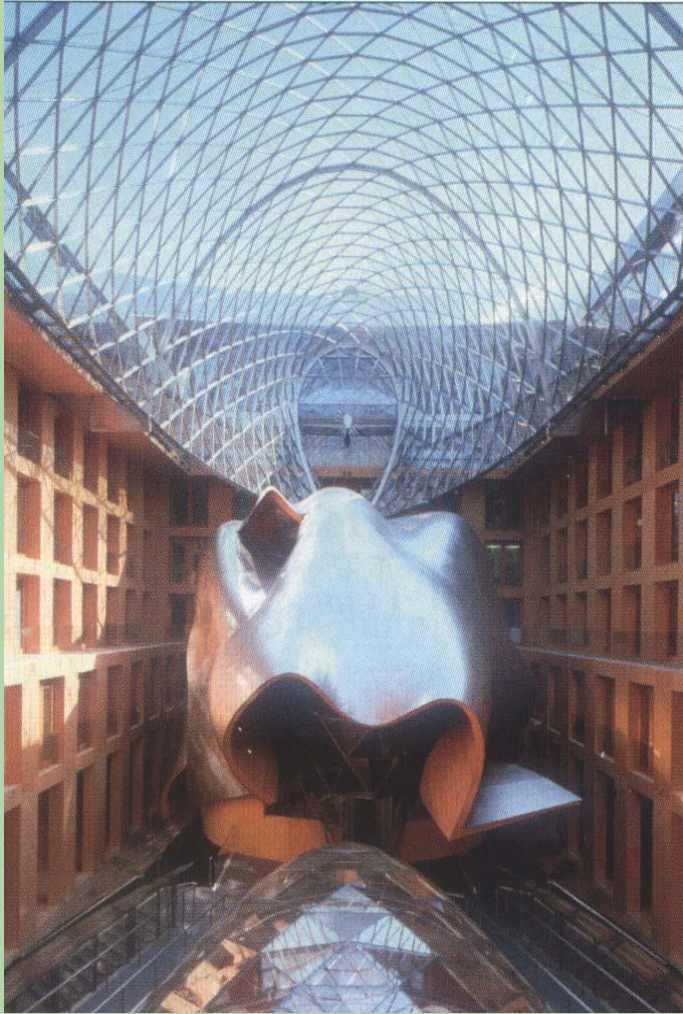


- moderne fasade od stakla

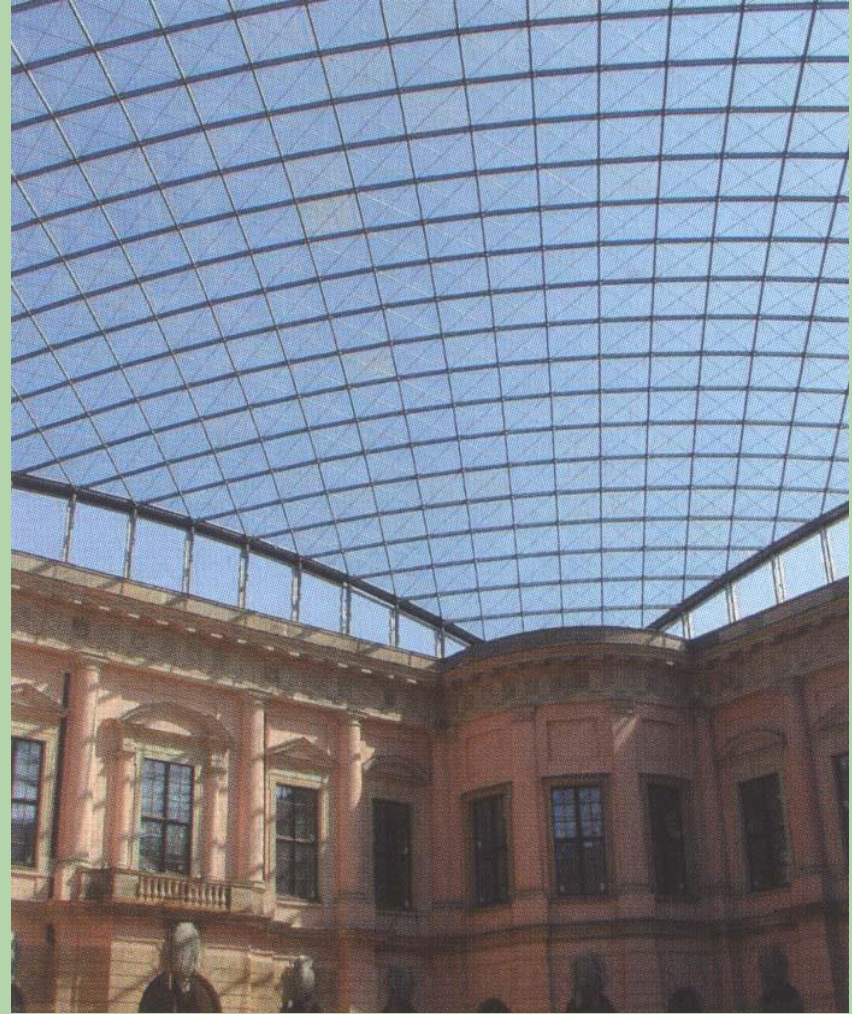




- krajem 20.st. staklo se počinje koristiti kao *konstrukcijski materijal*



Stakleni krov DZ Bank, Njemačka



Stakleni krov Hamburškog Povijesnog muzeja



*Ovješena staklena konstrukcija za
Stadtbahn Heilbronn, Njemačka*



Loggia Wasseraalfinger, Njemačka



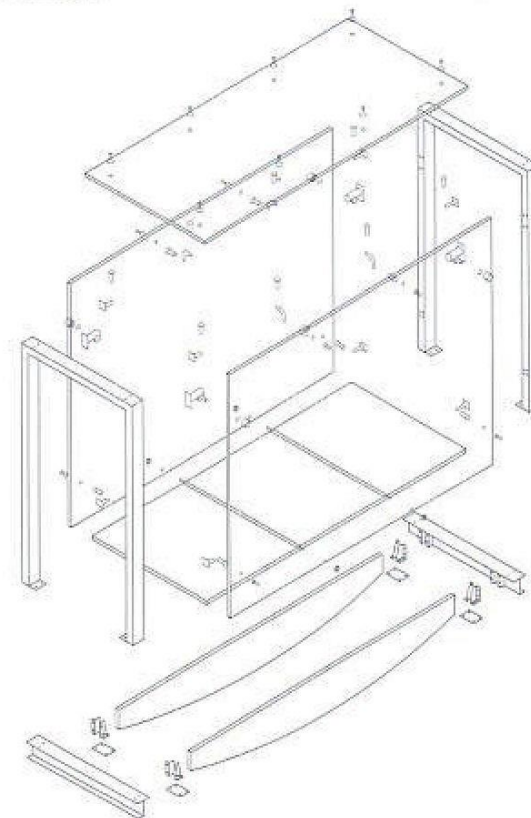
*Staklena ljuska za
Maximilianmuseum, Njemačka*



*Staklene grede i stupovi
Broadfield Glass Museum,
Engleska*



ds Exploded diagram



A Vertical section
B Horizontal section
scale 1:50

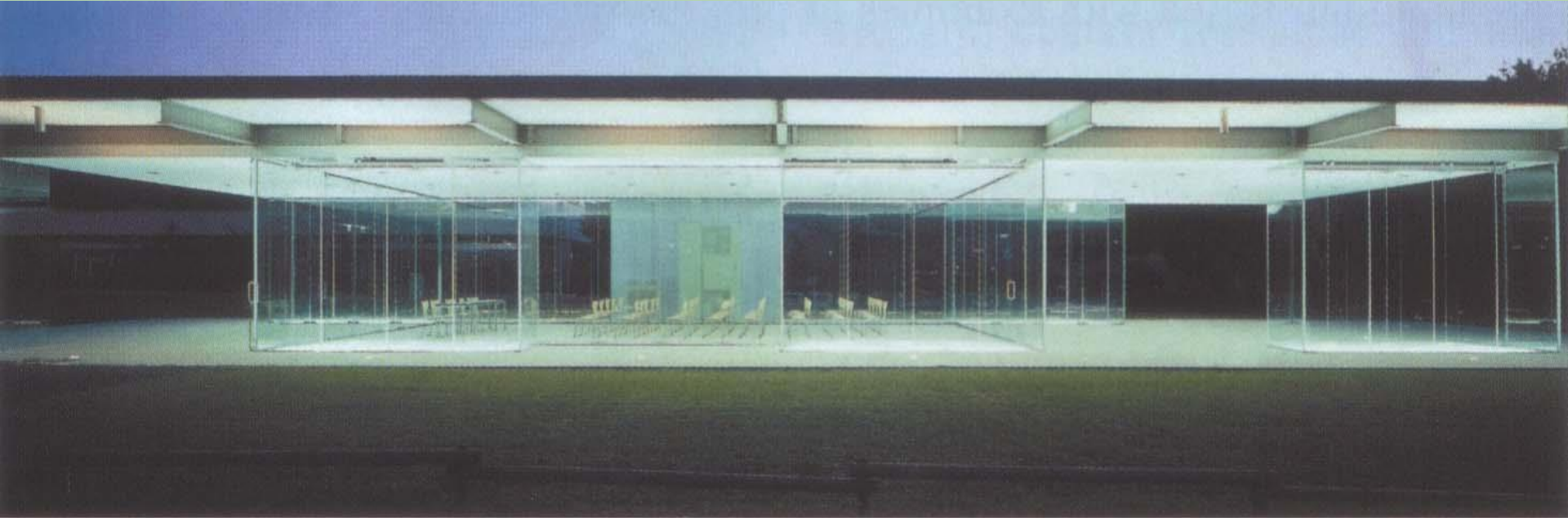
C Vertical section aa
D Vertical section bb:
abutment with wall
scale 1:5

- 1 laminated safety glass:
10 mm toughened glass
externally; 6 mm heat
strengthened glass internally
- 2 stainless steel point fixing
- 3 7 mm laser-cut stainless
steel plate
- 4 1.5 mm painted sheet-alu-
minium gutter on 18 mm
waterproof-bonded plywood
- 5 70x70x7 mm angle
- 6 80x120x6.3 mm steel RHS
- 7 2 panes 15 mm laminated
safety glass floor
- 8 3 mm sheet stainless steel
bent to shape; on 2 sheets
18 mm plywood
- 9 2 No. 90x90x9 mm angles
- 10 160 mm channel filled with
concrete
- 11 60x60x6 mm steel SHS
- 12 steel joist hanger
- 13 glass beam: 3 x 10 mm
laminated safety glass

Stakleni most, Rotterdam, Nizozemska



Stakleni most, Science Museum, London, Velika Britanija



Stakleni stupovi, Rheinbach Pavillon, Njemačka



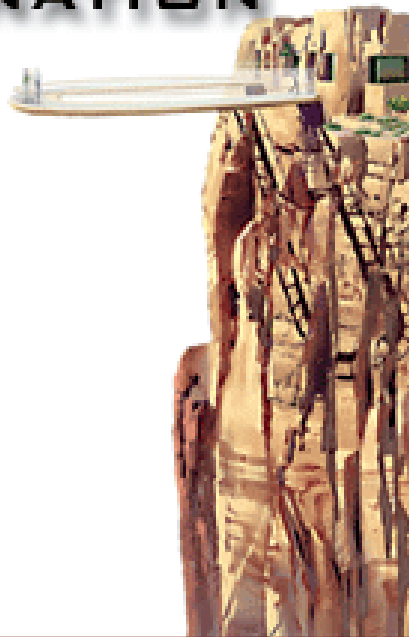
Spregnute grede drvo-staklo, Hotel Palafitte, Švicerska



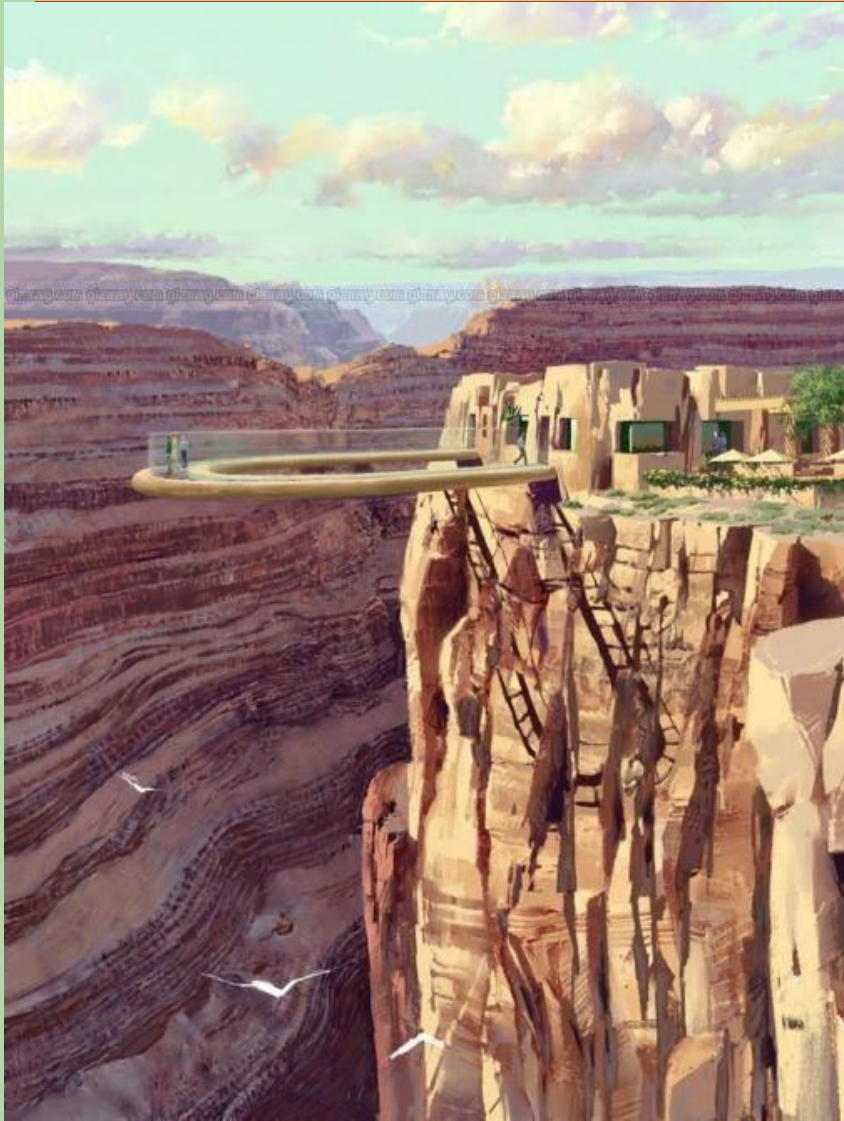
*Spregnute grede drvo-staklo,
Hotel Palafitte, Švicarska*

- u Grand Canyon (SAD) je završila 2008. izgradnja šetališta/mosta od stakla i čelika
- most je oko 1200 metara iznad rijeke Colorado
- projektiran za potres od 8 stupnjeva i vjetar od 180 km/h

EXCEEDING IMAGINATION



Grand Canyon Skywalk, Grand Canyon



Grand Canyon Skywalk, Grand Canyon

2. PROIZVODNJA STAKLA

KEMIJSKI SASTAV STAKLA

- Glavne 3 sirovine za dobivanje natrijeva-kalcijeva-silikatnog stakla ($\text{Na}_2\text{O} \times \text{CaO} \times 6 \text{SiO}_2$) su:
- Soda (Na_2CO_3 ; natrijev karbonat),
- Vapnenac (CaCO_3 ; kalcijev karbonat),
- Kvarcni pijesak (SiO_2 ; silicijev dioksid).
- Osnovnim sirovinama dodaje se i stakleni krš (oko 30%), jer ima niže talište od osnovnih sirovina, pa povećava brzinu staljivanja (taljenja).

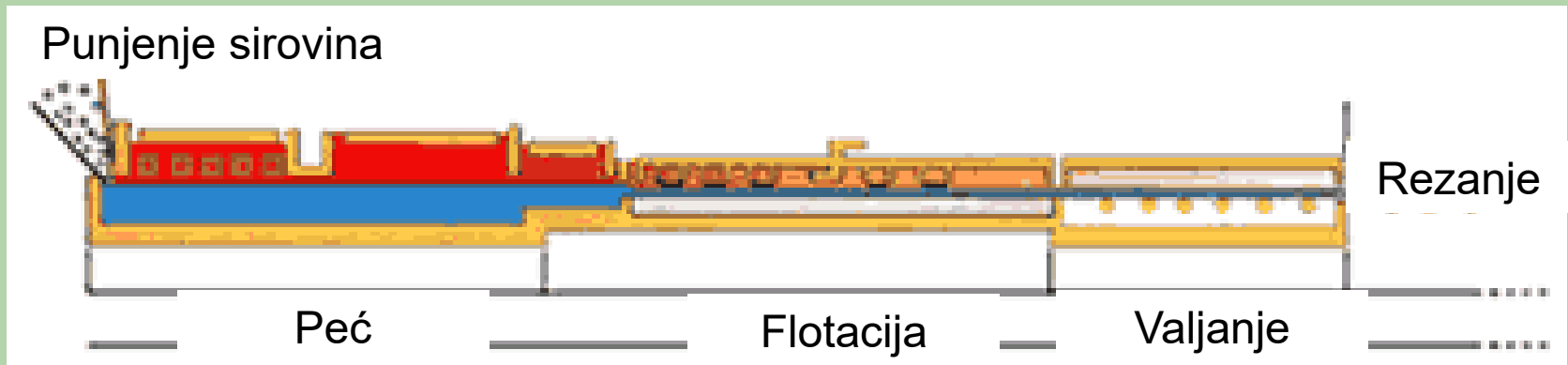


RECIKLIRANJE

- Iskorištenu staklenu ambalažu valja skupljati jer je pogodna za recikliranje. Može se u potpunosti reciklirati i koristiti kao isključiva sirovina za proizvodnju novih predmeta od stakla i time se smanjuje onečišćenje zraka u procesu proizvodnje za 20%, a onečišćenje vode za 50%.



- proizvodnja stakla – metodom cilindra i krune poznata još od srednjeg vijeka
- masovna proizvodnja stakla je započela početkom 20 st. u Belgiji i SAD – taljeno staklo se provlačilo kroz vertikalno postavljene valjke i nakon toga se hladilo. Maksimalne širine elementa su bile oko 2.3 m.
- današnje moderne tehnike proizvodnje baziraju su na metodi razvijenoj od Pilkingtona 1960 g. Ovaj proces je osnova današnje moderne proizvodnje stakla.



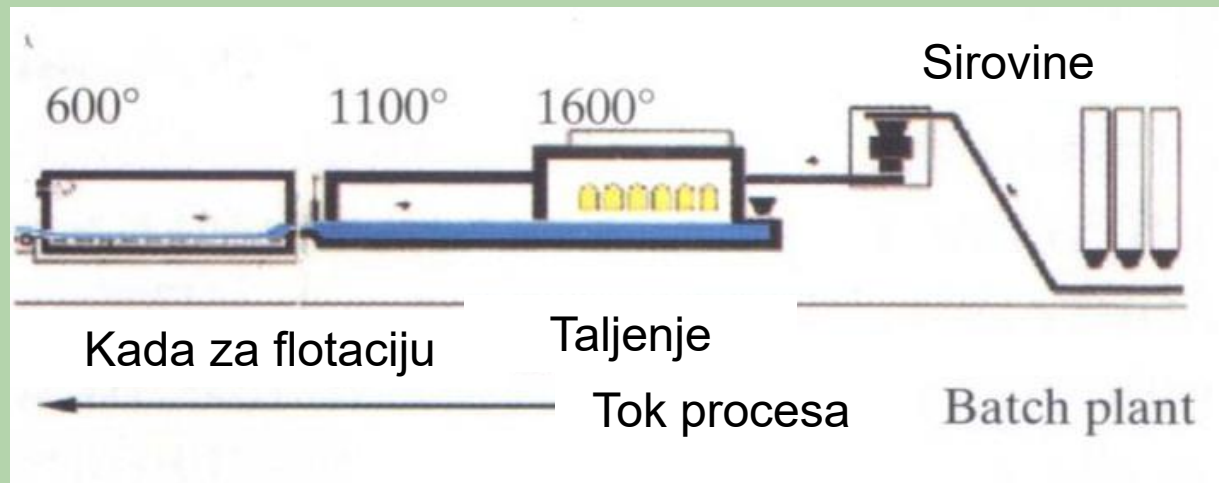
Shematski prikaz proizvodnje stakla



Proizvodnja je podijeljena u 2 dijela:

Prvi dio se sastoji od *tanka za sirovine*, *tanka (komore) za taljenje* i *kade za flotaciju*. Dužina ovog dijela je oko 500 m.

U **tanku za sirovine** se sirovine miješaju ovisno o vrsti stakla koja je potrebna. Za standardno staklo se koristi 72% silicijskog pijeska, 20-23 % recikliranog stakla te željezni oksid, kalcijev hidroksid, magnezijev oksid, dolomit, aluminijev oksid



Tok prve faze proizvodnje





Kemijski sastav :

SiO_2	73%
Na_2O	13.8 %
CaO	6.6 %
MgO	3.6 %
Al_2O_3	0.17 %
Fe_2O_3	0.12 %
SO_3	0.30 %

Nikal (Ni): nije sastavni dio stakla, može se pojaviti zbog procesa proizvodnje

Sumpor (S): nastaje prilikom procesa proizvodnje (goriva)

Nikal-sulfid (NiS): opasan spoj, mali kamenčići koji bitno smanjuju čvrstoću



Tok druge faze proizvodnje



Proizvodnja stakla



3. VRSTE STAKLA U GRAĐEVINSTVU

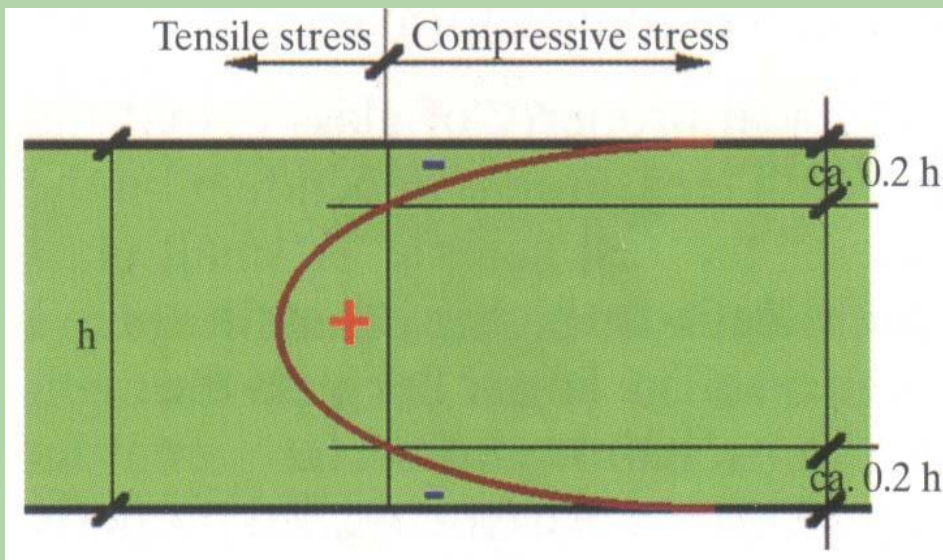
Vrste stakla koje se najčešće koriste kao konstruktivno staklo :

- **1. KALJENO STAKLO (TEMPERED GLASS)**
- **2. TOPLINSKI OJAČANO STAKLO (POLUKALJENO) (HEAT-STRENGTHENED GLASS)**
- **3. LAMINIRANO STAKLO (LAMINATED GLASS)**
- **4. KEMIJSKI OJAČANO (CHEMICALLY TOUGHENED)**
- **5. OBIČNO STAKLO (ANNEALED) – samo za panele i slabo opterećene elemente**



1. KALJENO STAKLO

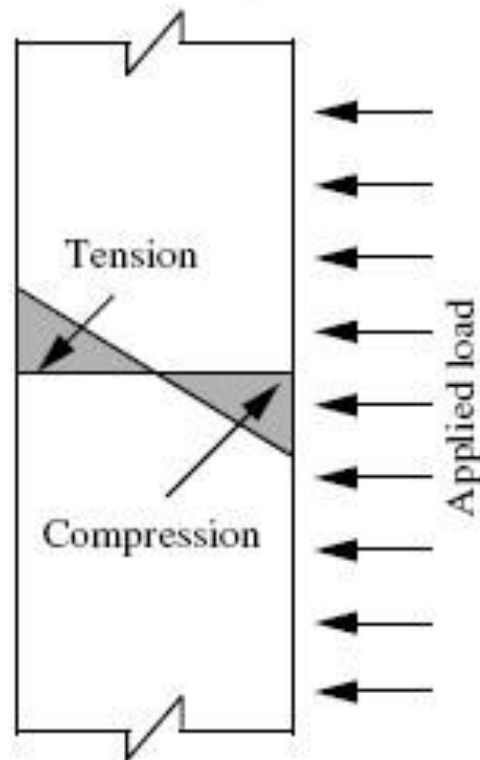
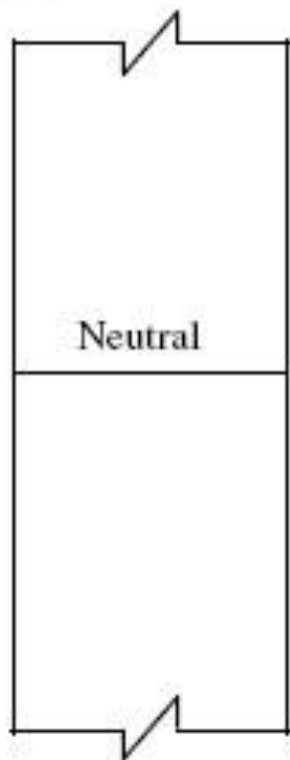
- Osnovna ideja je unijeti tlačne napone s ciljem povećanje otpornosti
- Ovo staklo se zove i ojačano ili prednapeto
- Staklo se grije do 650°C onda velikom brzinom hladi, tako da su vanjske stijenke puno hladnije od unutrašnjosti.
- Maksimalna debljina je 19 mm



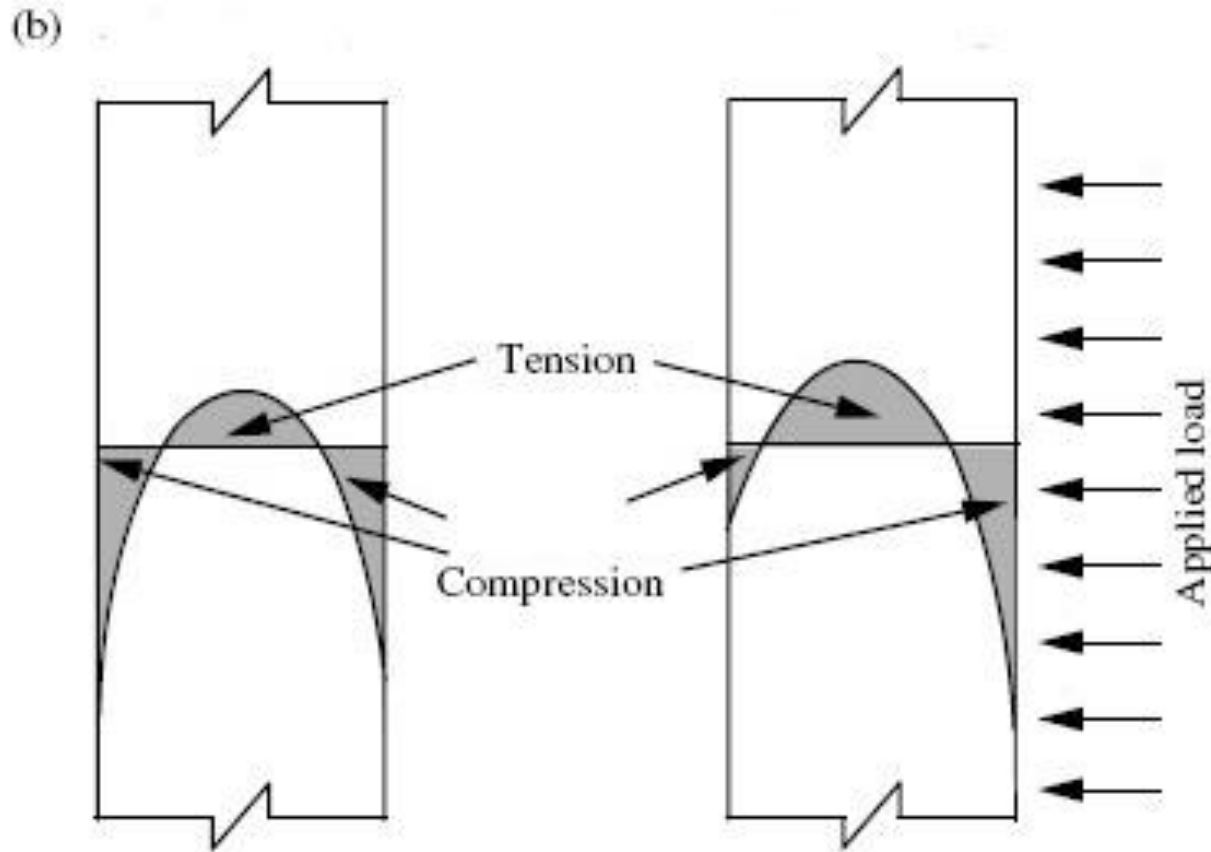
Dijagram naprezanja nakon kaljenja



(a)



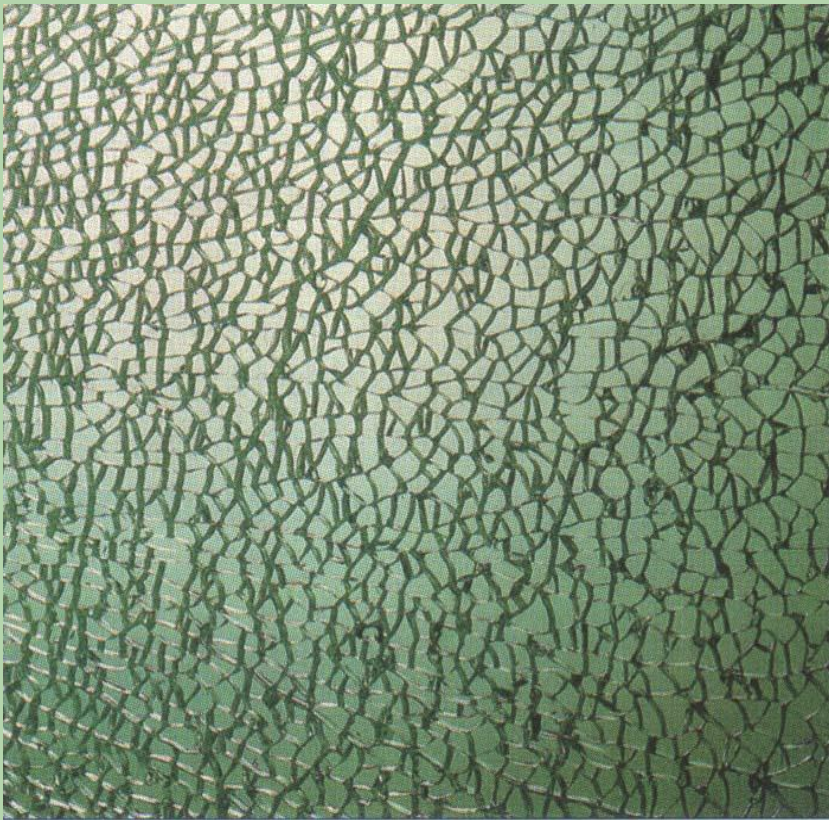
Nekaljeno staklo - prije opterećenja i nakon savijanja



Kaljeno staklo - prije opterećenja i nakon savijanja



- u slučaju pojave pukotine u vlačnoj zoni dolazi do širenja, i formiranja velikog broja malih čestica

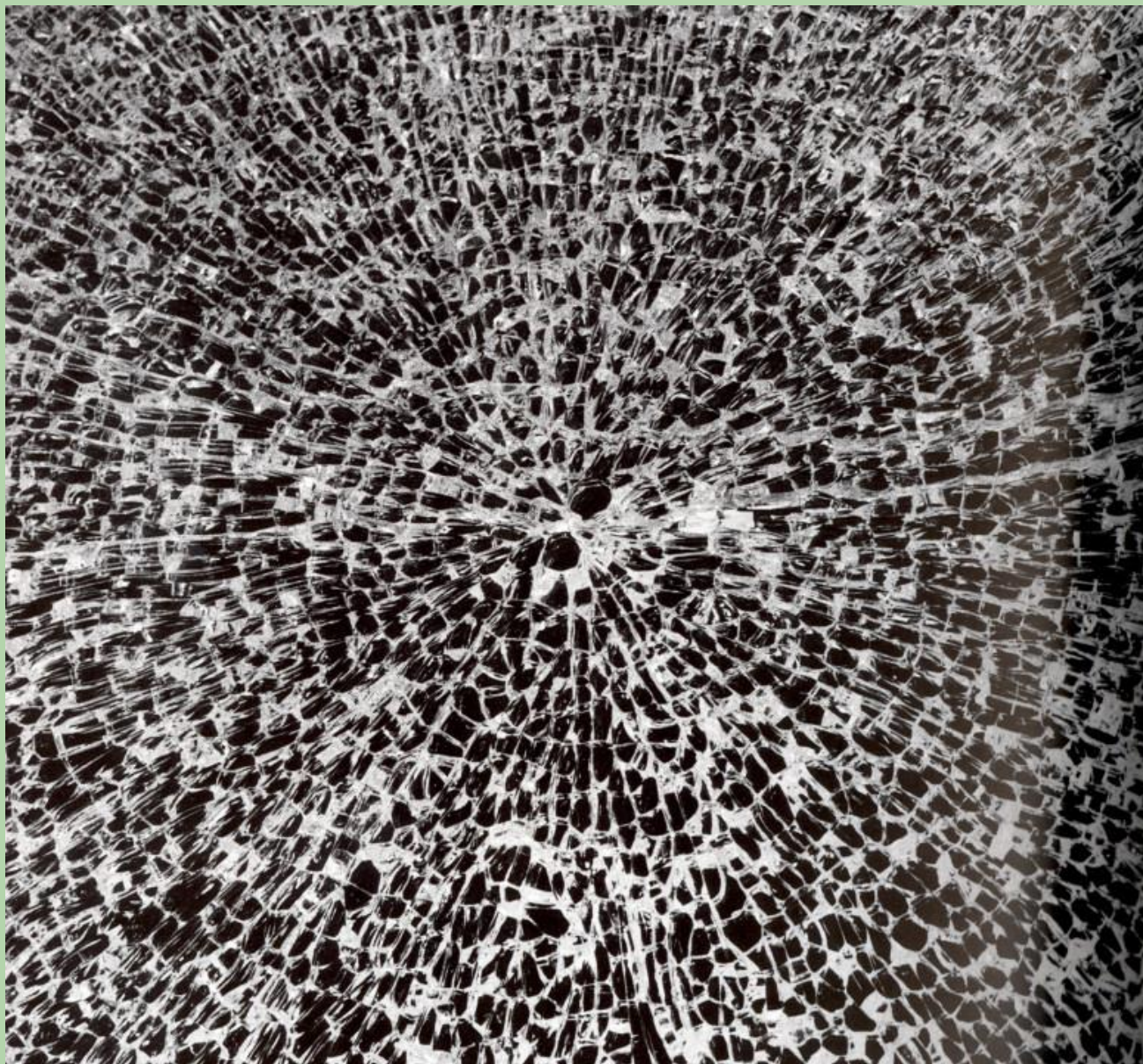


Lom kaljenog stakla

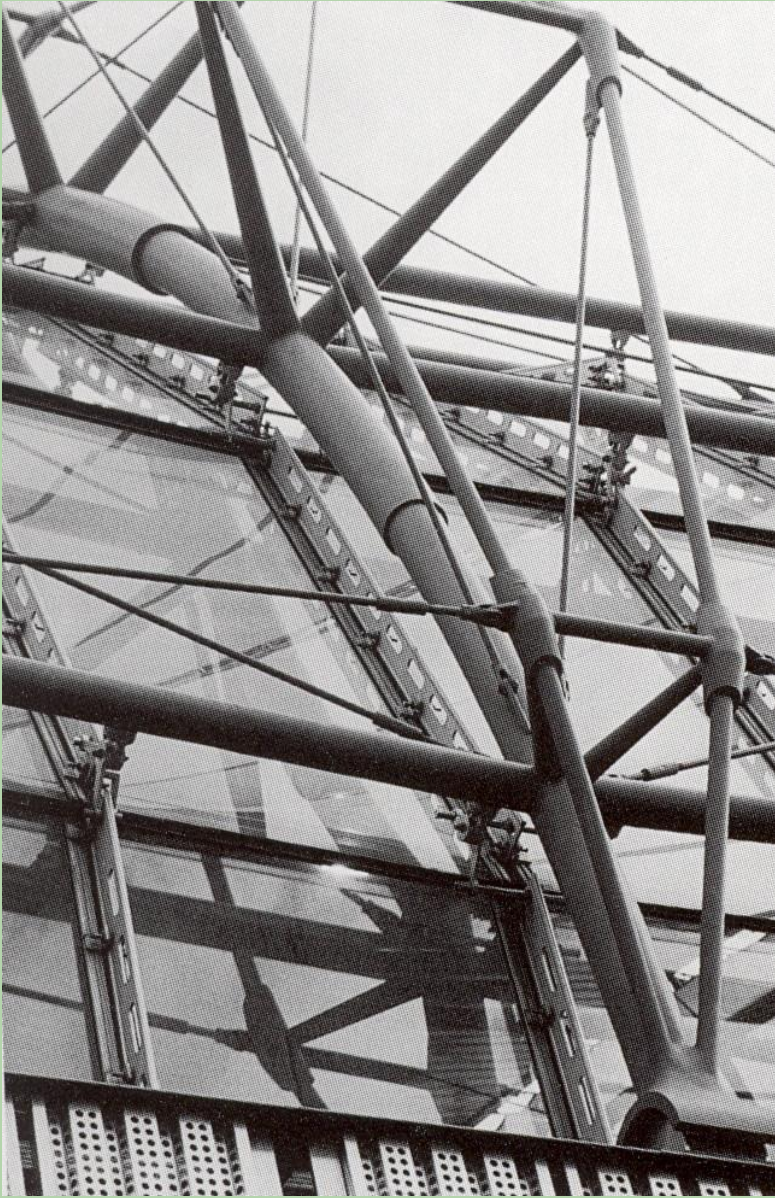


- RAD sa kaljenim staklom
- .
- NIKAL-SULFID
- **spontani slom** jest pojava sloma neopterećenog kaljenog stakla zbog prelaska čestica nečistoće NiS iz nestabilne β faze manje zapremine u stabilnu α fazu veće zapremine, a događa se najčešće tokom prvih 5 godina nakon kaljenja **mačje oči (cat's eye)**.
- najpoznatiji primjer je 1994 nagrađeni projekt International Terminal Waterloo Station (London). Ubrzo nakon izgradnje dogodio se slom.
- radi zaštite ljudi morala se napraviti posebna mreža.

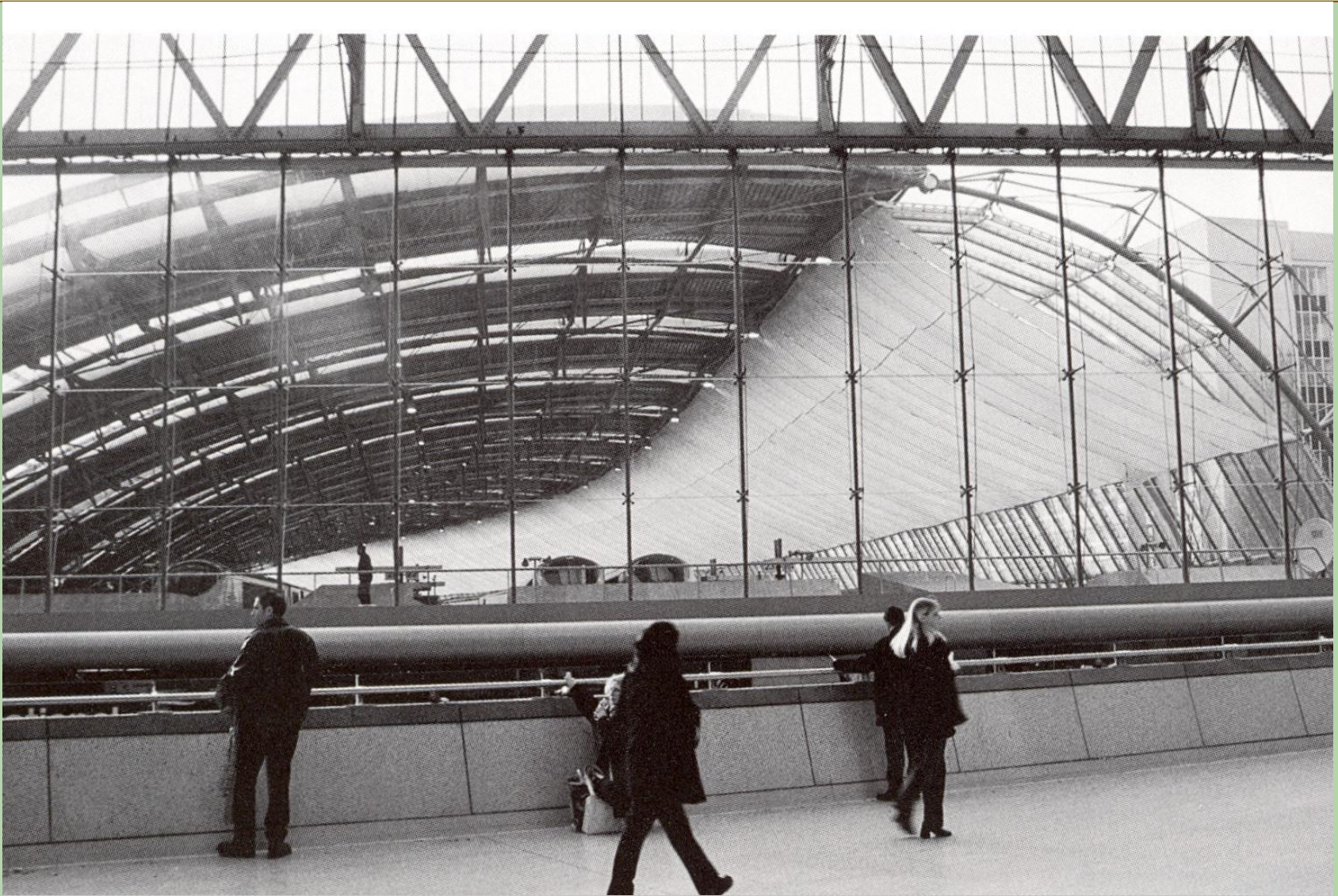




*Slom tipa “mačje
oči”*



*Vanjska fasada Waterloo Station
International Terminal, London*



Posebna mreža koja štiti pješake, Waterloo Station International Terminal, London

- Uklanjanje nikal-sulfida
1. **Veća pažnja prilikom proizvodnje stakla** – sirovine se ispituju, smanjuju se kontakti s elementima koji imaju nikal-sulfida (nehrđajući čelik)
 2. ***Heat soaking* (variranje temperature)** – staklo se izlaže velikim promjenama temperature. Testovi su definirani nacionalnim normama – npr. prema DIN – staklo se izlaže temperaturi od 300°C u trajanju od 8h.





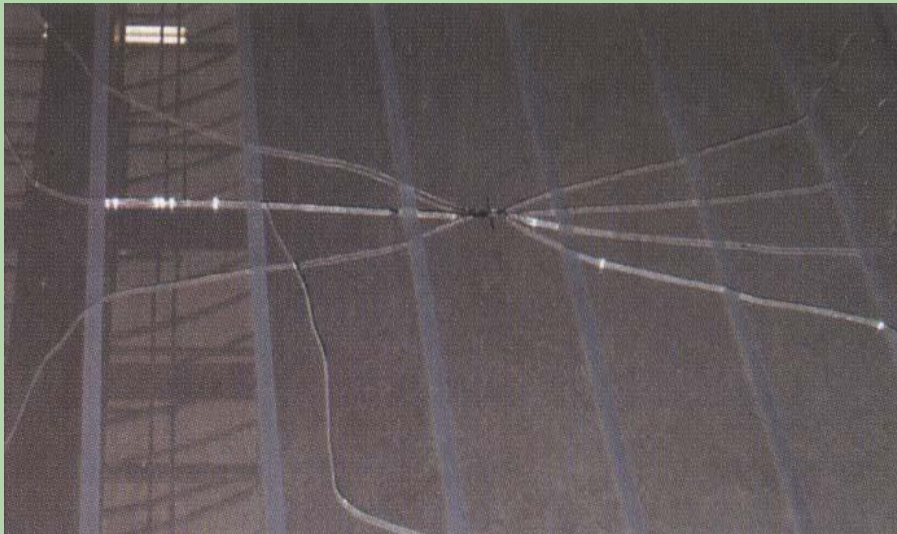
Komora za inspekciju stakla prije ugradnje (heat soak)

3. **Detekcija nakon ugradnje** – metoda koju od 1991. razvija University of Queensland, Australia
- Metoda se bazira na fotografskom detektiranju kamenčića nikal-sulfida unutar stakla
 - Vrlo pouzdana metoda (95% uspješna)
 - Korištena prilikom inspekcije nebodera od 36 katova u Brisbanu, 1997. – nađeno i uklonjeno više od 100 staklenih panela



2. POLUKALJENO ILI TOPLINSKI OJAČANO STAKLO

- proces vrlo sličan proizvodnji kaljenog stakla, samo je hlađenje duže
- ovakvo staklo ima manju nosivost
- debljine do 12 mm



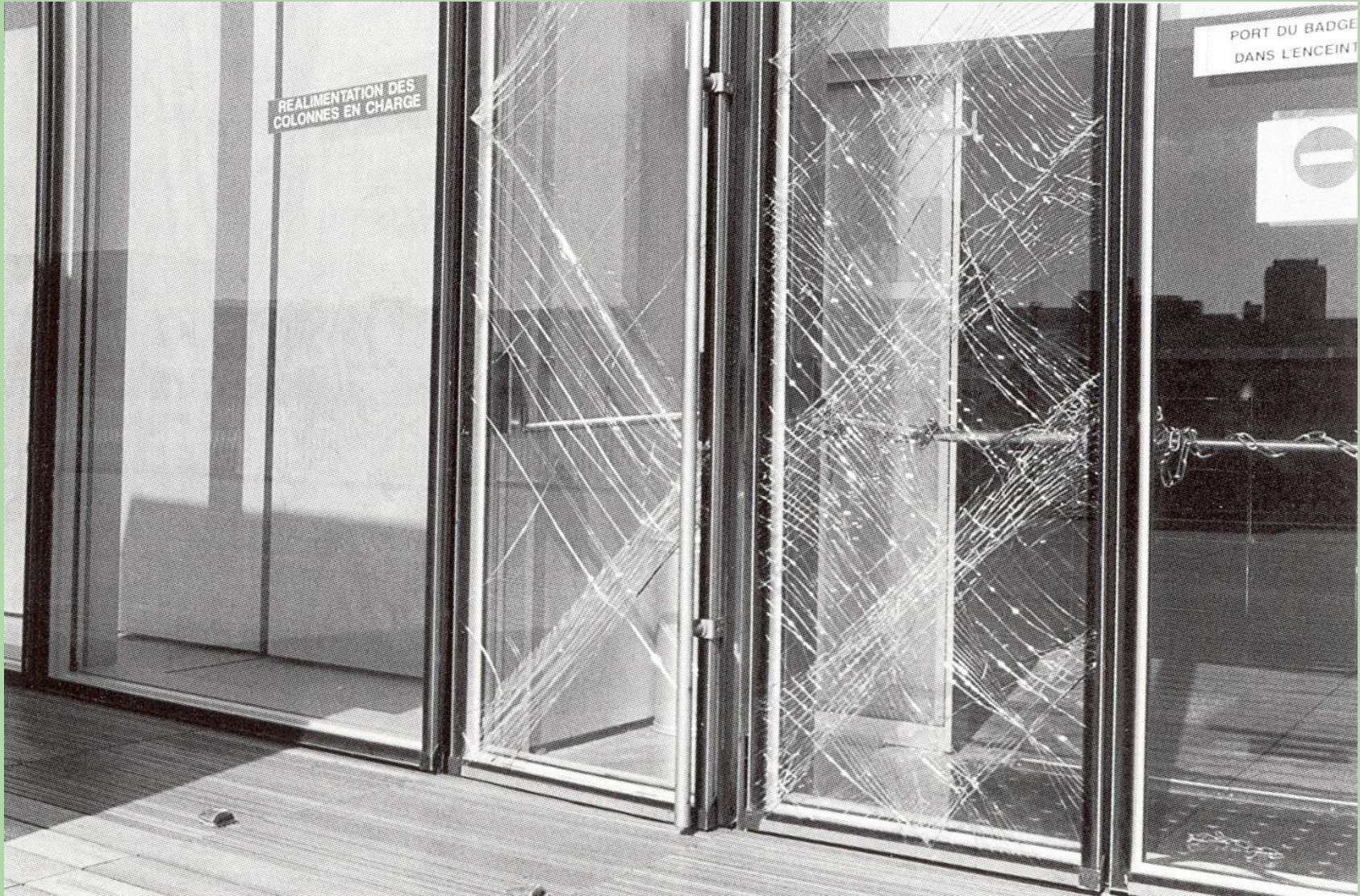
Lom toplinski ojačanog stakla



3. LAMINIRANO STAKLO

- 2 ili više elementa od float stakla, kaljenog stakla ili toplinski ojačanog stakla su povezana zajedno sa slojem polivinil-butirala (PVB) i PEA (polietilen acetat)
- debljina PVB sloja je oko 0.38 mm
- ovo staklo se često zove security jer se kombinacijom slojeva može postići neprobojnost za metke





Lom laminiranog stakla (Nacionalna biblioteka, Pariz)



OSTALE VRSTE STAKLA I POJMOVI

1. **ANNEALED GLASS** – paneli bez toplinske obrade, slabo podnosi temperaturne promjene. Ne koristi se kod velikih panela.
2. **OBOJANO STAKLO (TINTED)** – normalnom staklu se dodaju elementi koji daju određenu boju. Obično se koristi toplinski ojačano staklo
3. **OBLOŽENO STAKLO (COATED)** – posebni slojevi se dodaju na staklo radi estetske i konstrukcijske funkcije (smanjenje temperature stakla)
4. **ARMIRANO STAKLO (WIRED)** – prilikom procesa proizvodnje se u staklo ugrađuje žičana mreža. Loše se ponaša prilikom temperaturnih naprezanja.
5. **KEMIJSKI OJAČANO STAKLO (CHEMICALLY MODIFIED)** – na površinu se apliciraju kemijska sredstva koja poboljšavaju karakteristike.

OSTALE VRSTE STAKLA I POJMOVI

6. **NORMALNO STAKLO** jest staklo kojemu su u proizvodnji otpuštena zaostala naprezanja, što omogućava njegovo rezanje i daljnju obradu
7. **EMAJLIRANO STAKLO** jest staklo na čiju je površinu (u cijelosti ili djelomično) bojanjem ili sitotiskom nanesen sloj keramičke praškaste emulzije koja je potom zapečena u površinu stakla
8. **FLOAT STAKLO** jest plošno staklo sa paralelnim ploham, proizvedeno postupkom kontinuiranog izlivanja rastaljene staklene mase na kositrenu kupku
9. **VUČENO STAKLO** jest plošno staklo sa paralelnim ploham poliranim plamenom, proizvedeno kontinuiranim izvlačenjem iz početne vertikalne pozicije

OSTALE VRSTE STAKLA I POJMOVI

10. POLUKALJENO (toplinski ojačano) staklo jest staklo u čije je površinske slojeve (oko 20% ukupne debljine stakla) uneseno postupkom kontroliranog zagrijavanja i hlađenja trajno površinsko tlačno prednaprezanje (obično između 24 N/mm² i 52 N/mm²), kako bi se povećala mehanička otpornost, a zadržala fragmentacija po slomu karakteristična za normalno staklo
11. KALJENO (termički kaljeno) staklo jest staklo u čije je površinske slojeve (oko 20% ukupne debljine stakla) uneseno postupkom kontroliranog zagrijavanja i hlađenja trajno površinsko tlačno prednaprezanje (obično veća od 69 N/mm²), kako bi se povećala mehanička otpornost i postigla fragmentacija po slomu na male krhotine čija je najveća dimenzija približno jednaka debljini stakla

OSTALE VRSTE STAKLA I POJMOVI

12. TOPLINSKI PROŽETO STAKLO (HST) jest kaljeno staklo koje je podvrgnuto postupku toplinskog prožimanja, kojim se zagrijavanjem eliminira kaljeno staklo onečišćeno česticama NiS i na taj način umanjuje rizika spontanog sloma kaljenog stakla
13. SPONTANI SLOM jest pojava sloma neopterećenog kaljenog stakla zbog prelaska čestica nečistoće NiS iz nestabilne β faze manje zapremine u stabilnu α fazu veće zapremine, a događa se najčešće tokom prvih 5 godina nakon kaljenja
14. ŽRTVENA PLOČA jest staklena ploča koja osigurava uvjet redundancije, jer preostale ploče nakon njenog sloma imaju potrebnu mehaničku otpornost.

OSTALE VRSTE STAKLA I POJMOVI

15. **KEMIJSKI OJAČANO STAKLO** jest staklo koje je podvrgnuto kemijskom postupku kojim se površinski ioni zamjenjuju većim ionima, čime se postiže trajno površinsko tlačno prednaprezanje u sloju debljine oko 0,04 mm
16. **LAMINIRANO** (višeslojno) staklo jest sklop dva ili više paralelnih ravnih ili zakrivljenih staklenih ploča, jednakih ili različitih, zalijepljenih međusobno po cijeloj površini laminirajućim materijalom
17. **LAMINIRAJUĆI SLOJ** jest materijal između dvije ili više staklenih ploča laminiranog stakla, koji adhezivno prijanja na staklo i svojim mehaničkim svojstvima omogućava djelomično sprežanje ploča. Može biti proziran, u boji ili sa tiskanim uzorkom

OSTALE VRSTE STAKLA I POJMOVI

18. IZOLACIJSKO STAKLO jest sklop dva, tri ili više paralelnih ravnih ili zakrivljenih staklenih ploča, jednakih ili različitih, zabrtvljenih po rubu tako da hermetički zatvaraju prostor među njima, ispunjen zrakom ili nekim drugim plinom
19. HLADNO OBLIKOVANO staklo jest staklo koje je ugrađeno u prisilno deformirani položaj, koji uzrokuje trajna naprezanja u staklu
20. PJESKARENO STAKLO jest staklo čija je površina obrađena pjeskarenjem radi postizanja translucenosti
21. JETKANO STAKLO jest staklo čija je površina obrađena kemijskim agensima (obično hidrofluoričnom kiselinom) radi postizanja translucenosti ili geometrijskih ukrasa

OSTALE VRSTE STAKLA I POJMOVI

- 22. ZAKRIVLJENO STAKLO jest staklo koje je po proizvodnji zagrijavanjem omekšano i savijeno u cilindrični, sferni ili neki drugi prostorni oblik, u kojem ostaje nakon hlađenja, bez zaostalih naprezanja
- 23. SIGURNOSNO STAKLO jest staklo koje tvori fizičku barijeru protiv pada i ozljeda
- 24. KONSTRUKCIJSKO BRTVILO jest brtvilo, koje pričvršćuje stakleni element na oslonačku potkonstrukciju, sa dokazanim mehaničkim svojstvima koja mu omogućuju siguran prijenos djelovanja sa staklenog elementa na oslonačku
- 25. STRUKTURNO OSTAKLJIVANJE (SSG) jest pričvršćivanje staklenih elemenata na oslonačku potkonstrukciju konstrukcijskim brtvilima

4. KARAKTERISTIKE STAKLA

Vrste stakla u graditeljstvu:

- Sljedeće navedeni su među najčešćim silikatnim staklima:
- Natrij-kalcij-silikatno staklo u skladu sa HRN EN 572-1
- Borosilikatno staklo u skladu sa HRN EN 1748-1
- Staklokeramika u skladu sa HRN EN 1748-2
- Zemnoalkalijsko silikatno staklo u skladu sa HRN EN 14178-1 i HRN EN 14178-2



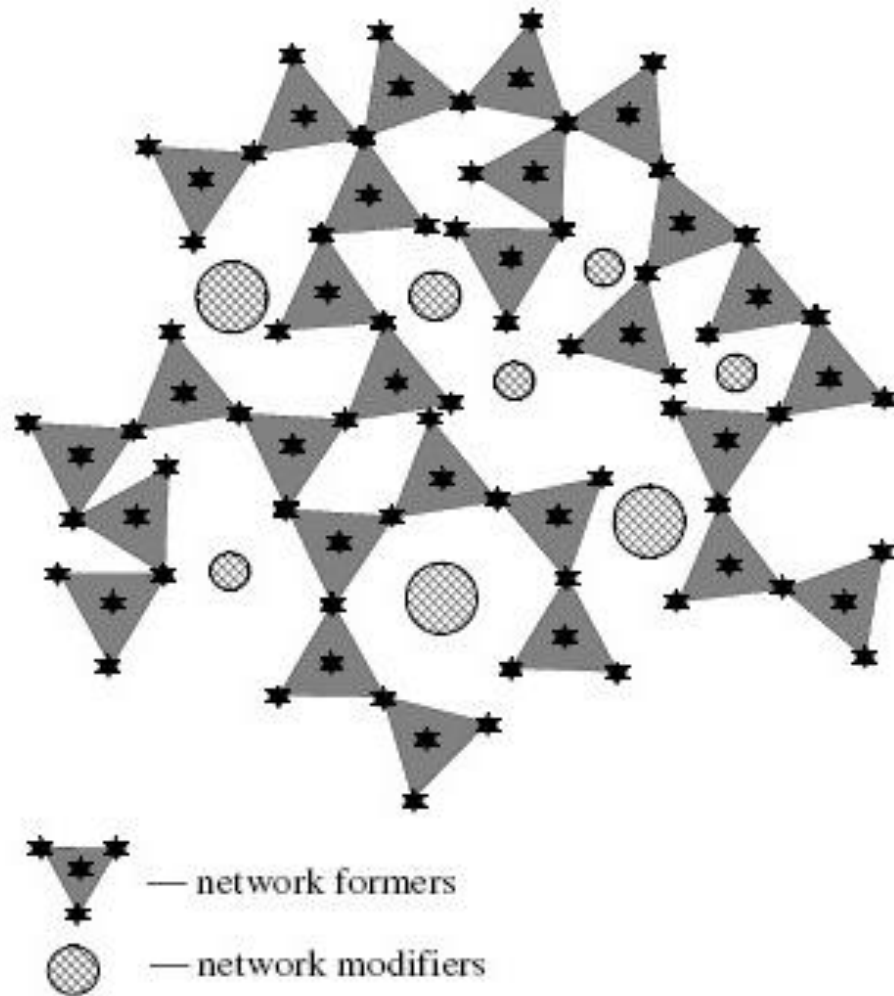
Kemijski sastav : **NATRIJ-KALCIJ SILIKATNO STAKLO**

SiO₂	73%
Na₂O	13.8 %
CaO	6.6 %
MgO	3.6 %
Al₂O₃	0.17 %
Fe₂O₃	0.12 %
SO₃	0.30 %

BOROSILIKATNO STAKLO – KORISTI SE NPR. ZA POŽARNO
OTPORNO STAKLO (UMJESTO CaO KORISTI SE BOROVI
OKSID B₂O₃)

ZEMNO-ALKALIJSKO STAKLO





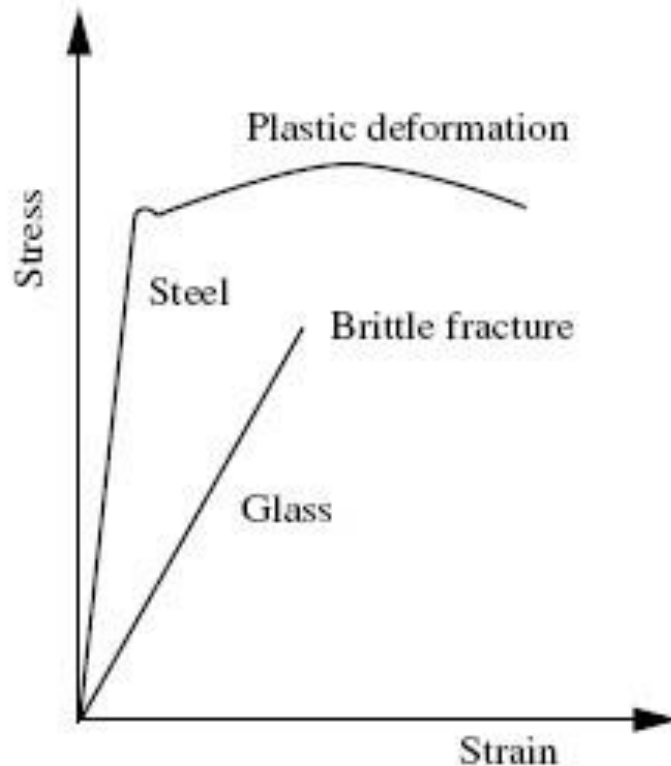
Pojednostavljen prikaz strukture stakla



KARAKTERISTIKE STAKLA

Specifična zapreminska težina	25 kN/m ³
Modul elastičnosti	70000 MPa = MN/m ²
Modul posmika	28000 MPa
Poissonov koeficijent	0,23
Vlačna čvrstoća	45 MPa
Tlačna čvrstoća	800 MPa
Čvrstoća (Mohrova ljestvica)	5-6
Temp.taljenja	600°C
Koeficijent termalne ekspanzije	9-9.2x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Čvrstoća na savijanje (60 sekundi opterećenje)	
Annealed	43 MPa
Toplinski ojačano	82 MPa
Kaljeno	165 MPa

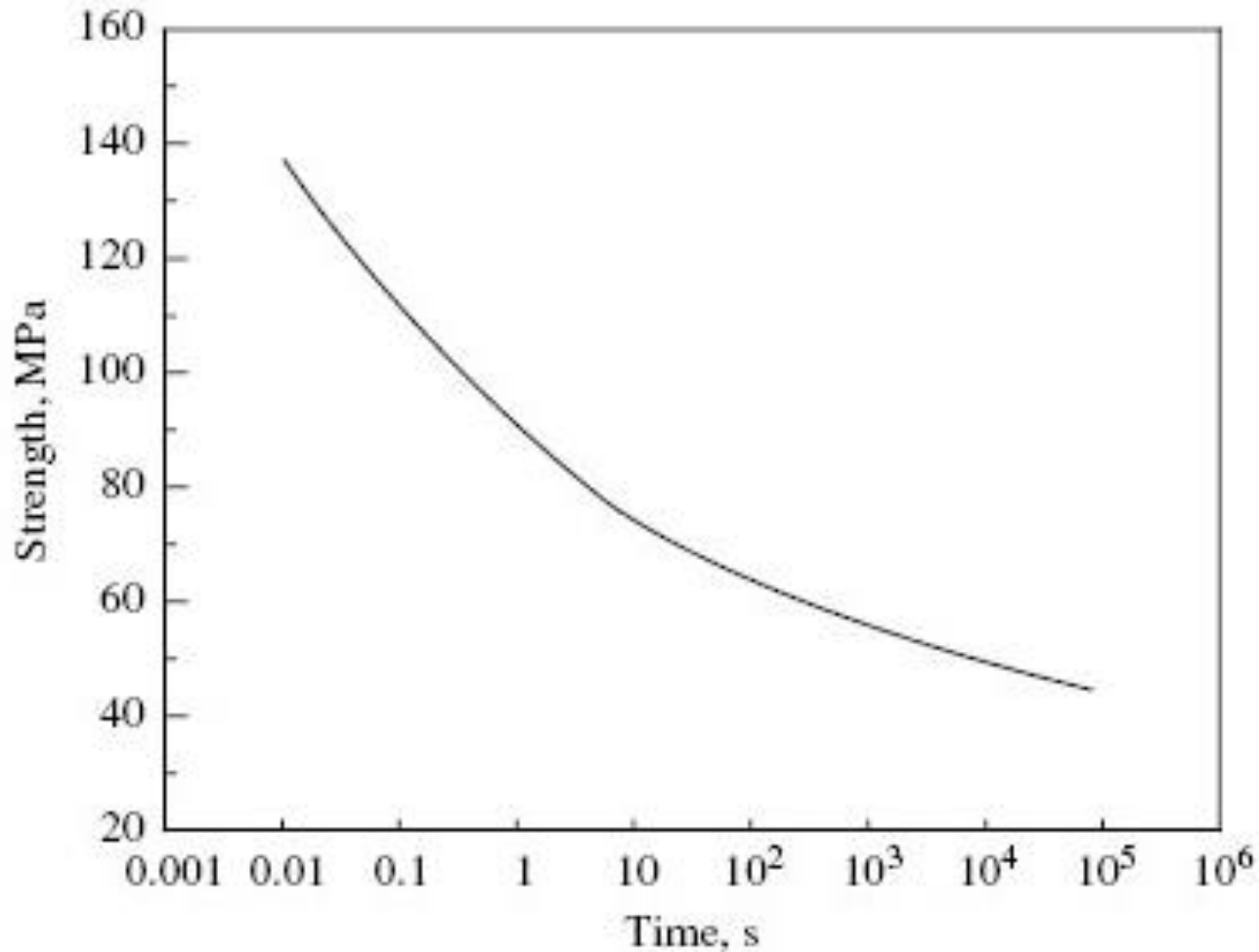




- staklo je krti materijal (nema mogućnosti plastičnih deformacija) kao npr. čelik
- ovisnost naprezanje-deformacija je linearna

Dijagrami naprezanje-deformacija za staklo i čelik





Utjecaj trajanja opterećenja na čvrstoću

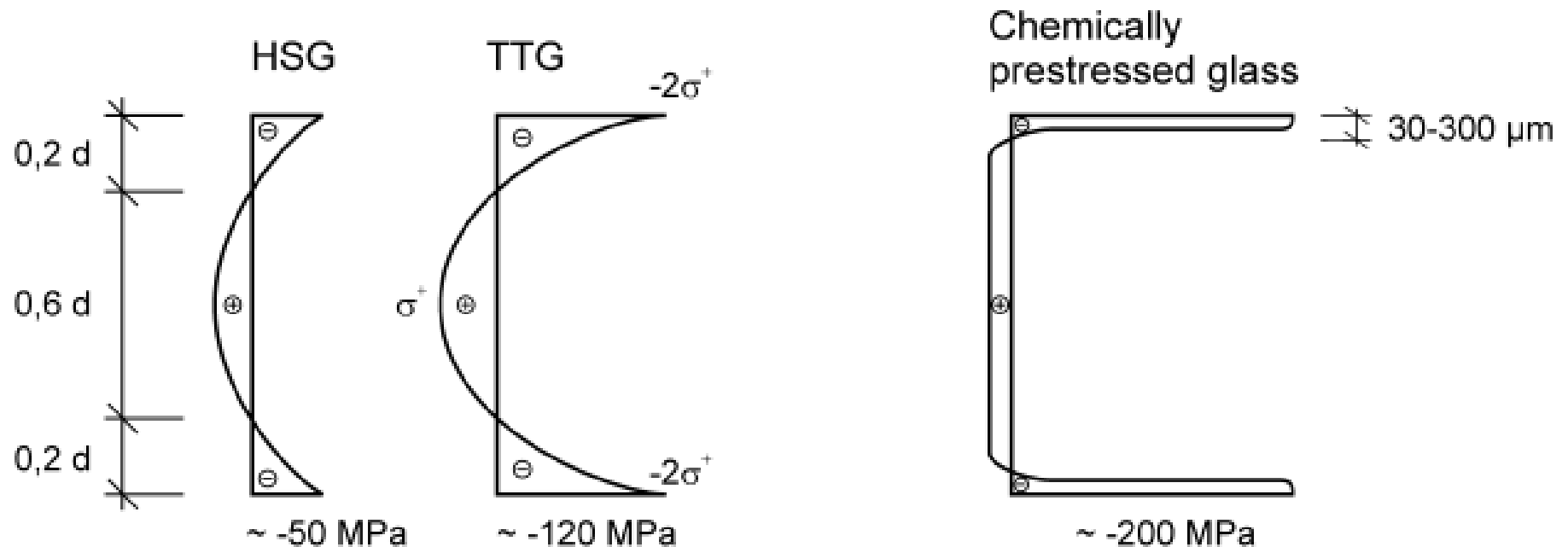


- Na temelju fizičkih izračuna su teoretski vlačne čvrstoće 5000 MPa do 8000 Mpa
- Rezultat strukturnih nedostataka je da se čvrstoća na savijanje običnog stakla u stvarnosti smanjuje na oko 30 do 80 MPa.
- To je razlog što je čvrstoća savijanje stakla npr. zbog trajnog opterećenja manja nego kod opterećenja s kratkim trajanjem.

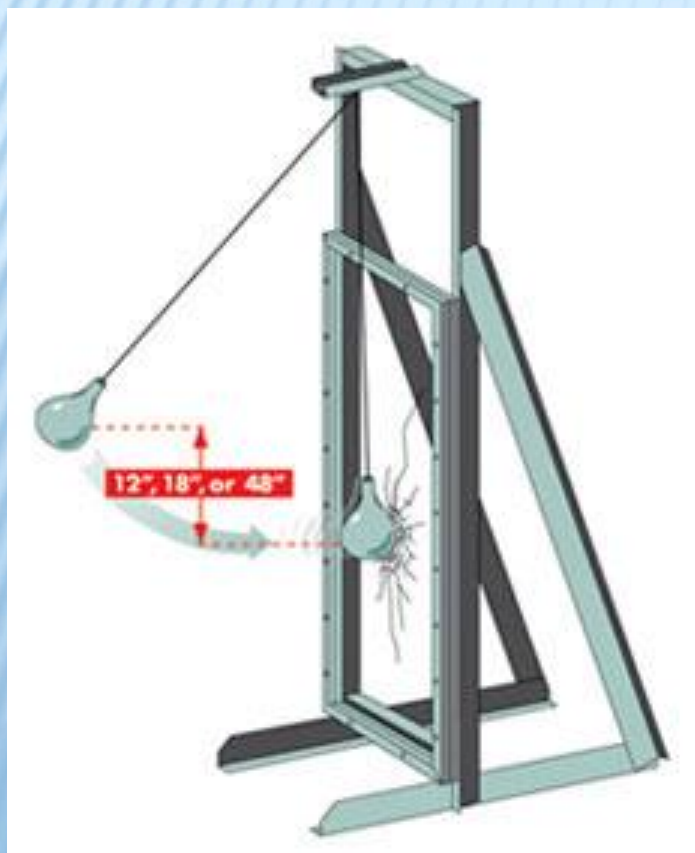
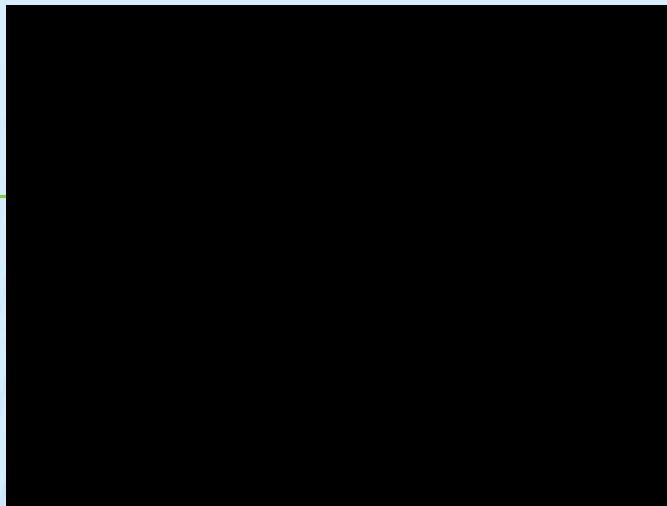


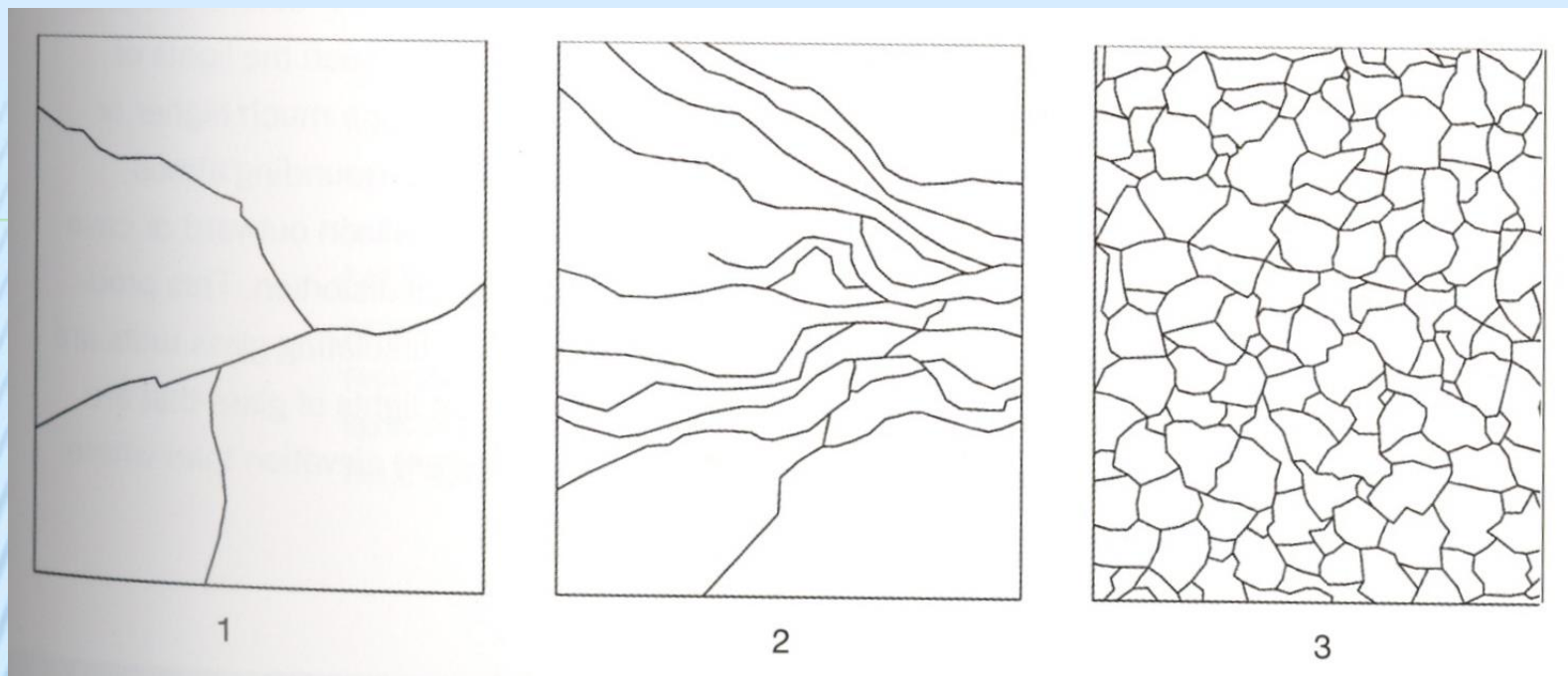


Sheme različitih distribucija prednaprezanja preko presjeka ploče ovisno o tipu stakla



ISPITIVANJE STAKLA





Sheme otkazivanja: normalno staklo (1), toplinski ojačano (2), kaljeno (3)





Povezanost oblika pukotine sa stupnjem prednaprezanja stakla za obično, termički ojačano i kaljeno staklo

obično staklo

termički očvrsnuto staklo

kaljeno staklo

Čvrstoća na savijanje f_k

45 N/mm²

70 N/mm²

120 N/mm²

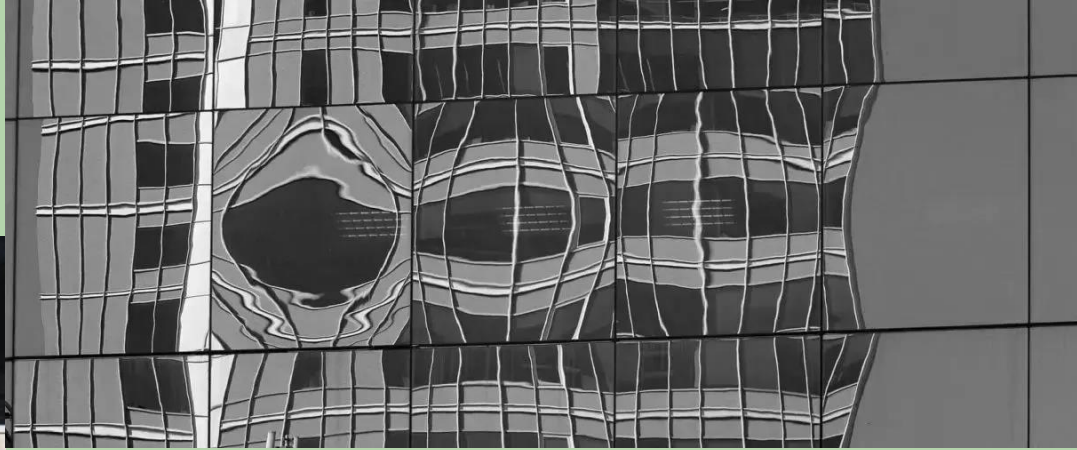


Stupanj prednaprezanja stakla

- 0 MPa

- 30-50 MPa

> 90 MPa



Roller – Wave Distorzija





Diferencijalni pritisak

LAMINIRANO STAKLO

- glavne karakteristike:
 - Mehaničke karakteristike
 - Utjecaj geometrije
 - Puzanje
 - Niske i visoke temperature



UTJECAJ TEMPERATURE

- povećanjem temperature staklo se širi
- ako je temperatura jednolika na cijelom elementu on se jednoliko širi
- ako su pojedini dijelovi izloženi toplini, dolazi do nejednolikog širenja i pojave naprezanja (hladniji dijelovi se opiru širenju i nastaju vlačna naprezanja - najveća na rubovima)
- uslijed velikih naprezanja dolazi do otkazivanja (*toplinski šok*)

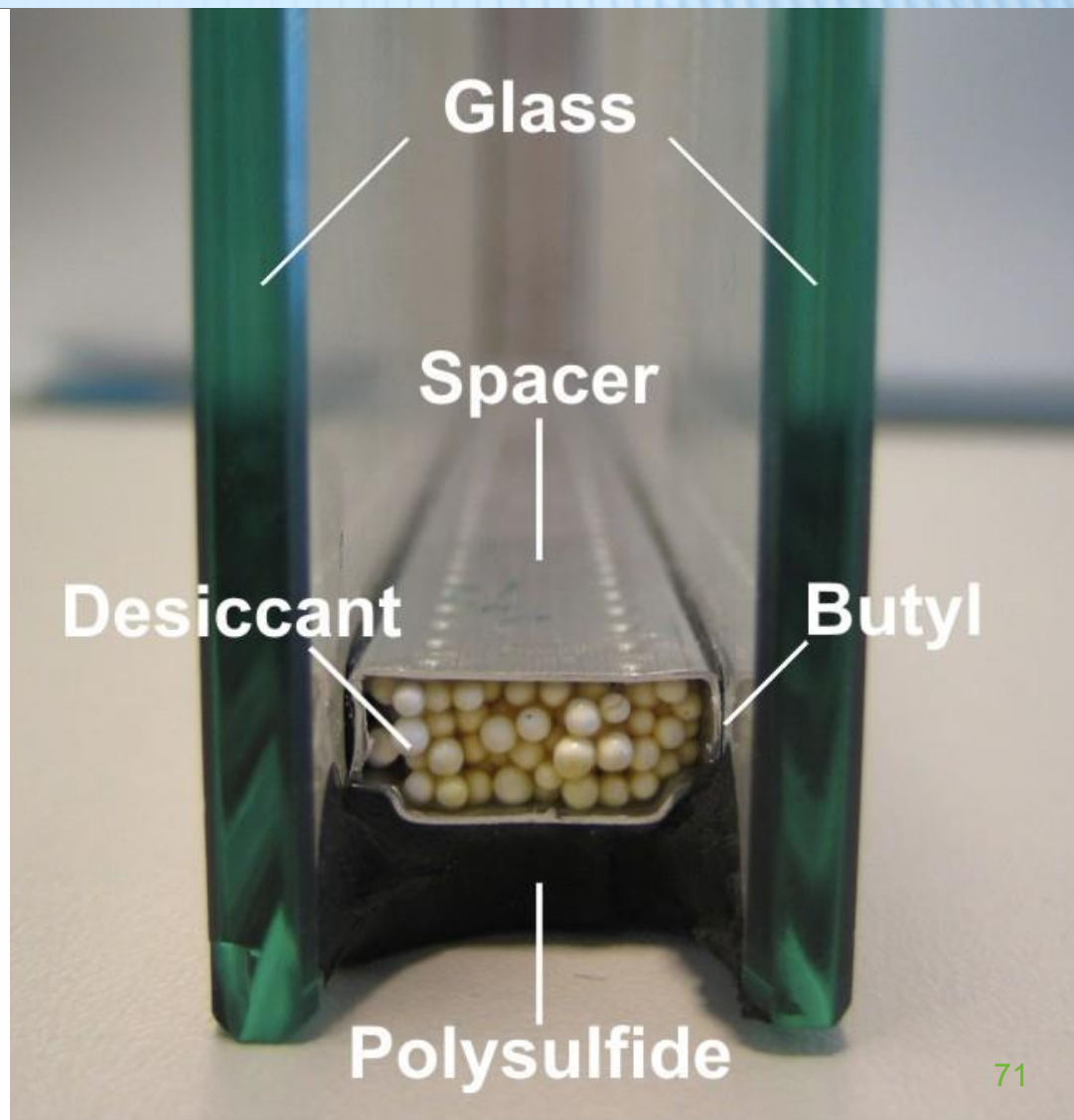
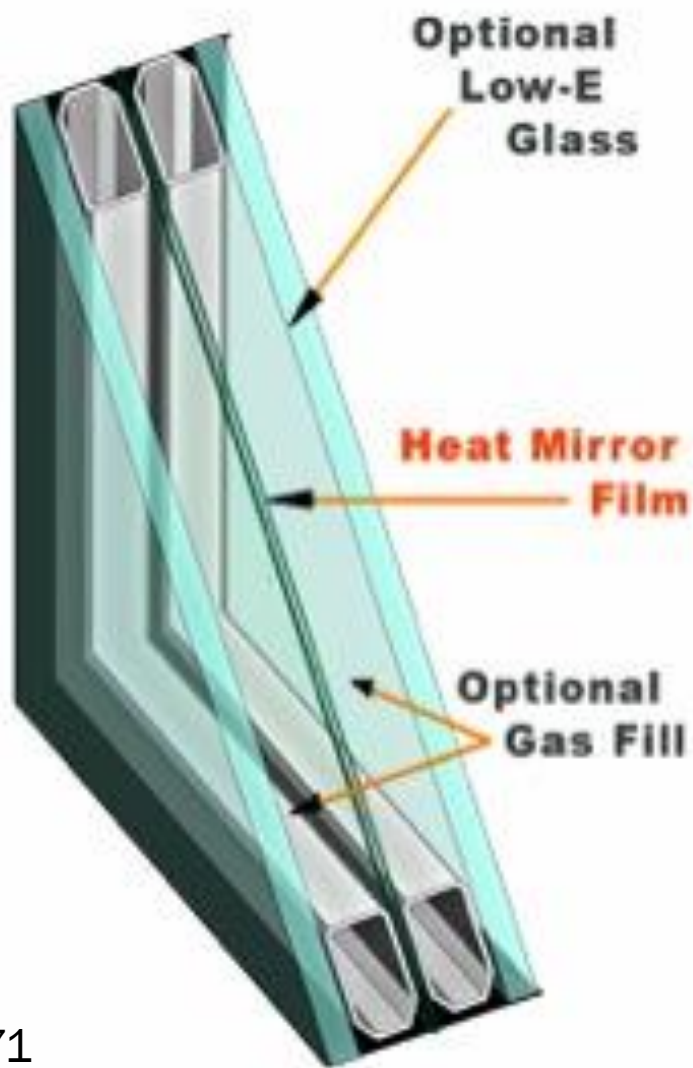


Coefficients of Expansion α

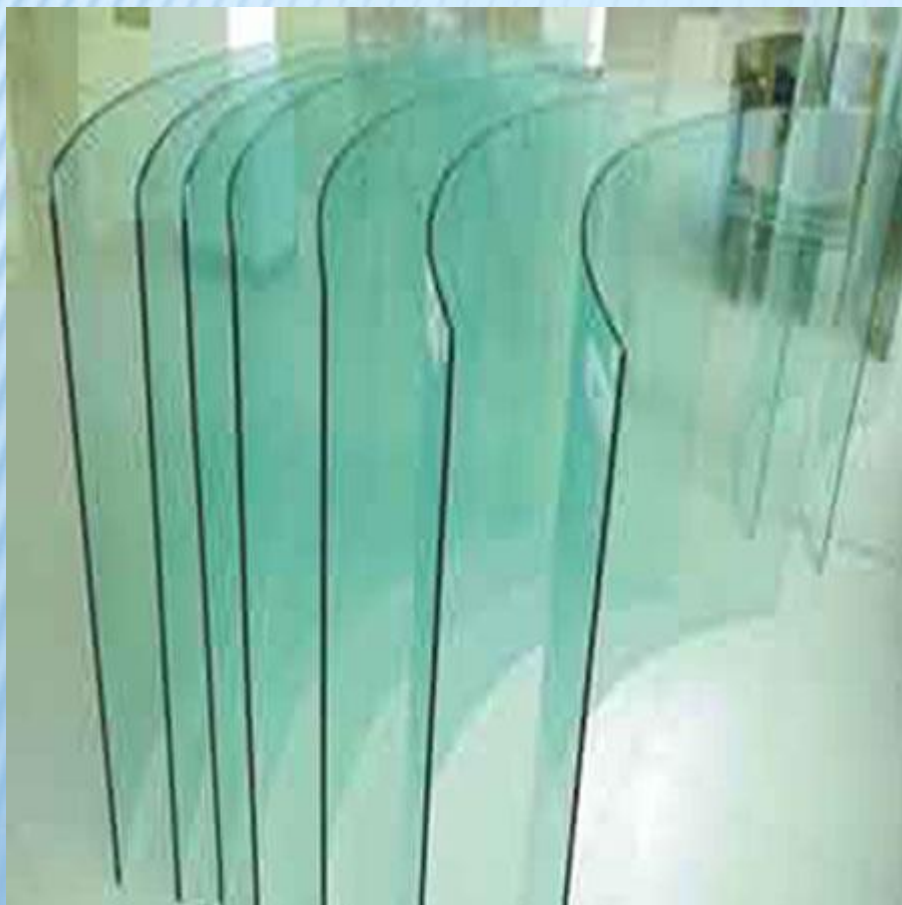
Material	inch/inch/degree F x 10^{-6}	cm/cm/degree C x 10^{-6}
Acrylic Plastic	40	72
Polycarbonate Plastic	38	68.4
Aluminum	13	23.4
Bronze (Arch 385)	11.6	21.9
Copper (110)	9.8	17.6
Stainless Steel (type 304)	9.6	17.3
Structural Steel	6.7	12.1
Concrete	6.0	10.8
Glass (float)	5.1	9.2

Koeficijent termalne ekspanzije (α)

ENERGETSKI UČINKOVITA STAKLA



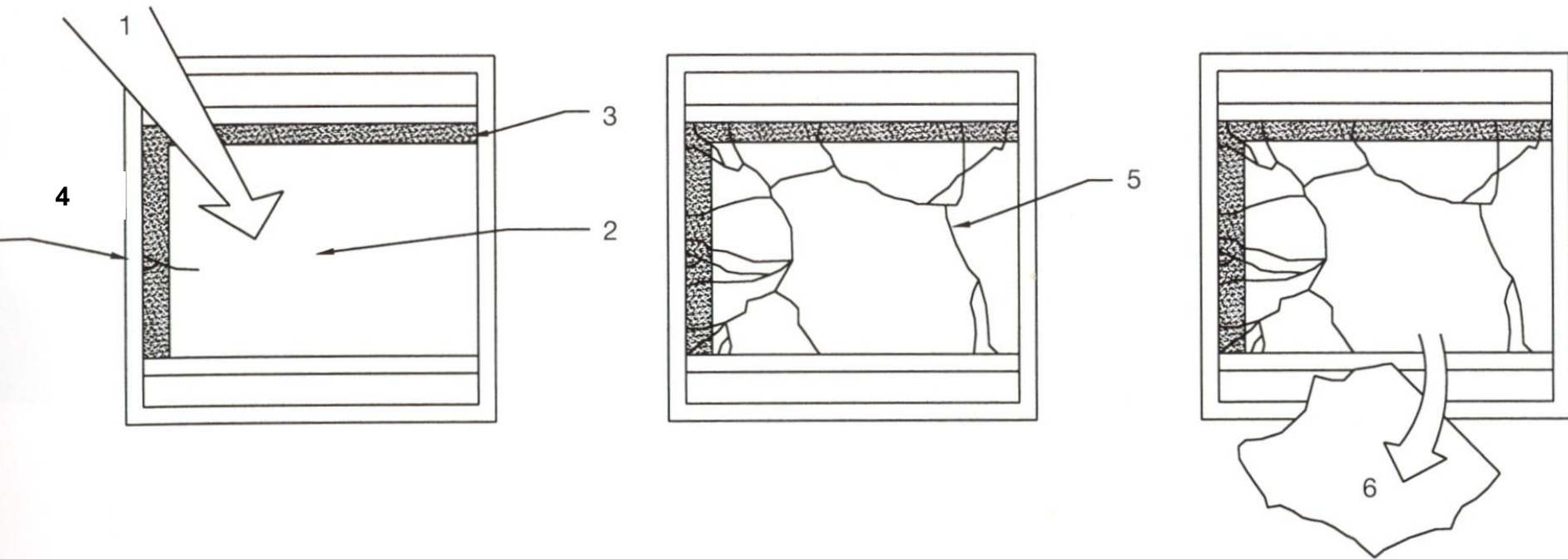
ZAKRIVLJENA STAKLA

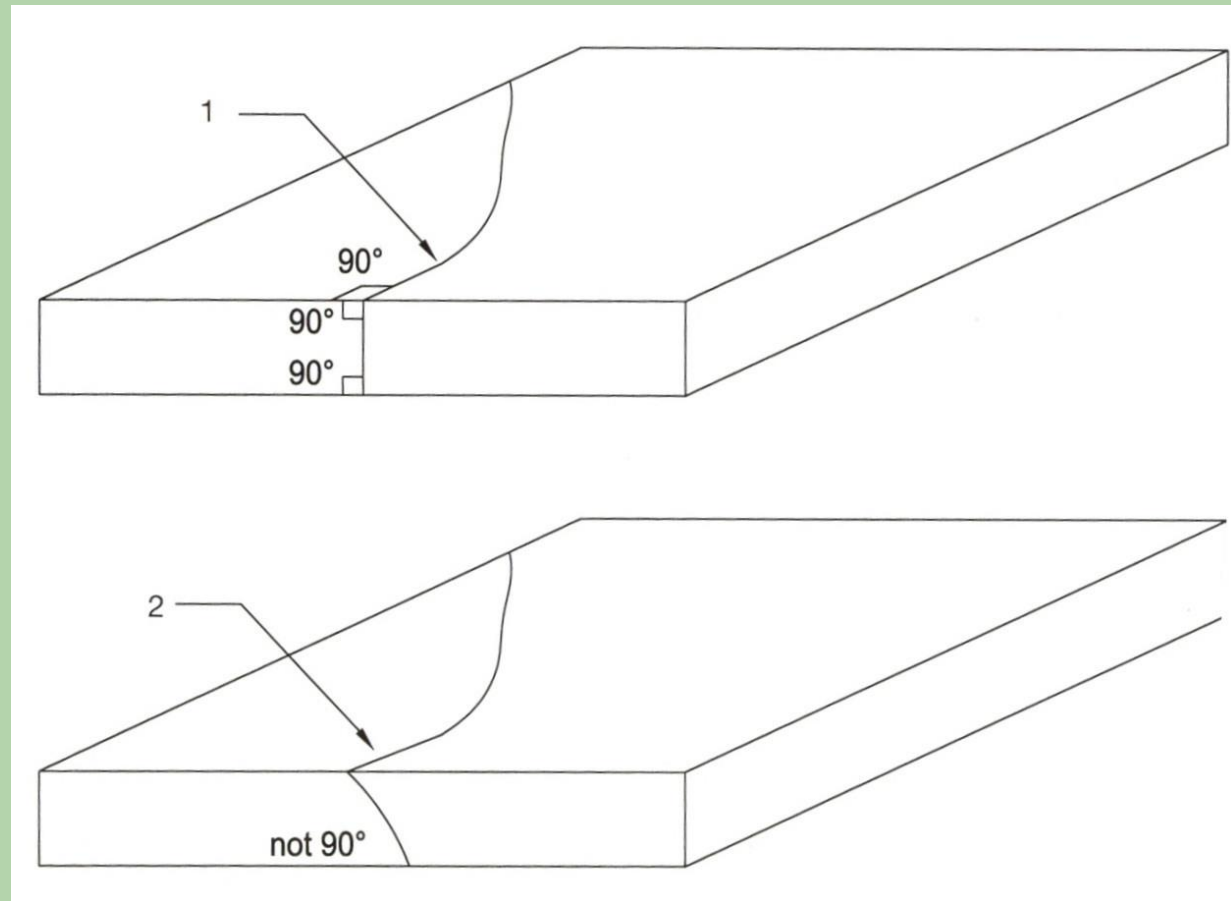




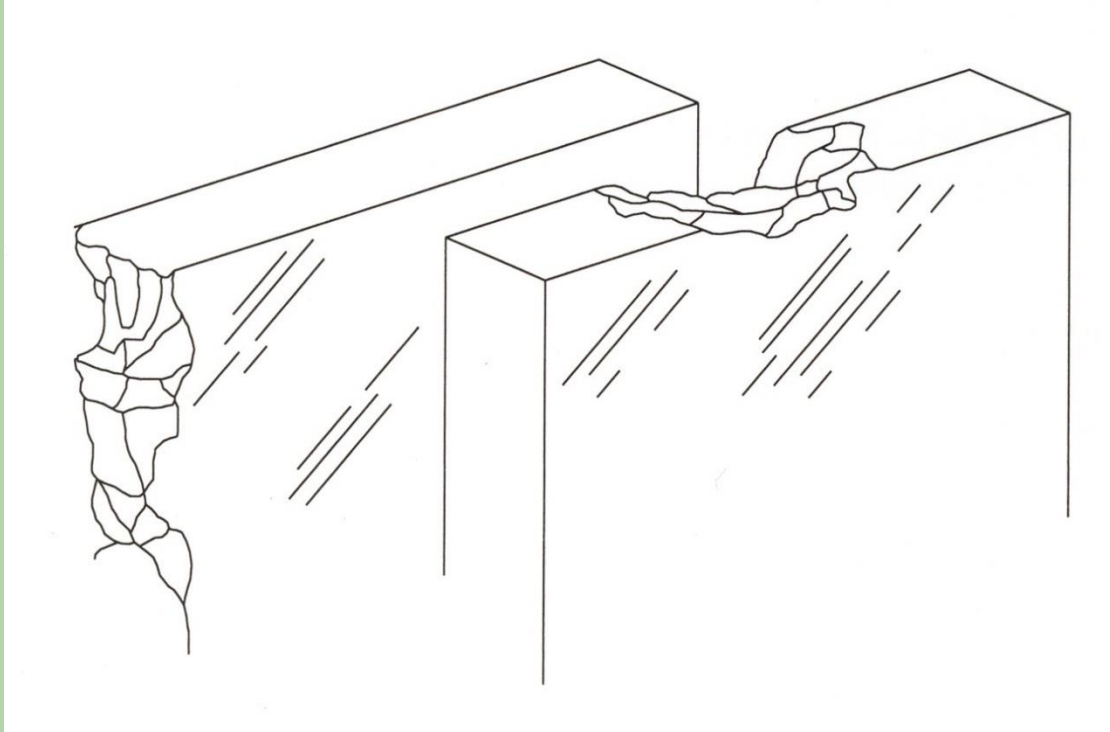
CNA Building, Chicago

MEHANIZAM OTKAZIVANJA



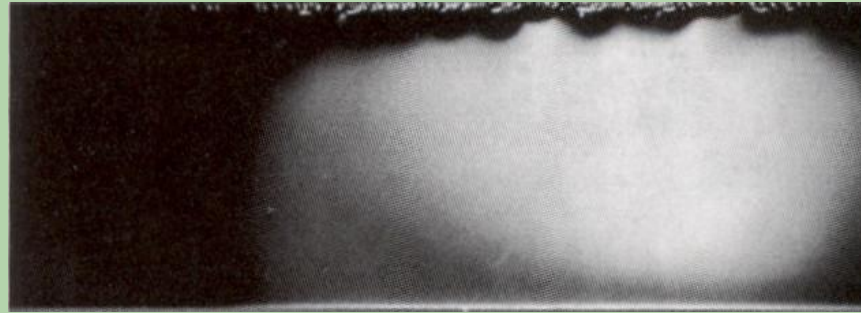
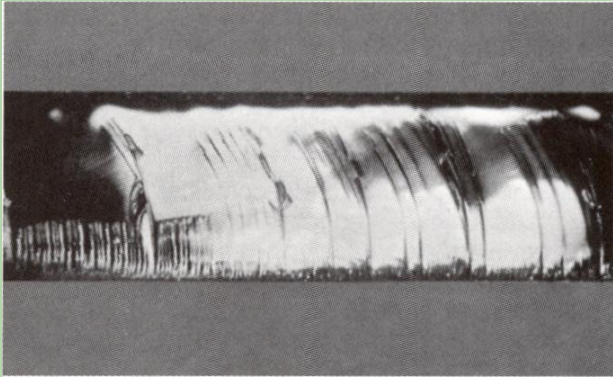


*Prepoznavanje uzroka otkazivanja: temperatura (1)
ostali uzroci - sigurno ne uslijed toplinske ekspanzije
(2)*

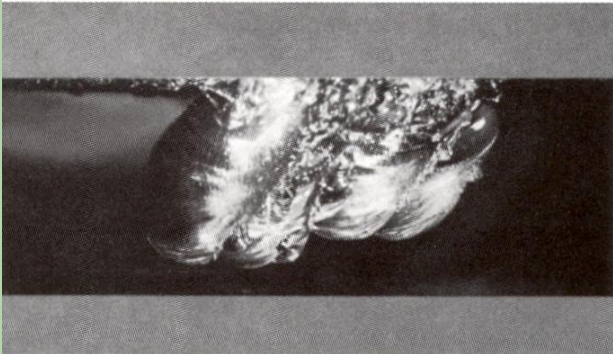
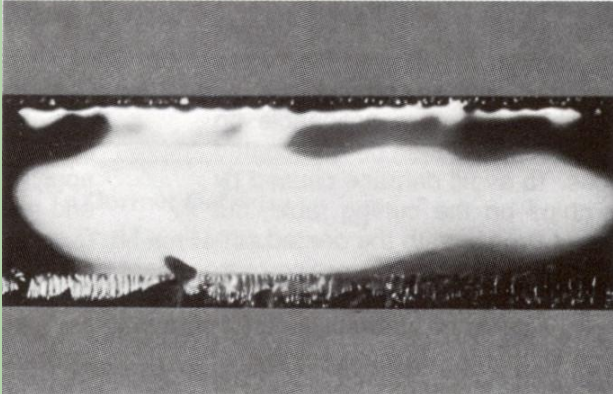


Imperfekcije na rubovima

- ovakve imperfekcije mogu dovesti do otkazivanja uslijed temperature (*thermal failure*)



Kvalitetni rubovi (bez imperfekcija)



*Imperfekcije koje
treba izbjegavati*