

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Gutnik, T., 2015. Steklo kot konstrukcijski material. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B.): 89 str.

Datum arhiviranja: 01-04-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Gutnik, T., 2015. Steklo kot konstrukcijski material. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B.): 89 pp.

Archiving Date: 01-04-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

TADEJ GUTNIK

STEKLO KOT KONSTRUKCIJSKI MATERIAL

Diplomska naloga št.: 3433/KS

GLASS AS A CONSTRUCTION MATERIAL

Graduation thesis No.: 3433/KS

Mentor:

prof. dr. Boštjan Brank

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:

doc. dr. Franc Sinur

doc. dr. Primož Može

izr. prof. dr. Matjaž Dolšek

Ljubljana, 31. 03. 2015

ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Tadej Gutnik izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Steklo kot konstrukcijski material«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 13. 3. 2015

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.012.6 (0.43.2)
Avtor:	Tadej Gutnik
Mentor:	Prof.dr. Boštjan Brank, univ.dipl.inž.grad.
Naslov:	Steklo kot konstrukcijski material
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študijski program
Obseg in oprema:	89 str., 14 pregl., 45 sl.
Ključne besede:	Stekleni panel, laminatno steklo

Izvleček

Cilj diplomske naloge je predstaviti uporabo stekla v gradbeništvu, ne samo kot glavnega elementa zasteklitve, ampak tudi kot konstrukcijskega materiala, ki je sposoben prenašati različne (nezanemarljive) obtežbe. Trenutni arhitektski trendi in tehnološki razvoj nakazujejo do sedaj nepredstavljivo uporabo stekla v arhitekturi in gradbeništvu - predvsem ko gre za velike steklene površine - ter na novo definirajo vlogo stekla v gradbeništvu – tudi kot konstrukcijskega materiala.

V uvodnem delu diplomske naloge je predstavljena zgodovina stekla. Sledi pregled kemijskih in fizikalnih lastnosti stekla ter opis vrst stekla in njihove izdelave, kjer sem se osredotočil na stekla, ki se uporabljajo kot konstrukcijska, to so lamelirana in toplotno obdelana stekla. Prikazani so tipični spoji pri steklenih konstrukcijah. V osrednjem delu naloge so predstavljeni trenutni postopki načrtovanja nosilnih steklenih konstrukcijskih elementov, v zadnjem delu naloge pa so podani računske primeri, ki se nanašajo na tipične steklene panele.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK:	624.012.6 (0.43.2)
Author:	Tadej Gutnik
Supervisor:	Prof.Ph. Boštjan Brank, b.sc.
Title:	Glass as a construction material
Document type:	Graduation Thesis – University Studies
Notes:	89 p., 14 tab., 45 fig.
Key words:	glass panel, laminated glass

Abstrakt

The goal of this thesis is to analyse technical characteristics and usability of glass, used in construction not just as main element of glazing, but also as construction material, which has ability to carry the loads. I will represent recent procedures of planing with carry – load glass construction element. Presented are the current procedures in the design of load-bearing glass construction elements.

In the introductory part of the thesis is presented the history of glass and glass features. Followed by an overview of the chemical and physical properties of glass, and the production of glass. Later, I focused on the current standards, and calculations in the use of glass as a carrier material.

ZAHVALA

Posebna zahvala gre mojim staršem za podporo in potrpežljivost pri vseh mojih odločitvah ter mi v težkih trenutkih vedno stali ob strani.

Hvala mentorju prof. dr. Boštjan Branku za strokovno svetovanje, literarno podporo ter potrpežljivost pri nastajanju diplomskega dela.

Hvala prav vsem, ki so mi skozi vsa leta stali ob strani, sodelovali pri študiju ali nastajanju diplomskega dela.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Motiv za izbiro teme.....	1
1.2	Zgodovina stekla.....	2
1.3	Funkcije stekla.....	5
2	STEKLO KOT GRADBENI MATERIAL.....	9
2.1	Kemijske in fizikalne lastnosti stekla.....	9
2.1.1	Kemijske lastnosti.....	9
2.1.2	Fizikalne lastnosti.....	13
2.2	Vrste stekel v gradbeništvu.....	15
2.2.1	Plosko steklo.....	15
2.2.2	Žično steklo.....	17
2.2.3	Steklena vlakna za armiranje.....	17
2.2.4	Steklo v betonu.....	18
2.2.5	Barvana stekla.....	18
2.2.6	Prevlčena stekla.....	19
2.2.7	Akrilno steklo.....	19
2.2.8	Izolacijsko steklo.....	20
2.2.9	Penjeno steklo.....	20
2.2.10	Profilno steklo.....	21
2.2.11	Laminatna stekla.....	21
2.2.12	Lito steklo.....	22
2.3	Tehnologija izboljšave in izdelave stekla.....	22
2.3.1	Toplotna obdelava stekla.....	23
2.3.2	Kemično utrjena stekla.....	28
2.3.3	Laminatna stekla.....	29
2.3.4	Upogibna trdnost stekel.....	30
2.4	Spoji.....	30
2.4.1	Mehanski spoji: Samovrezni in gumbni vijaki.....	31
2.4.2	Torni spoji: Kleščni spoji in tlačne plošče.....	32

2.4.3	Lepljeni spoji.....	33
2.4.3.1	Strukturni silikonski spoji.....	34
2.4.3.2	Trda lepila.....	36
2.5	Tip in pozicija steklitev.....	37
3	RAČUNANJE STEKLENIH KONSTRUKCIJSKIH ELEMENTOV.....	45
3.1	Osnove postopka dopustnih napetosti.....	45
3.2	Priporočljivo razmerje razpon / debelina.....	46
3.3	Evropski standardi in načrtovalske metode.....	47
3.3.1	DELR načrtovalska metoda.....	47
3.3.2	Evropski standard prEN 13474.....	49
3.3.2.1	Povzetek Evropskega standarda prEN 13474-2.....	51
3.3.3	Shenova metoda.....	58
3.3.4	Siebertova metoda.....	59
3.3.5	Poenostavitve standardov.....	61
4	TLAČNO OBREMENJENI ELEMENTI IN STABILNOSTNI PROBLEMI...63	
4.1	Uklon stebra.....	64
4.1.1	Prenos obtežbe.....	66
4.2	Uklon plošče.....	68
5	RAČUNSKI PRIMERI.....	71
5.1	Stena iz enojnega stekla.....	71
5.2	Stena iz izolacijskega stekla.....	72
5.3	Streha iz laminatnega stekla.....	78
6	ZAKLJUČEK.....	87
	VIRI.....	88

KAZALO PREGLEDNIC

- Preglednica 1: Kemična sestava natrij-kalcijevega stekla
- Preglednica 2: Osnovne lastnosti stekel
- Preglednica 3: Upogibna trdnost stekel
- Preglednica 4: Dovoljene obtežbe za osnovno načrtovanje
- Preglednica 5: Dovoljene napetosti po principu Pilkingtonovih ugotovitev
- Preglednica 6: Maksimalno razmerje razpon proti debelini
- Preglednica 7: Obtežni primeri po standardu prEN 13474-2
- Preglednica 8: Dovoljene napetosti po standardu prEN 13474-2
- Preglednica 9: Pogoji uporabe brez računanja za majhne izolacijske steklene panele
- Preglednica 10: Faktor η_F pri Shenovi metodi
- Preglednica 11: Faktor η_D pri Shenovi metodi
- Preglednica 12: Koeficient k_2 za izračun efektivnih napetosti 4-robno podprtega panela
- Preglednica 13: Koeficient k_4 za izračun maksimalnih pomikov 4-robno podprtega panela
- Preglednica 14: Koeficient k_5 za izračun volumenske deformacije

KAZALO SLIK

- Slika 1: Barvano steklo pri Saint Chapelle, Pariz zgrajeno v letu 1246
- Slika 2: Tipična steklitev v lesenem okvirju v gradbeništvu 17. stoletja
- Slika 3: Indeksi gibanja cen na referenčnih trgih glede na leto 1995
- Slika 4: Ločitev vezi Si-O-Si z vstavitvijo Na₂O v mrežo stekla
- Slika 5: Primerjava grafov plastične rezerve stekla in jekla
- Slika 6: Kontinuirni postopek pridelave stekla
- Slika 7: Žično steklo
- Slika 8: Stekljena vlakna
- Slika 9: Steklo v betonu
- Slika 10: Barvano steklo: Katedrala Notre Dame
- Slika 11: Prevlečeno steklo
- Slika 12: Akrilno steklo
- Slika 13: Dvoslojno izolacijsko steklo
- Slika 14: Vgradnja penjenega stekla pred temeljenjem
- Slika 15: Profilno U – steklo
- Slika 16: Laminatno fasadno steklo
- Slika 17: Lito kopalniško steklo
- Slika 18: Tipi stekel
- Slika 19: Principi toplotne obdelave
- Slika 20: Primerjava lomnega vzorca
- Slika 21: Postopek kaljenja stekla
- Slika 22: Faze porušitve laminatnega stekla (rezidualna nosilnost)
- Slika 23: Porušitev zaradi temperaturnih sprememb
- Slika 24: Spontani zlom zaradi nečistoč nikljevega sulfata
- Slika 25: Primerjava napetosti kemičnega in toplotnega tempiranja
- Slika 26: Obnašanje laminatnih stekel po zlomu
- Slika 27: Razvoj tipičnih podpor stekla
- Slika 28: Gumbni spoj
- Slika 29: Tipični primer samovreznega spoja
- Slika 30: Kleščni spoj

Slika 31: Primerjava poteka napetosti

Slika 32: Trdnost pri kratkotrajni obremenitvi lepila v odvisnosti od temperature

Slika 33: Trdnost lepila pri dolgotrajni obtežbi v odvisnosti od časa

Slika 34: Tipično linijsko podprti stekleni paneli z EPDM polnilom

Slika 35: Prikaz računskih modelov in preizkusa upogiba steklenega panela

Slika 36: Nadglavna nepohodna steklitev

Slika 37: Pohodna steklitev (Veliki kanjon)

Slika 38: Problem stabilnosti in obnašanje tlačnih elementov

Slika 39: Uklonski model

Slika 40: Prečni prerez laminatnega stekla dveh (levo) ali treh (desno) panelov

Slika 41: Vpliv rezidualnih napetosti in materialne trdnosti na uklonsko trdnost

Slika 42: Različni načini uklona plošče

Slika 43: Štiri robno podprta prostoležeča plošča; tlak (levo), strig (desno)

Slika 44: Vertikalni stekleni panel, podprto samo na vrhu in dnu

Slika 45: Štiri-robno podprt vertikalni stekleni panel, prerez steklenega panela

OKRAJŠAVE

KS	kaljeno steklo
NiS	nikljev sulfat
PKS	polno kaljeno steklo
RN	rezidualna nosilnost
TUS	termično utrjeno steklo

1 UVOD

1.1 Motiv za izbiro teme

Steklo je že od nekdaj fasciniralo ljudi, vse od nastanka pred 4000 leti. Od takrat je v gradbeništvu tako rekoč stalno prisotno. Steklo je eden izmed pomembnejših gradbenih materialov, saj njegova zmožnost prepuščanja svetlobe omogoča naravni svetlobi prehod v notranjost stanovanj, hiš in drugih poslopij. Prav tako ne moremo zanikati estetske vrednosti, ki jo imajo poslopja s stekleno fasado. Vendar pa se dandanes od zasteklitve pričakujejo še dodatne lastnosti, kot so pomoč pri upravljanju klimatskih pogojev v zgradbi ter zagotavljanje udobnejših in varnejših delovnih in domačih prostorov. Steklo ima pomemben vpliv na ekonomični in naravovarstveni del gradnje. Stroški stekla pri zgradbah zajemajo do 30 % stroškov gradnje, steklo vpliva na ogrevanje, ohlajevanje in osvetljenost v zgradbah. Uporaba stekel v gradbeništvu je v zadnjih letih narasla za 5 %, uporaba za obnovljive energijske namene pa za 15 % na leto [1]. Steklo vpliva tudi na poškodbe zgradb, saj je kar 80 % poškodb v zgradbah povezanih s steklom. Dosedanje inovacije so omogočile nove priložnosti za načrtovanje robustnih, učinkovitih in lepih konstrukcij, kar pa predstavlja izziv pri načrtovanju in gradnji. Glavna ovira napredka je »zaprtost« steklene proizvodnje, saj kljub veliki uporabi, steklo ni tako preučeno kot drugi materiali. Posledica tega je pomanjkljiva standardizacija, ki kljub nekaterim navodilom ni zadostna, saj se pogoji uporabe stekla spreminjajo tako rekoč pri vsaki konstrukciji.

Cilj diplomske naloge je bolje predstaviti karakteristike stekla in uporabnost stekla v gradbeništvu ne samo kot materiala zasteklitve, ampak tudi kot material za konstrukcijske elemente, ki so sposobni prenašati pomembne obtežbe. Predstavil bom trenutne postopke načrtovanja steklenih konstrukcijskih elementov.

1.2 Zgodovina stekla

Naravno steklo obstaja že »od nekdaj«, saj so se nekatere kamnine ob pojavih, ki povzročijo visoko temperaturo, kot na primer vulkanski izbruhi, udarci strele ali pa trčenje meteoritov, stopile, nato pa hitro ohladile in strdile v steklo. V kameni dobi je obsidian človek uporabljal kot orodje za rezanje. Kot je zapisal starorimski zgodovinar Plinij, naj bi steklo odkrili feničanski trgovci, ki so prevažali kamenje na področju Sirije okrog 5000 let pred našim štetjem. Plinij je poročal, da so trgovci pristali na obali, postavili lonec za kuhanje na nekaj kosov natrona, ki so ga prenašali kot tovor in zakurili ogenj, da bi pripravili obrok. Na njihovo presenečenje pa se je pesek pod ognjem stopil v tekočino in se nato ohladil in strdil v steklo.

Prvi izdelki iz stekla, večinoma gre za neprozorne steklene bisere, naj bi segali v okrog 3500 let pred našim štetjem, našli pa so jih v Egiptu in vzhodni Mezopotamiji. Votla steklena telesa naj bi prvi izdelovali egipčanski obrtniki po letu 1500 pred našim štetjem in sicer s tehniko peščenega jedra. Na kovinsko palico so dali mešanico gline in gnoja in jo oblikovali tako, kot naj bi izgledale notranje stene zelene posode. Tako imenovano peščeno jedro so potopili v posodo z raztopljenim steklom. Med celotnim postopkom so izdelek segreli in površino gladili na ploščatem kamnu. Roč, stojalo in vrat so pritrdili naknadno, nato pa so steklo ohladili. Nazadnje so palico odstranili in izpraskali peščeno jedro. To tehniko so uporabljali le za izdelavo manjših posod, kot so vaze in posode za kozmetiko.

Prvo navodilo za izdelavo stekla sega v leto 650 pred našim štetjem, in pravi: "Vzemi 60 delov peska, 180 delov pepela iz morskih rastlin, 5 delov solitra, 3 dele krede, jih pomešaj in dobil boš steklo" [2].

V drugem stoletju pred našim štetjem so Feničani prišli do revolucionarnega odkritja, da je s pihanjem steklo moč oblikovati na vse mogoče načine. Pihanje stekla se je kmalu razširilo in do 19. stoletja je to ostala najpomembnejša tehnika oblikovanja steklenih posod.

Steklopihaška cev je dolga do 1,20 metra in ima ustnik. Pihalec stekla s koncem cevi zajame majhno količino staljenega stekla in jo povalja po leseni ali kovinski plošči sem ter tja, da mu da zunanjo obliko in snov malce ohladi. Nato piha v cev in naredi mehur. S ponovnim

segrevanjem, pihanjem in valjanjem lahko steklo obdeluje toliko časa, dokler ne doseže zelene oblike in trdote.

Pihanje stekla, ne tako draga in dolgotrajna metoda proizvodnje stekla, je prek Sirije prišla do Rima in postopoma izpodrinila stare tehnike. Ker je bilo s pihanjem moč izdelati veliko količino izdelkov, je steklo iz cenjenega postalo vsakdanje blago, ki ga je moč uporabljati za okensko steklo, kozarce in posode vseh vrst. S tem je bila povezana tudi sprememba okusa; medtem ko so prejšnje metode poudarjale barvo in vzorec, so s pihanjem dobili tanko in prozorno steklo. Poleg tega je konec 1. stoletja v modo prišlo brezbarvno steklo. Z odkritjem le-tega (z dodatkom manganovega oksida) so Rimljani okrog leta 100 v Aleksandriji začeli steklo uporabljati v gradbene namene. Lita steklena okna, čeprav optično nizko kvalitetna, so se začela pojavljati na najpomembnejših zgradbah v Rimu in najrazkošnejših vilah v Herculaneumu in Pompejih.

Propad rimskega cesarstva je s seboj pripeljal tudi zaton v izdelavi stekla za vsakdanjo rabo. Šele v srednjem veku se je v srednji Evropi zopet pojavila omembe vredna proizvodnja stekla. V 11. stoletju so nemški obrtniki izdelali tehniko pridobivanja ploskega stekla, ki so jo potem nadalje razvili beneški obrtniki v 13. stoletju. Za razliko od Rimljanov, ki so plosko steklo vlivali v vlažne lesene modele, so v srednjem veku steklene plošče pridobivali s pihanjem. Najprej so napihnilo cilindri, ki je bil dolg do tri metre in širok do 45 centimetrov, ga po dolžini prerezali, razprostrli in pogladili. Še do konca 19. stoletja so plosko steklo izdelovali po tem postopku.

V srednjem veku so cilindrični postopek pridobivanja stekla izpopolnili, vendar je bilo steklo izredno drago in se je uporabljalo le za zasteklitev reprezentančnih zgradb oz. palač. Barvna okna so dosegla svoj vrh proti koncu srednjega veka, ko je bilo vedno večje število javnih zgradb, gostišč in bogatih domov opremljenih z prozornim ali barvnim steklom, okrašenim z zgodovinskimi motivi ali grbi.



Slika 1: Barvano steklo v Saint Chapelle, Pariz
zgrajeno v letu 1246 [3]



Slika 2: Tipična steklitev v lesenem
okvirju v gradbeništvu 17. stoletja [3]

Steklo so začeli masovno proizvajati šele proti koncu industrijske revolucije. Ključna osebnost in eden izmed očetov modernega raziskovanja stekla je bil nemški znanstvenik Otto Schott (1851-1935), ki je z znanstvenimi metodami preučeval učinke številnih kemijskih elementov na optične in termične lastnosti stekla. Proti koncu 19. stoletja je ameriški inženir Michael Owens (1859-1923) izumil stroj za pihanje steklenic, ki se je začel uporabljati v Evropi šele v začetku 20. stoletja. V izdelavi ploskega stekla pa je šele leta 1905 prišlo do prve prave novosti, ko je Belgijec Fourcault prvič vertikalno iz taline povlekel nepretrgano ploščo stekla. Pred tem so stopljeno steklo zlili na velike platoje, jih povaljali v plošče, ohladili, zbrusili in položili, nato pa po istem postopku obdelali še drugo stran. Po drugi svetovni vojni pa je v izdelavi ploskega stekla največji pomen dobil kontinuirni postopek pridelave stekla, ki so ga razvili v britanski tovarni Pilkington leta 1959, saj je omogočil izdelavo kvalitetnega stekla za razmeroma nizko ceno. Na takšen način pridobljeno steklo ima odlične optične lastnosti. Pri ploskem steklu sta obe površini povsem vzporedni in brez napak. Plosko steklo je danes osnova za vse zastekljene elemente.

V zadnjih štiridesetih letih se tehnološki razvoj pridelave stekla nadaljuje in tudi v hitro se razvijajoči informacijski tehnologiji je steklo postalo skoraj nenadomestljiva snov. Dokončno priznано ter zaželeno je steklo postalo v 1990-tih, saj steklo omogoča kvaliteto steklenih

zgradb, ugoden vpliv na splošno počutje, zanesljivost in enotno fasado. Z razvojem lepil in kvalitetnih stikov se je začela masovna gradnja steklenih fasad, ki so vplivale še na razvoj ostalih vej uporabe stekla. V prihodnosti bo steklo ostalo pomemben material, saj do sedaj niso odkrili nobene snovi s tako enkratnimi lastnostmi kot jih ima steklo, ki bi jo lahko tako mnogostransko uporabili. Za tako odkritje pa tudi ni nobene potrebe, saj je glavna sestavina stekla, silicijev dioksid, v zemeljski skorji druga najpogostejša snov.

1.3 Funkcije stekla

Okna dajejo pomemben pečat estetskemu videzu fasade, hkrati pa morajo poskrbeti za pravilno prezračevanje in osvetlitev prostorov ter povezati človeka z naravo.

Poleg tega morajo sodobna okna ustrezati tudi številnim funkcionalnim zahtevam, kot so zaščita pred mrazom, vročino, hrupom, vetrom, dežjem, vandalizmom in ognjem.

Funkcionalni kriteriji za okna oz. posamezne dele stavbe, morajo biti določeni že v fazi projektiranja. Ta nalaga konstruktorjem oken in fasad celo vrsto dodatnih nalog, saj morajo pri načrtovanju upoštevati različne zakone, pravilnike, predpise, standarde in tehnične smernice.

Zaradi različnih potreb in posebnih gradbeno-fizikalnih zahtev se naloge okna delijo na:

Primarne funkcije:

- nosilnost in odpornost na obtežbe
- zaščita pred dežjem, vetrom in mrazom
- transparentnost: prozornost in prosojnost
- zagotavljanje dnevne svetlobe
- omogočanje komuniciranja z okolico
- prezračevanje

Dodatne funkcije:

- toplotna zaščita
- zaščita okolja
- zvočna zaščita
- zaščita pred soncem
- zaščita objekta in ljudi
- požarna zaščita

- omogočanje izkoriščanja sončne energije
- zagotavljanje ugodnega počutja

Sedanost in prihodnost stekla

Arhitekti iščejo rešitve, ki bodo okoliški naravni vpliv pripeljali v notranjost stavbe in pri tem optimalno izkoristili naravno svetlobo. To se lahko doseže z uporabo velikih steklenih površin na fasadah in strehah in z uporabo celotnih steklenih fasad, kjer je steklo konstrukcijski del stavbe. Okna dajejo pomemben pečat estetskemu videzu fasade, hkrati pa morajo poskrbeti za pravilno prezračevanje in osvetlitev prostorov ter povezati človeka z naravo.

Fasada in zaščita pred soncem

Zahtevo, da je ob naravni svetlobi mogoče bivati in delati tudi globlje v notranjosti stavbe, zlahka uresničimo z uporabo stekla. Z dobitkom dnevne svetlobe pa skozi steklo istočasno dobimo dodatek energije, ki je v odvisnosti od namena zgradbe in letnega časa, več ali manj zaželen. V primeru sončnega sevanja lahko s pravilnim načrtovanjem uspešno ohranimo ravnovesje med koristnim dobitkom energije v zimskem času in porabljeno energijo za ohlajevanje poleti. Tako lahko z uporabo sodobnih sončno – zaščitnih stekel bistveno zmanjšamo porabo energije, ki je potrebna za prezračevanje in klimatizacijo.

Zasteklitev

Zasteklitev vpliva na toplotne izgube, zaščito pred hrupom, pomemben pa je tudi prehod svetlobe in sončnega sevanja. Idealna zasteklitev bi bila taka, ki ne bi prepuščala toplote iz prostorov v zimskem času, ščitila prostor pred hrupom, pozimi bi prepuščala sončno sevanje, poleti pa ga odbijala, podnevi bi prepuščala svetlobo, ponoči pa ne, biti pa bi morala tudi nezdroljiva, tako da bi ščitila pred možnostjo vdora, pa še kakšna zahteva bi se našla.

Možnosti izbire glede posameznih lastnosti so:

- glede toplotne izoliranosti bomo na vsak način izbrali zasteklitev z nizko-emisijskim nanosom in s plinskim polnjenjem ($U = 1,1-1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$), saj razliko v ceni glede na klasično dvoslojno zasteklitev povrnemo s prihranki energije v dveh do treh letih.

- glede zvočne izoliranosti lahko izberemo zasteklitev s povečano izolativnostjo, kar dosežemo s stekli različne debeline, polnjenjem s posebnim plinom, z lepljenimi stekli in podobno
- glede zaščite pred toplotnim sevanjem lahko izberemo okna s posebnimi nanosi, premazi in s folijami, ki odbijajo del sončnega sevanja in ščitijo prostor pred pregrevanjem, bleščanjem in ultravijoličnim sevanjem. Žal ti nanosi tudi zmanjšajo svetlobno prepustnost, tako da se zmanjša osvetljenost prostorov, pozimi pa zmanjšujejo možnost za pasivno izkoriščanje sončne energije
- druge zahteve, ki jih lahko izpolnjuje zasteklitev, pa so predvsem glede trdnosti in zaščite pred vlomom ali udarci trdih predmetov – uporabimo lahko kaljena stekla ali stekla z mrežo.

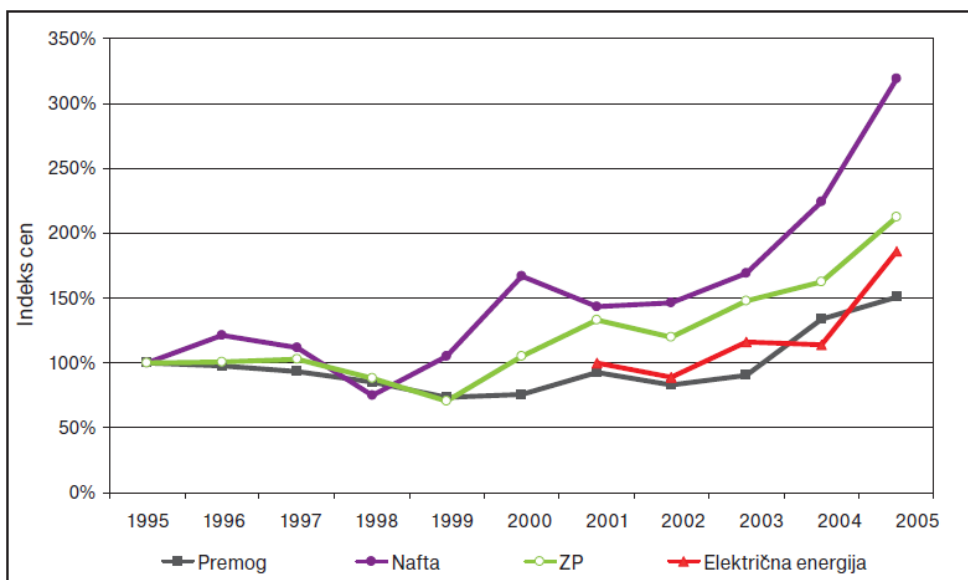
Energetsko učinkovita zasteklitev okna

Okna so eden izmed bistvenih elementov vsake zgradbe, saj omogočajo dnevno osvetlitev prostorov, vidni stik z okolico, zajem sončne energije in prezračevanje prostorov. Če bi obravnavali stavbo le z vidika energetske učinkovitosti, idealna stavba sploh ne bi imela oken. Sodobna okna z nizko toplotno prevodnostjo in majhno zračno prepustnostjo zmanjšujejo transmisijske toplotne izgube in s tem ugodno vplivajo na toplotno bilanco stavbe ter z njo povezanimi stroški.

Visoko kotiranje nafte na blagovni borzi, drastičen porast cen goriv na črpalkah, pritožbe uporabnikov zaradi dviganja cen za zemeljski plin in nenazadnje uporaba nafte in plina kot sredstva pritiska – to so v zadnjih 30 letih časopisni naslovi, kako se obnašati z omejenimi viri fosilnih energetov, da na eni strani ne oviramo gospodarskega razvoja, na drugi pa da ne obremenimo okolje.

Zgorevanje naravnih in fosilnih goriv, kot so kurilno olje, les in premog, spremlja visoka emisija škodljivih snovi, ki zelo obremenjujejo atmosfero. Z akcijskim planom, objavljenim leta 2006, želi Evropska komisija razširiti energetske učinkovitost na evropsko raven. Zaradi tega naj bi se energijska učinkovitost do leta 2020 dvignila za 20 % [4]. Upoštevanje strožjih varčevalnih kriterijev energije in njene učinkovitosti je predvideno tudi pri gradnji novih zgradb in sanacijah obstoječih. To pomeni strm vzpon za steklarstvo in proizvodnjo oken, še posebej če upoštevamo, da izgube ogrevalne energije skozi slabo izolirana okna še vedno predstavljajo

do 37 % vseh toplotnih izgub posamezne hiše [5]. Danes lahko z ekonomsko upravičljivimi stroški optimalno varčujemo z energijo in tako pomembno prispevamo k varovanju okolja.



Slika 3: Indeksi gibanja cen na referenčnih trgih glede na leto 1995 [6]

2 STEKLO KOT GRADBENI MATERIAL

2.1 Kemijske in fizikalne lastnosti stekla

2.1.1 Kemijske lastnosti

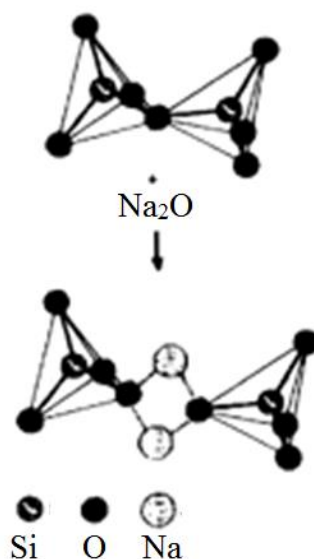
Steklo je trdna, brezbarvna ali barvna snov, ki nastane kot proizvod taljenja kremenca ali silicijevega dioksida z drugimi oksidnimi primesmi. V ožjem pomenu razumemo pod steklom samo strjeno talino nekaterih silikatov.

Glavna sestavina stekla je kremen, tj. silicijev dioksid (SiO_2). Najdemo ga predvsem v pesku, kjer pa je pomešan z različnimi nečistočami. Pesek deluje kot osnova stekla, tako da ustvari stekleno mrežo, na primer s pomočjo barvnih oksidov. Ker pa ti steklo obarvajo (npr. železov oksid steklo rjavo obarva), sme pesek vsebovati le 0,01–0,03 % železovega oksida. Kremen je glavna sestavina skoraj vseh stekel in od njega so odvisne tudi osnovne lastnosti in struktura stekla.

Silicijev dioksid je zelo trdna snov, kar je rezultat njegove zgradbe. Silicijevi atomi in atomi kisika, ki so v obliki tetraedra razporejeni okrog njih, tvorijo kristalno mrežo, pri čemer so atomi kisika znova povezani z atomi silicija. Nastane kristalna mreža, v kateri so vsi atomi med seboj povezani preko atomskih vezi. Kristalna mreža silicijevega dioksida je tako zelo podobna kristalni mreži diamanta.

Pri teh trdnih telesih ni moč govoriti o nobeni določeni kristalni strukturi, saj jih sestavljajo silikatni ioni zgrajeni iz tetraedrov SiO_4 , ki se držijo skupaj s kovinskimi ioni in so popolnoma neenakomerno razporejeni.

Pri amorfni (nekristalinični) snovi, kot je steklo, so molekule ali ioni neurejeni oz. urejeni le na zelo majhnih razdaljah, zato te snovi nimajo ostro omejenega tališča, ampak se zmehčajo v širših temperaturnih intervalih. Tako je tališče stekla med 500 °C in 1650 °C, odvisno od njegove sestave. V tej fazi oblikujemo steklo. Pri ponovnem segrevanju pa se steklo ponovno utekočini.



Slika 4: Ločitev vezi Si-O-Si z vstavitvijo Na₂O v mrežo stekla [2]

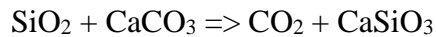
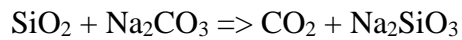
Kremen ima zelo visoko tališče, 1700 °C. Vzrok temu so močne Si-O vezi, ki se morajo pri taljenju prekiniti. Pri hlajenju je talina gosto tekoča in se na koncu strdi, ne da bi kristalizirala. Nastane kremenovo steklo. Podobno kot pri kremenu, so silicijevi atomi tudi v kremenovem steklu obdani s štirimi kisikovimi atomi v obliki tetraedra. Ti tetraedri pa niso razporejeni tako kot v kremenu, temveč so ostali v neredu, ki je bil navzoč v tekočini.

Kremenovo steklo je sorazmerno drago in zelo kvalitetno, saj ima zelo majhno toplotno razteznost, kar pomeni, da je zelo majhna nevarnost, da se steklo pri ekstremni spremembi temperature razleti. Poleg tega, da je kremenovo steklo obstojno proti toploti, je tudi odporno proti koroziji in prepustno za ultravijolične žarke.

Da bi bila izdelava stekla cenejša, pesku primešajo še nekatere druge snovi, večinoma sodo (Na₂CO₃). Ta snov kremenu zniža visoko tališče. V preteklosti so jo pridobivali iz egiptovskih jezer, ki so vsebovala sodo, ali pa tako, da so sežigali rastline, ki so vsebovala sodo, in nato luščili pepel. Danes sodo izdelujejo po Solvayevem postopku tako, da v raztopino kuhinjske soli uvajajo amonij

ak in CO₂, pri čemer se obarva natrijev hidrogenkarbonat ("soda bikarbona"), ki ga s segrevanjem prevedejo v karbonat, sodo. Pesku in sodi dodajo še zmleti apnenec (CaCO₃), ki steklu poveča trdnost in kemijsko odpornost proti številnim kemijskim snovem. Pri segrevanju

snovi izhaja ogljikov dioksid in nastajajo silikati, ki imajo podobno kot silicijev dioksid deloma mrežasto zgradbo.



Kot silikate označujemo različne kisline silicija. Te imajo deloma zelo zapleteno zgradbo. Najenostavnejša silicijeva kislina je ortosilicijeva kislina H_4SiO_4 .

Tudi silikati preidejo pri hlajenju v stekleno stanje. Nastalo steklo je mešanica natrijevega in kalcijevega silikata, imenovano natrijevo-kalcijevo steklo ali "običajno steklo". Ta vrsta stekla se uporablja najpogosteje, čeprav je manj kvalitetno kot čisto kremenovo steklo in se pri velikih temperaturnih spremembah razleti. Vzrok za to leži v strukturi nastalega stekla. V natrijevem-kalcijevem steklu niso sklenjene vse silicijeve vezi Si-O. Tu natrijevi ioni nevtralizirajo negativne naboje nevezanih kisikovih atomov na robovih tetraedrov SiO_4^{4-} .

Glede na uporabo stekla pri izdelavi, dodajajo tudi druge surovine, kot na primer različne okside, ki steklo obarvajo. Kobaltov oksid steklo obarva modro, aurati ga obarvajo rdeče (rubinasto), svinčev oksid pa povzroči večji lom svetlobe, zato ga uporabljamo za kristalno steklo. Tudi druga barvila se lahko v mikroskopsko majhni obliki porazdelijo v snovi. Steklo kalijo npr. s kalcijevim fosfatom, cinkovim dioksidom in kriolitom. Pogosta je tudi kasnejša obdelava z brušenjem ali jedkanjem s flourovodikom. Za pridobivanje čiste brezbarvne snovi dodajajo manganov dioksid, saj ta odstrani zeleno in rjavo obarvanje, ki ga povzročijo sledi železa.

Steklo je lahko tudi produkt organskih (npr. sladkor) ali anorganskih tekočin (npr. stopljen pesek) pa tudi večine tekočin pod pogojem, da je hitrost hlajenja dovolj velika, da njihova struktura tako rekoč zamrzne, preden se pojavi kristalizacija.

Steklo je odporno proti zraku, vodi in proti jedkim kemikalijam; je snov, ki postane pri ohlajanju na sobno temperaturo trdo in krhko. S spreminjanjem kemične sestave in načina izdelave, dobimo stekla, katerih lastnosti ustrezajo najrazličnejšim namenom uporabe.

Vrste stekel glede na kemijsko sestavo

Kremenovo steklo je izdelano brez primesi, je obstojno pri visokih temperaturah in prepustno za ultravijolične žarke, zato ga uporabljamo za halogenske žarnice in ultravijolične mikroskope. Poleg tega imajo zelo majhen koeficient razteznosti, tako da pri veliki spremembi temperature ne počí.

Natrijevo-kalcijevo steklo vsebuje 69-74 % kremenčevega peska, 10-16 % sode in 5-14 % apnenca. Sodo lahko nadomesti tudi natrijev sulfat in oglje. To steklo se lahko tali, saj se zmehča že pri 500 do 600 °C. To steklo je v veliki meri odporno proti kemijskim vplivom, le alkalne raztopine ga hitro najedajo. To je ceneno »običajno steklo«, ki se uporablja za okna, kozarce, ogledala in žično steklo. Steklo za steklenice izdelujejo iz še cenejših (manj čistih) surovin, zato vsebujejo tudi železove silikate, ki dajo steklu zeleno barvo, pa tudi aluminosilikate.

Preglednica 1: Kemična sestava natrij-kalcijevega stekla [7]

Komponenta	Kemična formula	Vsebina (masa %)
Kremenčev pesek	SiO ₂	69-74
Natrijev karbonat	Na ₂ O	10-16
Apnenec	CaO	5-14
Magnezij	MgO	0-6
Aluminij	Al ₂ O ₃	0-3
Ostalo		0.5

Boral steklo ali jensko steklo (borosilikatno), kjer je del SiO₂ zamenjan z B₂O₃ oziroma Al₂O₃, vsebuje 70-80 % kremenčevega peska (SiO₂), 7-13 % borovega trioksida (B₂O₃), 5-10 % sode in 2-7 % aluminijevega oksida (Al₂O₃). To steklo je zelo odporno proti kemikalijam in temperaturi. Zato ga uporabljamo za kemijsko steklovino in kuhinjsko posodje.

Kalijevo-kalcijevo steklo vsebuje kremenčev pesek (SiO₂), apnenec CaCO₃ in pepeliko (K₂CO₃). Ta vrsta stekla je težko taljiva, saj se zmehča pri 700 do 800 °C, zato ga uporabljamo za epruvete, kot »češko kristalno steklo« in »kronsko steklo« za optične naprave.

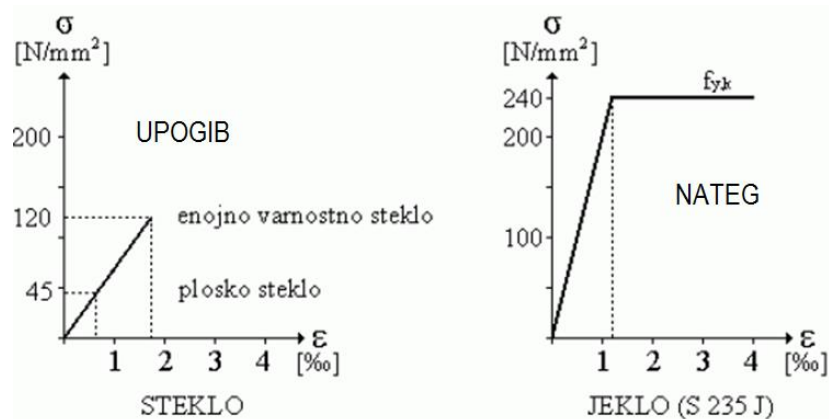
Pri gradnji so tipične uporabe:

- Okensko steklo; je značilna sestava iz 60 % kremenčevega peska, 14 % dolomita, 5 % apnenca, 1 % sulfata, 18 % natrijevega karbonata, dodana so lahko tudi barvila [6]
- Notranje zasteklevanje (ogledala, okrasna stekla, ...)
- Zaključni arhitekturni element stavbe (fasade, stebri, ...)

2.1.2 Fizikalne lastnosti

Steklo je zelo krhek material, pa tudi trden, saj prenese do 30-krat večje tlačne obremenitve kot beton. Ob majhnih tlačnih obremenitvah reagira skoraj popolnoma elastično, pri velikih pa hitro popusti, ker nima dovolj plastične rezerve za razliko od jekla in aluminija.

Teoretično velja, da je natezna trdnost (na molekularni bazi) izjemno velika in lahko doseže 6000 MPa do 10000 MPa, kar pa je nerelavantno za nosilnosti steklenega konstrukcijskega elementa. Dejanska natezna trdnost za inženirsko uporabo je mnogo manjša, ker površine steklenih panelov vsebujejo veliko število mehanskih napak, ki niso nujno vidne človeškemu očesu. Kot pri ostalih krhkih materialih, je tudi natezna trdnost stekla precej odvisna od površinskih napak. Pri nateznih obremenitvah postane steklo drobljivo, zaradi nekristalne molekularne strukture. Testiranje je pokazalo, da je nosilnost stekla probabilistična, kar nakazuje na nezanesljivost pri trdnosti samega materiala.



Slika 5: Primerjava grafov plastične rezerve stekla (levo) in jekla (desno) [3]

Natezna trdnost, ki ponavadi znaša med 28 in 56 MPa, lahko pri posebno obdelanem steklu preseže 70 MPa. Tlačna trdnost je približno 10-krat večja kot je natezna trdnost in znaša od 700 do 900 MPa. Upogibna trdnost je relativno nizka in znaša od 25 do 120 MPa. Odvisna je

predvsem od vrste stekla in znaša pri ploskem steklu 45 MPa, pri litem 25 MPa in 120 MPa pri kaljenem steklu.

Modul elastičnosti znaša približno 70000 N/mm^2 , strižni modul znaša približno 30000 N/mm^2 , koeficient toplotnega raztezka je okoli $8.5 \times 10^{-6}/\text{K}$, Poissonov količnik pa okoli 0.23.

Gostota stekla je lahko od 2000 kg/m^3 do 8000 kg/m^3 , povprečno pa 2500 kg/m^3 .

Preglednica 2 : Osnovne lastnosti stekla [7]

Lastnosti stekla	Simbol	Enota	Natrijevo-kalcijevo steklo	Borosilikatno steklo
gostota	ρ	kg/m^3	2 500	2 200-2 500
Youngov modul	E	MPa	70 000	60 000-70 000
Poissonov količnik	ν	-	0,23	0,2
koeficient toplotnega raztezka	α	10^{-6} K^{-1}	9	3,1 - 6,0
toplotna prevodnost	λ	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	1	1
emisivnost	ε	-	0,837	0,837

S pihanjem, valjanjem, vlečenjem in ulivanjem je steklo moč obdelati v vse možne oblike. Steklo je posebej pomembno zato, ker je pri njegovi izdelavi moč v veliki meri vplivati na njegove lastnosti. Steklo prav tako nima vonja, njegovo gladko površino pa je lahko očistiti. Ker površina nima por, steklo ne prepušča plinov.

Steklo je električni izolator, odporno je tudi proti skoraj vsem kemičnim vplivom, relativno hitro ga najedajo le flourovodikova kislina in taline hidroksidov alkalijskih kovin. Za jedkanje stekla uporabljajo flourovodikovo kislino in nekatere druge flourove kisline. Talina stekla ima drugačne lastnosti, saj do neke mere prevaja elektriko, ker se pri raztapljanju ioni sprostijo.

Steklo je slab toplotni izolator, s toplotno prevodnostjo $0,8 \text{ W/mK}$, kar je enako toplotni prevodnosti klasične opeke. Steklene stene so najbolj razširjen element naravnega ogrevanja stavb. Omogočajo pasivni zajem sončne energije po principu tople grede. Steklo ima namreč optično lastnost, ki jo imenujemo »učinek tople grede«. Močno prepušča valovne dolžine sončnega sevanja ($0.3 < \lambda < 3.0 \mu\text{m}$) in je nepropustno za valovne dolžine bližnjega sevanja

(IR sevanje), ki ga oddajajo telesa v prostoru. Skoraj polovico energijskega toka sonce oddaja pri valovnih dolžinah v vidnem delu spektra in preostanek kot toplotno in UV sevanje. Telesa, segreta na sobno temperaturo, sevajo v območju dolgovalovnega IR dela spektra.

Steklo ima veliko prednosti pred drugimi snovmi, predvsem zato, ker ga je mogoče stodontno predelati zaradi njegove raznolike in enkratne uporabnosti, okolju prijazne pridelave in okolju prijaznih produktov iz stekla, izjemne kemijske odpornosti in raznolikih optičnih lastnosti.

2.2 Vrste stekel v gradbeništvu

V gradbeništvu se uporabljajo predvsem natrijeva-kalcijeva stekla. Stekljeni proizvodi morajo poleg zagotavljanja pravilnega prezračevanja in osvetlitve prostorov, ustrezati še številnim drugim funkcionalnim zahtevam kot so zaščita pred vetrom, padavinami, požarom in vandalizmu.

Po načinu izdelave razlikujemo več vrst stekla:

- Izdelava stekel z vlečenjem (plosko steklo)
- Postopek izdelave stekla s plavajočo talino (plosko »float« steklo)
- Vlivanje-valjanje (plosko steklo, profili iz stekla)
- Stiskanje (izdelki: stekleni zidaki, stekleni strešniki, pohodne talne plošče)
- Pihanje-vrtenje (steklena vlakna, mineralna vlakna, steklena tkanina)
- Penjenje (penjeno steklo: plošče, bloki, granulati za lahki beton, malte, omete)

Poznamo različne steklene produkte, med katerimi pa se pogosto uporabljajo naslednji:

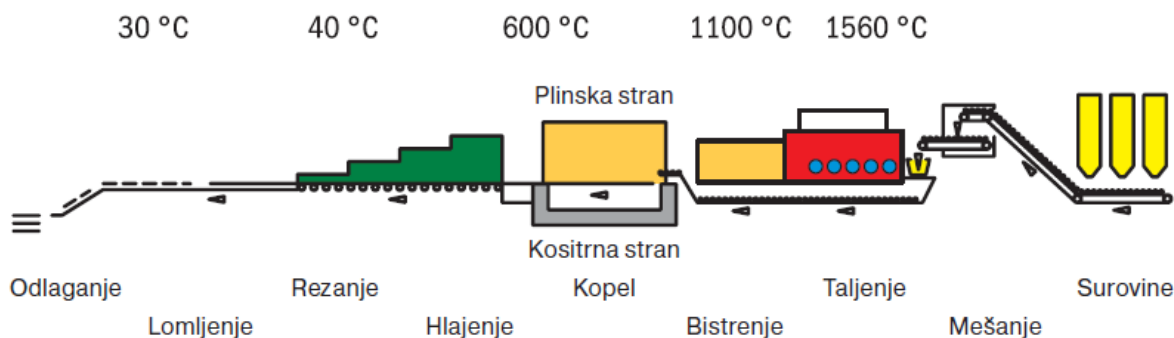
2.2.1 Plosko steklo

Ploska stekla danes izdelujemo predvsem po postopku s plavajočo talino. Kontinuirni postopek za pridobivanje stekla so leta 1959 razvili v tovarni Pilkington v Veliki Britaniji. Po tem postopku izdelujejo na primer okensko steklo. Surovine za pripravo stekla najprej ustrezno pripravijo v določenih utežnih razmerjih (čistoča, granulacija) v zbiralnem lijaku. Postopek mešanja je avtomatiziran proces, kjer se mešanica pripravi za taljenje v kadni peči.

Drobno zmletim surovinam dodajo 20 do 50 % odpadnega stekla. Kadne peči so do 40 metrov dolge in do 6 metrov široke, temperatura v njih pa se giblje od 1100 do 1600 °C. V prvem delu talilne peči, kjer temperatura znaša približno 1600 °C, se surovine stalijo. V zadnjem delu peči, kjer temperatura znaša približno 1100 °C, se talina zbistri, kar pomeni, da odstranimo mehurčke plina in talino homogeniziramo. Raztaljena steklena masa nato izteče v lebdečo kopel, ki je dolga do 60 metrov in široka 8 metrov, ki je izdelana iz raztaljenega kositra z nevtralno atmosfero. Steklo se enakomerno razlije po površini raztaljene kovine zaradi manjše gostote od kositra. Pri prehodu skozi kopel se steklo postopno ohlaja, saj temperatura pade iz 1000 °C na 600 °C. Medtem ko kositer ostane v tekočem stanju, saj se strdi šele pri 232 °C, se steklo počasi strjuje. Hkrati s plamenskim poliranjem obdelamo tudi zgornjo stran steklenega traku, tako da se obe površini zgladita (spodnja, ko se giblje na kositru, zgornja zaradi učinkovitosti grelnikov nameščenih nad površino stekla). Pri izstopu ima steklo že dovolj trdno površino, da ga valji, ki potiskajo stekleni trak v kalilno peč, ne morejo več poškodovati. Po dokončnem ohlajanju v kalilni peči stekleni trak razrežejo in zložijo na računalniško vodeni progi za razrez. Počasno ohlajevanje pa se nadaljuje še na prostem.

Da dobimo stekleno ploščo brez notranjih napetosti, je potrebno hitrost ohlajevanja nadzirati. V drugem delu ohlajevanja, ki poteka na zraku, steklenemu traku odrežemo robove. Na koncu ohlajevanja, ko je temperatura steklenega traku enaka temperaturi okolice, steklo prečno prerežemo na standardne plošče, dimenzij 600 * 321 cm. Sodobne peči imajo v kadi približno 2000 ton taline. Z opisanim postopkom dobimo stekleni trak z enako plan paralelnostjo, kot jo ima kristalno steklo.

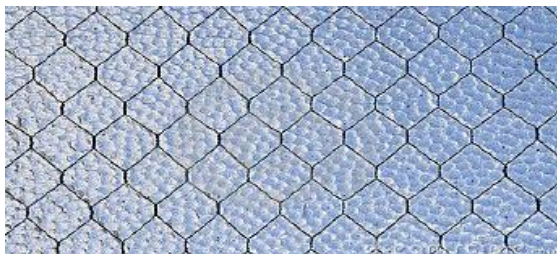
Po tem postopku pridelajo dnevno 800 ton ploskega stekla, in sicer 5000 m²/h. V enem mesecu tako proizvedejo 3,6 milijonov kvadratnih metrov ploskega stekla. Postopek taljenja je še posebno pomemben za kasnejšo čistost stekla.



Slika 6: Kontinuirni postopek pridelave stekla [8]

2.2.2 Žično steklo

Steklo je izdelano z dodajanjem jeklenih žic v taljeno steklo med proizvodnjo. Tako pripomore k večji odpornosti, ter da steklo pri lomu ostane v enem kosu. Polirana žičnata stekla so ponavadi uporabljena pri požarni varnosti, kjer kljub poškodbi stekla, žični stekleni panel še vedno zagotavlja nepredušnost.



Slika 7: Žično steklo [9]

2.2.3 Steklena vlakna za armiranje

Iz taline pridobivamo tudi niti, katerih premer znaša le nekaj mikronov. Te steklene niti se uporabljajo v gradbeni industriji kot steklena volna za toplotno in zvočno izolacijo kot tudi dodatek k izboljšavi betona, malt in asfaltov. Običajna steklena vlakna so neuporabna v alkalnem okolju (pri uporabi cementa in apna), zato za takšne primere uporabljamo steklena vlakna z dodatkom cirkonijevega dioksida. Stekljena vlakna se uporabljajo tudi za ojačitev plastičnih delov, kot na primer v proizvodnji vozil, pri športnih napravah in zaščitnih čeladah.



Slika 8: Steklena vlakna [9]

2.2.4 Steklo v betonu

Ta vrsta betona se uporablja predvsem na zunanjih fasadnih panelih in kot arhitekturni montažni beton, saj je material zelo primeren za oblikovanje različnih oblik na pročelju stavb.

Kompoziti betona, ojačanega s steklenimi vlakni, vsebujejo visoko odporna steklena vlakna, ki so vstavljena v cementno matrico bodisi kot nepretrgana ali kot narezana vlakna.



Slika 9: Steklo v betonu [9]

2.2.5 Barvana stekla

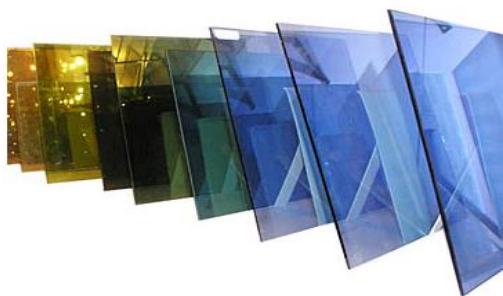
Barvana stekla ali toplotno absorpcijska stekla so izdelana z dodajanjem barve normalnim steklom. Prvotno so barvana stekla in okna svojo barvo dobila nenamerno zaradi nečistoč, ki so bila prisotna pri izdelovanju stekla. Svetlobna transmisija je od 14 % do 85 %, odvisno od tipa in debeline barve. Zaradi same narave stekla, morajo biti barvana stekla toplotno obdelana.



Slika 10: Obarvano steklo: Katedrala Notre Dame [3]

2.2.6 Prevljučena stekla

Kadar želimo dobiti sončno zaščitno steklo, moramo enemu od obeh stekel v izolacijskem steklu dodati tanke plasti kovinskih oksidov, ki povečajo odbojnost (refleksijo) energije. Sončno zaščitno steklo ima prepustnost vidnega sončnega sevanja, nizko toplotno prehodnost in majhno prepustnost sončne energije. Z ustrezno kombinacijo raznih nanosov delujejo istočasno kot toplotna in sončna zaščita.



Slika 11: Prevljučeno steklo [9]

2.2.7 Akrilno steklo

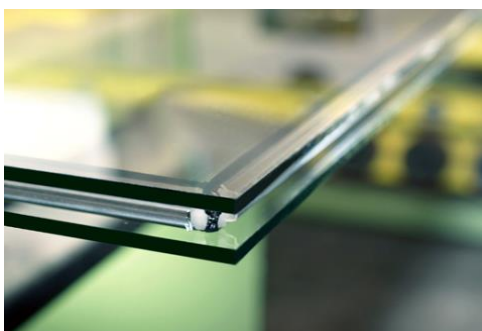
Akrilno steklo (organsko steklo) je umetna plastična masa, ki jo kemična industrija proizvaja v velikih količinah. Pred anorganskim steklom ima dve prednosti: specifična teža je za polovico manjša, oblikovanje pa izredno enostavno. Odporno je proti praskam. Ima dobro obstojnost proti staranju na svetlobi in je odporno na različne vremenske vplive. Neobstojno je v bencinu, alkoholu, nitrolakih in nitrorazredčilih, koncentriranih kislinah in določenih mehčalih.



Slika 12: Akrilno steklo [9]

2.2.8 Izolacijsko steklo

Izolacijsko steklo je sestavljeno iz dveh ali več plasti. Med plastmi je presledek od 9 do 12 milimetrov, ki je zapolnjen z zrakom ali plinom (argon, kripton), ki prepreči uhajanje toplote iz notranjosti. Je popularno, ker tudi izolira zvok in vibracije.



Slika 13: Dvoslojno izolacijsko steklo [9]

2.2.9 Penjeno steklo

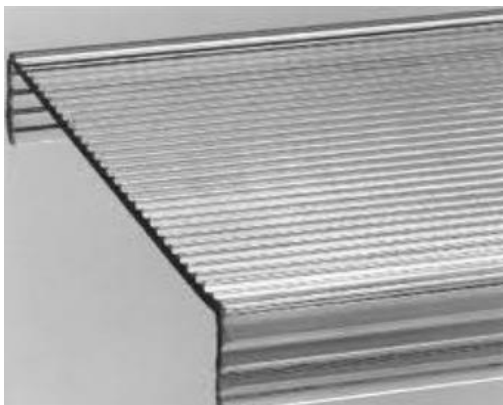
Penjeno steklo se uporablja kot toplotna zaščita zaradi nizke toplotne prevodnosti. Ugodne lastnosti so tudi lahkost, negorljivost, paroneprepustnost in večja trdnost. Izdeluje se predvsem iz odpadnega stekla. Uporablja se predvsem za pripravo podlage pred temeljenjem pri gradnji pasivnih hiš.



Slika 14: Vgradnja penjenega stekla pred temeljenjem [4]

2.2.10 Profilno steklo

Profilno steklo je uporabno pri svetlobno prepustnih notranjih in zunanjih zidovih, pregradah, strehah in oknih. Najpogosteje se za zasteklitve uporabljajo U – profili, ki omogočajo dobro osvetljenost, toplotno in zvočno izolacijo.



Slika 15: Profilno U – steklo [9]

2.2.11 Laminatna stekla

Pogosta uporaba stekel je z vezanjem 2 ali več steklenih plošč, z vmesnimi sloji kot je PVB (polivinil-bitural) folija, ki ima funkcijo zadržati stekleni plošči skupaj tudi po razbitju le-teh in preprečiti zlom na večje kose. Uporaba je priporočena tam, kjer je steklo podvrženo veliki verjetnosti poškodbam ter pred potencialnimi padci stekla z višine. Debelina vmesnih slojev je 0.38 mm, 0.76 mm, 1.52 mm, itd. Dejanski odziv je odvisen od vmesnih slojev, kar ne smemo spregledati.



Slika 16: Laminatno fasadno steklo [7]

2.2.12 Lito steklo

Lito steklo dobivajo z vlivanjem in valjanjem na jeklenih mizah. To steklo, ki ni prozorno, uporabljamo predvsem za okna v kopalnicah in sanitarijah. Pri postopku steklo teče na ognjeodporno ploščo. Njegova debelina je odvisna od razdalje, ki je med dvema valjema, skozi katera gre steklena masa. Podobno izdelujejo tudi žično steklo, le da je pred obema valjema nameščen še en kolut z žično mrežo. V procesu obdelave to mrežo nalahko vtisnejo v površino stekla. To vrsto stekla najdemo na primer na železniških postajah in vhodnih vratih.



Slika 17: Lito kopalniško steklo [9]

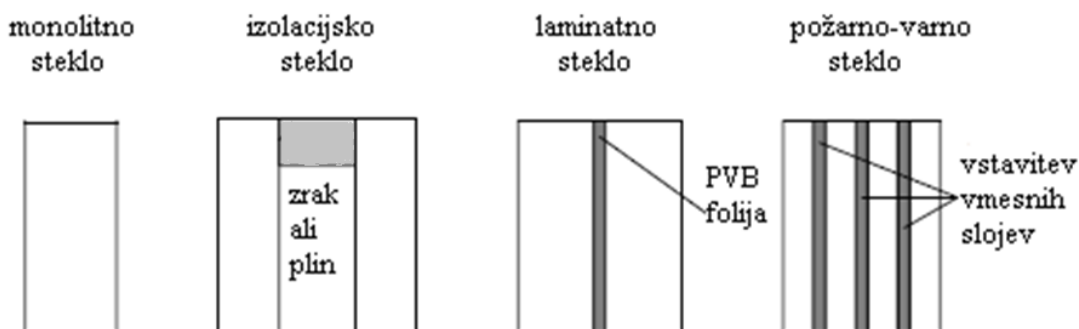
2.3 Tehnologija izboljšave in izdelave stekla

Po procesu izdelave stekla se steklo ponavadi še naknadno obdela zaradi oblike, obnašanja ali zaradi ostalih namenov uporabe. To so posebna stekla, ki izpolnjujejo višje kriterije. Nadaljni procesi lahko vključujejo:

- Rezanje robov zaradi poškodb ali enotnega zaključka
- Zaključevanje robov (poliranje)
- Vrtanje lukenj
- Zvijanje
- Toplotna obdelava
- Toplotno namakanje za odpravo nikljevega sulfata pri polno kaljenem steklu
- Laminiranje za doseg rezidualne (po-zlomne) nosilnosti, odpornosti proti udarcem, požarom ali zaradi zvočne izolacije

- Površinska obdelava za namen dekoracije, bleščanja ali zasebnosti
- Vstavljanje vmesnih slojev za zmanjševanje toplotnih izgub ali izboljšanje akustike

Stekla se načeloma razlikujejo po obliki, kot je prikazano na sliki 18:

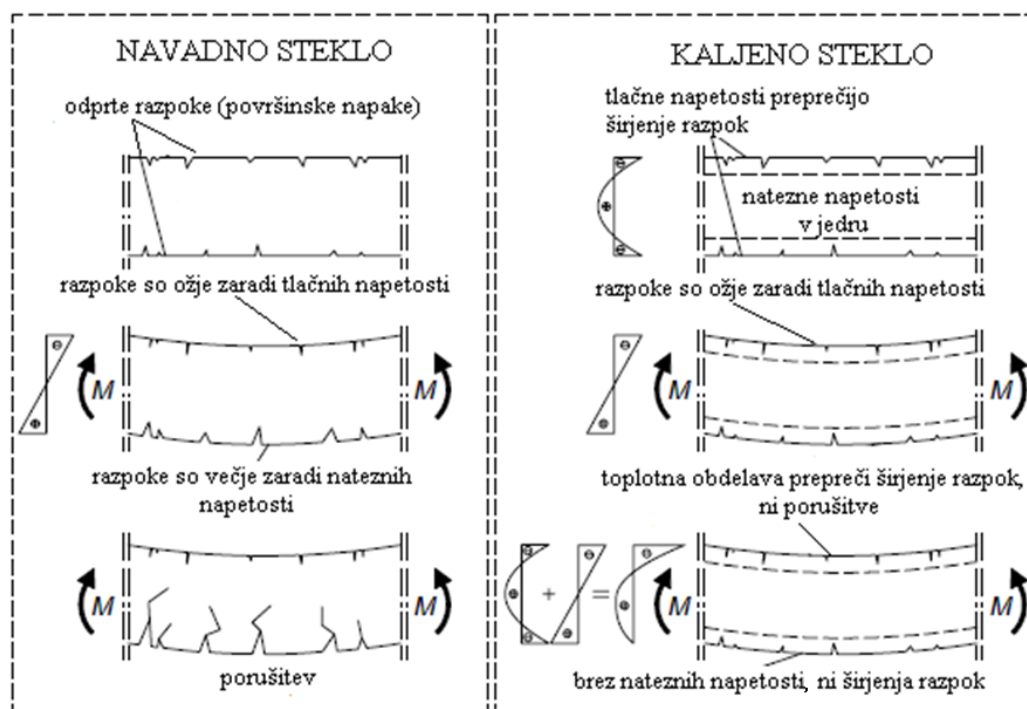


Slika 18: Tipi stekel (PVB = polivinil-butiral) [7]

2.3.1 Toplotna obdelava stekla

Steklo je zelo krhek material. Kljub temu, da prenese velike tlačne napetosti, ima izredno nizko natezno trdnost. Za splošno uporabo je toplotna obdelava (tempiranje oz. kaljenje) najpomembnejši proces, ki je potreben za izboljšanje lastnosti stekla, kot so udarna in upogibna trdnost ter odpornost proti temperaturnim spremembam. Če hočemo povečati odpornost proti nateznim obremenitvam in doseči zlom, ki bo varnejši (na majhne kose), je potrebno navadno steklo (brez toplotne obdelave) toplotno obdelati. Zaradi razpok (napake pri izdelavi, obraba), ki se pojavijo na zunanji strani stekla in majhne natezne nosilnosti stekla, je cilj doseči čim večje natezne napetosti v jedru in čim večje tlačne napetosti na zunanji površini stekla, kar bo ustvarilo večjo nosilnost. Vse dokler so natezne napetosti zaradi zunanje obremenitve manjše od tlačnih napetosti kaljenja, razpoke nimajo večjega vpliva na konstrukcijo.

Običajen postopek kaljenja je najprej, da obrežemo steklo do izbrane velikosti, nato pa ga postavimo v plavž in segrejemo od 620 do 675 °C. Po izpustu iz plavža se steklo hitro ohlaja tako, da zunanje površine postanejo tlačno, notranje pa natezno obremenjene. Debelina tlačne cone je 0,2t, natezne pa 0,6t (t je debelina).

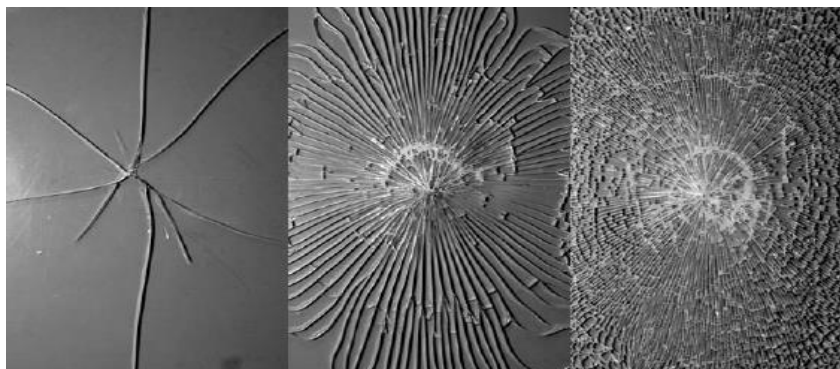


Slika 19: Principi toplotne obdelave [7]

Glede na toplotno obdelavo, stekla delimo na:

- Polno toplotno obdelana stekla (polno kaljenje)
- Termično utrjena stekla (delno kaljenje)
- Navadna stekla (nekaljeno steklo)

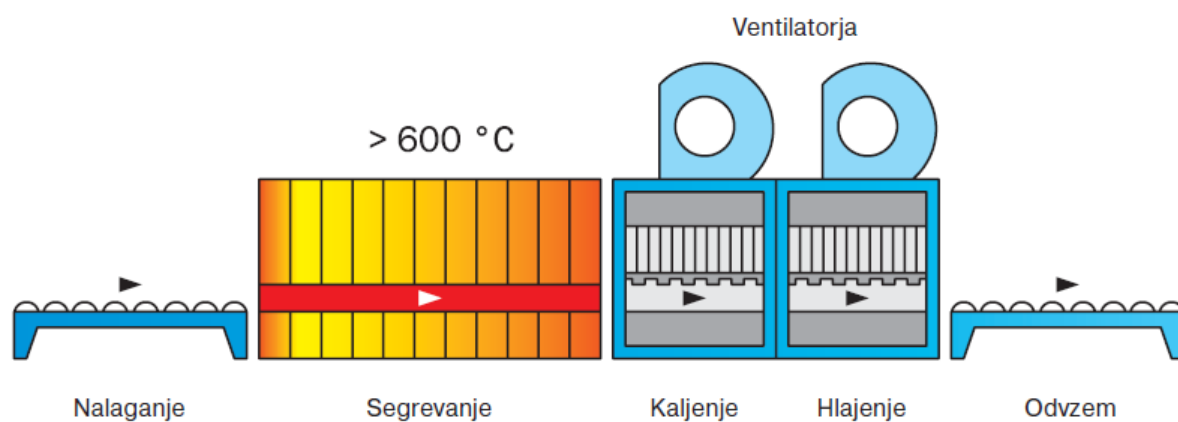
Navadno steklo, ki ni toplotno obdelano (kaljeno) ponavadi razpade na velike kose, napram polno toplotno obdelanem steklu, ki doseže najvišje napetosti in ponavadi po zlomu razpade na majhne kose velikosti 100 mm^2 . Zato to steklo imenujemo tudi varno steklo. Klasificiranje stekla za varno je lahko tudi zavajajoče, saj vsako steklo, ki se potencialno poruši lahko nevarno učinkuje na ljudi in zgradbo. Slaba lastnost polno kaljenih stekel je slabo obnašanje po zlomu, saj ne nudi velike odpornosti oz. nosilnosti. Delno kaljeno steklo pa zagotavlja ravnovesje med po-zlomno (rezidualno) nosilnostjo in razbitjem na velike kose.



Slika 20: Primerjava lomnega vzorca; navadno (levo), delno kaljeno (v sredini), polno kaljeno steklo (desno) [7]

Polno kaljeno steklo (PKS)

Med procesom kaljenja je potrebno steklo segreti do temperature približno $620 - 675\text{ }^{\circ}\text{C}$, torej približno $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ nad transformacijsko (sprememba trdega v tekoče stanje) temperaturo stekla. Nato pa steklo hitro ohladimo z hladnim zrakom. Če je začetna temperatura ohlajanja prenizka, se relaksacija ne more pojaviti, zato se steklo lahko razpoči na površini. Takoj ko temperatura na površju pade nižje od temperature relaksacije (cca $525\text{ }^{\circ}\text{C}$), se steklo strdi in relaksacija se ustavi. Za zagotovitev razvoja maksimalnih sprememb notranjih napetosti, se mora površina strditi točno takrat, ko je dosežena maksimalna temperaturna razlika, ter ko se notranje napetosti ravno sprostijo. Postopek kaljenja vpliva na razvoj notranjih napetosti (slika 19), saj temperatura na površini stekla hitreje pada kot v jedru. Posledica tega je, da se pojavijo tlačne napetosti na površini ter natezne napetosti v jedru. Steklo mora biti debeline najmanj 5 mm , da omogoči parabolični razvoj notranjih napetosti po celem prerezu. Zaradi same vizkoznosti stekla, se natezne napetosti sprostijo zelo hitro.



Slika 21: Postopek kaljenja stekla [8]

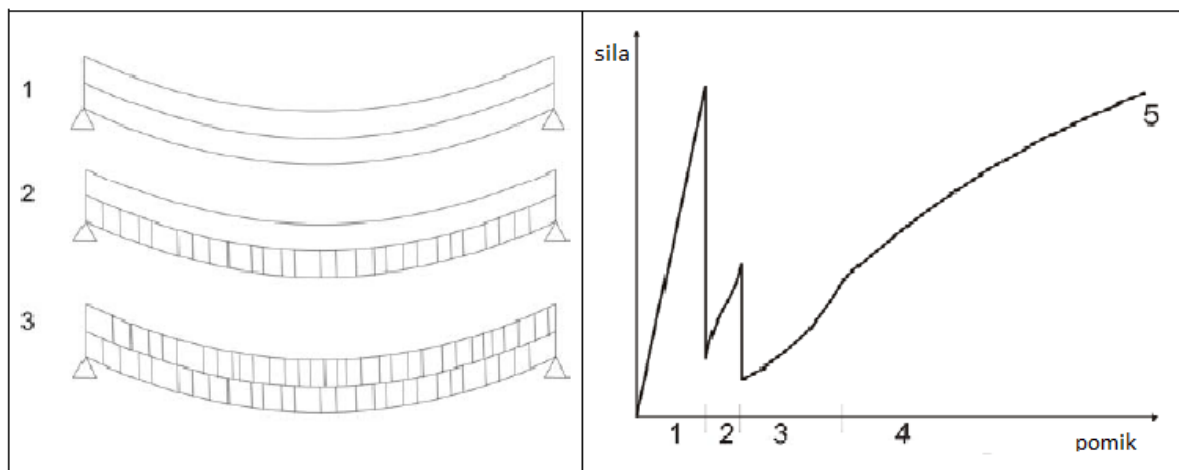
Dovoljene napetosti polno kaljenega stekla narastejo za 4-krat napram navadnemu steklu. Tipične temperirane tlačne napetosti silikatnega stekla, ki se ustvarijo na površini le-tega so nekje med 80 – 170 MPa. Standard ASTM C 1048-04 [10] zahteva minimalne površinske napetosti, ki ne smejo biti manjše od 67 MPa oz. napetosti na robovih ne smejo biti manjše od 67 MPa. Boro-silikatna stekla je težko kaliti zaradi nizkega koeficienta toplotnega raztezka (preglednica 1).

Z kaljenjem steklo pridobi na naslednjih lastnostih:

- **Struktura loma:** zmanjšana nevarnost poškodb zaradi nastanka fine mreže drobnih delcev s topimi robovi
- **Mehanska trdnost** (upogibna trdnost): izmerjena trdnost $> 120 \text{ N/mm}^2$ napram nekaljenemu steklu vrednosti 45 N/mm^2
- **Povečana udarna trdnost:** nihajni preizkus po EN 12600
- **Povečana obstojnost na temperaturne razlike:** obstojnost na temperaturne razlike na površini stekla znaša 200 K napram klasičnemu steklu, ki je občutljivo na temperaturno razliko do 40 K

Termično utrjena stekla (TUS)

Postopek kaljenja je podoben kot pri polno kaljenem steklu z razliko, da je manjša stopnja ohlajanja. Notranje napetosti na površini so zato nižje in posledično je natezna trdnost manjša. Po zlomu stekla je lomni vzorec podoben klasičnemu steklu, vendar z nekoliko večjimi kosi (velikosti pepelnika) kot pri polno kaljenem steklu. Površinske tlačne napetosti so približno 2-krat manjše kot pri polno kaljenem steklu ter 2-krat večje kot pri klasičnemu steklu. Nikljev sulfat je prav tako nedobrodošel, zato je ravno tako potrebno toplotno namakanje. Cena stekla tako naraste, ker potrebujemo več plošč za isto nosilnost kot pri polno kaljenemu steklu za iste obremenitve. Tipična uporaba delno kaljenih stekel je pri laminatnih steklih, kjer potrebujemo poleg trdnosti tudi po-zlomno nosilnost.



Slika 22: Faze porušitve laminatnega panela (rezidualna nosilnost):
1-nosilna obremenitev, 2-lom spodnjega sloja, 3-lom gornjega sloja, 4-naraščajoči pomiki, 5-porušitev laminatnega panela [11]

Klasična stekla (KS)

To so tista stekla, ki so toplotno neobdelana. Dovoljene napetosti so približno 15 MPa. Včasih se ne moremo izogniti uporabi klasičnega stekla zaradi težavnosti izgradnje, pa tudi zaradi prevelikih stekel, ki se jih ne da toplotno obdelati. Zaradi majhne trdnosti je klasično steklo slabo odporno proti temperaturnim spremembam. Delno osvetljenje površine stekla lahko povzroči porušitev zaradi temperaturnih sprememb.

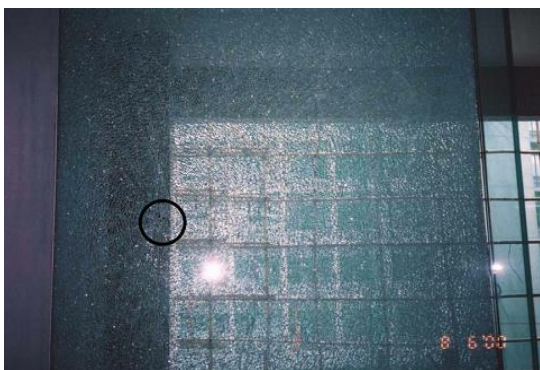


Slika 23: Porušitev zaradi temperaturnih sprememb [11]

Spontani zlom

Velika slabost uporabe polno ali delno kaljenih stekel, je problem nastanka spontanega zloma zaradi nečistoč nikeljevega sulfata (NiS). Spontani zlom, ki je malo verjeten (vendar ne zanemarljiv) lahko povzroči porušitev stekla več let po vgradnji stekla. Pri izdelavi stekla se pri fazni spremembi ohlajanja delci NiS lahko volumensko povečajo za 4 %. To povečanje, v

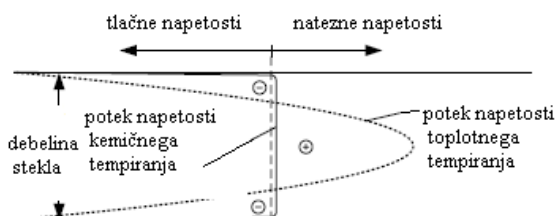
kombinaciji z nateznimi konicami napetosti v jedru zaradi kaljenja, lahko povzroči spontani zlom. Pri navadnem steklu so te nečistoče neškodljive, ker napetosti ne morejo povzročiti zloma natezne cone, vendar pa povzročijo takojšnji zlom, ko se pojavijo v natezni coni polno kaljenega stekla, kjer napetosti naraščajo z temperaturo in časom. Toplotno namakanje je učinkovit proces proti nastanku NiS, saj se predvideva, da se z vsako uro namakanja zmanjša možnost spontanega zloma za 95 %. Čas in temperatura namakanja sta odvisna od nacionalnih standardov.



Slika 24: Spontani zlom zaradi nečistoč nikljevega sulfata [11]

2.3.2 Kemično utrjena stekla

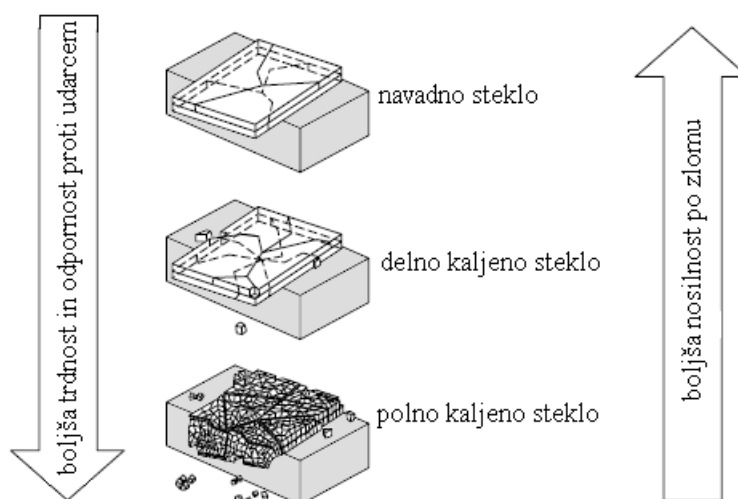
Ta metoda je redko uporabljiva v gradbeništvu. Ustvari se drugačen profil notranjih napetosti kot pri toplotnem tempiranju. Pri tej metodi lahko za razliko od toplotnega kaljenja steklo mehansko obdelamo tudi po tempiranju. Steklo se kemično utrdi tako, da se ga potopi v kad s kalijevim kloridom pri 450 °C. Izboljšava stekla nastane z menjavo natrijevih ionov na površini stekla z kalijevimi ioni, kateri so za 30 % večji. Ustvari se majhna debelina nanosa, ki je časovno odvisna (cca 20 μm v 24 urah). Če je globina površinske razpoke večja od tlačne cone nanosa, se razpoke širijo brez obremenitve, kar privede do spontanega zloma. Pogosta uporaba je predvsem v aeronavtiki.



Slika 25: Primerjava napetosti kemičnega in toplotnega tempiranja [7]

2.3.3 Laminatna stekla

Laminatna stekla so sestavljena iz 2 ali več plošč, ki so zlepljena s prozorno polimerno folijo. Če se steklo razbije, ostanejo črepinje na foliji, steklo pa ostane prozorno. Plošče so lahko enakih ali različnih debelin ter so lahko enako ali drugače toplotno obdelane. Najbolj pogosta temperatura lepljenja je približno 140°C. Temperatura in pritisk 14 barov poskrbita, da pri lepljenju plošč ne pride do nastanka zračnih žepov med stekli in vmesnimi sloji. Laminatna stekla dosežejo visoko trdnost ne glede ali je sestavljeno iz navadnih ali kaljenih stekel. Obnašanje po zlomu pa je odvisno od vmesnih slojev.



Slika 26: Obnašanje laminatnih stekel po zlomu [7]

Poznamo več vrst folij, najbolj pogosto se uporablja PVB (polyvinyl butyral) in EVA (ethylen vinyl acetate) folija, ki so skoraj ultravijolično neprepustne, zato jim včasih rečemo UV-zaščitne folije. Debelina posamezne folije je 0.38 mm. Ponavadi je vmesni sloj sestavljen iz dveh (0.76 mm) ali štirih folij (1.52 mm). PVB folija je viskoelastični material, pri katerem lastnosti močno varirajo v odvisnosti od temperature in dolgotrajnosti obtežbe. Pri sobni temperaturi ima sposobnost raztezanja kar za 200 %, preden pride do pretrga. Pri temperaturah nižjih od 0°C ter kratkotrajnih obtežbah, je folija večinoma sposobna prenašati strižne napetosti, ki se prenašajo iz enega na drugi panel. Pri višjih temperaturah in dolgotrajnih obtežbah pa se zmožnost prenašanja strižnih napetosti občutno zmanjša.

2.3.4 Upogibna trdnost stekel

Upogibna trdnost je tista upogibna napetost, ki bo z 5 % verjetnostjo povzročila zlom; po statistiki je v 95 % primerov večja od vrednosti, ki so navedene v preglednici 3.

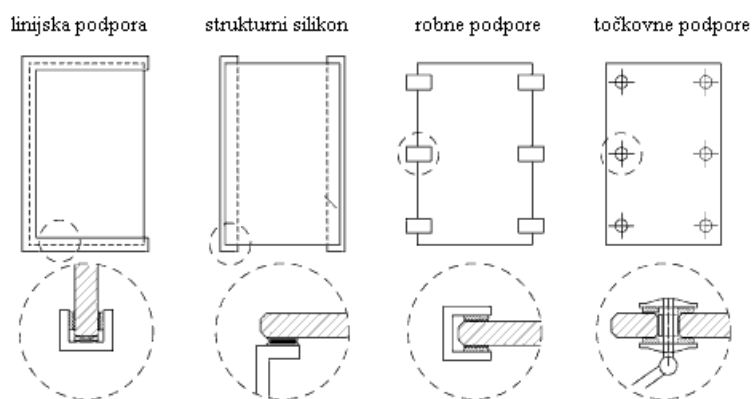
Preglednica 3: Upogibna trdnost stekel [12]

Vrsta stekla	Upogibna trdnost (MPa)
Plosko steklo	45
Delno kaljeno steklo	70
Kaljeno steklo	120
Lito steklo	25
Profilno steklo	45
Lito steklo z žico	25
Lepljeno steklo	Kombinacija zgornjih vrednosti

Trdnost stekla je v veliki meri odvisna od površinske obdelave, predvsem na tisti strani, ki je izpostavljena nateznim silam. Vse mikro in makropoškodbe na površini stekla zmanjšujejo njegovo upogibno trdnost. Upogibna trdnost je definirana statistično; torej kot tista minimalna vrednost, pri kateri je verjetnost loma največja. Pri načrtovanju posamezne zasteklitve moramo uporabljati bistveno nižje vrednosti za dovoljeno upogibno trdnost.

2.4 Spoji

Tradicionalni pristop pri spojih stekla in drugih materialov, se je razvijal v tej smeri, da preprečimo direktni stik steklo-steklo ali steklo-ostali trdni materiali. Razvoj pri spojih stekla se je usmerjal v manjšanje velikosti podpor in večanje obtežbe, ki jo lahko prenaša steklo. Z vmesnimi sloji preprečimo direktne kontakte. Vmesni sloji so ponavadi manj odporni kot steklo, vendar pa imajo dovolj veliko trdnost, da lahko prenašajo obtežbe. Ustrezni vmesni sloji so plastika, smole, neopren, injekcijske malte, aluminij in vlaknata polnila.



Slika 27:
Razvoj tipičnih podpor stekla [7]

Glede na mehanizem prenosa obtežbe delimo steklene spoje na mehanske, torne in lepljene spoje.

2.4.1 Mehanski spoji: Samovrezni in gumbni vijaki

Točkovne podpore vijasnih spojev, kot so samovrezni in gumbni vijaki, omogočajo steklenim elementom neodvisnost od primarne konstrukcije, vendar pa morajo biti izpolnjeni dodatni pogoji za zagotovitev proste podpore vzporedno ali pravokotno na stekleno površino.

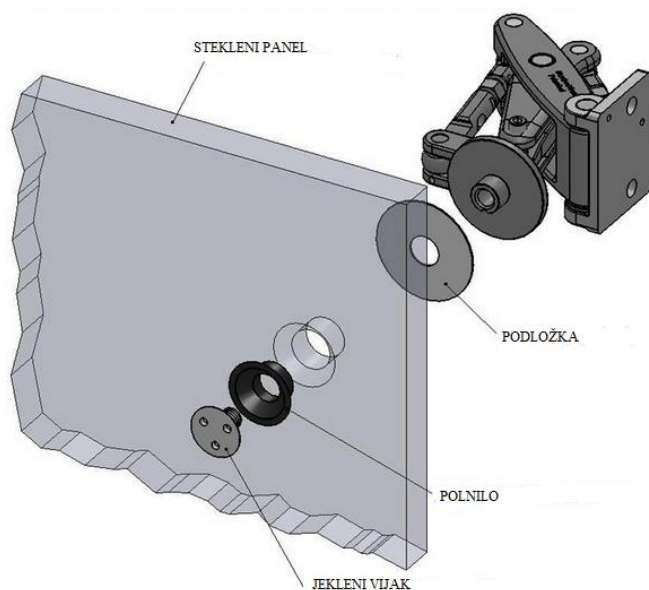
Za zagotovitev proste podpore mora biti omogočena premičnost spojnih elementov pri katerih je potrebno upoštevati konstrukcijske tolerance (vsaj 10 mm) med podkonstrukcijo in steklenimi paneli. Toleranca torej omogoči statično določenost in temperaturne deformacije do neke mere. Vodotesnost pa zagotovimo z elastično silikonskimi polnili.

Gumbni spoji so sestavljeni iz dveh kleščnih diskov (premera do 70 mm), ki so pritrjeni na stekleni panel (debeline 12-15 mm) z nerjavečimi vijaki. Vetrne obremenitve se prenašajo preko stika stekla in diskov, lastna teža vertikalno postavljenih steklitev pa preko stika luknje in vijaka. Napetosti so odvisne od tlačnih površinskih odpornosti vmesnih slojev. Material za luknje kot je podložka in obroč, mora biti fleksibilen zaradi toleranc ali napačno pozicijsko vrtanih lukenj. Tipična nepravilnost pri kaljenih steklih je 2 mm, zato to nadomestimo z večjimi luknjami in polnilom med luknjo in vijakom.



Slika 28: Gumbni spoj [7]

Samovrezno pritjevanje je sestavljeno iz samovreznega vijaka in kleščne plošče na notranji površini stekla. Konična luknja omogoča boljšo prilagoditev tolerancam konstrukcije. Lastna teža in obtežba vetra se prenašajo preko plastičnih ali aluminijevskih obročev med luknjo in vijakom. Zaradi slabše rezidualne nosilnosti je uporaba samovreznih spojev omejena pri nadglavni steklitvi.



Slika 29:
Tipični primer
samovreznega spoja [7]

2.4.2 Torni spoji: Kleščni spoji in tlačne plošče

So točkovne podpore, ki se uporabljajo na robovih ali kotih steklenih panelov. Normalne obtežbe se prenašajo preko mehanskih nastavkov, strižne napetosti (lastna teža ali vertikalna steklitev) pa preko blokov in nosilcev. Zaradi svojih velikosti lahko nadomestijo napake pri tolerancah. Površina plošče mora biti čim večja (vsaj 10 cm^2 /spoj), da lahko spoj zagotovi ustrezno rezidualno nosilnost.



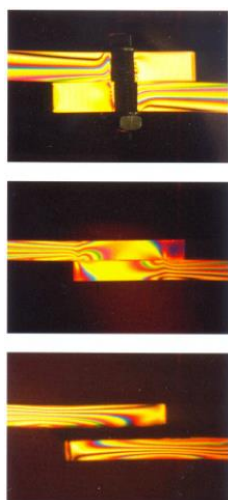
Slika 30: Kleščni spoj [9]

2.4.3 Lepljeni spoji

Spoj je omogočen z lepljivim, nekovinskim materialom, kjer doseže svoje sposobnosti samo po končanju nekaterih procesov. Lepljeni spoji ponujajo prerazporeditev obtežbe na večjo površino kot npr. vijalni spoji. Pomembne prednost je ravnost površin, ki omogoča lažje vzdrževanje, čiščenje in razgradnjo. Poznamo 2 tipa:

- Mehko elastični spoji (silikon)
- Trdi lepljeni spoji (akrilati, epoksi smole, poliester)

V primerjavi z mehanskimi spoji na nosilnost vpliva mnogo faktorjev, kot so mehanske karakteristike tipa spoja, tip in dolgotrajnost obtežbe, površinske kvalitete spojev in naravni pogoji (UV svetloba, vlaga, temperatura). Elastična lepila imajo trdnost do 1 N/mm^2 , žilavost do 150 %, ter so primerni za linijsko vezane spoje. Z debelino okoli 5 mm zaprejo pore ter zagotovijo porazdelitev obtežbe. Elastična lepila so priporočena pri dinamičnih obtežbah ter prenosih udarcev in zvoka. V primerjavi z trdimi lepili jih lažje popraviti ali zamenjati. Velika žilavost zagotovi nekaj nosilnosti, preden pride do končne porušitve. Epoksi smole in akrilati, ki so debeline 0.1 do 0.5 mm, pa smatramo za trda lepila. Pri optimalni debelini imajo veliko nosilnost, vendar pa zaradi slabih toleranc ne prerazporedijo obtežbe dovolj, zato so primerna za točkovne podpore. Zaradi velikega temperaturnega koeficienta lahko pride do porušitve brez opozorila.



Slika 31: Primerjava poteka napetosti [9]

Zgoraj: Vijačni spoj

Sredina: Lepljeni spoj-trdo lepilo

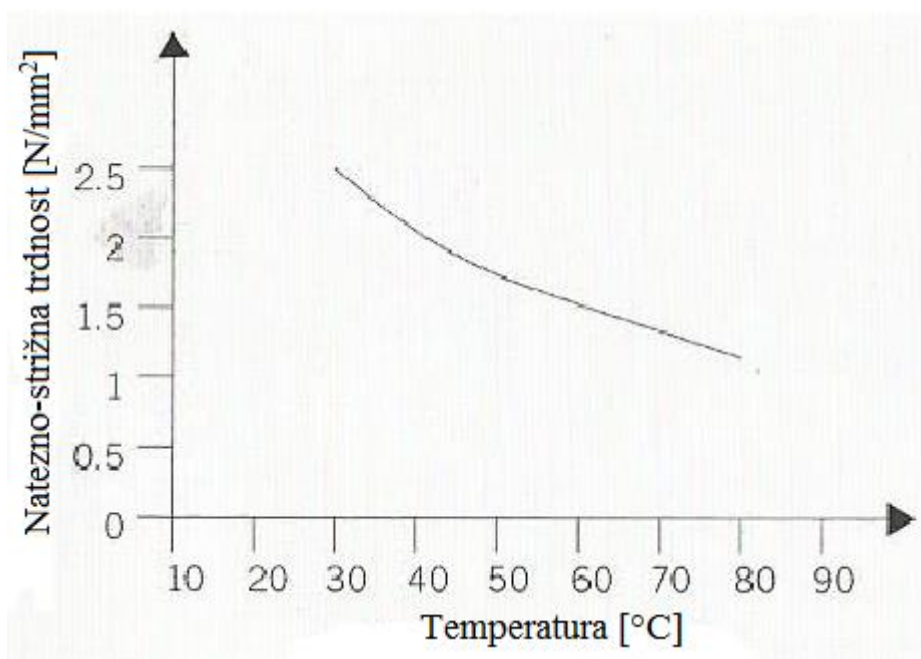
Spodaj: Lepljeni spoj-elastično lepilo

2.4.3.1 Strukturni silikonski spoji

Linijsko vezani paneli pri fasadah ali strehah so ponavadi izvedeni iz silikonov, ki prenašajo obtežbo na podokvirje. Poznamo 2 tipa silikonskih sistemov [13]:

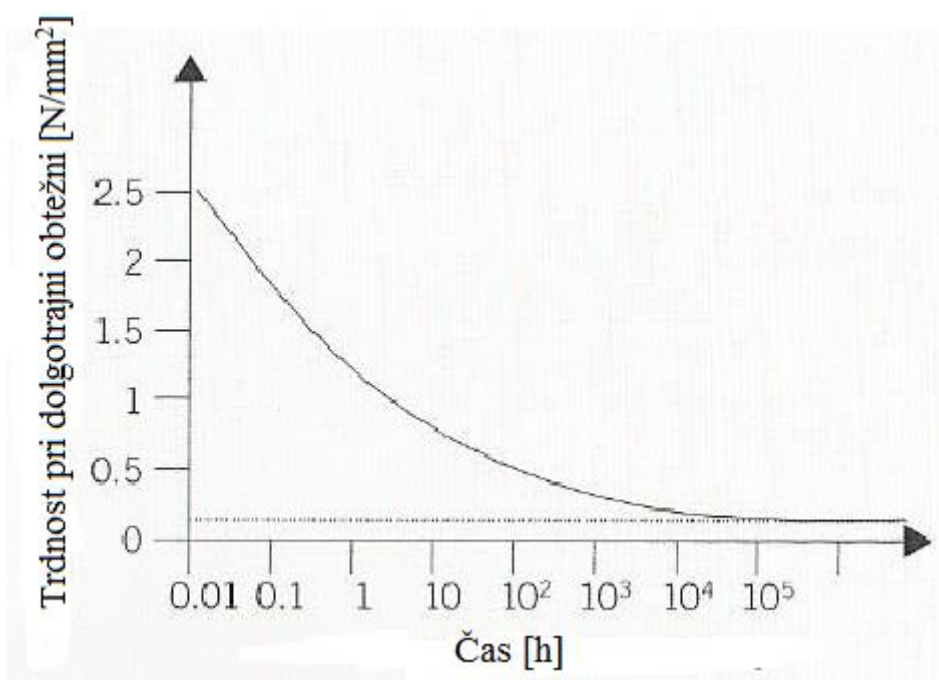
- 1-komponentni silikon začnejo funkcionirati takoj ob stiku vlage v zraku. Optimalni pogoji so 24 °C in 50 % vlažnost. Priporočena debelina je > 6 mm, širina pa < 20 mm. Razmerje debeline in širine lepila vsaj 1 : 1 in ne večja od 1 : 3 (idealno 1 : 2)
- 2-komponentni silikon nastanejo s polimerno reakcijo, ki se ustvari pri mešanju glavne komponente (90 % volumna) in katalizatorja (10 % volumna). Vezati se začnejo brez uporabe kemičnih komponent (običajno 3 dni). Minimalna debelina je 6 mm, maksimalna širina pa 50 mm. Proizvajalec poda različna razmerja debeline in širine, ki pa ne sme biti večje od 1 : 4.

Materialne lastnosti so zelo odvisne od proizvajalca. Pri testiranju silikona na kratkotrajne dinamične obtežbe se ponavadi doseže od 0.8 do 2.5 MPa v odvisnosti od temperature.



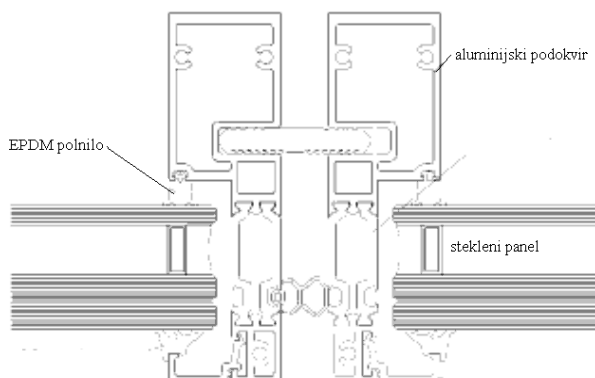
Slika 32: Trdnost lepila pri kratkotrajni obremenitvi lepila v odvisnosti od temperature [9]

Dovoljene napetosti za dolgotrajne obtežbe (veter) so ponavadi mnogo manjše. Nosilnost silikona pri dolgotrajnih obtežbah je približno ekvivalentna 10 % nosilnosti silikona pri kratkotrajnih obtežbah. Strukturni silikonski sistemi so ponavadi načrtovani po principu dovoljenih napetosti, ki temeljijo na maksimalni nosilnosti in varnostnih faktorjih (6 za kratkotrajne obtežbe ter 60 za dolgotrajne obtežbe).



Slika 33: Trdnost lepila pri dolgotrajni obtežbi v odvisnosti od časa [9]

Uporaba strukturnega silikona v kombinaciji z laminatnim steklom zagotavlja odlično obnašanje v primeru zaščitnega stekla (udarci) zaradi odlične absorpcije energije. V primeru velike robne rotacije zaradi deformacij stekla lahko pride do dodatnih nateznih napetosti v spoju. Zaradi Poissonovega količnika (cca 0.5) je trdnost odvisna od oblike spoja (debelina/širina lepila).



Slika 34: Tipično linijsko podprti stekleni paneli z EPDM polnilom [7]

V nekaterih državah (Nemčija, Francija) je predpostavljeno, da silikon ne prenaša stalnih obtežb (lastna teža), zato so potrebna dodatna pritrdila za preprečitev padca steklenega panela. Nadalje mora biti zagotovljena kemična kompatibilnost vseh materialov, ki so v stiku z lepilom, da se prepreči zlom pri dolgotrajnih obtežbah. Kompatibilnost drugih materialov (nastavljivi bloki, tesnila) morajo biti preverjeni z laboratorijskimi testi. EPDM (ethylene propylene diene monomer) gume, neopren, bitumen, asfalt in druge organsko bazirana tesnila lahko povzročijo težave. Kvaliteta lepljenja je v glavnem odvisna od kvalitete površine vezanih materialov. Ravna površina, kot je steklo, zagotavlja optimalne pogoje. Materiali z porami niso najboljše, ker tesnijo učinkovito samo lokalno. Aluminij in nerjaveče jeklo sta tudi primerna za silikonsko lepljenje.

2.4.3.2 Trda lepila

Razvoj lepil je šel v smeri zmanjšanja vizuelnega efekta. Epoksi smole in akrilati so se razvijali pri aeronavtiki in avtomobilizmu, potem pa še za steklitve v gradbeništvo. Njihovo obnašanje še ni zadostno testirano, zato je veliko izzivov in novosti pri takšnih steklenih spojih. Linijsko podprta stekla so pogosto uporabljena pri okvirnih konstrukcijah, kjer so pravokotni stekleni

paneli podprti 2-robno ali 4-robno. Veliko karakteristik, kot so izbira lepila, kemična kompatibilnost spoja, geometrija, temperaturni razpon, žilavost, vplivajo na obnašanje lepila. Debelina lepila je zelo pomembna lastnost. Imamo kontaktna lepila, ki zahtevajo majhno debelino (pogosto 1 mm) in zapolnilna lepila debelin do 5 mm. Klasično steklo je načeloma ravno, toplotno obdelano steklo pa vsebuje napake, zato lepljenje 2 ali 3 kosov zahteva več tolerance. Pri tolerancah 1 mm je priporočeno uporabiti epoksi smole, pri manjših tolerancah pa akrilate. Slabost so koncentrirane napetosti in deformacije zaradi geometrijskih nepravilnosti in ostrih robov. Pomembna lastnost je tudi temperaturni razpon, ki ji ga je lepilo podvrženo v svoji življenjski dobi. Temperature, ki so večje od tranzicijske temperature T_g , privedejo do zmanjšanja odpornosti in nosilnosti. T_g je temperatura (odvisna od kemične sestave), kjer pride do premika makromolekul, zato nosilnost lepila drastično pade. Epoksi smole imajo večjo T_g kot akrilati, zato so priporočljivejši za višje temperature. T_g vpliva na kratkotrajno in dolgotrajno obnašanje [13]. Na vzdržljivost najbolj vplivajo voda, vlaga in temperatura. Faktor varnosti je odvisen od testiranja, vrste obtežbe in okolja.

2.5 Tip in pozicija steklitev

Načrtovanje z steklom

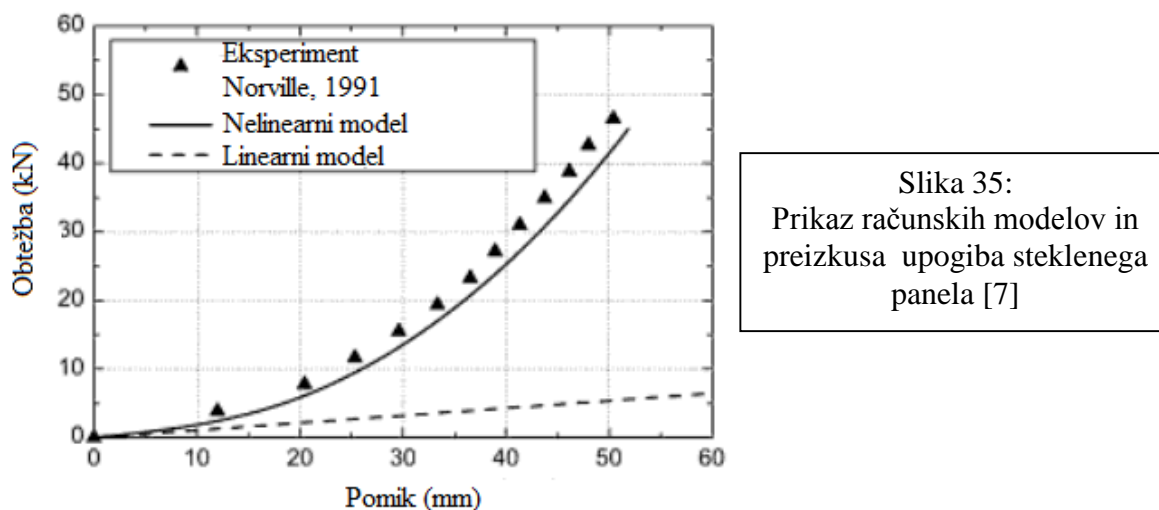
Steklo se od drugih materialov razlikuje po krhkosti, saj pred poružitvijo ni nobenega opozorila, zato je potrebno pri načrtovanju upoštevati tudi nosilnost v lomnem stanju.

Steklene konstrukcijske elemente lahko klasificiramo kot steno, ploščo ali nosilec, odvisno od njihove oblike. Steklo se pogosto uporablja pri fasadi. V primeru poružitve stekla, to ne vpliva na stabilnost zgradbe, kljub temu pa je še vedno potrebno zagotoviti rezidualno (po-zlomno nosilnost). Stekljeni elementi so ponavadi tanki, zato pogosto ne popustijo zaradi nosilnih, ampak zaradi stabilnostnih kriterijev. Tlačni elementi so podvrženi uklonu. Prenos obtežbe zahteva od načrtovalca predvidevanje načina poružitve in s tem tudi varnostne ukrepe pri poružitvi.

Geometrijska nelinearnost

Steklo je lahko podvrženo velikim deformacijam, zato lahko pride do membranskih napetosti. V praksi se pogosto uporabljajo metode, ki približno zajamejo učinek geometrijske nelinearnosti. Pri upogibu steklenega panela je za opis membranskih napetosti najprimernejša

Kirchhoffa teorija. Iz preizkusa upogiba 4-robno podprtega polno kaljenega steklenega panela dimenzij 1676,4 mm/ 1676,4 mm/ 5.66 mm je razvidno, da je geometrijsko nelinearna metoda končnih elementov zelo primerna za predviden opis obnašanja steklenega panela.



Slika 35:
Prikaz računskih modelov in
preizkusa upogiba steklenega
panela [7]

Poenostavljeni pristopi

Približne rešitve iz tabel in grafov so najhitrejša ter najpogostejša pot do iskanja največjih napetosti in pomikov. Standarda prEN 13474-2:2000 [14] ter ASTM E 1300-04 [15] imata tabele za več vrst različno podprtih pravokotnih, krožnih in trikotnih steklenih panelov.

Pozicija steklenega panela kot fasadnega elementa

V odvisnosti od kota namestitve delimo steklene panele na vertikalne, poševne ali horizontalne [14]. Pozicija vgradnje določa tip, trajnost ter potencialne nevarnosti. Poševna in horizontalna stekla predstavljajo nevarnost pri nadglavni steklitvi, kjer je potrebno zagotoviti primerno rezidualno nosilnost, vertikalna stekla pa morajo zagotoviti odpornost proti udarcem ter izpolniti še dodatne pogoje pri rezidualnem obnašanju panelov.

Vertikalne steklitve

Vetrne obremenitve (tlak in srk) delujeta pravokotno na stekleno površino. Lastna teža se preko podpor prenaša na podkonstrukcijo. Potrebno je zavarovati stekleno površino pred padcem v prometnem okolju. Za stekleni panel, ki je podprt vzdolž vseh robov in ni nevaren ljudem, lahko uporabimo klasično steklo. Če pa je nepodprt vzdolž robov, moramo uporabiti kaljeno (varnostno) steklo. Laminatno varnostno steklo mora biti uporabljeno pri srednje dolgih obtežbah.

Nadglavna nepohodna steklitev

Lastna teža predstavlja stalno obtežbo, ki se prenaša pravokotno na stekleno površino. Obvezno se uporablja laminatno steklo, ki pa je omejeno z velikostjo panela in razdaljo med podporami. Kljub temu, da je steklo lahko 2-robno podprto, pa se lahko tudi pri 4-robnem podprtem panelu pojavi porušitev na sredini. Nemška tehnična navodila priporočajo 4-robno podprtje in maksimalno razmerje dolžin 3 : 1 za razmike večje od 1200 mm.



Slika 36: Nadglavna nepohodna steklitev [9]

Nadglavna pohodna steklitev

Lahko je pohodno za začasna čistilna ali vzdrževalna dela. Za varnost mora biti poskrbljeno, zato je priporočljivo, da se v času vzdrževanja izprazni prostor pod stekleno konstrukcijo. Rezidualno nosilnost se obvezno preverja z testi. Objekti, kot so stopnice ali pohodne plošče, morajo biti dimenzionirane, da prenesejo tako površinske kot točkovne obtežbe. Proizvajalec ponavadi preveri nosilnost za površinsko obtežbo 5 kN/m^2 v najbolj neugodni poziciji. Testi udarcev se izvajajo z spuščanjem jeklenih krogel in nato s preverjanjem rezidualne nosilnosti. Ponavadi je pohodna steklitev narejena iz 3 slojev, ki so iz navadnega, delno in polno kaljenega stekla. Zgornji sloj je kaljeno steklo zaradi odpornosti proti udarcem, spodnje pa klasično ali delno kaljeno zaradi boljše rezidualne nosilnosti. Preizkusi se vrsto scenarijev, da se ugotovi kako pride do zloma posameznega sloja ali vseh slojev. Če pride do zloma posameznega sloja, je rezidualna nosilnost odvisna od upogibnih nosilnosti ostalih slojev. V primeru zloma vseh slojev je rezidualna nosilnost odvisna od tipa podpore in lomnega vzorca.



Slika 37: Pohodna steklitev
(Veliki kanjon) [16]

Tlačno obremenjene plošče

Steklene plošče lahko uporabimo za stenski panel, ploščo ali lupino. Nosilnost in porušitveni mehanizem sta odvisna od podpor. Na nosilnost plošče najbolj vplivajo koncentrirane natezne napetosti pri podporah ter stabilnostni kriterij. Stabilnostni kriterij je pomembnejši pri površinsko obremenjenih ploščah, saj se nepodprte plošče lahko ukrivijo okoli šibke osi. Kritična obtežba ni vedno odvisna od tlačne trdnosti stekla, ampak tudi od natezne trdnosti stekla zaradi nateznih napetosti, ki se pojavijo pri uklonu plošče. Faktorji, ki še vplivajo na nosilnost so vitkost, podporni pogoji, začetne nepopolnosti in ekscentričnost obtežbe.



Slika 38: Jeklana streha podprta z steklenimi paneli [9]

Strižno obremenjene plošče

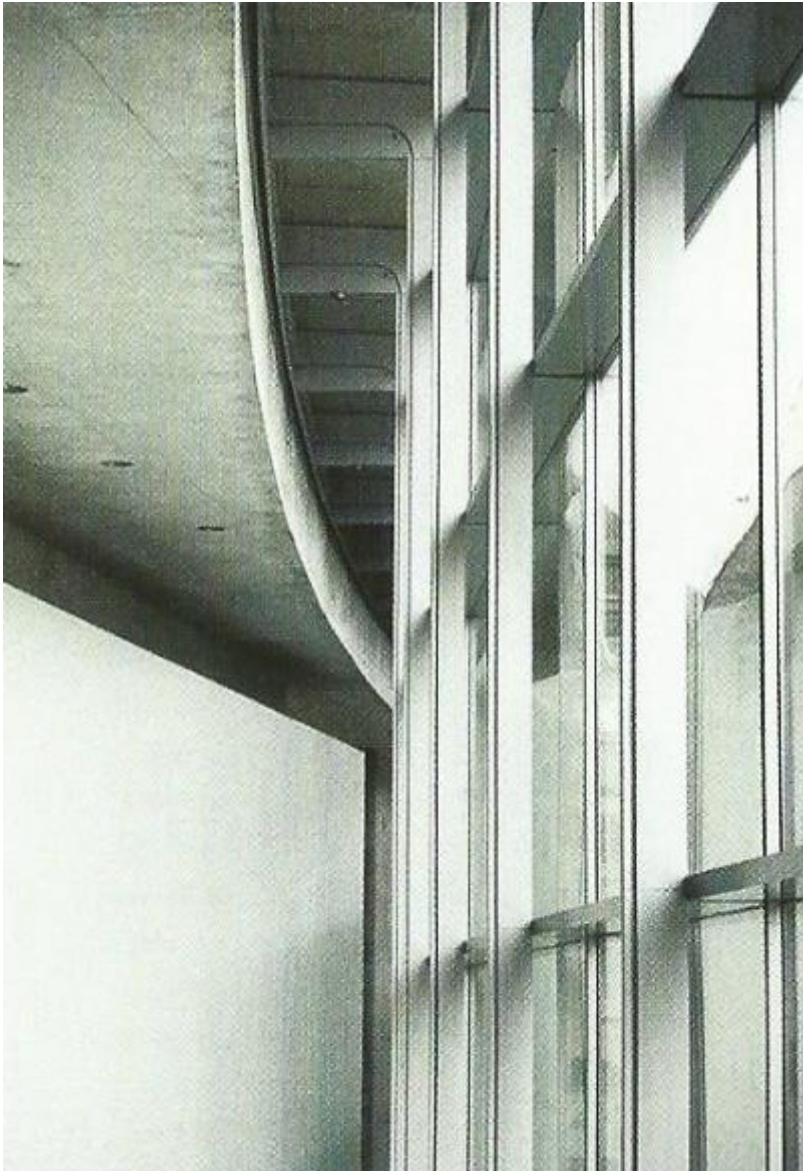
Steklo se že od 19-tega stoletja uporablja kot ojačitev zelenih hiš. Steklена plošča je poleg vizuelnega efekta izboljšala tudi stabilnost jeklene konstrukcije. Strižna togost steklenih plošč ima potencial pri izboljšanju nosilnosti okvirnih konstrukcij.



Slika 39: Steklени paneli zagotavljajo stabilnost kupole [9]

Lupina

Prvič so bili uporabljeni leta 1950 zaradi stabilizacije trgovinskih oken. Pri vetrnih obtežbah fasad omogočajo boljšo odpornost, saj zaradi prenosa nateznih napetosti in tlačnih sil ni potrebno uporabljati laminatnih stekel.



Slika 40: Stekljeni paneli zagotavljajo stabilnost fasade [9]

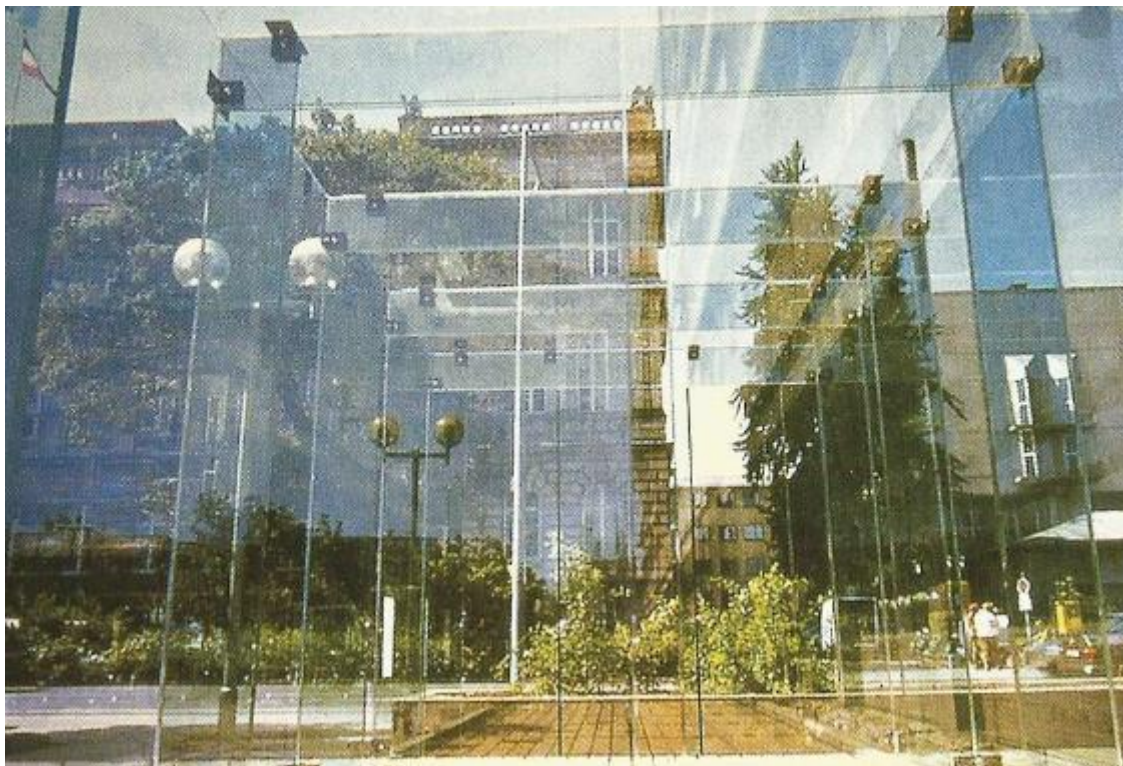
Stebri

Stekleni stebri so bili prvič uporabljeni za notranje dvorišče v Saint Germain-en-Laye zgradbi. Stebri so ojačani z več plastnimi ploščami, da so boljše stabilnostno odporni, vendar pa so nosilnostno omejeni.

Nosilci

Od leta 1980 se uporabljajo v strešnih konstrukcijah. Pri strehah ali etažah morajo prenesti večje stalne, kratkotrajne in dolgotrajne obtežbe. Dolžina nosilcev je omejena med 6 in 7.5 m.

Nosilec je obtežen okoli svoje močne osi, upogibne napetosti pa so odvisne od razpona in tipa podpor. Lahko se uporablja kot prostočežeči nosilec, konzola ali kot previsni nosilec. Nosilnost je odvisna od lokalnega, torzijskega ukrivljanja in natezne trdnosti. Ukrivljanje se pojavi, ko natezne napetosti v steklu presežejo efektivno natezno nosilnost stekla. Načrtovanje nosilca je odvisna od tipa stekla, strižne nosilnosti PVB vmesnih slojev, tipa obtežbe in efektivne upogibne nosilnosti.



Slika 41: Uporaba steklenih nosilcev in stebrov [9]

Rezidualna (po-zlomna) nosilnost

Rezidualna nosilnost (RN) je odvisna od porušitvenega scenarija, tipa stekla in podpor. V primeru zloma moramo zagotoviti stabilnost posamezne in celotne strukture. Pri laminatnih steklih mora biti preprečen zlom vseh slojev hkrati. V primeru, da vsi stekleni paneli počijo, mora RN zagotoviti vmesni sloj. Stabilnostna porušitev zaradi lokalnega ali globalnega ukrivljanja mora biti preprečena. Ko se posamezni sloj zlomi (zaradi obtežbe ali udarca), se napetosti v ostalih slojih močno povečajo. Za zagotovitev večje RN se mora vsaj en panel biti sposoben zlomiti na velike kose.

Ponavadi se uporablja delno kaljeno steklo, ker so napetosti za klasično steklo prevelike. Z postavitvijo zunanjih dveh slojev iz delno kaljenega stekla in vmesnega iz klasičnega stekla dobimo simetrijo.

RN nosilca lahko izboljšamo z ojačitvami v natezni coni z vstavitvijo jeklene žice.

Računski postopki

So različni v odvisnosti od države. Obstajajo standardi EN 572 za klasično steklo, EN 12150 kaljeno steklo in EN 1863 za termično utrjeno steklo. Ti dokumenti obravnavajo priporočila glede izdelave, dimenzij, toleranc in trdnosti. Kakovost steklenega elementa mora proizvajalec dokazati z certifikatom (testi). V Evropi ni enotnega standarda, vendar je v pripravi. Nekaj standardov je na nacionalni ravni. Nemčija ima standarde (TRLV) za zunanje stene (fasade), linijsko podprta stekla in varnostna stekla.

Računalniške analize

Verjetnost porušitve po EN 13474 na varnostnih faktorjih so dobili pri različnih variantah materiala (trdnost) in obtežb (sneg, veter). Varianta materiala lahko zavzema še tip in trajnost obtežbe, dimenzije in lokacija panela ter naravni pogoji.

Testi

Ponavadi za originalne konstrukcijske elemente. V veliko primerih je skoraj obvezno, saj je mnogo kombinacij uporabe in obtežb težko oziroma nemogoče modelirati z računalniškimi postopki. Testi so za udarno odpornost, nosilnost in rezidualno nosilnost. Dokaz nosilnosti se lahko dobi iz testov, obtežb in varnostnih faktorjev.

3 RAČUNANJE STEKLENIH KONSTRUKCIJSKIH ELEMENTOV

Povečana uporaba stekla kot nosilnega materiala je vodila do razvoja in izboljšanja nacionalnih in mednarodnih standardov, tehničnih navodil in priročnikov. Cilj teh dokumentov je priporočiti dovoljeno obtežbo ali napetost, ki je povezana z verjetno porušitvijo za različne oblike in podpore steklenih elementov. Mnoga navodila temeljijo na enostavnejših teorijah, ki so dovolj natančna le za linijsko podprta pravokotna stekla.

3.1 Osnove postopka dopustnih napetosti

Kljub dejstvu, da se koncept dovoljenih napetosti pri drugih materialih opušča, pa se ta metoda pri steklu še vedno uporablja. Glavno pravilo je

$$\sigma_E \leq \sigma_{dov} \quad (3.1)$$

σ_E maksimalne izračunane napetosti, ki se pojavijo pri najbolj neugodni kombinaciji obtežb

σ_{dov} dovoljene napetosti, ki zajamejo vse nepravilnosti pri odpornosti steklenega materiala

Učinke velikosti steklenih plošč, robnih pogojev, obtežbe in verjetnosti porušitve morajo biti upoštevani v σ_{dov} .

Nemška tehnična navodila TRLV 2006 [17] in TRAV 2003 [18] sta najbolj poznani in razširjeni navodili za načrtovanje po principu dovoljenih napetosti. Oba dokumenta sta primerna za steklene panele, ki so obremenjeni z površinsko obtežbo pravokotno na stekleni panel. Priporočene dovoljene napetosti za statično obtežbo so predstavljene v preglednici 4.

Preglednica 4: Dovoljene napetosti (σ_{dov}) za površinsko obremenjene steklene plošče [17, 18]

Dovoljene napetosti (MPa)	vertikalno steklo	horizontalno steklo
Klasično steklo	18	12
Polno kaljeno steklo	50	50
Laminatno klasično steklo	22,5	15

Za udarno obtežbo TRAV 2003 priporoča naslednje dovoljene napetosti: 80 MPa za navadno steklo, 120 MPa za termično utrjeno steklo ter 170 MPa za polno kaljeno steklo.

Preglednica 5 prikazuje priporočene dovoljene napetosti za začetno načrtovanje po Pilkingtonovih ugotovitvah. Te vrednosti se uporabljajo samo v povezavi z linearno napetostno analizo.

Preglednica 5: Dovoljene napetosti (MPa) po Pilkingtonovih ugotovitvah [19]

Vrsta obtežbe	Primer obtežbe	Klasično steklo	Polno kaljeno steklo
Kratkotrajna panelna obtežba	veter	28	59
Kratkotrajna robna obtežba	veter	17,8	59
Srednje trajna obtežba	sneg	10,75	22,7
Dolgotrajna obtežba	lastna teža, voda	7	35

Pomanjkljivosti metode dopustnih napetosti:

- Ne upošteva fizikalnih fenomenov mehanskega obnašanja stekla
- Nezanestljivost vplivnih parametrov zaradi uporabe enega samega globalnega varnostnega faktorja
- Pristop me zajema geometrijske nelinearnosti in uklona

3.2 Priporočljivo razmerje razpon / debelina

Preglednica 6 prikazuje maksimalna razmerja razponov proti debelinam za 2 ali 4-robno podprtih panelov.

Preglednica 6: Maksimalno razmerje razpon proti debelini [20]

Vrsta stekla	Maksimalno razmerje razpon / debelina	
	vertikalno	horizontalno
Navadno steklo	150	100
Polno kaljeno steklo	200	150
Laminatno navadno steklo	150	100
Laminatno kaljeno steklo	150	100

3.3 Evropski standardi in načrtovalske metode

Vse današnje načrtovalske metode so v bistvu kombinacija ali izboljšava drugih. Lahko jih razvrstimo v Evropske metode, ki temeljijo na DELR načrtovalski metodi, ter Severno Ameriške, ki temeljijo na GFPM metodi (The glass failure prediction model).

Pravila opisana v delu 3.3.1 so uporabna za začetne preveritve, vendar pa je pogosto potreben točnejši račun. Predstavil bom različne metode Evropskih standardov, ki pri določanju nateznih napetosti upoštevajo geometrijske nelinearnosti.

3.3.1 DELR načrtovalska metoda

Načrtovalska metoda DELR (damage equivalent load and resistance) je bila prva evropska metoda, ki je upoštevala potek napetosti steklenega panela v odvisnosti od obtežbe ter vrste stekla. Sloni na podatkih in izkušnjah več avtorjev [21]. Največja pričakovana napetost se primerja z odpornostjo materiala:

$$\sigma_{\max,d} \leq \frac{\sigma_{bB,A_{red},k}}{\alpha_{\sigma}(q, \sigma_v) \cdot \alpha(A_{red}) \cdot \alpha(t) \cdot \alpha(S_v) \cdot \gamma_{M,E}} + \frac{\sigma_{V,K}}{\gamma_{M,V}} \quad (3.2)$$

$\alpha_{\sigma}(q, \sigma_v)$ koeficient, ki upošteva porazdelitev napetosti na površini stekla; q je površinska obtežba, σ_v so rezidualne napetosti

$\alpha(A_{red})$ koeficient, ki upošteva velikost natezne površine A_{red} (za klasično steklo je A_{red} enako celotni površini)

$\alpha(t)$ koeficient, ki upošteva trajanje obtežbe; t je čas

$\alpha(S_v)$ koeficient, ki upošteva kombinacijo obtežb in okoljske pogoje

$\sigma_{\max,d}$ izračunana največja napetost v elementu

$\sigma_{bB,A_{red},k}$ karakteristična vrednost upogibne zlomne trdnosti po standardu EN 1288-2:2000

$\sigma_{V,K}$ karakteristična vrednost absolutne vrednosti rezidualnih površinskih napetosti (tlačno = pozitivno)

$\gamma_{M,E}$ varnostni faktor trdnosti

$\gamma_{M,V}$ varnostni faktor rezidualnih napetosti

Koeficienti

Koeficienti se uporabljajo zaradi kompenzacij razlik med laboratorijskimi testnimi pogoji (za določitev trdnosti) in dejanskimi pogoji. Nehomogeno porazdelitev napetosti predstavlja faktor:

$$\alpha_{\sigma}(q, \sigma_V) = \left[\frac{1}{A_{red}} \int_{A_{red}} \left(\frac{\sigma_1(x, y)}{\sigma_{max,d}} \right) dx dy \right]^{1/\beta} \quad (3.3)$$

$\sigma_1(x, y)$ predstavlja glavno napetost na površini v odvisnosti od σ_V . Geometrijski parameter β je predpostavljen na 25. Ta vrednost je bila določena na podlagi preizkusov [22]. Za standardne situacije velja konzervativna predpostavka, da je $\alpha_{\sigma} = 1.0$. Vpliv velikosti tlačne površine prereza ponazarja naslednji faktor:

$$\alpha(A_{red}) = (A_{red} / A_0)^{1/\beta} \quad (3.4)$$

A_{red} natezna površina panela ($A_{red} = A_0$ pri klasičnem steklu)

A_0 celotna površina panela

Koeficient $\alpha(t)$ ponazarja trajanje obtežbe. Odvisen je od kritične rasti razpoke, kombinacij in trajnosti obtežb, verjetnosti vetrnih in snežnih obtežb ter ostalih parametrov. Za običajne pogoje in življensko dolgotrajnost 50 let se priporoča $\alpha(t) = 3.9$ [21].

Koeficient $\alpha(S_V)$ predstavlja relativno velikost različnih obtežb, kot so pogoste obtežbe v kombinaciji z vetrnimi in snežnimi obremenitvami [21].

Varnostni faktorji

Parcialni faktor $\gamma_M \approx 1.8$ je za srednje pomembne zgradbe ter vključuje dva podatka Weibullove porazdelitve: karakteristično vrednost upogibne trdnosti $\sigma_{bB, A_{test}, k} = 45$ MPa pri 5 % zlomu z parametroma $\theta_{A_{test}} = 74$ MPa in $\beta_{test} = 6$. Distribucija predstavlja zlomno nosilnost za plosko steklo pri obremenilnemu obročnemu testu za napetostno odstopanje 2 ± 0.4 MPa/s in $A_{test} = 0.24$ m². Testi so izvedeni po standardu DIN 1249-10:1990 [23], načrtovana upogibna

trdnost poškodovanih preizkušancev $\sigma_{bB, A_{rest}, k} = 24.7$ MPa pri 0.0012 vzorčni vrednosti trdnostne porazdelitve ($45/24.7 = \gamma_M \approx 1.8$).

Izpeljava za nosilce

Največja pričakovana napetost se izračuna iz izpeljave enačbe (3.2), kjer so koeficienti prilagojeni za nosilce:

$$\sigma_{\max, d} \leq \frac{\sigma_{bB, L_{test}, k}}{\alpha_{\sigma}(q, \sigma_V)_{BZ} \cdot \alpha(L_{red}) \cdot \alpha_{BZ}(t) \cdot \alpha_{BZ}(S_V) \cdot \gamma_{M, E}} + \frac{\sigma_{V, K}}{\sigma_{M, V}} \quad (3.5)$$

$$\alpha_{\sigma}(q, \sigma_V)_{BZ} = \left[\frac{1}{L_{red}} \int_{L_{red}} \left(\frac{\sigma_1(l)}{\sigma_{\max, d}} \right)^{\beta} dl \right]^{1/\beta} \quad \alpha(L_{red}) = \left(\frac{L_{red}}{L_{test}} \right)^{1/\beta} \quad \alpha(t) \approx 3.7 \quad (3.6)$$

$\sigma_{bB, L_{test}, k}$ je karakteristična vrednost upogibne trdnosti 5% fraktila upogibnih preizkušancev pri natezni dolžini $L_{test} = 0.46$ m. $\sigma_1(l)$ je glavna napetost na lokaciji 1. $\alpha(L_{red})$ predstavlja dolžino nosilca, kjer je nosilec podvržen nateznim napetostim. Sedlacek [21] priporoča $\beta = 5$ za polirane in $\beta = 12.5$ za nepolirane robove, $\gamma_{M, E} \approx 1.40$ je predpostavljen za $\beta = 12.5$, $\alpha_{\sigma}(q, \sigma_V)_{BZ}$ je 1.0 za enakomerno, 0.94 za parabolično ter 0.86 za trikotno obtežbo, $\alpha_{BZ}(S_V)$ je enako $\alpha(S_V)$.

3.3.2 Evropski standard prEN 13474

Ta metoda sloni na metodi DELR z dodatki metod Shen (3.3.3) in Siebert (3.3.4), ki sta predstavljeni v nadaljevanju:

$$\sigma_{eff, d} \leq f_{g, d} \quad (3.7)$$

Efektivne napetosti $\sigma_{eff, d}$ dobimo iz najbolj neugodne kombinacije obtežb:

$$\sigma_{eff, d} = \left[\frac{1}{A} \int_A (\sigma_1(x, y))^{\beta} dx dy \right]^{1/\beta} \quad (3.8)$$

A celotna površina panela

$\sigma_1(x, y)$ glavna napetost zaradi obtežb na površini

β geometrijski parameter (glej poglavje 3.3.1)

To pomeni, da je efektivna napetost definirana neodvisno od rezidualnih napetosti ob predpostavki, da je celotna površina natezno obremenjena. Uporablja se koeficient za klasično steklo $\alpha_\alpha(p)$ iz DELR metode, zato velja $\sigma_{eff,d} = \sigma_{max,d} \cdot \alpha_\alpha(p)$. β je oblikovni parameter Weibullove porazdelitve lomnih napetosti. Za običajne konstrukcije in podporne pogoje standard prEN 13747-2:2000. *Steklo v gradbeništvo - Načrtovanje steklenih panelov- Del 2: Načrtovanje površinsko obremenjenih plošč* podaja tabele in rešitve za definiranje $\sigma_{eff,d}$ v odvisnosti od obtežbe q ter dimenzije plošč (ni potrebno reševati enačbe 3.8). V petem poglavju bom predstavil 3 primere načrtovanja površinsko obremenjenih steklenih panelov s standardom prEN 13747.

Dovoljene efektivne napetosti so:

$$f_{g,d} = \left(k_{mod} \frac{f_{g,k}}{\gamma_M \cdot k_A} + \frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{\gamma_V} \right) \cdot \gamma_n \quad (3.9)$$

$f_{b,k}$ karakteristična vrednost porušne trdnosti

$f_{b,k} = f_{g,k}$ za KS, 70 MPa za TUS ter 120 MPa za PKS

$f_{g,k}$ karakteristična vrednost trdnosti; $f_{g,k} = 45$ MPa za silikatno in borosilikatno steklo

$f_{b,k} - f_{g,k}$ prispevek rezidualnih napetosti napram materialni trdnosti (0 za KS)

γ_V varnostni faktor rezidualnih napetosti zaradi kaljenja (2.3 za NKS)

γ_M varnostni faktor materialne napetosti (=1.8 za NKS)

γ_n nacionalni varnostni faktor (=1.0 za večino držav)

k_A koeficient, ki upošteva površino panela, ki je neodvisna od rezidualnih napetosti;

$k_A = A^{0.04}$ pri $A_{test} = 1\text{m}^2$ ter $\beta = 25$

k_{mod} faktor, ki upošteva trajnost ter kombinacijo obtežb in okoljske vplive;

kratkotrajna (veter), 0.72; srednjetrjna (sneg), 0.36; trajna obtežba (lastna teža), 0.27.

Kratice: KS- klasično steklo, TUS-termično utrjeno steklo, PKS-polno kaljeno steklo, SLK-natrijevo-kalcijevo steklo

V primerjavi z DELR metodo, prEN 13474 upošteva naslednje dodatke:

- Faktor, ki upošteva vpliv porazdeljenosti napetosti je neodvisen od rezidualnih napetosti, ker se upošteva celotna površina A (pri DELR metodi se upošteva A_{red})
- k_{mod} nadomešča $\alpha(t)$ in $\alpha(S_v)$
- k_A nadomešča $\alpha(A_{red})$, vendar temelji na celotni površini namesto samo na natezni coni, zato je neodvisna od rezidualnih napetosti

3.3.2.1 Povzetek Evropskega standarda prEN 13474-2

Velja za steklene panele, ki so obremenjeni z enakomerno površinsko obtežbo pravokotno na ravnino steklenega panela. Išče se potrebna debelina stekla statične plošče, da bo ta odporna napram enakomernim površinskim obtežbam kot so lastna, vetrna in temperaturna obtežba.

1 Področje standarda

Podane so enostavne rešitve za:

- Pravokotne steklene panele, ki so enostavno podprte na dveh, treh ali štiri robovih
- Trikotne steklene panele, ki so podprti na vseh treh robovih
- Okroglih steklenih panelih, ki so podprti po celem robu

2 Referenčni standardi

Trenutni Evropski standard vsebuje datumske in brez datumske reference drugih virov:

EN 572	Steklo v gradbeništvo - Osnovni stekleni proizvodi
prEN 1279	Steklo v gradbeništvo – Izolacijsko steklo
EN 1748-1	Steklo v gradbeništvo - Borosilikatna stekla
EN 1748-2	Steklo v gradbeništvo - Keramično steklo
prEN 1863	Steklo v gradbeništvo - Termično utrjeno steklo
prEN 12150	Steklo v gradbeništvo - Polno kaljeno steklo
prEN 12337	Steklo v gradbeništvo - Kemično utrjeno steklo

EN 12543-2	Steklo v gradbeništvo - Laminatno varnostno steklo
EN 12543-3	Steklo v gradbeništvo - Laminatno steklo
prEN	Steklo v gradbeništvo - Termično utrjeno borosilikatno steklo
prEN	Steklo v gradbeništvo - Termično utrjeno borosilikatno steklo
prEN	Steklo v gradbeništvo - Toplotno utrjeno steklo z namakanjem
ENV 1991-1	Osnove načrtovanja in obtežb na zgradbah - Osnove načrtovanja
ENV 1991-2-1	Osnove načrtovanja in obtežb na zgradbah - Gostota, lastna teža
ENV 1991-2-3	Osnove načrtovanja in obtežb na zgradbah - Obtežbe snega
ENV 1991-2-4	Osnove načrtovanja in obtežb na zgradbah - Vetrne obtežbe
prEN 1288-1	Določanje upogibne trdnosti stekla - Testiranja stekla
prEN 1288-2	Določanje upogibne trdnosti stekla - Dvoosno dvojno obročni test ravnih preizkušancev z veliko površino
prEN 1288-3	Določanje upogibne trdnosti stekla - Testiranje preizkušancev podprtih na dveh točkah
prEN 1288-4	Določanje upogibne trdnosti stekla - Dvoosno dvojno obročni test ravnih preizkušancev z majhno površino

3 Definicije pomembnejših lastnosti

Obtežbe

Preglednica 7: Obtežni primeri po standardu prEN 13474-2

	Ena spremenljiva obtežba	2 / več spremenljivih obtežb
Mejno stanje nosilnosti	$\sum_j \gamma_{Gj} G_{kj} + 1,5 Q_{k1}$	$\sum_j \gamma_{Gj} G_{kj} + 1,35 \sum_i Q_{Ki}$
Mejno stanje uporabnosti	$\sum_j G_{kj} + Q_{k1}$	$\sum_j G_{kj} + 0,9 \sum_i Q_{Ki}$

Dovoljene napetosti

Za panele velikosti do 4.0 m² se uporabljajo vrednosti v preglednici 8

Preglednica 8: Dovoljene napetosti (MPa) po standardu prEN 13474-2

Stekleni proizvod		Enakomerno porazdeljena površinska obtežba					
Tip stekla	Obdelava	Kratkotrajne obtežbe		Srednjetrojne obtežbe		Stalne obtežbe	
		Vetrna obtežba		Obtežba snega, Klimatska obtežba		Lastna, Višinska obtežba	
		MSN	MSU	MSN	MSU	MSN	MSU
Plosko steklo	Klasično	17.0	30.7	8.5	15.3	6.4	11.5
	Termično	27.9	47.3	19.4	32.0	17.3	28.2
	Kaljeno	49.6	80.7	41.1	65.3	39.0	61.5
	Kemično	62.7	100.7	43.2	85.3	52.0	81.5
Barvano steklo	Termično	17.0	30.7	8.5	15.3	6.4	11.5
	Kaljeno	30.1	50.7	21.6	35.3	19.4	31.5
Vlečeno steklo	Klasično	13.3	23.6	6.7	11.8	5.0	8.8
	Termično	16.7	28.6	10.0	16.8	8.3	13.8
	Kaljeno	28.3	46.1	21.7	34.3	20.0	31.3
	Kemično	48.3	76.1	41.7	64.3	40.0	61.3
Žično steklo	Vlečeno	9.6	17.0	4.8	8.5	3.6	6.4
	Polirano	13.3	23.6	6.7	11.8	5.0	8.8

Primerjava izračunanih in dovoljenih napetosti ter pomikov

Z računom moramo preveriti ustreznost steklenega panela v mejnem stanju nosilnosti (MSN) in v mejnem stanju uporabnosti (MSU):

-Izračunane napetosti ne smejo preseči dovoljenih napetosti:

$$\sigma_{calc} \leq f_{g,d} \quad (3.10)$$

-Če je potreba po omejitvi pomikov, potem mora veljati:

$$w_{max} \leq w_d \quad (3.11)$$

Robne podpore

Enostavno podprti robovi morajo biti dovolj togi podporni element (okvir) v primerjavi s togostjo steklenega panela. Priporočljiva togost okvira, v primeru površinskih obtežb do 2

kN/m^2 , mora biti tolikšna, da so manjši od $L/200$. V primeru obtežb večjih od 2 kN/m^2 , moramo zagotoviti ustrezno togost okvirja.

Majhni izolacijski stekleni paneli

Izolacijske steklene panele, ki so podprti na vseh 4-ih robovih, za katere veljajo pogoji v preglednici 9, lahko uporabljamo pri vertikalnem zasteklevanju za višine vse do 20 m nad tlemi. Za običajne steklene proizvode ter običajne vgradne pogoje, ni potrebno opraviti kakršnihkoli računov.

Preglednica 9: Pogoji uporabe brez računanja za majhne izolacijske steklene panele

Lastnost	Omejitev
Tip stekla	Kaljeno ali termično utrjeno steklo
Maksimalna površina panela	$1,6 \text{ m}^2$
Minimalna debelina posameznega panela	4 mm
Maksimalna razlika v debelini različnih panelov	4 mm
Dovoljena zunanja obtežba	Samo obtežba vetra, $0,8 \text{ kN/m}^2$
Maksimalna višinska razlika proizvodnje in vgraditve	500 m

Aneks A

Upogibna togost steklenega panela:
$$K = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (3.12)$$

kjer so E elastični modul, h debelina panela ter μ Poissonov količnik.

Aneks B

Pravokotni stekleni paneli

Izmed dimenzij a in b panela, štejemo a kot krajšo stranico. λ predstavlja razmerje dimenzij kot $\lambda = a/b$, h je debelina panela ter F_d je projektna obtežba.

Za praktično določitev napetosti ter pomika uporabljamo naslednje enačbe:

Maksimalne natezne napetosti
$$\sigma_{\max} = k_1 \frac{a^2}{h^2} F_d \quad (3.13)$$

Efektivne napetosti
$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d \quad (3.14)$$

Pomik
$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} \quad (3.15)$$

Normirana napetost
$$p^* = \frac{a^4}{h^4} \frac{F_d}{E} \quad (3.16)$$

V primeru štiri-robno podprtih steklenih panelih, so koeficienti k_1 , k_2 in k_4 odvisni on razmerja λ ter normirane obtežbe p^* . V primeru majhnih pomikov (linearna teorija) lahko predpostavimo $p^* = 0$.

Izolacijski stekleni paneli

V primeru dvojne steklitve je potrebno prenos obtežbe določiti glede na relativno togost panelov:

Koeficient togosti zunanjšega panela 1:

$$\delta_1 = \frac{h_1^3}{h_1^3 + h_2^3} \quad (3.17)$$

Koeficient togosti notranjšega panela 2:

$$\delta_2 = \frac{h_2^3}{h_1^3 + h_2^3} \quad (3.18)$$

kjer so: h_1 je debelina zunanjšega sloja, h_2 je debelina notranjšega sloja ter s je širina medzračnega prostora.

Karakteristična dolžina enote:

$$a^* = 28,9 \left(\frac{sh_1^3 h_2^3}{(h_1^3 + h_2^3) k_5} \right)^{0,25} \quad (3.19)$$

Vpliv obtežb predstavlja t.i. izolacijski faktor:

$$\phi = \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{a^*} \right)^4} \quad (3.20)$$

Obtežbe

- *Zunanje obtežbe*

-Ena spremenljiva obtežba Q_{k1} delujoča na zunanji panel

Projektna obtežba $F_{d,1}$ za zunanji panel 1:

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2)(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 1,5Q_{k1}) + (1-\phi)\delta_1 \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} \quad (3.21)$$

Projektna obtežba $F_{d,2}$ za notranji panel 2:

$$F_{d,2} = (1-\phi)\delta_2(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 1,5Q_{k1}) + (\phi\delta_1 + \delta_2) \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} \quad (3.22)$$

-Ena spremenljiva obtežba Q_{k2} delujoča na notranji panel

Projektna obtežba $F_{d,1}$ za zunanji panel 1:

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2) \sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + (1-\phi)\delta_1 \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 1,5Q_{k2} \quad (3.23)$$

Projektna obtežba $F_{d,2}$ za notranji panel 2:

$$F_{d,2} = (1-\phi)\delta_2 \sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + (\phi\delta_1 + \delta_2) \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 1,5Q_{k2} \quad (3.24)$$

-Za več spremenljivih obtežb:

Projektna obtežba za zunanji panel 1:

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2)(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 1,35Q_{k1}) + (1-\phi)\delta_1 \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 1,35Q_{k2} \quad (3.25)$$

Projektna obtežba za notranji panel 2:

$$F_{d,2} = (1-\phi)\delta_2 \sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 1,35Q_{k1} + (\phi\delta_1 + \delta_2)(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 1,35Q_{k2}) \quad (3.26)$$

- *Notranje obtežbe:*

Projektna obtežba za zunanji panel 1:

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2)(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9Q_{k1}) + (1-\phi)\delta_1(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 0,9Q_{k2}) \pm \phi(p_{H,0} + 0,9p_{C,0}) \quad (3.27)$$

Projektna obtežba za notranji panel 2:

$$F_{d,2} = (1-\phi)\delta_2(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9Q_{k1}) + (\phi\delta_1 + \delta_2)(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 0,9Q_{k2}) \pm \phi(p_{H,0} + 0,9p_{C,0}) \quad (3.28)$$

Višinski pritiski $p_{H,0}$ in klimatski pritiski $p_{C,0}$ se določijo iz standarda prEN 13747-2.

Aneks E

Račun mora potekati tako, da je potrebno v primeru preseženih dovoljenih napetosti ponovno preračunati za steklo z boljšimi karakteristikami in /ali povečati debelino stekla.

E.1 Stalne obtežbe (razen višinske obtežbe)

Potrebno je določiti napetosti za lastno obtežbo v kombinaciji z drugimi stalnimi obtežbami, ter primerjati z dovoljenimi napetostmi za mejno stanje nosilnosti stalnih obtežb.

E.2 Višinske obtežbe

Potrebno je določiti napetosti v kombinaciji s katerokoli lastno in stalno obtežbo, ter primerjati z dovoljenimi napetostmi za mejno stanje uporabnosti stalnih obtežb.

E.3 Obtežba snega

V primeru obtežbe snega ali drugih srednje trajnih obtežb:

Potrebno je določiti napetosti v kombinaciji obtežbe snega s katerokoli srednje trajno obtežbo, ter primerjati z dovoljenimi napetostmi za mejno stanje uporabnosti stalnih obtežb, ter primerjati z dovoljenimi napetostmi za mejno stanje nosilnosti za srednje trajne obtežbe.

E.4 Klimatske obtežbe

Potrebno je določiti napetosti v kombinaciji klimatske obtežbe z katerokoli srednje trajno obtežbo, skupaj z lastno obtežbo, višinsko obtežbo in ostalimi stalnimi obtežbami, ter primerjati z dovoljenimi napetostmi za mejno stanje uporabnosti za srednje trajne obtežbe.

E.5 Obtežba vetra in ostale kratkotrajne obtežbe

(5a) Potrebno je določiti napetosti v kombinaciji vseh obtežb (vključujoče notranje obtežbe), ter jih primerjati z dovoljenimi napetostmi za mejno stanje nosilnosti za kratkotrajne obtežbe.

(5b) Za izolacijski panel je potrebno določiti napetosti za notranje obtežbe v kombinaciji katerih koli ostalimi obtežbami, ter primerjati z dovoljenimi napetostmi za mejno stanje nosilnosti za kratkotrajne obtežbe.

3.3.3 Shenova metoda

Shen metoda je znatna poenostavitev DELR metode z eno pomembno izjemo. Rezidualne napetosti so povzete iz Kanadskega standarda CAN/CGSB 12.20-M89. Metoda je primerna za površinsko obremenjene steklene panele klasične ali kaljene izvedbe, podprte na vseh štirih robovih. Veljati mora:

$$\sigma_{\max,d} \leq \sigma_k \frac{\eta_F \cdot \eta_D}{\gamma_R} \quad (3.29)$$

$\sigma_{\max,d}$ maksimalna vrednost napetosti

σ_k karakteristična vrednost upogibne trdnosti določena po R400 dvoosno dvoobročnem testu

η_F koeficient, ki upošteva porazdelitev napetosti na površini

η_D koeficient, ki upošteva dolgotrajnost obtežbe

γ_R varnostni faktor odpornosti

Preveritev napetosti je potrebna posamezno za različne trajnosti obtežb. Faktor η_F predstavlja velikost panela ter porazdelitev napetosti (preglednica 7). Faktor trajnosti obtežbe η_D je odvisen od tipa stekla (preglednica 8). Če hočemo upoštevati to metodo, morajo biti tudi površinski in okoljski pogoji enaki kot pri laboratorijskih testih, zato velja:

$$\eta_D = \frac{\sigma_D}{\sigma_R} = \left[\frac{t_R}{t_D} \cdot \frac{1}{n+1} \right]^{1/n} \quad (3.30)$$

σ_D ekvivaletna trdnost

σ_R testna upogibna trdnost

t_R trajanje testa

t_D trajanje obtežbe

n parameter hitrosti širjenja razpoke; $n_{KS} \approx 17$ (KS), $n_{PKS} \approx 70$ (PKS)

Vrednost $n_{PKS} = 70$ ima pomankljivost, ker ne upošteva fenomena naraščanja hitrosti širjenja razpoke, ki se pojavi pri polno kaljenem steklu.

Preglednica 10: Faktor η_F pri Shenovi metodi

	A = 0.5-4.0 m ²	A = 4-10 m ²
Klasično steklo	1.0	0.9
Polno kaljeno steklo	1.0	1.0

Preglednica 11: Faktor η_D pri Shenovi metodi

	Stalna obtežba (50 let)	Sneg (30 dni)	Veter (10 min)
Klasično steklo	0.27	0.45	0.69
Polno kaljeno steklo	0.74	0.83	1.00

3.3.4 Siebertova metoda

Poglavitne spremembe prej omenjenim metodam so:

- Upošteva vpliv dvoosnih napetosti
- Rezidualne napetosti so predstavljene kot obtežba

$$\sigma_{ges,d,max} \cdot f_A \cdot f_\sigma \cdot f_{tS} \leq \frac{\theta}{f_P} \quad (3.31)$$

$\sigma_{ges,d,max}$ maksimalne površinske napetosti ($\sigma_{ges,d,max} = \sigma_{d,max} + \sigma_E$)

$\sigma_{d,max}$ maksimalne napetosti zaradi obtežb

σ_E rezidualne površinske napetosti (tlačne imajo negativni predznak)

f_A koeficient, ki upošteva različne površine testnih in realnih elementov

f_σ koeficient, ki upošteva porazdelitev napetosti testnih in realnih elementov

f_{tS} koeficient, ki upošteva trajanje obtežbe in relativne magnitude različnih obtežb

θ parameter Weibullove porazdelitve, ki ponazarja eksperimentalne upogibne teste

f_p varnostni faktor, ki upošteva verjetnost porušitve

Nehomogeno porazdelitev napetosti upošteva t.i. efektivna površina $A_{N,ef}$:

$$A_{N,ef} = \int_A \left(\frac{\chi \cdot \sigma_{ges,d}(x, y)}{\sigma_{ges,d,max}} \right)^\beta dA \quad (3.32)$$

$\sigma_{ges,d}(x, y)$ prve glavne napetosti na površini (nanaša se na napetosti, ki širijo razpoke
 ($\sigma_{ges,d,max} \geq 0$))

$\sigma_{ges,d,max}$ maksimalne glavne napetosti na površini

A površina steklenega panela

χ korekcijski faktor prvih in tretjih glavnih napetosti; konzervativna ocena: 1.0; za dvoosno napetostno stanje, $\chi \approx 0.83$ je predpostavljeno

Koeficient, ki vključuje razlike površin testnih in realnih elementov je:

$$f_{A\sigma} = \left(\frac{A_{N,ef}}{A_{L,ef}} \right)^{1/\beta} \quad (3.33)$$

$A_{L,ef}$ je efektivna površina testnih preizkušancev. Za poenostavitev je priporočeno razdelitev

$f_{A\sigma}$ na 2 sledeča faktorja:

$$f_A = \left(\frac{A}{A_{L,ef}} \right)^{1/\beta} \quad f_\sigma = \left(\frac{A_{N,ef}}{A} \right)^{1/\beta} = \frac{\sigma_{ges,d,ef}}{\sigma_{ges,d,max}} \quad (3.34)$$

Efektivna glavna napetost $\sigma_{ges,d,ef}$ je definirana kot $A \cdot \sigma_{ges,d,ef}^\beta = A_{eff} \cdot \sigma_{ges,d,max}^\beta$. Rezidualna napetost se šteje kot obtežba, zato vpliva na f_σ , koeficient f_A je identičen kot $\alpha(A)$ pri DELR metodi.

Trajanje obtežbe, relativne magnitude različnih obtežb v kombinacijah obtežb in okoljski vplivi so upoštevani s faktorjem f_{ts} , ki izhaja iz faktorjev $\alpha(t)$ in $\alpha(S_v)$ [22].

Faktor f_p , ki predstavlja verjetnost porušitve je definiran kot:

$$f_p = \left[\ln \left(\frac{1}{1 - G_a} \right) \right]^{-1/\beta} \quad (3.35)$$

G_a je predpostavljen $1.5 \cdot 10^{-3}$ za srednje pomembne konstrukcije, zato dobimo $f_p = 1.30$, ko uporabimo $\beta = 25$ [22]

3.3.5 Poenostavitve standardov

Časovna odvisnost trdnosti stekla

Natezna trdnost stekla se s časom spreminja zaradi napetostne korozije. Trenutne metode predpostavljajo, da je hitrost širjenja razpok konstantna vrednost [24].

Trajanje obtežbe

Vse metode so poenostavljene, saj temeljijo na predpostavki, da lahko rast razpoke in verjetnost porušitve zapišemo z integralom rizika, znanim kot Brownov integral. Trenutna verjetnost porušitve v točki je časovno neodvisna od trenutne obtežbe, kar pa seveda realno ne drži. Odpornost materiala izhaja iz modela, ki pravi da se ne manjša pri kratkotrajnih obtežbah, kar seveda ne velja. Te površne predpostavke ter visoke variance testnih parametrov Weibullove porazdelitve, so vodile k zmedi in netočnosti metod. Brownov integral je dober približek, samo v primeru, če je razpoka pri porušitvi občutno večja od začetne razpoke. Pri velikih razponih obtežb ali pa pri nižjih hitrostih razpoke moramo uporabiti formulo, ki temelji na analizi eksperimentov.

Rezidualne napetosti

Kritično je, da ločimo rezidualne napetosti od trdnosti stekla. Samo natezni deli steklenega elementa so podvrženi sub-kritični rasti razpok, zato so tudi varnostni faktorji različni za rezidualne napetosti in trdnost stekla.

Zaključek

Trenutne metode imajo pomanjkljivosti, zato so primerne samo za:

- pravokotne panele
- enakomerno površinsko obtežbo
- konstantno trajajočo obtežbo
- časovno neodvisen napetostni razvoj in podobno...

Trenutni standardi, ki sem jih predstavil v poglavju 3 so torej primerni za enakomerne obtežbe, ki delujejo pravokotno (upogib) na površino steklenega panela. V naslednjem poglavju bom predstavil obremenitve, ki delujejo vzporedno z površino steklenega panela (strig, uklon). Pri teh obremenitvah se pojavijo stabilnostni problemi.

4 TLAČNO OBREMENJENI ELEMENTI IN STABILNOSTNI PROBLEMI

Tlačna trdnost stekla je do desetkrat večja kot natezna. Eksperimentalne analize [25] so potrdile, da lahko tlačno obremenjeni stekleni paneli prenesejo velike obremenitve. Ta lastnost stekla je odprla veliko različic uporabe, kot so stene, nosilci, lupine in fasadni elementi, vendar pa se zaradi vitkosti elementov pojavijo stabilnostni problemi. V preteklosti se je uporabljala linearno elastična stabilnostna teorija, pri kateri se geometrijsko popoln element poruši, ko je presežena kritična obtežba. Kritična obtežba je odvisna samo od geometrije, obtežnih pogojev in odpornosti elementa. Ti modeli v glavnem ne morejo prikazati uklonsko stabilnost realnega elementa z začetno nepravilnostjo in nelinearnim obnašanjem materiala. Uporabljeni morajo biti bolj realistični modeli, kot je nelinearna numerična analiza uklona, ki ponazarja realno nosilnost in obnašanje. Pri analizi ni potrebno uporabljati nelinearno obnašanje materiala, ker se steklo obnaša idealno-elastično.

Uklonsko obnašanje steklenih elementov je odvisno od:

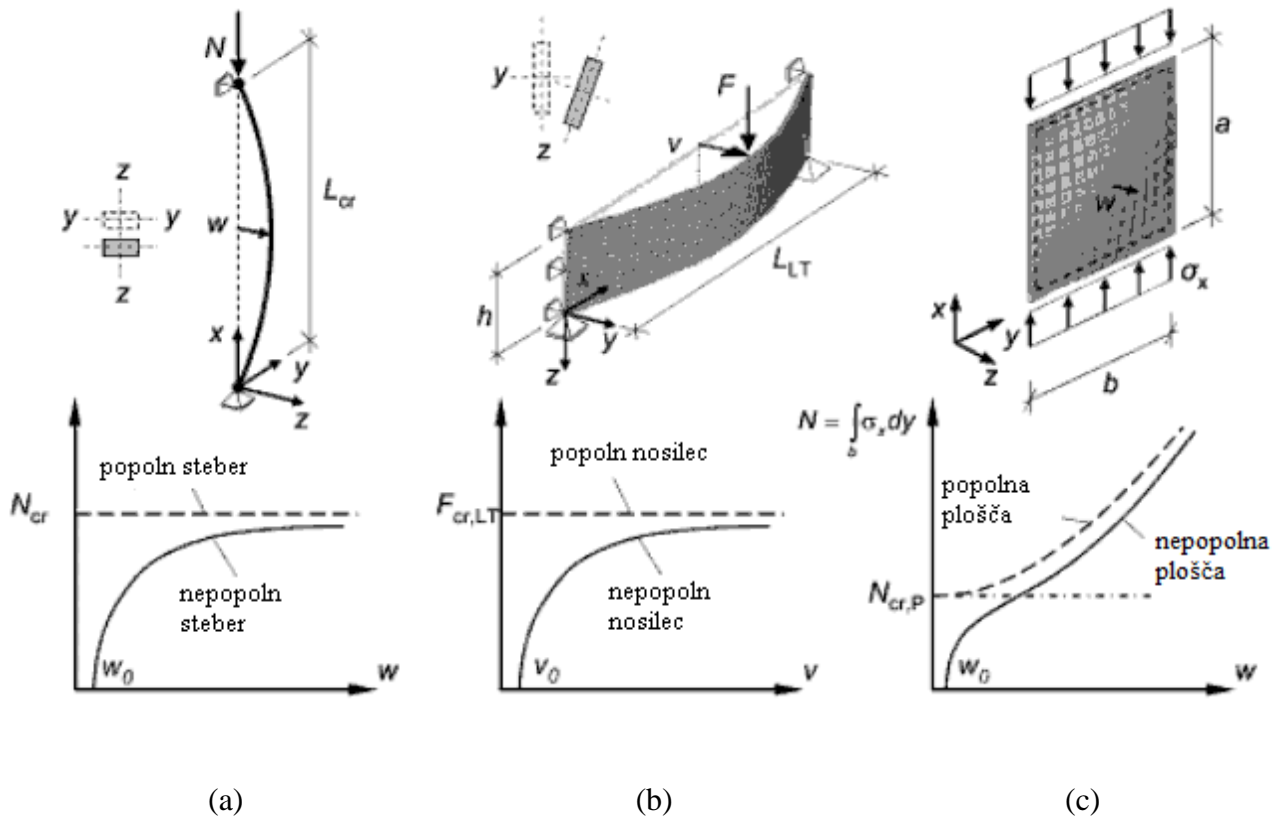
- toleranc proizvodnje
- imperfektnosti (začetnih deformacij)
- vmesnih slojev pri laminatnih steklih
- linearno elastičnega obnašanja materiala brez plastične rezerve
- trdnosti materiala, ki je odvisna od trdnosti stekla in rezidualnih napetosti
- mejnih pogojev (tip pritjevanja, silikonski spoji ter polnila)

Steklarske tovarne stremijo k zmanjšanju materiala. Realna debelina t je ponavadi manjša od nominalne vrednosti, kar zmanjšuje prečni prerez, ter posledično manjšo uklonsko odpornost. Visko-elastično obnašanje materiala (PVB folije), ki je časovno in temperaturno odvisno, vpliva na uklonsko obnašanje laminatnih stekel. Stabilnostna odpornost je mnogo višja pri kratkotrajnih obtežbah, kot pri dolgotrajnih obtežbah.

Podpore in prenos obtežbe imajo lahko pozitiven vpliv, če je na primer rotacija na robovih preprečena (silikonski stiki), saj uspešno zmanjša efektivno uklonsko dolžino. Če so ti vplivi upoštevani, potem je potrebno izbrati ustrezen model za račun ter kvaliteto materiala, ki bo ustrezna skozi celotno življensko dobo.

Začetne deformacije (imperfektnosti)

Začetne deformacije so v glavnem posledica procesov kaljenj. Meritve so pokazale, da imajo klasična stekla majhno začetno deformacijo ($<L/2500$), medtem ko imajo termično utrjena stekla in polno kaljena stekla vse do $L/300$. Začetne deformacije so odvisne od izdelave, zato varirajo glede na proizvajalca [25]. Slika 42 prikazuje vpliv imperfektnosti (w_0) na potek odklona (w) ter kritično obremenitev (N_{cr}) pri tipičnih uklonskih obremenitvah.



Slika 42: Problem stabilnosti in obnašanje tlačnih elementov: (a) uklon stebra, (b) torzijski uklon nosilca, (c) uklon plošče

4.1 Uklon stebra

Uklon monolitnega steklenega stebra stekla lahko opišemo z diferencialno enačbo II.reda pri dolžini L_{cr} , začetni deformaciji w_0 , tlačni sili N ter njeni ekscentričnosti e

$$EI \frac{d^2 w(x)}{dx^2} + N \left[w_0 \sin \frac{\pi x}{L_{cr}} + e + w(x) \right] = 0 \quad (3.17)$$

Kritična uklonska sila je:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \quad (3.18)$$

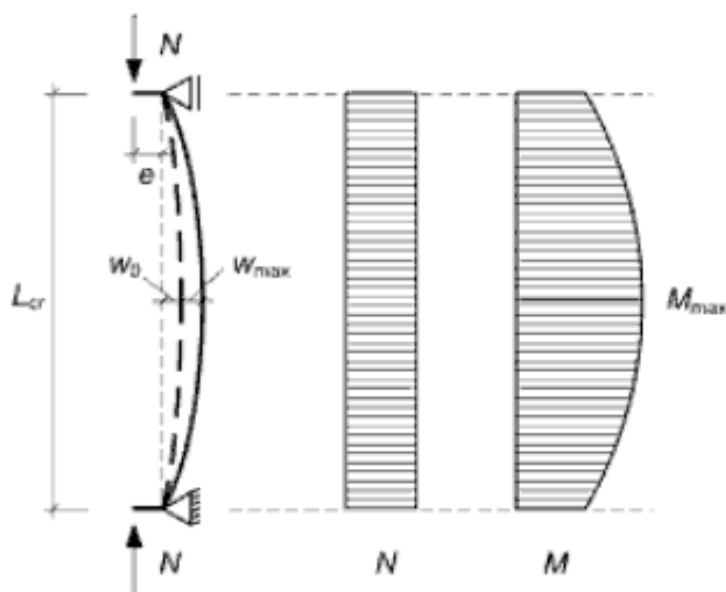
Maksimalen odmik je:

$$w_{max} = \frac{e}{\cos(L_{cr} / 2\sqrt{N / N_{cr}})} + \frac{w_0}{1 - N / N_{cr}} \quad (3.19)$$

Maksimalne napetosti so:

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} (w_{max} + w_0 + e) \quad (3.20)$$

kjer je N osna sila, A površina prečnega prereza in W elastični vztrajnostni moment prereza.



Slika 43: Uklon stebra

Pri laminatnih steklih se vmesni material obnaša kot strižni stik med steklenimi paneli. Poenostavljeno lahko vmesne sloje smatramo kot elastične s konstantno strižno odpornostjo za določeno temperaturo in trajnost obtežbe. Prenos obtežbe se lahko opiše z uporabo elastične 'sendvič' teorije [26].

Kritična uklonska sila laminatnega stekla iz dveh ali treh panelov (simetrična postavitev):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2(1 + \alpha + \pi^2\alpha\beta)}{1 + \pi^2\beta} \frac{EI_S}{L_{cr}^2} \quad (3.21)$$

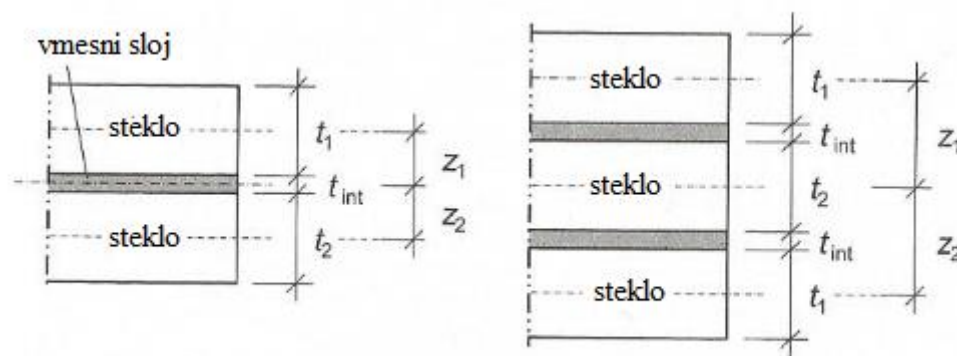
V primeru dveh panelov velja:

$$\alpha = \frac{I_1 + I_2}{I_S}; \quad \beta = \frac{t_{int}}{G_{int} b(z_1 + z_2)} \frac{EI_S}{L_{cr}^2}; \quad I_S = b(t_1 z_1^2 + t_2 z_2^2) \quad (3.22)$$

In v primeru treh panelov:

$$\alpha = \frac{2I_1 + I_2}{I_s}; \quad \beta = \frac{t_{\text{int}}}{2G_{\text{int}}bz_1^2} \frac{EI_s}{L_{cr}^2}; \quad I_s = 2bt_1z_1^2 \quad (3.23)$$

L_{cr} je upogibna dolžina, b je širina prečnega prereza, G_{int} je strižni modul vmesnega sloja in $I_i = bt_i^3/12$ je odpornostni moment panela i



Slika 44: Prečni prerez laminatnega stekla dveh (levo) ali treh (desno) panelov

Poenostavljen pristop za računanje pomikov in maksimalnih upogibnih napetosti laminatnih stekel uporabimo izračun efektivne debeline:

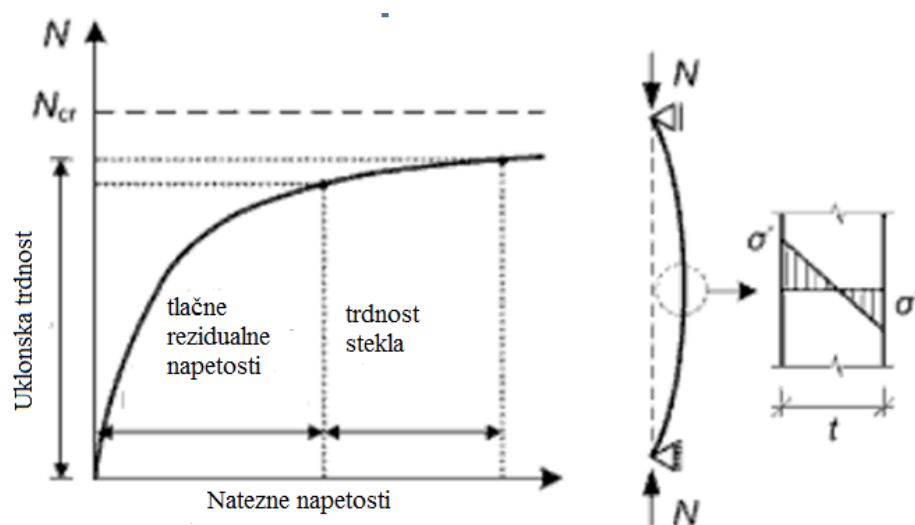
$$t_{\text{eff}} = \sqrt[3]{\frac{12I_s(1 + \alpha + \pi^2\alpha\beta)}{b(1 + \pi^2\beta)}} \quad (3.24)$$

$$A = b \sum t_i; \quad W = bt_{\text{eff}}^2 / 6 \quad (3.25)$$

Parametri, ki vplivajo na uklon stebra:

- Debelina panela stebra t , začetna deformacija w_0 ter ekscentričnost obtežbe e imajo največji vpliv na uklonsko trdnost.
- Zaradi velike tlačne trdnosti stekla je porušitev odvisna od maksimalne natezne trdnosti.
- Eksperimenti so pokazali, da se pojavi porušitev na mestu z najmanjšo natezno trdnostjo. V primeru klasičnega stekla so to robovi (poškodbe), v primeru kaljenega stekla pa bližina robov zaradi zmanjšanih rezidualnih napetosti.

- Sposobnost prenašanja obtežb kaljenih stekel je bolj odvisna od rezidualnih tlačnih napetosti, kot pa od trdnosti stekla zaradi nelinearnega odnosa med tlačno obtežbo in natezno napetostjo na površini stekla.
- Laminatno steklo z PVB folijami poveča uklonsko trdnost, vendar pa je trdnost vmesnega sloja časovno in temperaturno odvisna. Za nizke temperature in kratkotrajne obtežbe je nosilnost skoraj enaka kot pri celotni debelini laminata, pri visokih temperaturah (>50 °C) in dolgotrajnih obtežbah (lastna teža) pa je nosilnost podobna nosilnosti posameznega panela.



Slika 45: Vpliv rezidualnih napetosti in materialne trdnosti na uklonsko trdnost

V nasprotju z jeklenimi stebri je uklonska nosilnost steklenega stebra odvisna od maksimalne natezne trdnosti, ker tlačna trdnost ne preseže uklonske napetosti. Maksimalne napetosti lahko dobimo z enačbo (3.20). Uklonska trdnost zagotovljena, če velja:

$$f_{sd} \leq f_{Rd} \quad (3.26)$$

kjer je f_{sd} maksimalna natezna napetost in f_{Rd} maksimalna natezna trdnost.

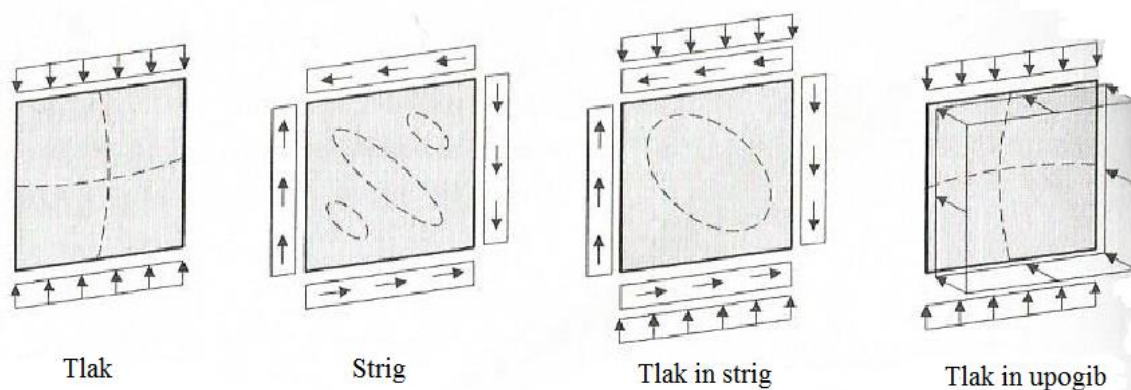
Zaradi nelinearnega odnosa med tlačno obtežbo in natezno napetostjo na površini stekla mora biti maksimalna upogibna napetost zmanjšana z ustreznimi varnostnimi faktorji. Poenostavljeno lahko smatramo, da je natezna trdnost enaka rezidualnim napetostim (slika 41). Pri laminatnih steklih upoštevamo kompozitno obnašanje zaradi vmesnih slojev. Za PVB sloje je priporočeno upoštevati kompozitno obnašanje za kratkotrajne obtežbe (veter).

Poenostavljeno lahko debelino laminata upoštevamo z enačbo efektivnega monolitnega stekla (enačba (3.24)). Maksimalne napetosti lahko izračunamo z enačbo (3.20) ali z numeričnimi modeli.

4.2 Uklon plošče

V odvisnosti od tipa obtežbe ali obnašanja strukture delimo plošče na:

- tlačno obremenjene plošče
- strižno obremenjene plošče
- tlačno in strižno obremenjene plošče – interakcija tlaka in striga
- upogibno in tlačno obremenjene plošče – interakcija tlaka in upogiba



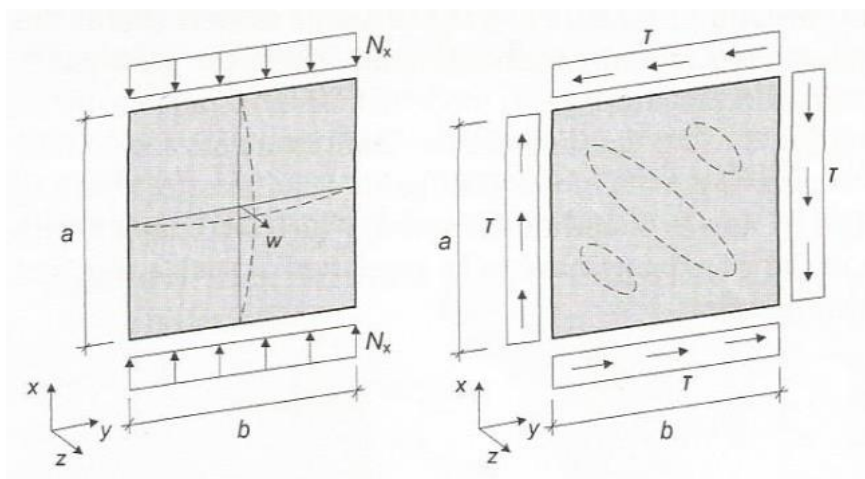
Slika 46: Različni načini uklona plošče

Kritično upogibno obtežbo monolitnega stekla lahko izračunamo z analitičnimi modeli, ki temeljijo na linearno elastični teoriji. Zaradi post-kritičnega uklonskega obnašanja plošče kritični uklonski obtežbi N_{crit} in τ_{crit} nista merodajni za nosilnost, ker podcenjujeta realno upogibno trdnost vitkih plošč. Vendar pa kritične uklonske formule vseeno uporabljamo.

Kritična uklonska obtežba $N_{x,crit}$ (sila na dolžinsko enoto) za monolitno ploščo, ki je samo tlačno obremenjena je:

$$N_{x,crit} = \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m}\right)^2 \frac{\pi^2 Et}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (3.27)$$

kjer je $\alpha = a/b$ (slika 43), m je število polovice uklonskih valov v smeri x , t je debelina panela, b je širina panela, E je modul elastičnosti ter ν je Poissonov količnik.



Slika 47: Štiri robno podprta prostoležeča plošča; tlak (levo), strig (desno)

Kritična upogibna obtežba $N_{x,crit}$ za pravokotno laminatno steklo z dvema slojima, kjer je upoštevana linearno elastična teorija plošče [22] se glasi:

$$N_{x,crit} = \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m}\right)^2 \frac{\pi^2 D}{b^2} \frac{\frac{D_1 + D_2}{D} \left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + 1\right] + \frac{Ab^2}{\pi^2 D_s}}{\left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + 1\right] + \frac{Ab^2}{\pi^2 D_s}} \quad (3.28)$$

kjer so:

$$D = D_1 + D_2 + D_s; \quad D_i = \frac{Et_i^3}{12(1-\nu^2)}; \quad D_s = \frac{Et_1 z_1^2 + Et_2 z_2^2}{1-\nu^2} \quad (3.29)$$

$$A = \frac{G_{int} (z_1 + z_2)^2}{t_{int}} \quad (3.30)$$

Kritična uklonska obtežba τ_{crit} (sila na dolžinsko enoto) za monolitno ploščo, ki je samo strižno obremenjena je:

$$\tau_{crit} = \frac{\pi^2 Et}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 k_\tau \quad (3.31)$$

z strižno uklonskim koeficientom:

$$k_\tau = 4.00 + 5.34/\alpha^2 \text{ za } \alpha < 1 \text{ in } k_\tau = 5.34 + 4.00/\alpha^2 \text{ za } \alpha \geq 1 \quad (3.32)$$

Kritična uklonska obtežba τ_{crit} za pravokotno laminatno steklo se glasi:

$$\tau_{crit} = \frac{\pi^2 Et}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 k_\tau k_{VSG} \quad (3.33)$$

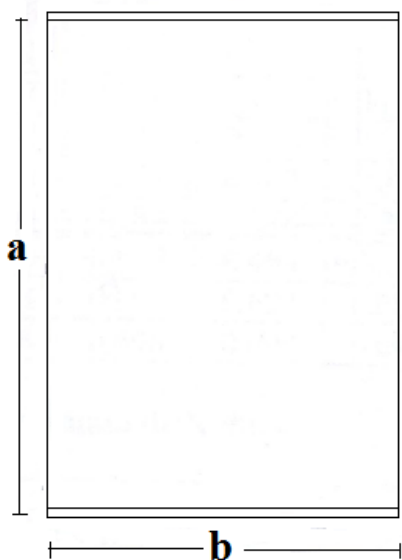
kjer korekcijski faktor k_{VSG} upošteva strižno togost vmesnega sloja [27].

5 RAČUNSKI PRIMERI

Predstavil bom trenutne postopke načrtovanja pri zasnovi nosilnih steklenih konstrukcijskih elementov. Računski primeri bodo zajemali tipične postavitve (zid, streha) in obremenitve steklenih panelov. Mejno stanje nosilnosti (MSN) ter mejno stanje uporabnosti (MSU) bom preveril v skladu z standardom prEN 13474 (poglavje 3.3.2) ter z standardom prEN 13474-2 (poglavje 3.3.2.1)

5.1 Stena iz enojnega stekla

Vertikalen panel enojne zasteklitve 14 mm klasičnega stekla, 1200 mm široko ter 1800 mm visoko, podprto samo na vrhu in dnu, podvržen vetrni obtežbi $0,9 \text{ kN/m}^2$.



Slika 48: Vertikalni stekleni panel, podprto samo na vrhu in dnu

Iz prEN 13474-2 sledi (poglavje 3.3.2):

-Karakteristike in dimenzije steklenega panela:

$$k_{\text{mod}} = 0,72 \text{ (srednjetrojna obtežba)}, f_{g,k} = 45 \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}, E = 70\,000 \text{ MPa (N/mm}^2\text{)},$$

$$\gamma_M = 1,8, \gamma_n = 1,0, a = 1800 \text{ mm}, b = 1200 \text{ mm}, h = 14 \text{ mm}$$

-Podporni pogoji:

$$\text{Dvo-robno podprt panel: } k_2 = 0,699, k_4 = 0,148$$

Izpolnjena morata biti dva pogoja:

- $\sigma_{ef} \leq f_{g,d}$ (MSN)
- $w_{\max} \leq w_d$ (MSU)

$$A = 1,2 \times 1,8 = 2,16 m^2$$

$$k_A = A^{0,04} = 2,16^{0,04} = 1,031$$

Dovoljena napetost (enačba 3.9):

$$f_{g,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{g,k}}{\gamma_M \cdot k_A} \cdot \gamma_n = 0,72 \times \frac{45}{1,8 \times 1,031} \times 1,0 = 17,5 N / mm^2$$

Iz preglednice 7 sledi:

-lastne teže ne upoštevamo, ker zaradi vertikalne postavitve panela ne učinkuje na upogib panela

MSN:

$$F_d = \sum_j \gamma_{Gj} G_{kj} + 1,5 Q_{k1} = 1,35 \times 0 + 1,5 \times 0,9 = 1,35 kN / m^2 = 1350 N / m^2$$

MSU:

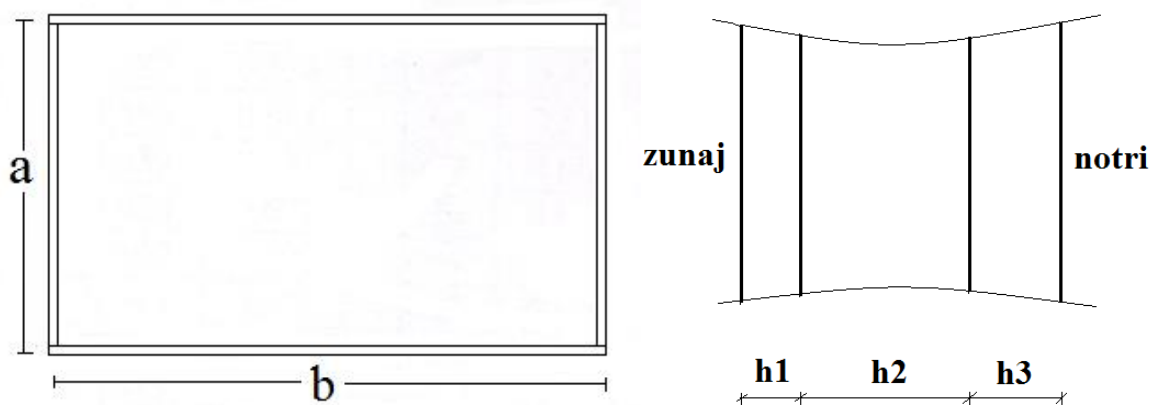
$$F_d = \sum_j G_{kj} + Q_{k1} = 1 \times 0 + 1,0 \times 0,9 = 0,9 kN / m^2 = 900 N / m^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,699 \times \frac{1,8^2}{14^2} \times 1350 = 16,0 N / mm^2 \quad [< 17,5]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,148 \times \frac{1,8^2 \times 1800^2}{14^3} \times \frac{900}{70000} = 7,3 mm \quad [< a/200 = 9 mm]$$

5.2 Stena iz izolacijskega stekla

Vertikalno izolacijsko steklo sestavljeno iz 4 mm termično utrjenega stekla (zunajni sloj), 12 mm votlega dela, 7 mm klasičnega stekla (notranji sloj), 1200 mm širokega in 900 mm visokega panela, podprtega na vseh štirih robovih, podvržen obtežbi vetra $1,51 \text{ kN/m}^2$, na višini manj kot 400 m.



Slika 49: Štiri-robno podprt vertikalni stekleni panel, prerez steklenega panela

Dimenzije steklenega panela:

$$a = 900 \text{ mm}, b = 1200 \text{ mm}, h_1 = 4 \text{ mm}, h_2 = 12 \text{ mm}, h_3 = 7 \text{ mm}$$

$$\lambda = a/b = 900/1200 = 0,75$$

Iz preglednice 9: $k_2 = 0,368$

Iz preglednice 10: $k_4 = 0,076$

Iz preglednice 11: $k_5 = 0,0315$

Koeficienta za togost zunanjega (1) in notranjega panela (2):

$$\delta_1 = \frac{h_1^3}{h_1^3 + h_2^3} = \frac{4^3}{4^3 + 7^3} = 0,157$$

$$\delta_2 = \frac{h_2^3}{h_1^3 + h_2^3} = \frac{7^3}{4^3 + 7^3} = 0,843$$

Karakteristična dolžina enote:

$$a^* = 28,9 \left(\frac{sh_1^3 h_2^3}{(h_1^3 + h_2^3) k_5} \right)^{0,25} = 28,9 \left(\frac{12 \times 4^3 \times 7^3}{(4^3 + 7^3) \times 0,0315} \right)^{0,25} = 346 \text{ mm}$$

Vpliv obtežb predstavlja t.i. izolacijski faktor:

$$\phi = \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{a^*} \right)^4} = \frac{1}{1 + \left(\frac{900}{346} \right)^4} = 0,021$$

Dovoljene napetosti za termično utrjeno in klasično steklo dobimo iz preglednice 8:

- Za 4 mm kaljeno steklo:

Obtežba vetra (MSN): $f_{g;d} = 49,6 \text{ N} / \text{mm}^2$

Obtežba vetra (MSU): $f_{g;d} = 80,7 \text{ N} / \text{mm}^2$

Obtežba klime (MSU): $f_{g;d} = 65,3 \text{ N} / \text{mm}^2$

Obtežba višine (MSU): $f_{g;d} = 61,5 \text{ N} / \text{mm}^2$

- Za 7 mm klasično steklo:

Obtežba vetra (MSN): $f_{g;d} = 17,0 \text{ N} / \text{mm}^2$

Obtežba vetra (MSU): $f_{g;d} = 30,7 \text{ N} / \text{mm}^2$

Obtežba klime (MSU): $f_{g;d} = 15,3 \text{ N} / \text{mm}^2$

Obtežba klime (MSU): $f_{g;d} = 11,5 \text{ N} / \text{mm}^2$

Po Aneksu E sledi:

E.1 Ni potrebno (ni stalnih obtežb)

E.2 Iz prEN 13471-2, tabela 1: $p_{H,0}$ višinski pritisk, $p_{C,0}$ klimatski pritisk

$$p_{H,0} = +3,6kN/m^2 \text{ ali } -3,6kN/m^2 \text{ (višinski pritisk)}$$

Za 4 mm kaljeno steklo (enačba (3.27)):

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2)(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9Q_{k1}) + (1-\phi)\delta_1(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 0,9Q_{k2}) \pm \phi(p_{H,0} + 0,9p_{C,0})$$

$$F_{d,1} = (0,159 + 0,021 \times 0,843) \times 0 + (1 - 0,021) \times 0,159 \times (0) - 0,021 \times (-3,6 + 0,9 \times 0)$$

$$F_{d,1} = 0,076kN/m^2 = 76N/m^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,368 \times \frac{0,900^2}{4^2} \times 76 = 1,4N/mm^2 \quad [<61,5]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,076 \times \frac{0,900^2 \times 900^2}{4^3} \times \frac{76}{70000} = 0,85mm$$

Podobno za 7 mm klasično steklo (enačba (3.28)):

$$F_{d,2} = 0,076kN/m^2 = 76N/m^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,368 \times \frac{0,900^2}{7^2} \times 76 = 0,5N/mm^2 \quad [<11,5]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,076 \times \frac{0,900^2 \times 900^2}{7^3} \times \frac{76}{70000} = 0,16mm$$

E.3 Ni potrebno (ni obtežbe snega)

E.4 Iz prEN 13474-1:

$$p_{H,0} = +12,0kN/m^2 \text{ ali } -15kN/m^2$$

Za 4 mm kaljeno steklo (enačba (3.27)):

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2)(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9Q_{k1}) + (1-\phi)\delta_1(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 0,9Q_{k2}) \pm \phi(p_{H,0} + 0,9p_{C,0})$$

$$F_{d,1} = (0,157 + 0,021 \times 0,843) \times 0 + (1 - 0,021) \times 0,157 \times (0) - 0,021 \times (-3,6 + 0,9 \times (-15,0))$$

$$F_{d,1} = 0,359kN/m^2 = 359N/m^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,368 \times \frac{0,900^2}{4^2} \times 359 = 6,7 N / mm^2 \quad [<65,3]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,076 \times \frac{0,900^2 \times 900^2}{4^3} \times \frac{359}{70000} = 4,0 mm$$

Podobno za 7 mm klasično steklo (enačba (3.28)):

$$F_{d,2} = 0,166 kN / m^2 = 359 N / m^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,368 \times \frac{0,900^2}{7^2} \times 359 = 2,2 N / mm^2 \quad [<15,3]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,076 \times \frac{0,900^2 \times 900^2}{7^3} \times \frac{359}{70000} = 0,75 mm$$

E.5 Za 4 mm kaljeno steklo (enačba (3.21)):

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi \delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 1,5 Q_{k1} \right) + (1 - \phi) \delta_1 \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,1} = (0,157 + 0,021 \times 0,843)(0 + 1,5 \times 1,51) + (1 - 0,021) \times 0,157 \times 0$$

$$F_{d,1} = 0,396 kN / m^2 = 396 N / m^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,368 \times \frac{0,900^2}{4^2} \times 396 = 7,4 N / mm^2 \quad [<49,6]$$

MSU (enačba (4.12)):

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi \delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 1,0 Q_{k1} \right) + (1 - \phi) \delta_1 \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,1} = (0,157 + 0,021 \times 0,843)(0 + 1,0 \times 1,51) + (1 - 0,021) \times 0,157 \times 0$$

$$F_{d,1} = 0,264 kN / m^2 = 264 N / m^2$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,076 \times \frac{0,900^2 \times 900^2}{4^3} \times \frac{264}{70000} = 2,9 mm$$

Za 7 mm klasično steklo (enačba (3.22)):

$$F_{d,2} = (1 - \phi) \delta_2 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 1,5 Q_{k1} \right) + (\phi \delta_1 + \delta_2) \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,2} = (1-0,021) \times 0,843 \times (0+1,5 \times 1,51) + (0,021 \times 0,157 + 0,843) \times 0$$

$$F_{d,2} = 1,869 \text{ kN} / \text{m}^2 = 1869 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,368 \times \frac{0,900^2}{7^2} \times 1869 = 11,4 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad [<17,0]$$

MSU (enačba (3.22)):

$$F_{d,2} = (1-\phi)\delta_2 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 1,5 Q_{k1} \right) + (\phi\delta_1 + \delta_2) \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,2} = (1-0,021) \times 0,843 \times (0+1,0 \times 1,51) + (0,021 \times 0,157 + 0,843) \times 0$$

$$F_{d,2} = 1,246 \text{ kN} / \text{m}^2 = 1246 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,076 \times \frac{0,900^2 \times 900^2}{7^3} \times \frac{1246}{70000} = 2,6 \text{ mm}$$

E.5 (b) Za 4 mm termično utrjeno steklo (enačba (3.27)):

$$F_{d,2} = (\delta_1 + \phi\delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9 Q_{k1} \right) + (1-\phi)\delta_1 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 0,9 Q_{k2} \right) \pm \phi(p_{H,0} + 0,9 p_{C,0})$$

$$F_{d,2} = (0,157 + 0,021 \times 0,843) \times (0 + 0,9 \times 1,51)$$

$$+ (1-0,021) \times 0,157 \times (0) - 0,021 \times (-3,6 + 0,9 \times (-15,0))$$

$$F_{d,2} = 0,597 \text{ kN} / \text{m}^2 = 597 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,368 \times \frac{0,900^2}{4^2} \times 597 = 11,1 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad [<80,7]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,076 \times \frac{0,900^2 \times 900^2}{4^3} \times \frac{597}{70000} = 6,6 \text{ mm}$$

Za 7 mm klasično steklo (enačba (4.28)):

$$F_{d,2} = (1-\phi)\delta_2 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9 Q_{k1} \right) + (\phi\delta_1 + \delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 0,9 Q_{k2} \right) \pm \phi(p_{H,0} + 0,9 p_{C,0})$$

$$F_{d,2} = (1-0,021) \times 0,843 \times (0 + 0,9 \times 1,51)$$

$$+ (0,021 \times 0,157 + 0,843) \times (0) + 0,021 \times (3,6 + 0,9 \times 12,0)$$

$$F_{d,2} = 1,424 \text{ kN} / \text{m}^2 = 1424 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,368 \times \frac{0,900^2}{7^2} \times 1424 = 8,7 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad [<30,7]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4 F_d}{h^3 E} = 0,076 \times \frac{0,900^2 \times 900^2}{7^3} \times \frac{1424}{70000} = 3,0 \text{ mm}$$

5.3 Streha iz laminatnega stekla

Poševno izolacijsko steklo sestavljeno iz 5 mm kaljenega stekla, 12 mm votlega dela, 8.4 mm laminatno klasičnega stekla (5 mm gornji sloj, 0.38 mm folija, 3 mm spodnji sloj), 1100 mm širokega in 1500 mm visokega panela, podprtega na vseh štirih robovih, nagnjen za 30°, podvržen obtežbi vetra 1,4 kN/m² in obtežbi snega 0,7 kN/m², na višini manj kot 400 m.

$$\lambda = a/b = 1100/1500 = 0,73$$

Iz preglednice 12: $k_2 = 0,380$

Iz preglednice 13: $k_4 = 0,079$

Iz preglednice 14: $k_5 = 0,033$

Po Aneksu E za laminatno steklo sledi:

Za kratkotrajne obtežbe:

$$h_{ef;\sigma} = h_{ef;w} = 5 + 3 = 8 \text{ mm}$$

Za dolgotrajne obtežbe:

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{\sum_i h_i^3} = \sqrt[3]{5^3 + 3^3} = 5,34 \text{ mm}$$

$$h_{ef;\sigma;5} = \sqrt[3]{\frac{5^3 + 3^3}{5}} = 5,51 \text{ mm}$$

Karakteristična dolžina enote za kratkotrajne obtežbe:

$$a^* = 28,9 \left(\frac{sh_1^3 h_2^3}{(h_1^3 + h_2^3) k_5} \right)^{0,25} = 28,9 \left(\frac{12 \times 5^3 \times 8^3}{(5^3 + 8^3) \times 0,033} \right)^{0,25} = 399 \text{ mm}$$

Karakteristična dolžina enote za dolgotrajne obtežbe:

$$a^* = 28,9 \left(\frac{sh_1^3 h_2^3}{(h_1^3 + h_2^3) k_5} \right)^{0,25} = 28,9 \left(\frac{12 \times 5^3 \times 5,34^3}{(5^3 + 5,34^3) \times 0,033} \right)^{0,25} = 363 \text{ mm}$$

Izolacijski faktor za kratkotrajne obtežbe :

$$\phi = \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{a^*}\right)^4} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1100}{399}\right)^4} = 0,0170$$

Izolacijski faktor za dolgotrajne obtežbe :

$$\phi = \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{a^*}\right)^4} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1100}{363}\right)^4} = 0,0117$$

Togost gornjega (1) in spodnjega panela (2) za kratkotrajne obtežbe:

$$\delta_1 = \frac{h_1^3}{h_1^3 + h_2^3} = \frac{5^3}{5^3 + 8^3} = 0,196$$

$$\delta_2 = \frac{h_2^3}{h_1^3 + h_2^3} = \frac{8^3}{5^3 + 8^3} = 0,804$$

Togost gornjega (1) in spodnjega panela (2) za dolgotrajne obtežbe:

$$\delta_1 = \frac{h_1^3}{h_1^3 + h_2^3} = \frac{5^3}{5^3 + 5,34^3} = 0,451$$

$$\delta_2 = \frac{h_2^3}{h_1^3 + h_2^3} = \frac{5,34^3}{5^3 + 5,34^3} = 0,549$$

Dovoljene napetosti za termično utrjeno in klasično steklo dobimo iz preglednice 8:

- Za 6 mm termično utrjeno steklo:

Obtežba vetra (MSN): $f_{g;d} = 49,6 N / mm^2$

Obtežba vetra (MSU): $f_{g;d} = 80,7 N / mm^2$

Obtežba snega (MSN): $f_{g;d} = 41,1 N / mm^2$

Obtežba klime (MSU): $f_{g;d} = 65,3 N / mm^2$

Lastna obtežba (MSN): $f_{g;d} = 39,0 N / mm^2$

Obtežba nadmorske višine (MSU): $f_{g;d} = 61,5 N / mm^2$

- Za 8.4 mm klasično steklo:

$$\text{Obtežba vetra (MSN): } f_{g;d} = 17,0N / mm^2$$

$$\text{Obtežba vetra (MSU): } f_{g;d} = 30,7N / mm^2$$

$$\text{Obtežba snega (MSN): } f_{g;d} = 8,5N / mm^2$$

$$\text{Obtežba klime (MSU): } f_{g;d} = 15,3N / mm^2$$

$$\text{Lastna obtežba (MSN): } f_{g;d} = 6,4N / mm^2$$

$$\text{Obtežba nadmorske višine (MSU): } f_{g;d} = 11,5N / mm^2$$

$$\text{Lastna obtežba za 5 mm kaljeno steklo je } 5 \times 0,025 = 0,125kN / m^2$$

$$\text{Lastna obtežba za 8.4 mm laminatno steklo je } 8,4 \times 0,025 = 0,21kN / m^2$$

Lastno obtežbo in obtežbo snega je potrebno modificirati zaradi nagnjenosti terena:

$$\text{Lastna obtežba za 5 mm kaljeno steklo je } 0,125 \times \cos(30^\circ) = 0,108kN / m^2$$

$$\text{Lastna obtežba za 8.4 mm laminatno steklo je } 0,21 \times \cos(30^\circ) = 0,182kN / m^2$$

$$\text{Obtežba snega } 0,70 \times \cos^2(30^\circ) = 0,525kN / m^2$$

Po Aneksu E sledi:

E.1 Za 5 mm kaljeno steklo – MSN (enačba (3.21))

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} \right) + (1 - \phi)\delta_1 \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,1} = (0,451 + 0,0117 \times 0,549)(1,35 \times 0,108) + (1 - 0,0117) \times 0,451 \times 1,35 \times 0,182$$

$$F_{d,1} = 0,176kN / m^2 = 176N / m^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,380 \times \frac{1,100^2}{5^2} \times 176 = 3,2N / mm^2 \quad [<39,0]$$

Za 5 mm kaljeno steklo – MSU (enačba (3.21))

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} \right) + (1 - \phi) \delta_1 \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,1} = (0,451 + 0,0117 \times 0,549)(1,0 \times 0,108) + (1 - 0,0117) \times 0,451 \times 1,0 \times 0,182$$

$$F_{d,1} = 0,131 \text{ kN} / \text{m}^2 = 131 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,079 \times \frac{1,100^2 \times 1100^2}{5^3} \times \frac{131}{70000} = 1,7 \text{ mm}$$

Podobno za 8.4 mm laminatno steklo – MSN (enačba (3.22)):

$$F_{d,2} = (1 - \phi) \delta_2 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} \right) + (\phi\delta_1 + \delta_2) \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,2} = (1 - 0,0117) \times 0,549(1,35 \times 0,108) + (0,0117 \times 0,451 + 0,549) \times 1,35 \times 0,182$$

$$F_{d,2} = 0,215 \text{ kN} / \text{m}^2 = 215 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,380 \times \frac{1,100^2}{5,51^2} \times 215 = 3,3 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad [<6,4]$$

Za 8.4 mm laminatno steklo - MSU (enačba (3.22)):

$$F_{d,2} = 0,129 \text{ kN} / \text{m}^2 = 129 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,074 \times \frac{1,189^2 \times 1189^2}{5,34^3} \times \frac{129}{70000} = 1,8 \text{ mm}$$

E.2 Iz prEN 13471-1:

$$p_{H,0} = +3,6 \text{ kN} / \text{m}^2 \text{ ali } -3,6 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Za 5 mm termično utrjeno steklo (enačba (3.27)):

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9Q_{k1} \right) + (1 - \phi) \delta_1 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 0,9Q_{k2} \right) \pm \phi(p_{H,0} + 0,9p_{C,0})$$

$$F_{d,1} = (0,451 + 0,0117 \times 0,549) \times (1,0 \times 0,108) + (1 - 0,0117) \times 0,451 \times (1,0 \times 0,182)$$

$$-0,0117 \times (-3,6 + 0,9 \times 0)$$

$$F_{d,1} = 0,172 \text{ kN} / \text{m}^2 = 173 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,380 \times \frac{1,100^2}{5^2} \times 173 = 3,2 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad [<61,5]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,079 \times \frac{1,100^2 \times 1100^2}{5^3} \times \frac{172}{70000} = 2,3 \text{ mm}$$

Podobno za 8.4 mm laminatno steklo (enačba (3.28):

$$F_{d,2} = (1 - \phi) \delta_2 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9 Q_{k1} \right) + (\phi \delta_1 + \delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 0,9 Q_{k2} \right) \pm \phi (p_{H,0} + 0,9 p_{C,0})$$

$$F_{d,2} = (1 - 0,0117) \times 0,549 (1,0 \times 0,108) + (0,0117 \times 0,451 + 0,549) \times (1,0 \times 0,182) + 0,0117 (3,6 + 0,9 \times 0)$$

$$F_{d,2} = 0,202 \text{ kN} / \text{m}^2 = 202 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,380 \times \frac{1,100^2}{5,51^2} \times 202 = 3,1 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad [<11,5]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,079 \times \frac{1,100^2 \times 1100^2}{5,34^3} \times \frac{202}{70000} = 2,2 \text{ mm}$$

E.3 Za 5 mm kaljeno steklo (enačba (3.21)):

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi \delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 1,5 Q_{k1} \right) + (1 - \phi) \delta_1 \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,1} = (0,451 + 0,0117 \times 0,549) (1,35 \times 0,108 + 1,5 \times 0,525) + (1 - 0,0117) \times 0,451 \times 1,35 \times 0,182$$

$$F_{d,1} = 0,531 \text{ kN} / \text{m}^2 = 531 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,380 \times \frac{1,100^2}{5^2} \times 531 = 9,9 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad [<41,5]$$

Iz enačbe (4.12) za MSU:

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi \delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 1,0 Q_{k1} \right) + (1 - \phi) \delta_1 \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,1} = (0,451 + 0,0117 \times 0,549) (1,0 \times 0,108 + 1,0 \times 0,525) + (1 - 0,0117) \times 0,451 \times 1,0 \times 0,182$$

$$F_{d,1} = 0,371 \text{ kN} / \text{m}^2 = 371 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,079 \times \frac{1,100^2 \times 1100^2}{5^3} \times \frac{371}{70000} = 4,9 \text{ mm}$$

Podobno za 8.4 mm laminatno steklo – MSN (enačba (3.22)):

$$F_{d,2} = 0,496 \text{ kN} / \text{m}^2 = 496 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,362 \times \frac{1,189^2}{5,51^2} \times 496 = 8,4 N / mm^2 \quad [<8,5]$$

Za 8.4 mm laminatno steklo – MSU (enačba (4.13)):

$$F_{d,2} = 0,343 kN / m^2 = 343 N / m^2$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,074 \times \frac{1,189^2 \times 1189^2}{5,34^3} \times \frac{343}{70000} = 4,8 mm$$

E.4 Iz prEN 13474-1:

$$p_{H,0} = +12,0 kN / m^2 \text{ ali } -15 kN / m^2$$

Za 6 mm termično utrjeno steklo (enačba (3.27)):

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi \delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9 Q_{k1} \right) + (1 - \phi) \delta_1 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 9 Q_{k2} \right) \pm \phi (p_{H,0} + 0,9 p_{C,0})$$

$$F_{d,1} = (0,451 + 0,0117 \times 0,549) \times (1,0 \times 0,108 + 0,9 \times 0,525) + (1 - 0,0117) \times 0,451 \times (1,0 \times 0,182) - 0,0117 (-3,6 + 0,9 \times (-15,0))$$

$$F_{d,1} = 0,547 kN / m^2 = 547 N / m^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,380 \times \frac{1,100^2}{5^2} \times 547 = 10,0 N / mm^2 \quad [<65,3]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,079 \times \frac{1,100^2 \times 1100^2}{5^3} \times \frac{547}{70000} = 7,2 mm$$

Podobno za 8.4 mm laminatno steklo – MSN (enačba 3.28):

$$F_{d,2} = (1 - \phi) \delta_2 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9 Q_{k1} \right) + (\phi \delta_1 + \delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 9 Q_{k2} \right) \pm \phi (p_{H,0} + 0,9 p_{C,0})$$

$$F_{d,2} = (1 - 0,0117) \times 0,549 \times (1,0 \times 0,108 + 0,9 \times 0,525) + (0,0117 \times 0,451 + 0,549) \times (1,0 \times 0,182) + 0,0117 (3,6 + 0,9 \times 12)$$

$$F_{d,2} = 0,584 kN / m^2 = 584 N / m^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,380 \times \frac{1,100^2}{5,51^2} \times 584 = 8,2 N / mm^2 \quad [<8,3]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,079 \times \frac{1,100^2 \times 1100^2}{5,34^3} \times \frac{584}{70000} = 6,3 mm$$

E.5 (a) Za 5 mm kaljeno steklo – MSN (enačba (3.25)):

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 1,35 Q_{k1} \right) + (1 - \phi) \delta_1 \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,2} = (0,196 + 0,017 \times 0,804) \times (1,35 + 0,108 + 1,35 \times 0,525 + 1,35 \times 1,4) \\ + (1 - 0,017) \times 0,196 \times 1,35 \times 0,182$$

$$F_{d,2} = 0,623 \text{ kN} / \text{m}^2 = 623 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,380 \times \frac{1,100^2}{5^2} \times 623 = 11,5 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad [<49,6]$$

Za 5 mm kaljeno steklo – MSU (enačba(3.25)):

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9 Q_{k1} \right) + (1 - \phi) \delta_1 \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,1} = (0,196 + 0,017 \times 0,804) \times (1,0 \times 0,108 + 0,9 \times 0,525 + 0,9 \times 1,4) \\ + (1 - 0,017) \times 0,196 \times 1,0 \times 0,182$$

$$F_{d,1} = 0,421 \text{ kN} / \text{m}^2 = 421 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,079 \times \frac{1,100^2 \times 1100^2}{5^3} \times \frac{421}{70000} = 5,6 \text{ mm}$$

Za 8.4 mm klasično steklo – MSN (enačba (3.26)):

$$F_{d,2} = (1 - \phi) \delta_2 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 1,35 Q_{k1} \right) + (\phi\delta_1 + \delta_2) \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,2} = (1 - 0,017) \times 0,804 \times (1,35 \times 0,108 + 1,35 \times 0,525 + 1,35 \times 1,4) \\ + (0,017 \times 0,196 + 0,804) \times 1,35 \times 0,182$$

$$F_{d,2} = 2,367 \text{ kN} / \text{m}^2 = 2367 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,380 \times \frac{1,100^2}{8^2} \times 2367 = 17,0 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad [<17,0]$$

Za 8.4 mm klasično steklo – MSU (enačba (3.26)):

$$F_{d,2} = (1 - \phi)\delta_2 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9Q_{k1} \right) + (\phi\delta_1 + \delta_2) \sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj}$$

$$F_{d,2} = (1 - 0,017) \times 0,804 \times (1,0 \times 0,108 + 0,9 \times 0,525 + 0,9 \times 1,4) \\ + (0,017 \times 0,196 + 0,804) \times 1,0 \times 0,182$$

$$F_{d,2} = 1,602 \text{ kN} / \text{m}^2 = 1602 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,079 \times \frac{1,100^2 \times 1100^2}{8^3} \times \frac{1602}{70000} = 5,2 \text{ mm}$$

E.5 (b) Za 5 mm termično utrjeno steklo (enačba (3.27)):

$$F_{d,2} = (\delta_1 + \phi\delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9Q_{k1} \right) + (1 - \phi)\delta_1 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 0,9Q_{k2} \right) \pm \phi(P_{H,0} + 0,9P_{C,0})$$

$$F_{d,2} = (0,196 + 0,017 \times 0,804) \times (1,0 \times 0,108 + 0,9 \times 0,525 + 0,9 \times 1,4) \\ + (1 - 0,017) \times 0,196 \times (1,0 \times 0,182) - 0,017 \times (-3,6 + 0,9 \times (-15,0))$$

$$F_{d,2} = 0,712 \text{ kN} / \text{m}^2 = 712 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,380 \times \frac{1,100^2}{5^2} \times 712 = 13,1 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad [<80,7]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,079 \times \frac{1,100^2 \times 1100^2}{5^3} \times \frac{712}{70000} = 9,4 \text{ mm}$$

Za 8.4 mm laminatno steklo (enačba (3.28)):

$$F_{d,2} = (1 - \phi)\delta_2 \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{1,kj} + 0,9Q_{k1} \right) + (\phi\delta_1 + \delta_2) \left(\sum_j \gamma_{Gj} G_{2,kj} + 0,9Q_{k2} \right) \pm \phi(P_{H,0} + 0,9P_{C,0})$$

$$F_{d,2} = (1 - 0,017) \times 0,804 \times (1,0 \times 0,108 + 0,9 \times 0,525 + 0,9 \times 1,4) \\ + (0,017 \times 0,196 + 0,804) \times (1,0 \times 0,182) + 0,017 \times (3,6 + 0,9 \times 12,0)$$

$$F_{d,2} = 1,850 \text{ kN} / \text{m}^2 = 1850 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{ef} = k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,380 \times \frac{1,100^2}{8^2} \times 1850 = 13,3 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad [<30,7]$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} = 0,079 \times \frac{1,100^2 \times 1100^2}{8^3} \times \frac{1850}{70000} = 6,0 \text{ mm}$$

5 ZAKLJUČEK

Steklo je konstrukcijski material, ki zagotavlja transparentnost, nosilnost in lepoto. Skozi zgodovino se je steklo razvijalo iz izključno arhitekturnega elementa v konstrukcijski material, ki je sposoben prenašati velike obremenitve.

Steklo je v gradbeništvu tako rekoč vseprisoten, vse od nastanka 4000 let nazaj. Steklo je eden izmed pomembnejših gradbenih materialov, saj njegova zmožnost prepuščanja svetlobe omogoča naravni svetlobi prehod v notranjost stanovanj, hiš in drugih poslopij. Številni arhitekti imajo vizijo po ustvarjanju steklenih fasad in kupolastih streh, kar je pripeljalo do izboljšav lastnosti stekla kot nosilnega elementa. Karakteristike stekla so se z razvojem izboljševale, vendar pa kljub povečani uporabi, steklo še vedno ni popolno izkoriščeno. Vendar pa trenutni arhitektski trendi in tehnološki razvoj omogočajo nepredstavljivo uporabo in položaj stekla v gradbeništvu, predvsem zaradi uporabe velikih steklenih površin.

Pri diplomski nalogi sem predstavil karakteristike in uporabnosti stekla v gradbeništvu ne samo kot glavni element zasteklitve, ampak tudi kot konstrukcijski element, ki je sposoben prenašati obtežbe. Predstavil sem trenutne postopke izdelave, vgradnje, načrtovanja, trende in kalkulacije pri zasnovi stekla kot primarnega nosilnega elementa. Ker bo vedno več inženirjev in načrtovalcev delalo s steklom kot konstrukcijskim materialom, se bo tudi uveljavila potreba po oblikovanju novih enotnih varnostnih predpisov (evropski predpisi prEN 13474). Zaenkrat je še vedno pomanjkljiva standardizacija, ker steklo ni tako preučeno kot drugi materiali.

Steklo bo vedno zaželen element zaradi estetike in povezanosti človeka z naravno svetlobo. Številne analize so dokazale, da povečana izpostavljenost naravni svetlobi izboljša razpoloženje in produktivnost ljudi. Gradbeni in arhitekturni pogoji gradnje bodo še naprej zahtevali industrijski in tehnološki napredek. Zahteve po energetski učinkovitosti bo steklo pripeljalo do gradbenega materiala, ki bo še bolj zaželen v viziji prihodnosti.

VIRI

- [1] <http://www.glassforeurope.com/en/issues/faq.php> (Pridobljeno 15. 09. 2014.)
- [2] <http://www.kemija.org/index.php/kemija-mainmenu-38/24-kemijacat/55-reciklaža-in-zgodovina-stekla> (Pridobljeno 19. 09. 2014.)
- [3] Overend, M. 2008. Current international trends in the use of glass in buildings, Univerza Cambridge: loč. pag.
- [4] <http://www.kemija.org/index.php/kemija-mainmenu-38/24-kemijacat/55-reciklaža-in-zgodovina-stekla> (Pridobljeno 19. 09. 2014.)
- [5] Direktiva 2006/32/ES, Sklep št. 1982/2006/ES. 2006. <http://eur-lex.europa.eu> (Pridobljeno 23. 09. 2014.)
- [6] Direktiva 2006/32/ES, Sklep št. 406/2009/ES. <http://eur-lex.europa.eu> (Pridobljeno 23. 09. 2014.)
- [7] Haldimann, M. 2008. Structural use of glass. Bern: 215 str.
- [8] <http://www.reflex.si> (Pridobljeno 16. 10. 2014.)
- [9] Wurm J. 2007. Glass structures. Berlin: 255 str.
- [10] ASTM C 1048-04. 2004. Standard Specifications for Heat-Treated Flat Glass. American Society for Testing Materials: loč. pag.
- [11] Chan S.L. 2003. Basic structural design considerations and properties of glass and aluminium structures. Hong Kong: loč. pag.
- [12] EN 1288-1:2000. Glass in building – Determination of the bending strength of glass – Chapter 1: Fundamentals of testing
- [13] EOTA 1998. Structural Sealant Glazing Systems. ETAG Nr. 002, EOTA – European Organisation for Technical Approvals
- [14] prEN 13474-2:2000. Glass in building – Design of glass panes – Part 2: Design for uniformly distributed load.
- [15] ASTM E 1300-04. Standard practise for determining the minimum thickness and type of glass required to resist a specific load. American Society for Testing Materials.
- [16] <http://thetravellingonline.com> (Pridobljeno 16. 11. 2014.)
- [17] TRLV 2006. 2006. Technische Regeln fuer die Verwendung von linienfoermig gelagerten Verglasungen (TRLV). Technical Report, Mitteilungen des Deutschen Instituts fuer Bautechnik (DIBt), Berlin: loč. pag.

- [18] TRAV 2003. 2003. Technische Regeln fuer die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen (TRAV). Technical Report, Deutsches Institut fuer Bautechnik (DIBt): loč. pag.
- [19] Pilkington. 2010. Rec. Design of Glass – Recommendations for the design of glass, -. Pilkington UK Ltd, Undated: loč. pag.
- [20] Colvin, J. Look – No Frames! In Proceedings of Glass Processing Days 2003, 15-18 June, Tampere, Finland, 2003.
- [21] Sedlacek, G., Blank, K., Laufs, W. and Gusgen, J. 1999. Glas im Konstruktiven Ingenieurbau. Ernst & Sohn, Berlin: loč. pag.
- [22] Blank, K. 1993. Dickenbemessung von vierseitig gelagerten rechteckigen Glasscheiben unter gleichfoermiger Flaechenlast. Technical Report, Institut fuer Konstruktiven Glasbau, Gelsenkirchen: loč. pag.
- [23] DIN 1249-10:1990 Flachglas im Bauwesen – Teil 10: Chemische und physikalische Eigenschaften.
- [24] Kerkhof, F., Richter, H. and Stahn, D. 1981. Festigkeit von Glass – Zur Abhaengigkeit von Belastungsdauer und –verlauf. Glastechnische Berichte, 54,8: 265-277.
- [25] Luible, A. 2004. Lasteinleitungsversuche in Glaskanten. Rapport ICOM 463, Ecole polytechnique federale de Lausanne (EPFL): loč. pag.
- [26] Zenkert, D. 2004. The Handbook of Sandwich Construction. Engineering Materials Advisory Service Ltd., United Kingdom: loč. pag.
- [27] Wellershoff, F. 2006. NUTzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebaeudehuelen. Ph.D. thesis, RWTH Aachen / Shaker Verlag: loč. pag.