

Analiza Schwedlerovih kupola u aluminijskoj i čeličnoj izvedbi

Jovanović-Verbanac, Patricia

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:924361>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

**Diplomski sveučilišni studij
Smjer-konstrukcije
Lagane konstrukcije**

**Patricia Jovanović-Verbanac
0114025217**

Analiza Schwedlerovih kupola u aluminijskoj i čeličnoj izvedbi

Diplomski rad

Rijeka, studeni 2019.

IZJAVA

Završni/Diplomski rad izradio/izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom/mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Patricia Jovanović-Verbanac

U Rijeci, 31.10.2019.

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu prikazan je povijesni pregled različitih tipova kupola, njihove značajke i primjena. Glavnina rada fokusira se na Schwedlerovu kupolu; njezin nastanak, dizajn i primjenu. Provedene su analize Schwedlerovih kupola izvedene u dva različita materijala, aluminiju i čeliku. Kod obje kupole koriste se isti parametri; promjer i visina kupole, te materijali pokrova. Namjena kupole je manja sportska dvorana. Model kupole na kojemu je provedena analiza izrađen je pomoću programa SketchUp koji je importiran u AutoCad, te potom u Robot Structural Analysis Professional u kojem je proveden statički proračun. Nosivost kupole dokazana je prema graničnom stanju nosivosti (otpornost presjeka na vlak i tlak te otpornost elemenata na izvijanje) dok joj je uporabljivost dokazana prema graničnom stanju uporabljivosti (progib tjemena). Poprečni presjeci elementa konstrukcije odabrani su na način da iskoristivost presjeka bude maksimalna. Prikazani su iskazi materijala za obje izvedbe konstrukcije kupole te je provedena usporedba i analiza utrošenog materijala.

Ključne riječi: kupola, Schwedler, Schwedlerova kupola, aluminij, čelik

SUMMARY

In this graduate thesis, a historical overview of different types of domes, their features and application has been presented. Majority of the work focuses on Schwedler dome; its origin, design and application. An analysis of the Schwedler domes were conducted in two different materials, aluminium and steel. Both domes use the same parameters; the diameter and height of the dome, and the facade materials. Domes are intended for a smaller sports hall. The dome model, on which the analysis was conducted, was created using SketchUp which was imported into AutoCad and then into Robot Structural Analysis Professional in which a static analysis was performed. The load-bearing capacity of the dome was checked according to the ultimate limit state (tension and compression cross-section resistance and buckling resistance), while its usability was checked according to the serviceability limit states (the crown of the dome displacement). The cross-sections of the structural element are selected in such a way that the cross-section capacity is maximized. Lists of materials for both type of the dome structure and a comparison and analysis of the used materials was carried out.

Key words: dome, Schwedler, Schwedler dome, aluminium, steel

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	8
POPIS TABLICA.....	11
1. UVOD.....	12
2. KUPOLE KROZ POVIJEST.....	14
3. PRIMJENA KUPOLA.....	20
3.1. EKONOMIČNOST I PREDNOSTI KUPOLA.....	20
3.2. VRSTE KUPOLA.....	21
3.2.1. Corbel kupola.....	21
3.2.2. Poligonalna kupola.....	21
3.2.3. Kupola s križnim lukom.....	21
3.2.4. Geodetska kupola.....	22
3.2.5. Monolitna kupola.....	22
3.2.6. Lukovičasta glava (eng. Onion dome).....	22
3.2.7. Ovalna kupola.....	22
3.2.8. Polukružne kupole.....	22
3.2.9. Kalota.....	22
3.2.10. Kišobran kupola.....	23
3.2.11. Kupola kableske mreže.....	23
3.2.12. Napuhane kupole.....	23
4. SCHWEDLEROVA KUPOLA.....	25
4.1. KONSTRUKCIJA KUPOLE.....	27
4.2. PRIMJENA SCHWEDLEROVE KUPOLE.....	28
4.2.1. „Okrugle kuće“ u Njemačkoj.....	28
4.2.2. Monumentalne kupole.....	30
4.2.3. Sportske dvorane.....	32
5. PROJEKTNI ZADATAK.....	34
5.1. ANALIZA DJELOVANJA.....	35
5.1.1. Vlastita težina.....	35
5.1.2. Djelovanje snijega.....	35
5.1.3. Djelovanje vjetra.....	37
6. STATIČKI PRORAČUNI KUPOLA.....	41
6.1. SCHWEDLEROVA KUPOLA U ALUMINIJSKOJ IZVEDBI.....	41
6.1.1. Nosiva konstrukcija.....	41
6.1.2. Pokrov.....	41
6.1.3. Zaštita od korozije.....	41
6.1.4. Doprema i montaža konstrukcije.....	42
6.1.5. REZULTATI STATIČKOG PRORAČUNA.....	42
6.1.6. PROVJERA KONSTRUKCIJE PREMA GRANIČNOM STANJU NOSIVOSTI (GSN).....	43
6.1.6.1. Provjera nosivosti elemenata.....	44

6.1.7. PROVJERA KONSTRUKCIJE PREMA GRANIČNOM STANJU UPORABLJIVOSTI (GSU)	46
6.1.8. ISKAZ MATERIJALA	47
6.2. SCHWEDLEROVA KUPOLA U ČELIČNOJ IZVEDBI.....	49
6.2.1. Nosiva konstrukcija.....	49
6.2.2. Pokrov	49
6.2.3. Zaštita od korozije.....	49
6.2.4. Doprema i montaža konstrukcije.....	49
6.2.5. REZULTATI STATIČKOG PRORAČUNA.....	50
6.2.6. PROVJERA KONSTRUKCIJE PREMA GRANIČNOM STANJU NOSIVOSTI (GSN) 51	
6.2.6.1. Provjera nosivosti elemenata	51
6.2.7. PROVJERA KONSTRUKCIJE PREMA GRANIČNOM STANJU UPORABLJIVOSTI (GSU)	54
6.2.8. ISKAZ MATERIJALA	55
U nastavku je prikazan iskaz materijala za Schwedlerovu kupolu u čeličnoj izvedbi (tablica 14) te ukupni utrošak materijala i ukupna težina konstrukcije (tablica 15).	55
6.3. USPOREDBA DOBIVENIH VRIJEDNOSTI	57
7. DETALJI SPOJEVA	58
7.1. T-STAR SUSTAV	58
7.2. SPOJ NA PREKLOP	58
7.3. SPOJ PREKO LIMA	59
7.4. KK SUSTAV	59
8. ZAKLJUČAK.....	60
LITERATURA	61

POPIS SLIKA

SLIKA 1: PRIKAZ LAKOLITA (WPCLIPART).....	12
SLIKA 2: SOLNA KUPOLA U ZAGROSU, IRAN (WIKIPEDIA, 2014).....	12
SLIKA 3: PRIKAZ ARPAČIJE: KUĆA U OBLIKU KOŠNICE (MÜLLER I VOGEL, 1999)	14
SLIKA 4: SKUPINA TRULLA U APULIJI (MÜLLER I VOGEL, 1999).....	14
SLIKA 5: IZGLED JURTE (LIJEVO) I PRIKAZ MODERNE JURTE (DESNO) (ZOLTÁN, 2016).....	14
SLIKA 6: PRIKAZ ATREJEVE RIZNICE (MÜLLER I VOGEL, 1999).....	15
SLIKA 7: PRESJEK KROZ PANTEON (RADIĆ, 2016).....	16
SLIKA 8: AJA SOFIJA (DESNO) I PRIKAZ NJEZINIH KUPOLA I POLU-KUPOLA IZNUTRA (LIJEVO) (WIKIPEDIA 2019, ANTENAM.NET).....	16
SLIKA 9: KATEDRALA U FIRENCI (LIJEVO), BAZILIKA SV. PETRA U RIMU (DESNO) (SLIKE I PRILIKE 2019, DUHOS 2017).....	17
SLIKA 10: SANTA MARIA DELLA SALUTE U VENECIJI (LIJEVO), PANTÉON U PARIZU (DESNO) (IMG.LOCATIONSCOUT 2015, WIKIMEDIA).....	17
SLIKA 11: PRIKAZ ARMIRANOBETONSKE KUPOLE CRKVE SV. BLAŽA U ZAGREBU (SVBLAZ 2013).....	18
SLIKA 12: PRIKAZ PREDGOTOVLJENE KUPOLE SPORTSKE DVORANE U RIMU (ENCIKLOPEDIJA.HR).....	18
SLIKA 13: MILENIJSKA KUPOLA U LONDONU (WIKIMEDIA).....	18
SLIKA 14: PRIKAZ NAPUHANE KUPOLE (ARCHITEN LANDRELL 219).....	23
SLIKA 15: SHEMATSKI PRIKAZ POLIGONALNE KUPOLE (WIKIMEDIA).....	24
SLIKA 16: UNUTRAŠNJI PRIKAZ KUPOLE VELIKE DŽAMIJE U CORDOBI (CAMEL76 2012).....	24
SLIKA 17: PRIMJER GEODETSKE KUPOLE (DESIGNING BUILDINGS WIKI 2018).....	24
SLIKA 18: PRIKAZ MONOLITNE KUPOLE (GRADJEVINARSTVO.RS 2010).....	24
SLIKA 19: PRIKAZ LUKOVIČASTIH GLAVA (BAVA 2013).....	24
SLIKA 20: UNUTRAŠNJI PRIKAZ OVALNE KUPOLE (WIKIPEDIA 2019).....	24
SLIKA 21: PRIKAZ POLUKRUŽNE KUPOLE (WIKIPEDIA 2019) SLIKA 22: PRIKAZ PLITKE KUPOLE (KALOTA) (WIKIPEDIA 2019).....	24
SLIKA 23: KONSTRUKCIJE KROVA PLINSKOG SPREMNIKA U HOLZMARKTSTRAßE U BERLINU: A) OD DRVA (1838), B) S RADIJALNIM ŽELJEZNYM VEZAMA (1858) I C) S PRVOM SCHWEDLEROVOM KUPOLOM (1863) (MOMENTUM MAGAZINE 2013)	

.....	25
SLIKA 24: PRIKAZ FICHTE-BUNKERA IZ 1876.GODINE (WIKIPEDIA 2017).....	25
SLIKA 25: IZGLED KROVA FICHTE-BUNKERA DANAS (I1.WP).....	26
SLIKA 26: ELEMENTI SCHWEDLEROVE KUPOLE.....	27
SLIKA 27: PRIKAZ KLASIČNE SCHWEDLEROVE KUPOLE (LIJEVO) I SCHWEDLEROVE KUPOLE SA SKRAĆENIM ELEMENTIMA (<i>TRIMMED SCHWEDLER DOME</i>) (DESNO) (MAKKAR I DR., 2016).....	27
SLIKA 28: SPREMIŠTE LOKOMOTIVA SAARLANDSKE ŽELJEZNICE SA SCHWEDLEROVOM KUPOLOM U SAARBRÜCKEN-ST. JOHANN IZ 1863. GODINE (BTU 2017).....	28
SLIKA 29: KUPOLA NOVE SINAGOGE U BERLINU IZ 1863. GODINE (BTU 2017).....	28
SLIKA 30: GÜTERBAHNHOF PANKOW; UNUTRAŠNJI (GORE) I VANJSKI (DOLJE) IZGLED KUPOLE (ABANDONED BERLIN 2013).....	29
SLIKA 31: RUNDLOKSCHUPPEN RUMMELSBURG; UNUTRAŠNJI (LIJEVO) I VANJSKI (DESNO) IZGLED KUPOLE (THE URBANITE 2019).....	29
SLIKA 32: IZGLED NOVE SINAGOGE U BERLINU 1866. GODINE (LIJEVO) I DANAS (DESNO) (DOBRA SZCZYH I SEALY 2016, MUSEUMSPORTAL BERLIN 2019).....	30
SLIKA 33: MICHAELERTRAKT; SJEVERNO PROČELJE PALAČE HOFBURG (WIKIPEDIA 2019).....	31
SLIKA 34: STRUKTURA CENTRALNE KUPOLE MICHAELERTRAKT; UNUTARNJA I VANJSKA STRUKTURA KUPOLE (LIJEVO) I VRH VANJSKE KUPOLE (DESNO) (AGUILAR I DR. 2019).....	31
SLIKA 35: SPORTSKI CENTAR TELFS, AUSTRIJA (INDERMÜHLE BAUINGENIEURE 1999).....	32
SLIKA 37: POSTAVLJANJE SCHWEDLEROVE KUPOLE 1955.GODINE (KSI STRUCTURAL ENGINEERS 2014).....	33
SLIKA 36: MCCAMISH PAVILLION S UNUTARNJIM PRIKAZOM SCHWEDLEROVE KUPOLE (KSI STRUCTURAL ENGINEERS 2014).....	33
SLIKA 38: DISPOZICIJA SCHWEDLEROVE KUPOLE.....	34
SLIKA 39: FAKTOR OBLIKA OPTEREĆENJA ZA CILINDRIČNE KROVOVE (EN 1991-1-3).....	36
SLIKA 40: PREPORUČENA MAKSIMALNA VRIJEDNOST FAKTORA OBLIKA M3 (EN 1991-1-3).....	36
SLIKA 41: PRORAČUNSKI MODEL ZA IZRAČUN VANJSKOG PRITISKA (EN 1991-1-4)	

.....	39
SLIKA 42: PRIKAZ 3D MODELA U SKETCHUP-U (LIJEVO), ACAD-U (SREDINA) I ROBOT-U (DESNO)	41
SLIKA 43: PRIKAZ ELEMENTA U KOJEM SE JAVLJA MAKSIMALNA TLAČNA SILA ..	42
SLIKA 44: IZGLED POPREČNOG PRESJEKA IZVEDENOG OD ALUMINIJA.....	44
SLIKA 45: PRIKAZ ELEMENTA U KOJEM SE JAVLJA MAKSIMALNA TLAČNA SILA ..	50
SLIKA 46: IZGLED POPREČNOG PRESJEKA IZVEDENOG OD ČELIKA.....	51
SLIKA 47: PRIMJERI T-STAR SUSTAVA (VIKINGDOME, 2018)	58
SLIKA 48: PRIMJER SPOJA NA PREKLOP (LIJEVO) I PRIKAZ SPLJOŠTENOG KRAJA PROFILA (DESNO) (VIKINGDOME, 2018)	58
SLIKA 49: PRIKAZ SPOJA PREKO LIMA (INSTRUCTABLES WORKSHOP, 2019)	59
SLIKA 50: PRIMJERI KK SUSTAVA (MERO-TSK, 2008).....	59

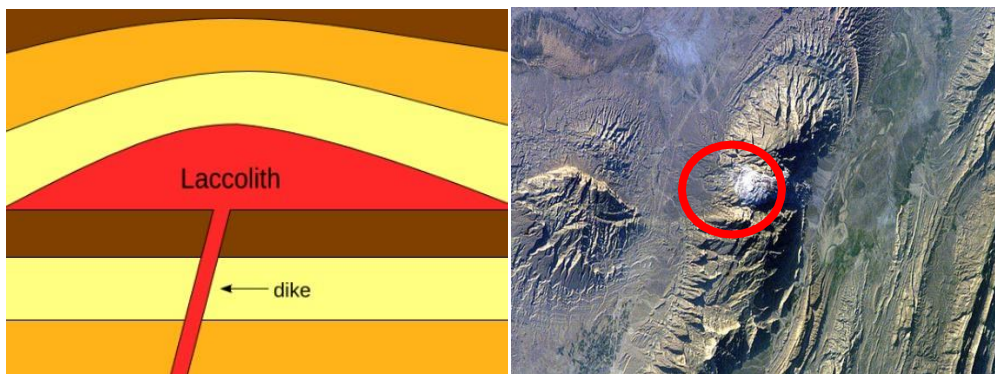
POPIS TABLICA

TABLICA 1. PRIKAZ DOBIVENIH VRIJEDNOSTI	39
TABLICA 2: REZULTATI ANALIZE STATIČKOG MODELA SCHWEDLEROVE KUPOLE U ALUMINIJSKOJ IZVEDBI.....	43
TABLICA 3: KLASIFIKACIJA ALUMINIJSKOG PRESJEKA.....	43
TABLICA 4: OTPORNOST ALUMINIJSKOG PRESJEKA NA VLAK.....	44
TABLICA 5: OTPORNOST ALUMINIJSKOG PRESJEKA NA TLAK	45
TABLICA 6: OTPORNOST ELEMENATA IZVEDENIH OD ALUMINIJA NA IZVIJANJE ..	46
TABLICA 7: ISKAZ MATERIJALA ZA SCHWEDLEROVU KUPOLU U ALUMINIJSKOJ IZVEDBI.....	47
TABLICA 8: UKUPNI ISKAZ MATERIJALA ZA SCHWEDLEROVU KUPOLU U ALUMINIJSKOJ IZVEDBI	48
SLIKA 45: PRIKAZ ELEMENTA U KOJEM SE JAVLJA MAKSIMALNA TLAČNA SILA ..	50
TABLICA 9: REZULTATI STATIČKE ANALIZE SCHWEDLEROVE KUPOLE U ČELIČNOJ IZVEDBI.....	50
TABLICA 10: KLASIFIKACIJA ČELIČNOG PRESJEKA	51
TABLICA 11:OTPORNOST ČELIČNOG PRESJEKA NA VLAK	52
TABLICA 12: OTPORNOST ČELIČNOG PRESJEKA NA TLAK.....	52
TABLICA 13: OTPORNOST ELEMENATA IZVEDENIH OD ČELIKA NA IZVIJANJE	53
TABLICA 14: ISKAZ MATERIJALA ZA SCHWEDLEROVU KUPOLU U ČELIČNOJ IZVEDBI.....	55
TABLICA 15: UKUPNI ISKAZ MATERIJALA ZA SCHWEDLEROVU KUPOLU U ČELIČNOJ IZVEDBI.....	56
TABLICA 16: USPOREDNI PRIKAZ DOBIVENIH VRIJEDNOSTI.....	57

1. UVOD

Zamislite da prerežete naranču na pola, uzmete jednu polovicu i stavite ju na stol ravnim dijelom prema dolje. Upravo tako izgleda kupola. U prirodi se kupola može formirati pomicanjem površinskih slojeva stijena uslijed djelovanja magme. Na taj način magma ulazi između dva sloja sedimentne stijene te stvara oblik kupole ili trokuta dok gura ostale slojeve. Stvrdnuta magma koja tvori ovu vrstu kupole naziva se lakolit (eng. laccolith) (slika 1) (National Geographic, 2011).

Druga vrsta prirodnih kupola su takozvane solne kupole (slika 2). One nastaju uzdizanjem kamene soli preko nadzemnog sedimentnog kamena. Sol se akumulira i iznad nje se formira talog. Obzirom da je sol manje gustoće od većine drugih stijena, polagano se kreće prema površini formirajući kupolasti brežuljak. Takve solne kupole su važne za industriju jer se sol koristi u proizvodnji plastike, pesticida, konzervansa i opreme za gašenje požara. Također su važne za naftnu industriju jer zadržavaju ulje između slojeva stijene koje naftne bušotine mogu s lakoćom izvući na površinu (National Geographic, 2011).



Slika 1: Prikaz lakolita (WPClipart)

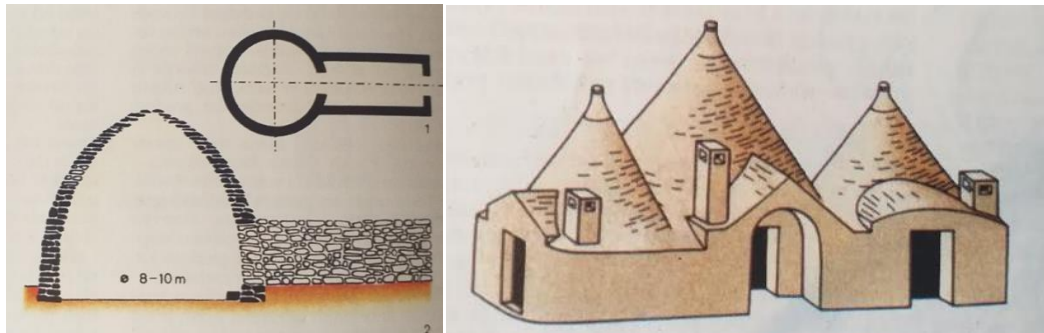
Slika 2: Solna kupola u Zagrosu, Iran
(Wikipedia, 2014)

U arhitekturi kupola se definira kao svod sferičnog oblika kojim se natkrivaju prostori kružnog, višekutnog ili kvadratičnog tlocrta (Hrvatska enciklopedija, 2012). Najčešće se dobivaju rotacijom ravninske krivulje oko vertikalne osi. Često se radi o kružnom isječku kojeg se rotira oko vertikalne osi, ali se mogu koristiti i krivulje kao što su parabola ili elipsa (Jovanović-Verbanac i dr., 2019). Kupole mogu biti zasebne građevine ili dio već postojeće. U tom slučaju konstrukcija kupole leži na rotondi, građevini kružnog tlocrta ili na cilindru, a može biti pridržana stupovima, gdje se prijelaz u kupolu ostvaruje pandativima odnosno sfernim trokutima (Jovanović-Verbanac i dr., 2019). Radi smještaja otvora za svjetlo, često se između kupole i

pandativa umeće cilindrični prsten (tambur), odnosno na tjemenu kupole se ostavlja otvor (oculus) ili pak gradski tornjić (lanterna) (Hrvatska enciklopedija, 2012). Ovakav strukturni sustav može premostiti veće raspone s minimalnim smetnjama između oslonaca na krajevima, odnosno omogućuje obavljanje maksimum prostora s minimalnom površinom. Zbog povoljnog oblika kupole njezina se vlastita težina i vanjska opterećenja uglavnom prenose unutarnjim tlačnim silama (Hrvatska enciklopedija, 2012). Geometrija kupole zapravo nosi sama sebe te nema potrebe za unutarnjim potpornim stupovima ili nosivim zidovima (Makkar i dr., 2016).

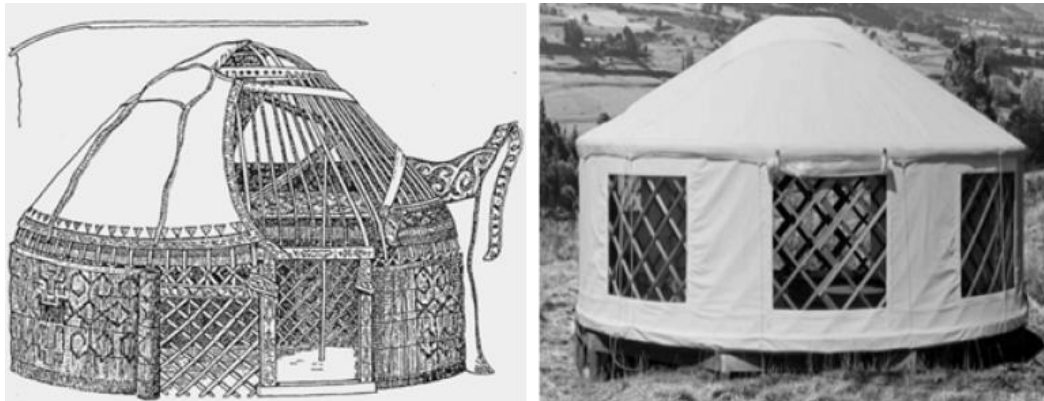
2. KUPOLE KROZ POVIJEST

Kupole imaju dugu arhitektonsku liniju koja se proteže natrag u prapovijest. Građene su kroz stoljeća od blata, snijega, kamena, drva, cigle, betona, metala, stakla i plastike (Wikipedia, 2019). Rani oblici primjene kupola pojavljuju se kod prvotnih tipova kuća oko 5000.g.pr.Kr. u srednjoj Aziji (slika 3), oko 3500.g.pr.Kr. na Cipru, ali i u 20.st. kod *trulla* u Apuliji (slika 4). Naznake kupola se pojavljuju i kod nomada u Mongoliji. Tamo su se podizale *jurte* (slika 5): kupolasti šatori na motkama promjera do 8 m, na elastičan konstruktivan način, usporediv u načelu s tehničkim rješenjima koja se primjenjuju u 20.st. (Müller i Vogel, 1999).



Slika 3: Prikaz arpačije: kuća u obliku košnice (Müller i Vogel, 1999)

Slika 4: Skupina trulla u Apuliji (Müller i Vogel, 1999)



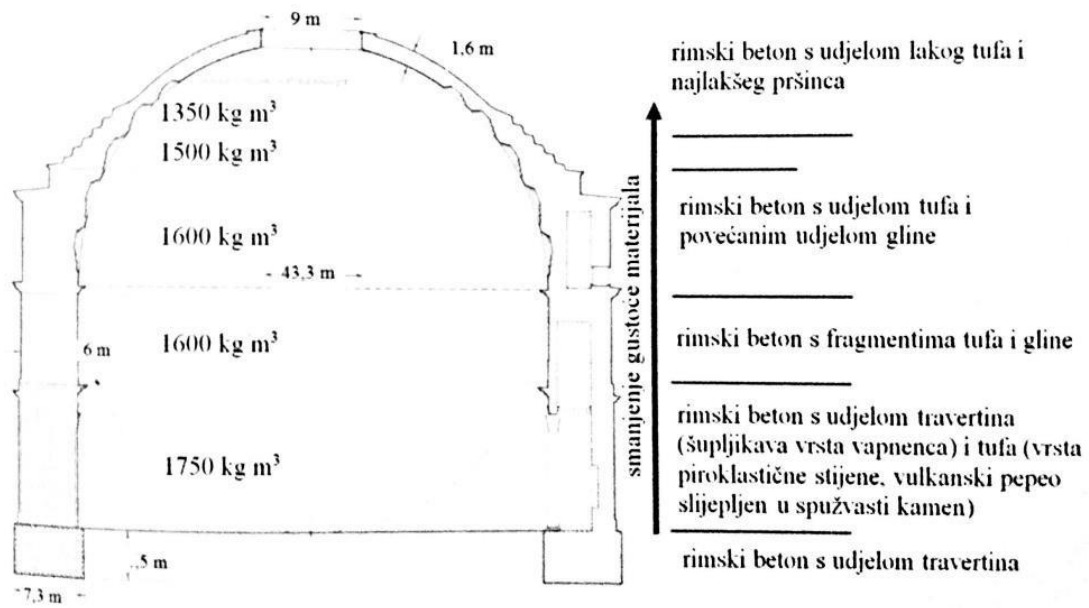
Slika 5: Izgled jurte (lijevo) i prikaz moderne jurte (desno) (Zoltán, 2016)

Prostorne koncepcije ostvarene u tim prvobitnim kućama, nakon prijelaza u pravokutne kuće, su tijekom stoljeća bile potisnute u područje pretežno podzemne grobne arhitekture (Müller i Vogel, 1999). Najznačajnije takve građevine su Mikenske kupolne grobnice. Sačinjavane su od kružnog oblika u tlocrtu, brežuljkastog oblika (*tumulus*) u obrisu, konzolne kupole kao tehničkog rješenja za svod, ozidanog *dromosa* kao prilazni put te grobne komore za sahranjivanje. Najočuvaniji primjer takve sakralne upotrebe kupola jest Atrejeva riznica (slika 6). Njezina kupola tlocrtnog promjera 14,50 m doseže visinu od 13,20 m. Prilazni put (*dromos*) joj je dugačak 36, a širok 6 m (Müller i Vogel, 1999). Kupolu sačinjavaju 33 prstenasta sloja obrađena na licu mjesta nakon slaganja te prilagođena krivulji kupole. Sve do Rimskog carstva i gradnje Panteona, Atrejeva riznica je nosila titulu najveće kupole.



Slika 6: Prikaz Atrejeve riznice (Müller i Vogel, 1999)

Otkrivanjem morta počinju se savladavati mnogo veći rasponi. Iako su još Feničani poznavali mort i beton, tek ga Rimljani rabe i unaprjeđuju što rezultira ponovnim uvođenjem luka, svoda i kupole, koje su Grci zanemarili. Rimljani su izvodili kupole iznad osmerokutnih ili kružnih tlocrta, a koristili su se i jajolikim oblicima. Takve tlocrte su uglavnom imali antički hramovi. Najpoznatiji do danas očuvani rimski antički hram jest Panteon u Rimu. Njegova kupola raspona 43,50 m sastoji se od horizontalnih i vertikalnih rebara, a na slici 7 vidljivo je smanjenje gustoće upotrijebljenih materijala s povećanjem visine hrama (Radić, 2016).



Slika 7: Presjek kroz Panteon (Radić, 2016)

Kupolaste strukture bile su popularne i u bizantskoj i srednjovjekovnoj islamskoj arhitekturi (Wikipedia, 2019). Njihov vrhunac predstavlja Aja Sofija u Istanbulu (slika 8). Prvotno je izgrađena kao crkva, a poslije prenamijenjena u džamiju i naposljetku u muzej. Bila je najveća crkva u Istočnom Rimskom Carstvu te prva kupola na pandativima. Kupola je promjera 31 m, gradnja je trajala pet godina i izgrađena je jednim slojem opeke i perforirana prozorima na mjestu oslanjanja. Na taj način stvorena je tanka stijenka koja je minimalizirala težinu pandantiva (Radić, 2016).



Slika 8: Aja Sofija (desno) i prikaz njezinih kupola i polu-kupola iznutra (lijevo) (Wikipedia 2019, Antenam.net)

U renesansi uloga kupole je povećana jer se pomoću tambura oblikuje vanjski prostor. Rebra, kao uzlazne linije, postaju vidljiva te se poseže za paraboličnim povišenjem i dodaje se krunište s lanternom. Kupola zapravo dominira slikom grada (Müller i Vogel, 1999). Glasovite renesansne kupole su kupole katedrale u Firenci (F. Brunelleschi, promjer 32 m) i bazilike sv. Petra u Rimu (Michelangelo, promjer 42 m) (slika 9) (Hrvatska enciklopedija, 2012). Kupolu imaju i mnoge barokne građevine (Santa Maria della Salute, Venecija) te su bile česte i u doba klasicizma (Pantéon u Parizu) (slika 10) (Hrvatska enciklopedija, 2012).



Slika 9: Katedrala u Firenci (lijevo), bazilika sv. Petra u Rimu (desno) (Slike i prilike 2019, Duhos 2017)



Slika 10: Santa Maria della Salute u Veneciji (lijevo), Pantéon u Parizu (desno) (Img.locationscout 2015, Wikimedia)

Krajem 19.stoljeća, a kasnije i u 20.stoljeću, počele su se izvoditi tankostijene kupole od armiranog i prednapregnutog betona, lameliranog drva i metala, čime je omogućeno natkrivanje raspona većih od 200 m. Od armiranog betona izgrađena je kupola crkve sv. Blaža u Zagrebu (slika 11), a od predgotovljenih ljuskastih rebara napravljena je kupola sportske dvorane u Rimu (slika 12) (Hrvatska enciklopedija, 2012).

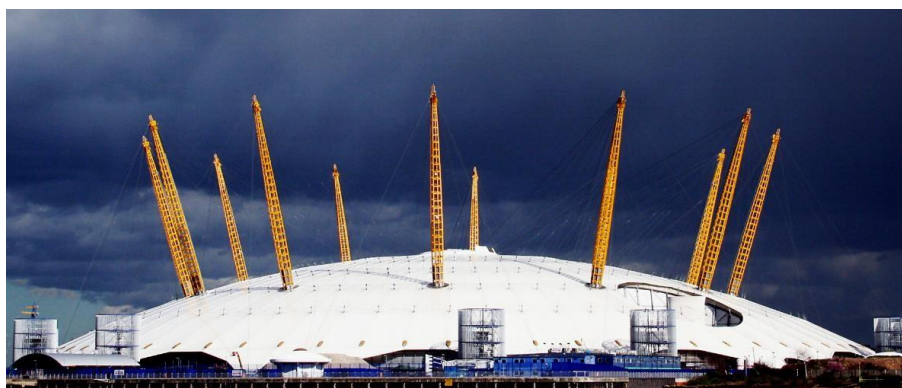


Slika 11: Prikaz armiranobetonske kupole crkve sv. Blaža u Zagrebu (Svblaz 2013)



Slika 12: Prikaz predgotovljene kupole sportske dvorane u Rimu (Enciklopedija.hr)

Danas se za sportske objekte, radarska postrojenja i slične građevine vrlo često izvode drvene ili metalne kupole od štapova, rebara ili panela po uzoru na geodetske kupole R. B. Fullera. Jedan od najvećih zatvorenih prostora današnjice je Milenijska kupola u Londonu promjera 320 m, građena 1999.godine upotrebom platna i čelične užadi ovješene o metalne stupove (slika 13).



Slika 13: Milenijska kupola u Londonu (Wikimedia)

Kroz ovaj sažeti prikaz povijesnog razvoj kupola možemo zaključiti kako ova vrsta građevina nema samo jednu početnu točku iz koje se razvijala već da je bila istovremeno prisutna u raznim dijelovima svijeta, što bi značilo da su naši preci već tada uvidjeli razne prednosti ove strukture.

3. PRIMJENA KUPOLA

Mnoga moderna čuda i povijesna blaga se oslanjaju na arhitekturu kupola i njihov „wow“ efekt. Prvobitno je ova elegantna tehnika gradnje često bila rezervirana za krovove koliba i grobnica, da bi se nastavila kroz ljudsku povijest u domovima, skladištima hrane, mjestima bogoslužja, spomenicima i važnim državnim zgradama. Obzirom da kupole olakšavaju uvid u sve koji su okupljeni u velikom prostoru, idealne su za takvu uporabu. Također treba znati da kupole mogu nositi glasove i olakšati razumijevanje osobe koja govori u središtu bez mikrofona. Zbog toga su kupole u obliku tanjura iznimno uobičajene za igraonice i koncertne dvorane. Ovisno o zemljopisnoj regiji, vrsta korištene kupole može varirati. To je velikim dijelom posljedica dostupnosti građevinskog materijala koji utječe i na sam odabir vrste kupole (Hunker 2019).

3.1. EKONOMIČNOST I PREDNOSTI KUPOLA

Kupole su prilično složeno arhitektonsko čudo unatoč njihovom fluidnom i jednostavnom izgledu. Radi se o samonosivim građevinama stabiliziranim silom gravitacije koja djeluje na njihovu težinu kako bi ih držala u kompresiji. Većina kupola funkcionira na isti način. Međutim, neke, kao što su napuhana kupola ili kupola kabela mreže, nisu „prave kupole“, u smislu da ne koriste ovu metodu da bi zadržale svoj oblik (Designing Buildings Wiki 2018).

Kupole nam omogućuju savladavanje većih raspona bez potrebe za dodatnim oslanjanjima između krajnjih oslonaca čime se dobiva maksimalna iskoristivost prostora. Također zahtijevaju puno manje materijala od konvencionalnih zgrada. Primjerice, da bi se kvadratnom zgradom obuhvatio isti volumen kao kupolom, potrebno je 30% više materijala. Obzirom da kupole imaju barem 30% manje površine od ostalih oblika građevina, znatno su energetski učinkovitije jer je potrebno najmanje 30% manje energije za grijanje, odnosno hlađenje negoli za zgradu iste veličine s istim volumenom i istom debljinom izolacije (Geo-dome 2014).

Od materijala kroz povijest, koristili su se gotovo svi materijali za izradu ovih konstrukcija; od blata i šiblja, preko kamenih blokova, opeka pa sve do betona i čelika. Novi građevinski materijali 19. stoljeća i bolje razumijevanje sila unutar konstrukcija 20. stoljeća otvorili su nove mogućnosti. Željezne i čelične grede, čelični kabeli i prednapregnuti beton eliminirali su potrebu za vanjskim podupiranjem i omogućili znatno tanje kupole. Dok su ranije zidane kupole mogle imati omjer radijusa i debljine do 50, omjer radijusa i debljine kod modernih kupola može biti veći i od 800. Manja težina ovih kupola je omogućila mnogo veće raspone te stvaranje pokretnih kupola nad modernim sportskim stadionima (National Geographic 2011).

Po pitanju vremenskih utjecaja kupole su prirodno otporne na uragane i jake vjetrove. Kod klasičnih objekata se uslijed djelovanja jakih vjetrova stvaraju velike količine turbulencije što uzrokuje usis krova. Kod kupola ti isti jaki vjetrovi mogu glatko proći preko objekta jer nema uglova i ravnih površina koji bi uzrokovali turbulenciju zraka (Geo-dome 2014). Također nema ni akumuliranja velikih količina oborina jer se one jednostavno otkližu niz glatku i zaobljenu površinu kupole.

Još jedno bitno svojstvo kupole jest njezina akustika. Budući da su kupole odozdo konkavne, mogu odražavati zvuk i stvarati odjeke (National Geographic 2011). Ukoliko legnete na pod u središtu kupole i govorite, zvučati će kao da vam se glava nalazi u velikoj metalnoj cijevi. Ukoliko pak stojite po strani unutar kupole, osoba nasuprot vas može čuti kako šaputate s druge strane prostorije (Geo-dome 2014).

3.2. VRSTE KUPOLA

Iako kupole često izgledaju slično jedna drugoj, njihove konstrukcije su vrlo različite. Postoji 12 osnovnih stilova kupolastih struktura koje se obično koriste u cijelome svijetu (Hunker 2019).

3.2.1. Corbel kupola

Ovo je jedan od najstarijih oblika kupole koji datira još iz doba paleolitika. Poznate su još pod nazivom „*kupolna košnica*“. Ne radi se o kupolama u strogom smislu jer se formiraju horizontalnim slojevima zidova koji su lagano konzolirani te se spajaju u središtu (Designing Buildings Wiki 2018). Primjer ove vrste kupola jest prethodno spomenuta Atrejeva riznica (slika 6).

3.2.2. Poligonalna kupola

Također se nazivaju kupolni svodovi. Imaju poligonalan oblik u horizontalnim presjecima dok se poprečni presjeci okreću prema središtu kupole što rezultira mnogo jačom kupolom od prethodno spomenute corbel kupole (slika 15) (Hunker 2019).

3.2.3. Kupola s križnim lukom

Kupola s križnim lukom jedna je od najranijih tipova rebrastih svodova. Umjesto da se rebra spajaju u središtu kupole, ona su međusobno isprepletana formirajući na taj način poligone i ostavljajući središte kupole praznim. Najraniji poznati primjer nalazi se u Velikoj džamiji u Cordobi koja datira iz 10. stoljeća (slika 16) (Hunker 2019).

3.2.4. Geodetska kupola

Prvu geodetsku kupolu razvio je američki inženjer i arhitekt Buckminster Fuller kasnih četrdesetih godina. Radi se o strukturi sličnoj sferi koja se sastoji od mreže trokuta. Ti trokuti pružaju samobalansirajući strukturni okvir uz minimalnu upotrebu materijala (slika 17) (Hunker 2019).

3.2.5. Monolitna kupola

Monolitne kupole sastoje se samo od jednog dijela (slika 18). Na taj način se postiže estetski ugodna, homogena struktura. Jedan od primjera ove vrste kupola jest i eskimska nastamba iglu.

3.2.6. Lukovičasta glava (eng. Onion dome)

Osnovna karakteristika ovih kupola jest način na koji se izbočuju iznad njihovih promjera i glatko sužavaju u „ogee“ profilu (S-krivulja). Visina im obično prelazi njihovu širinu i često su pozlaćeni ili vedro oslikani. Tradicionalno se povezuju sa ruskom arhitekturom (slika 19) (Designing Buildings Wiki 2018).

3.2.7. Ovalna kupola

Ovalna kupola može se definirati kao kupola čiji nacrt ili profil (ili oboje) ima ovalni oblik. Naziv im potječe od latinske riječi „*ovum*“ što u prijevodu znači „*jaje*“. Uobičajene su u srednjovjekovnim crkvama te su bile popularne u renesansi i baroku (slika 20) (Designing Buildings Wiki 2018, Hunker 2019).

3.2.8. Polukružne kupole

Polukružne kupole poznate su i kao „hemisferične kupole“ (slika 21). Predstavljaju jednu polovicu kugle izgrađenu na kružnoj prstenastoj kolonadi. Konstrukcija im se dobiva uzastopnim rotiranjem luka obzirom na vertikalnu os (Designing Buildings Wiki 2018, Hunker 2019).

3.2.9. Kalota

Profil ovih kupola je manji od polovice kruga te se iz tog razloga nazivaju još i segmentne kupole. Radi se o izuzetno plitkim kupolama nalik na tanjur (slika 22). Neke od najvećih kupola su upravo ove vrste (Wikipedia 2019).

3.2.10. Kišobran kupola

Ova vrsta kupole poznata je i kao „bundeva“, „lubenica“, „zupčasta“ ili „padobranska“ kupola. Konstrukcija im je podijeljena rebrima koja izlaze iz središta kruga poput donje strane kišobrana (Designing Buildings Wiki 2018, Hunker 2019). Primjer ove vrste jest prethodno spomenuta katedrala u Firenci (slika 9).

3.2.11. Kupola kableske mreže

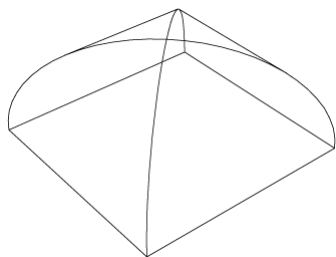
Kableske mreže su nekonvencionalne po tome što su izgrađene pomoću zateznih struktura kao što su kabeli, te nisu kompresijske već zatezne konstrukcije. Unatoč tome one mogu poprimiti cjelokupni oblik kupole (Designing Buildings Wiki 2018, Hunker 2019). Primjer ovakve konstrukcije jest Milenijska kupola sa slike 13.

3.2.12. Napuhane kupole

Napuhane kupole formiraju se tlačenjem volumena zraka zatvorenog laganom membranskom tkaninom. Obično se koriste za prostore koji zahtijevaju veliku zatvorenost bez prekida stupovima kao što su skladišta, sportski objekti, arene za glazbu i slično (slika 14) (Designing Buildings Wiki 2018, Hunker 2019).



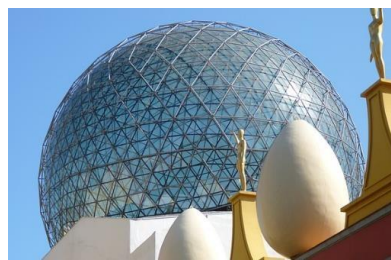
Slika 14: Prikaz napuhane kupole (Architen Landrell 219)



Slika 15: Shematski prikaz poligonalne kupole (Wikimedia)



Slika 16: Unutrašnji prikaz kupole Velike džamije u Cordobi (Camel76 2012)



Slika 17: Primjer geodetske kupole (Designing Buildings Wiki 2018)



Slika 18: Prikaz monolitne kupole (Gradjevinarstvo.rs 2010)



Slika 19: Prikaz lukovičastih glava (Bava 2013)



Slika 20: Unutrašnji prikaz ovalne kupole (Wikipedia 2019)



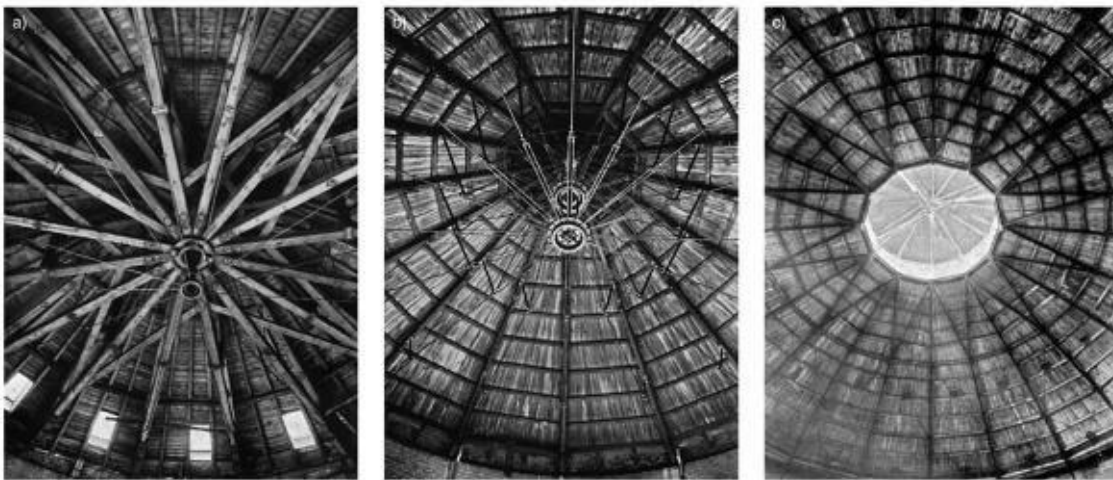
Slika 21: Prikaz polukružne kupole (Wikipedia 2019)



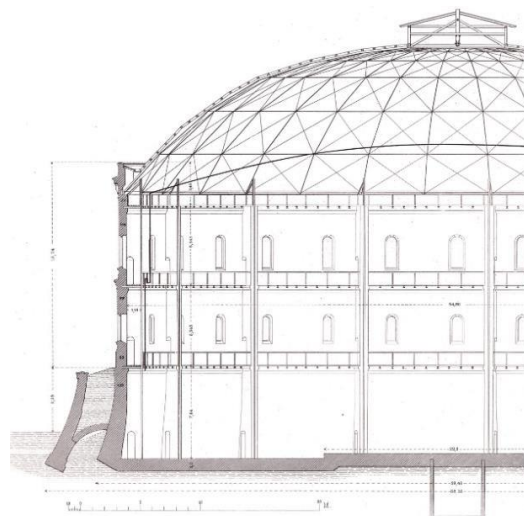
Slika 22: Prikaz plitke kupole (kalota) (Wikipedia 2019)

4. SCHWEDLEROVA KUPOLA

Schwedlerova kupola dobila je naziv po svome izumitelju, pruskom građevinskom inženjeru Johannu Wilhelm Schwedleru. Schwedler je kupolu dizajnirao 1863. godine kao zamjenu za urušeni krov spremnika za plin. Spremnik se nalazio u Berlinu te se koristio za berlinsku uličnu rasvjetu. Na slici 27 prikazana je razvojna povijest krovne konstrukcije plinskog spremnika u Holzmarktstraße u Berlinu. Ta prva Schwedlerova kupola imala je promjer od 30,38 m te je na nju utrošeno 20,6 t željeza (Momentum magazine 2013). Schwedler je ukupno osmislio četiri kupole za spremnike plina od kojih je do danas preživjela samo jedna poznatija pod nazivom *Fichte-Bunker* (slika 24).



Slika 23: Konstrukcije krova plinskog spremnika u Holzmarktstraße u Berlinu: a) od drva (1838), b) s radialnim željeznim vezama (1858) i c) s prvom Schwedlerovom kupolom (1863) (Momentum magazine 2013)



Slika 24: Prikaz Fichte-Bunkera iz 1876.godine (Wikipedia 2017)

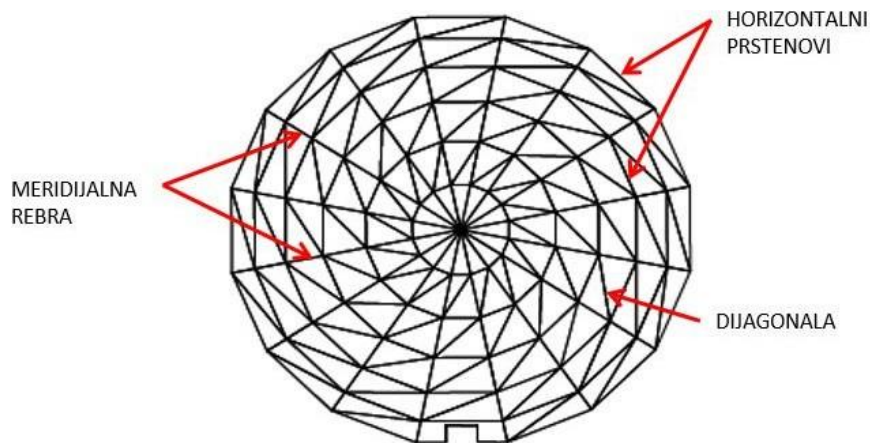
Fichte-Bunker izgrađen je 1874. godine te je bio drugi od četiri spremnika za plin. Radi se o cilindru promjera 56 metara, visine 27 metara od čega je sama visina kupole 6 metara, te je na kupolu utrošeno 68 t željeza (Wikipedia 2019, Momentum magazine 2013). Nakon uvođenja električne ulične rasvjete, spremnik za plin je izašao iz upotrebe, te je od 1922. do 1940. godine bio prazan. Krajem 1940. godine, Fichte-Bunker pretvoren je u sklonište za zračni napad, a od 1944. do 1945. godine pružao je utočište za izbjeglice iz Istočne Njemačke. Nakon rata koristio se kao zatvor za maloljetnike te kao dom za starije osobe. Naposljetku je postao sklonište za beskućnike pod nazivom “*Bunker der Hoffnungslosen*” (*Bunker beznadnih*). Zbog zdravstvenih razloga objekt je zatvoren 1963. godine, te se do ponovnog ujedinjenja Berlina koristio kao skladište za dio Senata. 2006. godine, spremnik je prodan privatnim investitorima te se danas na njegovom krovu nalaze stanovi (slika 24) (Wikipedia 2017).



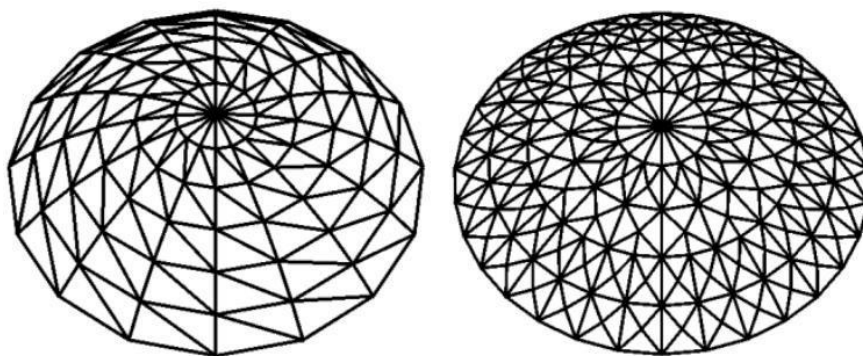
Slika 25: Izgled krova Fichte-Bunkera danas (I1.wp)

4.1. KONSTRUKCIJA KUPOLE

Schwedlerova kupola spada u skupinu štapastih kupola. Njezina konstrukcija sastoji se od dva glavna elementa: meridijanskih rebara i horizontalnih poligonalnih prstenova. Uvođenjem dijagonalnog člana, svaki trapez formiran presijecanjem rebra s horizontalnim prstenom, podijeljen je na dva dijela u obliku trokuta (slika 26) čime se postiže krutost kupole. Prednost ovakvog konstruktivnog sustava je u tome da se osigurava stabilnost čak i pri asimetričnim opterećenjima. Kako bi se izbjegla prenapućenost elemenata u gornjem dijelu kupole, njen dizajn može uključivati skraćivanje pojedinih elementa čime se dobiva vrlo zanimljiv izgled kupole (slika 27) (Makkar i dr., 2016).



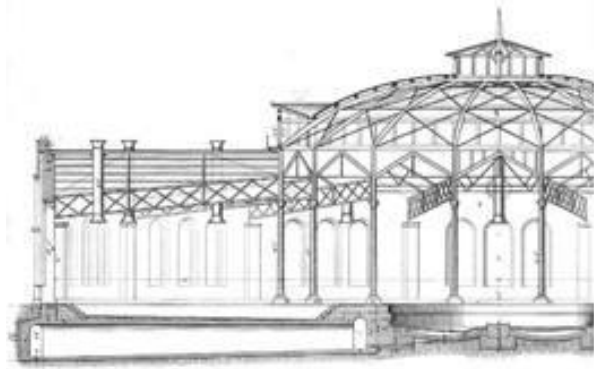
Slika 26: Elementi Schwedlerove kupole



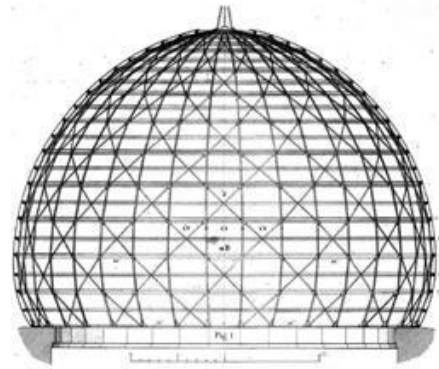
Slika 27: Prikaz klasične Schwedlerove kupole (lijevo) i Schwedlerove kupole sa skraćenim elementima (*Trimmed Schwedler dome*) (desno) (Makkar i dr., 2016)

4.2. PRIMJENA SCHWEDLEROVE KUPOLE

Od 1863. godine široko se primjenjuje Schwedlerova kupola. Osim što se koristila u krovovima berlinskih rezervoara za plin, primjenjivala se i za natkrivanje lokomotivnih spremišta Pruske željeznice (slika 28). Izgradnjom kupole iznad Nove sinagoge u Berlinu, koja također datira iz 1863. godine, Schwedler je kupolu uveo i u monumentalnu arhitekturu (slika 29) (BTU 2017).



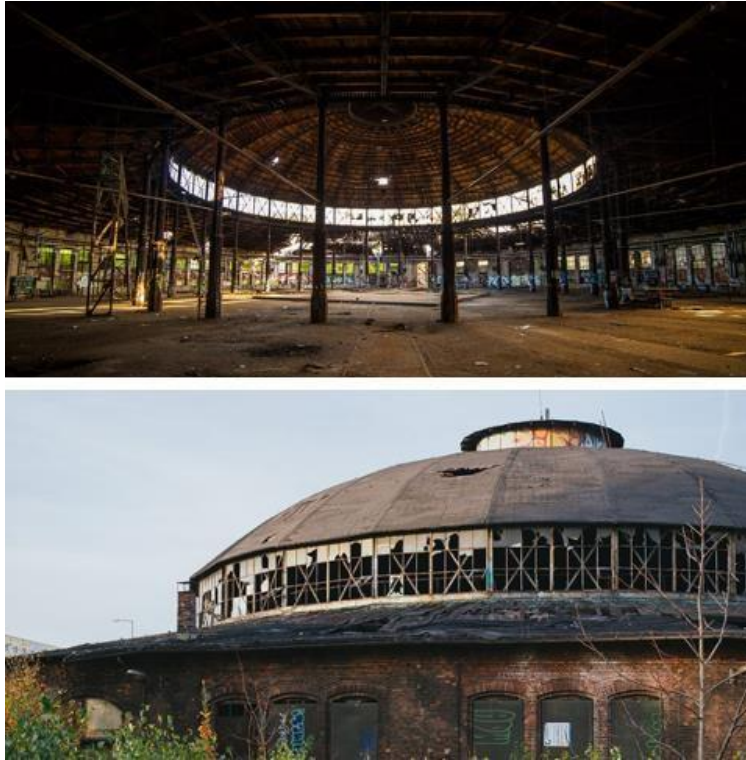
Slika 28: Spremište lokomotiva saarlandske željeznice sa Schwedlerovom kupolom u Saarbrücken-St. Johann iz 1863. godine (BTU 2017)



Slika 29: Kupola Nove sinagoge u Berlinu iz 1863. godine (BTU 2017)

4.2.1. „Okrugle kuće“ u Njemačkoj

Pod nazivom „okrugle kuće“ podrazumijevamo spremište lokomotiva. Radi se o kružnoj građevini u čijoj se sredini nalazi pokretna ploča oko koje zvjezdane tračnice spajaju spojeve za lokomotive. Od mnogobrojnih, danas su samo dvije preostale na području Njemačke. Radi se o Güterbahnhof Pankow (slika 30) i Rundlokschuppen Rummelsburg (slika 31). Obje su smještene u Berlinu te ih natkriva Schwedlerova kupola. Kupole su promjera 30 m, a same okrugle kuće su sadržavale 24 kolosijeka. Nažalost, nakon 1970. godine nisu više u upotrebi te se nalaze u propadajućem stanju (Abandoned Berlin 2013, The urbanite 2019).



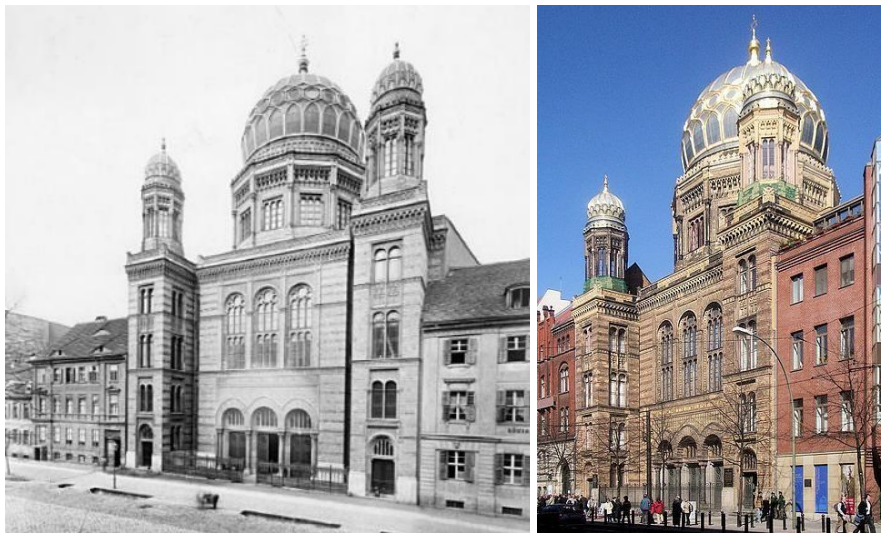
Slika 30: Güterbahnhof Pankow; unutrašnji (gore) i vanjski (dolje) izgled kupole (Abandoned Berlin 2013)



Slika 31: Rundlokschuppen Rummelsburg; unutrašnji (lijevo) i vanjski (desno) izgled kupole (The urbanite 2019)

4.2.2. Monumentalne kupole

Među mnogobrojnim arhitektima koji su sudjelovali na izgradnji prethodno spomenute Nove sinagoge u Berlinu, Johann Wilhelm Schwedler bio je zadužen za izgradnju glavne kupole (slika 29). Originalna kupola je bila željezna i visoka 50 m. Nažalost, za vrijeme Kristalne noći 1938. godine, među brojim napadnutim i zapaljenim sinagogama od strane nacista, našla se i ova. Njeno potpuno uništenje te noći spriječio je jedan policajac, ali rat je ipak ostavio svoje tragove. Tako je od izvorne građevine ostao sačuvan samo dio fasade. Ostatak građevine kao i njena glavna kupola rekonstruirani su sredinom 90-ih godina na način da se što autentičnije prikaže njezin izvorni izgled (Dobraszczyh i Sealy 2016, Museumportal Berlin 2019).



Slika 32: Izgled Nove Sinagoge u Berlinu 1866. godine (lijevo) i danas (desno) (Dobraszczyh i Sealy 2016, Museumportal Berlin 2019)

Sljedeći primjer monumentalne uporabe Schwedlerove kupole nailazimo u Austriji. Jedna od znamenitosti koja krasi grad Beč jest Michaelertrakt. Radi se o sjevernom pročelju palače Hofburg (slika 33) (Wikipedia 2019). Pročelje se sastoji od tri kupole: dvije manje i centralne velike kupole. Izgradnja centralne kupole započeta je između 1891. i 1893. godine. Radi se o željeznoj kupoli promjera 22,77 m te visine od 25,85 m. Konstrukcija se sastoji od unutarnje i vanjske kupole (slika 34). U smislu strukturalne karakterizacije, unutarnja kupola s jednostranom zakrivljenosti slijedi koncept i metodu izračuna koju je uveo J. W. Schwedler. Ista metoda se uspješno primijenila i na vanjsku kupolu dvostruke zakrivljenosti za oblikovanje radijalnih krovnih greda i tangencijalnih prstenova pod vertikalnim opterećenjem (Aguilar i dr. 2019).



Slika 33: Michaelertrakt; sjeverno pročelje palače Hofburg (Wikipedia 2019)



Slika 34: Struktura centralne kupole Michaelertrakt; unutarnja i vanjska struktura kupole (lijevo) i vrh vanjske kupole (desno) (Aguilar i dr. 2019)

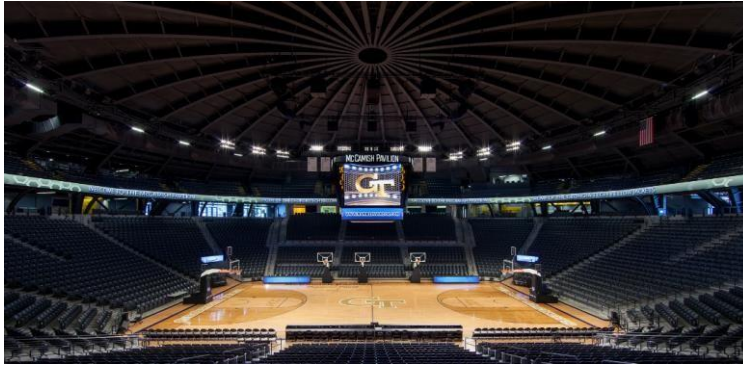
4.2.3. Sportske dvorane

Još jedna od primjena Schwedlerove kupole nalazi se u Austriji. Radi se o sportskom centru Telfs. Točnije riječ je o klizalištu kojeg natkriva eliptična Schwedlerova kupola sa skraćenim elementima (slika 35). Kupola natkriva površinu od 3250 m², te joj se raspon kreće od 55 do 75 m, a visina joj je 10 m. Konstrukcija se sastoji od lijepljenih lameliranih drvenih štapova duljine 2,5 do 5,9 m, širine presjeka 22 do 32 cm i visine 40 cm. Štapovi su spojeni na posebne čvorove koji se sastoje od čeličnih ploča debljine 15 mm i međufaznih ploča od punog drveta (Zoltán 2014, Indermühle Bauingenieure 1999).



Slika 35: Sportski centar Telfs, Austrija (Indermühle Bauingenieure 1999)

Osim u Austriji, Schwedlerova kupola se kao dio sportskog objekta može pronaći u Sjedinjenim Američkim Državama. Radi se o McCamish Pavillion-u (slika 36) koji se nalazi na tehnološkom institutu Georgia u Atlanti. Pavillion predstavlja dom košarkaškog tima Georgia Tech Yellow Jackets, te izvorni objekt uključuje Schwedlerovu kupolu visine 15,24 m (50 ft) i promjera 82,30 m (270 ft). Radi se o čeličnoj kupoli koja se sastoji od 32 rebra. Originalno je postavljena 1955. godine (slika 37), a sam objekt ima kapacitet od 8 600 sjedećih mjesta (KSi structural engineers 2014).



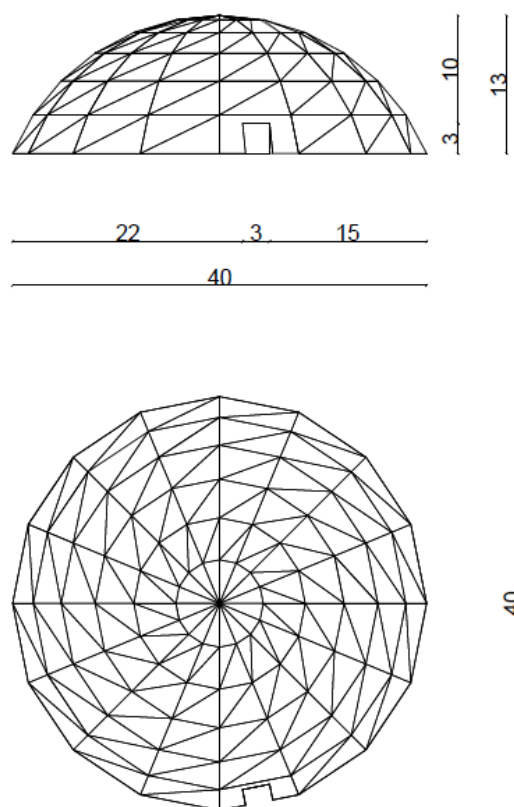
Slika 36: McCamish Pavillion s
unutarnjim prikazom Schwedlerove
kupole (KSi structural engineers 2014)



Slika 37: Postavljanje
Schwedlerove kupole
1955.godine (KSi structural
engineers 2014)

5. PROJEKTNI ZADATAK

Projektom zadatkom definirana je izvedba Schwedlerove kupole u dva materijala; aluminij i čelik. Obje kupole su promjera 40,0 m i visine tjemena 13,0 m (slika 38). Cilj projektnog zadatka jest usporediti utroške materijala te odabrati optimalno rješenje za ovakvu vrstu konstrukcije. Lokacija objekta je Pula, a namjena je sportska dvorana.



Slika 38: Dispozicija Schwedlerove kupole

5.1. ANALIZA DJELOVANJA

Statički proračun konstrukcije provodi se u programskom paketu Robot Structural Analysis Professional 2018. Elementi konstrukcije definirani su kao šuplji profili te su im pridodana odgovarajuća svojstva materijala (čelik ili aluminij). Zbog nemogućnosti definiranja obloge, pokrov je zadan naredbom „CLADDINGS“. „Cladding“ predstavlja fiktivnu površinu bez debljine u svrhu lakšeg nanošenja opterećenja. U nastavku su dane vrijednosti opterećenja koje su uzete u obzir pri proračunu.

5.1.1. Vlastita težina

Vlastita težina konstrukcije uzeta je u obzir pomoću naredbe „*SELF WEIGHT*“ dok je težina pokrova nanijeta kao kontinuirano opterećenje. U gornjem dijelu kupole predviđena je upotreba aluminijskih ploča debljine 3 mm te njihovo opterećenje iznosi 0,08 kPa. Na obodnom dijelu kupole predviđena je upotreba staklenih panela debljine 10 mm te njihovo opterećenje iznosi 0,26 kPa.

5.1.2. Djelovanje snijega

Lokacija: Pula

N.M.V.: 30 m

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_k \quad (1)$$

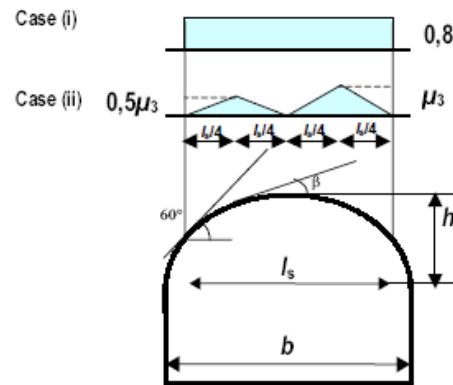
μ_i faktor oblika opterećenja snijegom na krovu

s_k karakteristična vrijednost opterećenja snijegom na tlu

C_e faktor izloženosti ($C_e = 1,0$)

C_t toplinski koeficijent ($C_t = 1,0$)

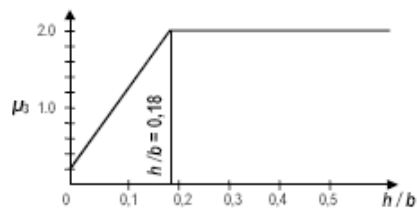
Za nadmorsku visinu 100 m i 1. područje – priobalje i otoci, karakteristična vrijednost opterećenja snijegom iznosi $s_k = 0,50 \text{ kN/m}^2$.



Slika 39: Faktor oblika opterećenja za cilindrične krovove (EN 1991-1-3)

EN 1991-1-3_2003 kao preporučenu maksimalna vrijednost faktora μ_3 navodi 2,0 što je i prikazano na slici 40.

NOTE 1: The upper value of μ_3 may be specified in the National Annex. The recommended upper value for μ_3 is 2,0 (see Figure 5.5).



Slika 40: Preporučena maksimalna vrijednost faktora oblika μ_3 (EN 1991-1-3)

$$\text{SLUČAJ 1: } s_1 = \mu_i * C_e * C_t * s_k = 0,8 * 1,0 * 1,0 * 0,5 = 0,4 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (2)$$

$$\text{SLUČAJ 2: } s_{2,\text{lijevo}} = \mu_i * C_e * C_t * s_k = (0,5 * 2,0) * 1,0 * 1,0 * 0,5 = 0,5 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3)$$

$$s_{2,\text{desno}} = \mu_i * C_e * C_t * s_k = 2,0 * 1,0 * 1,0 * 0,5 = 1,0 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (4)$$

Kao mjerodavna vrijednost u proračunu uzeto je maksimalno opterećenje snijegom koje iznosi $s=1,0 \text{ kN/m}^2$ s ciljem pojednostavljenja proračuna. Za nekakav stvarni projekt trebala bi se oba slučaja uzeti u obzir za analizu djelovanja te napraviti kombinacije djelovanja za oba slučaja.

5.1.3. Djelovanje vjetra

Osnovna brzina vjetra

$$v_b = C_{dir} * C_{season} * v_{b,0} \quad (5)$$

v_b osnovna brzina vjetra

$v_{b,0}$ temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra

C_{dir} faktor smjera ($C_{dir} = 1,0$)

C_{season} faktor godišnjeg doba ($C_{season} = 1,0$)

Temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra očitana s karte za lokaciju Pula: $v_{b,0} = 25$ m/s.

Uvrštavanjem očitane temeljne vrijednosti osnovne brzine vjetra u izraz (5) dobivamo:

$$v_b = C_{dir} * C_{season} * v_{b,0} = 1,0 * 1,0 * 25 = 25 \text{ m/s} \quad (6)$$

Srednja vrijednost brzine vjetra

$$v_m(z) = C_r(z) * C_o(z) * v_b \quad (7)$$

$C_r(z)$ faktor hrapavosti

$C_o(z)$ faktor orografije $\rightarrow C_o(z) = 1,0$

Hrapavost terena

$$C_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ za } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (8)$$

$$C_r(z) = C_r(z_{min}) \text{ za } z < z_{min} \quad (9)$$

z_0 duljina hrapavosti

k_r faktor terena ovisan o duljini hrapavosti z_0 i proračunan kao

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (10)$$

$z_{0,II} = 0,05$ (kategorija terena II)

z_{min} najmanja visina

z_{max} uzima se kao 200 m

$z_0; z_{max}$ ovise o kategoriji terena

Prema normi HRN EN 1991-1-4 i kategoriji terena III (područja dobro prekrivena vegetacijom ili zgradama ili izoliranim preprekama s podjelom na barem 20 visina prepreka), vrijedi:

$z_0 = 0,3 \text{ m}$ i $z_{\min} = 5,0 \text{ m}$.

Iz $z = 30,0 \text{ m}$

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 * \left(\frac{0,3}{0,05}\right)^{0,07} = 0,22 \quad (11)$$

Vrijedi $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$ ($5 \text{ m} < 30,0 \text{ m} < 200 \text{ m}$) pa koristimo formulu iz izraza (8):

$$C_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,22 * \ln\left(\frac{30,0}{0,3}\right) = 0,99 \quad (12)$$

Srednja brzina vjetra jednaka je:

$$v_m(z) = C_r(z) * C_o(z) * v_b = 0,99 * 1,0 * 25 = 24,75 \text{ m/s} \quad (13)$$

Jakost turbulencije vjetra

Za $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$ ($5 \text{ m} < 30 \text{ m} < 200 \text{ m}$):

$$\sigma_v = k_r * V_b * k_I = 0,22 * 25,0 * 1,0 = 5,5 \quad (14)$$

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{V_m(z)} = \frac{5,5}{24,75} = 0,22 \quad (15)$$

Vršni pritisak brzine

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) = C_e(z) * q_b \quad (16)$$

ρ gustoća zraka ($\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$)

$C_e(z)$ faktor izloženosti

q_b osnovni pritisak brzine

$$q_b = \frac{1}{2} * \rho * V_b^2 = 0,5 * 1,25 * \frac{25^2}{1000} = 0,39 \text{ kN/m}^2 \quad (17)$$

$$q_p(z) = [1 + 7 * 0,22] * 0,5 * 1,25 * \frac{24,75^2}{1000} = 0,97 \text{ kN/m}^2 \quad (18)$$

$$C_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} = \frac{0,97}{0,39} = 2,5 \quad (19)$$

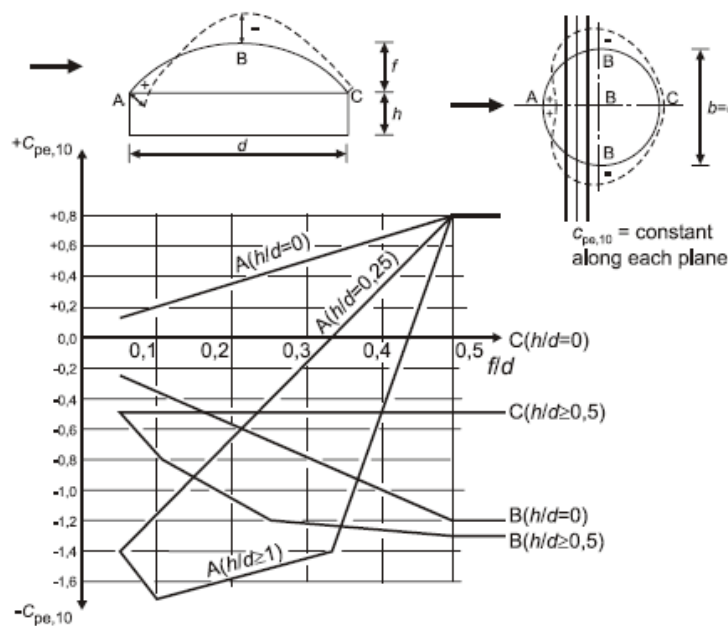
Tablica 1. Prikaz dobivenih vrijednosti

OPIS	OZNAKA	VRIJEDNOST
Vršni pritisak brzine	$q_p(z)$	0,97 kN/m ²
Osnovna brzina vjetra	V_b	25 m/s
Referentna visina	Z_e	30 m
Kategorija terena		3
Karakteristični vršni pritisak brzine	q_p	0,97 kN/m ²
Intenzitet turbulencija	$I_v(z)$	0,22
Srednja brzina vjetra	V_m	25,25 kN/m ²
Koeficijent orografije	$C_0(z)$	1,0
Koeficijent hrapavosti	C_r	0,99
Faktor izloženosti	$C_e(z)$	2,5

KOEFICJENTI PRITISKA:

Eurokod za djelovanje vjetra EN 1991-1-4_2005 daje vrijednosti koeficijenta pritiska za svodene krovove i kupole (slika 41).

A) VANJSKI PRITISAK



Slika 41: Proračunski model za izračun vanjskog pritiska (EN 1991-1-4)

Iz dijagrama koji je prikazan na slici 41, u ovisnosti $\frac{f}{d} = \frac{13}{40} = 0,33$ za određenu liniju (A,B i/ili C) dobiva se koeficijent vanjskog pritiska tlaka. Tako vrijedi sljedeće:

$$A \rightarrow C_{pe,10} = +0,55$$

$$B \rightarrow C_{pe,10} = -0,85$$

$$C \rightarrow C_{pe,10} = 0,0$$

A) UNUTRAŠNJI PRITISAK

Prema Eurokodu za projektiranje kupola definirano je da vanjski i unutarnji pritisak djeluju u isto vrijeme. Najnepovoljnija kombinacija je ona s otvorom na kupoli, te C_{pi} ovisi o veličini otvora.

$$\mu = \frac{\Sigma \text{površina otvora gdje je } C_{pe} \text{ negativan ili } 0,0}{\Sigma \text{površina svih otvora}} = 1 \quad (20)$$

Interpolacijom dobivamo vrijednosti $C_{pi} = -0,32$

PRITISAK VJETRA NA VANJSKE POVRŠINE:

$$w_e = q_p(z_e) * C_{pe,10} \quad (21)$$

$$w_{e,A} = 0,97 * 0,55 = 0,5335 \text{ kN/m}^2 \quad (22)$$

$$w_{e,B} = 0,97 * (-0,85) = -0,8245 \text{ kN/m}^2 \quad (23)$$

$$w_{e,C} = 0,97 * 0 = 0,0 \text{ kN/m}^2 \quad (24)$$

Kao što je prikazano na slici 41, vanjski pritisak vjetra se smanjuje postepeno. Zbog pojednostavljenja proračuna, što je ujedno i na strani sigurnosti, u ovom diplomskom radu je uzeto jednoliko kontinuirano djelovanje vjetra kroz sve tri vjetrovne zone.

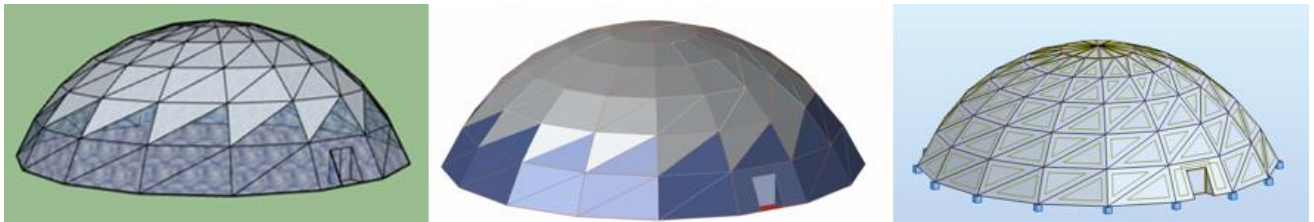
PRITISAK VJETRA NA UNUTARNJE POVRŠINE:

$$w_i = q_p(z_i) * C_{pi} \quad (25)$$

$$w_i = 0,97 * (-0,32) = -0,3104 \quad (26)$$

6. STATIČKI PRORAČUNI KUPOLA

U ovom poglavlju su prikazane analize za dvije varijante Schwedlerove kupole istih tlocrtnih dimenzija i visine, izvedene u dva različita materijala (čelik i aluminij), s ciljem odabira optimalnog rješenja. 3D model kupole je izrađen pomoću programa Google SketchUp nakon čega je uvezen u AutoCAD 2018 te zatim u Robot Structural Analysis Professional 2018.



Slika 42: Prikaz 3D modela u SketchUp-u (lijevo), ACAD-u (sredina) i Robot-u (desno)

6.1. SCHWEDLEROVA KUPOLA U ALUMINIJSKOJ IZVEDBI

6.1.1. Nosiva konstrukcija

Nosiva konstrukcija izvedena je od ekstrudiranih aluminijskih cijevnih profila vanjskog promjera 11 cm, te debljine stjenke od 3,5 cm. Odabrana je aluminijska legura EN AW-6082 T6. Aluminijski cijevni profili spajaju se na gradilištu KK sustavima. KK sustav je čvorna kugla od aluminija za koju se pričvršćuju aluminijski cijevni profili. Aluminijski cijevi profili se povezuju vijcima sa čvorom koji ima utore kako bi se svaki profil mogao povezati i tako tvoriti prostornu strukturu.

6.1.2. Pokrov

S obzirom na namjenu objekta odabran pokrov od aluminija i stakla. Aluminijske ploče debljine 3 mm postavljene su na gornjem dijelu kupole, dok je obloga obodnog dijela izvedena od staklenih ploča debljine 10 mm.

6.1.3. Zaštita od korozije

Djelovanjem okoliša i brojnih drugih vanjskih agensa može doći do skidanja oksidnog filma koji prirodno štiti aluminijsku površinu te na taj način može doći do stvaranja korozije. Obzirom da je kupola smještena u gradskoj sredini, svi aluminijski cijevni profili će se u radionici premazati organskim premazima i kao takvi gotovi elementi spremni za ugradnju dopremiti na gradilište. Organski premazi odabrani su zbog ekoloških razloga. KK sustavi, odnosno čvorovi, kojima se vrši

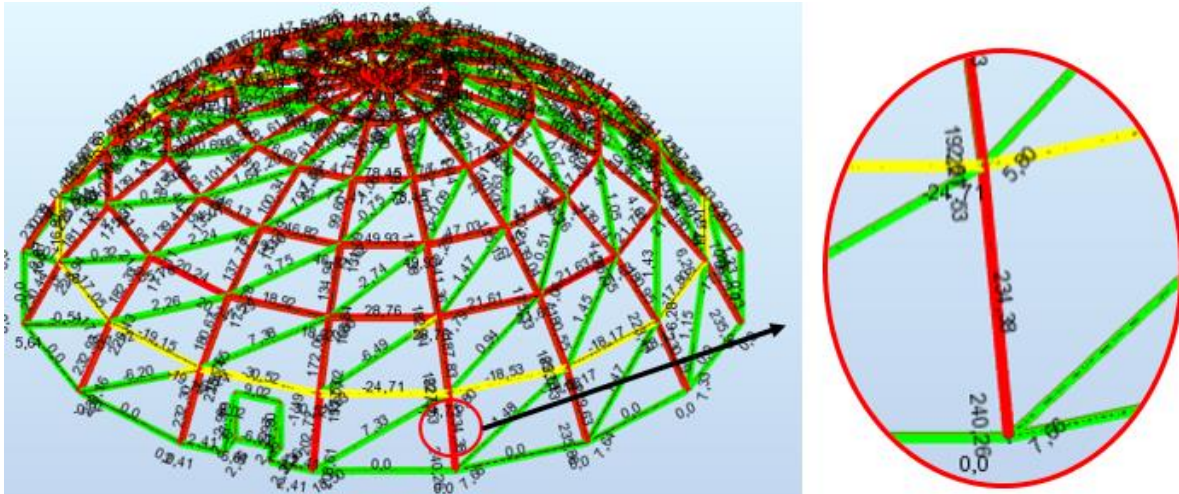
spajanje aluminijskih cijevnih profila, biti će lakirani prahom u tvornici kao sastavni dio proizvodnog procesa i kao takvi dovedeni na gradilište.

6.1.4. Doprema i montaža konstrukcije

Aluminijski cijevni profili izrađuju se u radionici te se s obzirom na male dimenzije dopremaju na gradilište redovnim prijevozom. Na gradilištu se cijevni aluminijski profili spajaju pomoću patentiranih aluminijskih KK sustava.

6.1.5. REZULTATI STATIČKOG PRORAČUNA

Statički proračun proveden je u programskom paketu Robot Structural Analysis Professional 2018. Nakon pridodavanja potrebnih karakteristika modelu (dimenzije profila, odabir materijala profila, postavljanje fiktivnih površina („claddings“) te definiranje ležajeva) nanijeta su dobivena opterećenja za snijeg i vjetar te opterećenja pokrova. Provedeno je ukupno 10 kombinacija opterećenja na osnovu kojih su dobivene kritične vrijednosti s kojima se dalje ulazilo u proračune nosivosti i uporabljivosti (tablica 2).



Slika 43: Prikaz elementa u kojem se javlja maksimalna tlačna sila

Tablica 2: Rezultati analize statičkog modela Schwedlerove kupole u aluminijskoj izvedbi

Maksimalna vlačna sila	119,88	kN
Kombinacija u kojoj se javlja maksimalni vlak:		
"stalno"+"vjetar B"		
Maksimalna tlačna sila	234,38	kN
Kombinacija u kojoj se javlja maksimalni tlak:		
"stalno"+"snijeg"		
Duljina štapa	4,21	m
Maksimalni progib tjemena	4	mm
Kombinacija u kojoj se javlja maksimalni progib:		
"stalno"+"snijeg"		

6.1.6. PROVJERA KONSTRUKCIJE PREMA GRANIČNOM STANJU NOSIVOSTI (GSN)

KLASIFIKACIJA PRESJEKA

U tablici 3 prikazana je klasifikacija presjeka provedena u skladu s EN 1991-1-1_2007.

Tablica 3: Klasifikacija aluminijskog presjeka

Klasifikacija presjeka		
f ₀	260	kN/cm ²
D ₀	110	mm
t	35	mm
D=D ₀ -t	75	mm
Okrugle cijevi s tankom stjenkom za jednolik tlak ili savijanje		
Uvjet za klasu 1	$\beta \leq \beta_1$	
$\beta = 3 \cdot \sqrt{D/t}$	4,39155	
$\beta_1 = 11\varepsilon$	10,7864	
$\varepsilon = \sqrt{250/f_0}$	0,98058	
4,39155 < 10,7864		
Poprečni presjek je klasa 1!		

6.1.6.1. Provjera nosivosti elemenata

Odabrani poprečni presjek je kružni šuplji presjek vanjskog promjera 110 mm i unutarnjeg 75 mm (slika 44). Provjere nosivosti elemenata provedene su u skladu s EN 1991-1-1_2007 te su prikazane u nastavku rada (tablice 4, 5 i 6).



Slika 44: Izgled poprečnog presjeka izvedenog od aluminija

OTPORNOST PRESJEKA:

Otpornost presjeka na uzdužnu vlačnu silu:

Ovim proračunom se uspoređuje maksimalna vlačna uzdužna sila N_{ed} , koja se javlja kao učinak djelovanja, i proračunska otpornost poprečnog presjeka na uzdužnu vlačnu silu $N_{t,Rd}$ te njihov omjer ne smije biti već od 1. Za proračunsku vlačnu otpornost poprečnog presjeka $N_{t,Rd}$ treba uzeti manju vrijednost od $N_{0,Rd}$ i $N_{u,Rd}$ što je i prikazani u tablici 4.

Tablica 4: Otpornost aluminijskog presjeka na vlak

f_0	26	kN/cm ²
f_u	29	kN/cm ²
γ_{M1}	1,1	
γ_{M2}	1,25	
A_g	50,8545	cm ²
A_{net}	50,8545	cm ²
N_{ed}	119,88	kN
$N_{t,Rd} = \min(N_{0,Rd}; N_{u,Rd})$		1061,84
$N_{0,Rd} = A_g \cdot f_0 / \gamma_{M1}$		1202,02
$N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2}$		1061,84
$N_{ed} / N_{t,Rd}$	0,11	<1
ZADOVOLJAVA		

Otpornost presjeka na uzdužnu tlačnu silu:

Za poprečne presjeke aluminijskih legura izložene uzdužnoj tlačnoj sili treba biti zadovoljeno $N_{ed}/N_{c,Rd} \leq 1$. N_{ed} je proračunska tlačna uzdužna sila koja se javlja kao učinak djelovanja, a $N_{c,Rd}$ je proračunska otpornost poprečnog presjeka na uzdužnu tlačnu silu (Boko i dr.,2017). Kao i kod proračunske vlačne otpornosti, za vrijednost $N_{c,Rd}$ odabire se manja vrijednost od $N_{0,Rd}$ i $N_{u,Rd}$. U tablici 5 prikazan je proveden proračun otpornosti presjeka na tlačnu silu.

Tablica 5: Otpornost aluminijskog presjeka na tlak

f_0	26	kN/cm ²
f_u	29	kN/cm ²
γ_{M1}	1,1	
γ_{M2}	1,25	
A_g	50,8545	cm ²
A_{net}	50,8545	cm ²
N_{ed}	234,38	kN
$N_{c,Rd} = \min(N_{0,Rd}; N_{u,Rd})$		1061,84
$N_{0,Rd} = A_{eff} \cdot f_0 / \gamma_{M1}$		1202,02
$N_{u,Rd} = A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2}$		1061,84
$N_{ed}/N_{t,Rd}$	0,22	<1
ZADOVOLJAVA		

STABILNOST ELEMENATA:

Otpornost elemenata na izvijanje:

U elementima izloženim centričnom tlaku može doći do izvijanja te je potrebno provesti proračun otpornosti elemenata na izvijanje. Potrebno je obratiti pozornost na kritičnu duljinu izvijanja jer ona ovisi o načinu oslanjanja elementa te se može razlikovati od stvarne duljine elementa. U ovome radu elementi su promatrani kao slobodno oslonjeni te je u tome slučaju duljina izvijanja jednaka stvarnoj duljini elementa. Provjerava se odnos proračunske vrijednosti uzdužne tlačne sile N_{ed} i proračunske otpornosti tlačnog elementa na izvijanje $N_{b,Rd}$. U tablici 6 prikazan je proveden proračun otpornosti elemenata na izvijanje.

Tablica 6: Otpornost elemenata izvedenih od aluminija na izvijanje

L	421	cm
$L_{cr}=k*L$	421	cm
E	7000	kN/cm ²
I	711,32	cm ⁴
A _{eff}	50,8545	cm ²
N _{ed}	234,38	kN
f ₀	26	kN/cm ²
γM ₁	1,1	
κ	1	
$N_{cr}=\pi^2*E*I_z/L_{cr}^2$	277,268	
$\chi=1/\varphi+\sqrt{\varphi^2-\lambda^2}$	0,20133	
$\varphi=0,5*(1+\alpha(\lambda-\lambda_0))+\lambda^2$	2,96355	
αLT	0,1	za klasu presjeka 1
λ ₀	0,6	
$\lambda=\sqrt{A_{eff}*f_0/N_{cr}}$	2,18374	
$N_{b,Rd}=\kappa*\chi*A_{eff}*f_0/\gamma M_1$	241,999	
N _{ed} /N _{b,Rd}	0,97	<1
ZADOVOLJAVA		

Odabrani kružni šuplji aluminijski poprečni presjek zadovoljava provjeru, sa iskoristivosti 97,0%.

6.1.7. PROVJERA KONSTRUKCIJE PREMA GRANIČNOM STANJU UPORABLJIVOSTI (GSU)

Maksimalni dopušteni konačni progib tjemena kupole iznosi:

$$u_{fin} \leq \frac{l}{200} = \frac{3000 \text{ cm}}{200} = 15 \text{ cm} \quad (27)$$

Kritična kombinacija opterećenja je „stalno“+“snijeg“ i za nju pomak tjemena iznosi 4 mm.

$$u_{fin} = 4 \text{ mm} < 150 \text{ mm} \quad (28)$$

6.1.8. ISKAZ MATERIJALA

U nastavku je prikazan iskaz materijala za Schwedlerovu kupolu u aluminijskoj izvedbi (tablica 7) te ukupni utrošak materijala i ukupna težina konstrukcije (tablica 8).

Tablica 7: Iskaz materijala za Schwedlerovu kupolu u aluminijskoj izvedbi

Elementi	Materijal	Zapreminska težina [kg/m ³]	Broj komada [kom.]	Duljina [m]	Poprečni presjek		Volumen [m ³]	Masa [kg]
					d[m]	d1 [m]		
Nosivi štapovi	Aluminijska legura EN AW-6082 T6	2712,629	96	4,21	0,11	0,075	0,021409758	5575,37
			16	1,63	0,11	0,075	0,008289289	359,77
			16	4,79	0,11	0,075	0,02435932	1057,24
			16	3,20	0,11	0,075	0,01627345	706,30
			16	5,71	0,11	0,075	0,029037937	1260,31
			16	4,65	0,11	0,075	0,023647357	1026,34
			16	6,72	0,11	0,075	0,034174245	1483,23
			16	5,92	0,11	0,075	0,030105882	1306,66
			16	7,68	0,11	0,075	0,03905628	1695,12
			16	6,93	0,11	0,075	0,03524219	1529,58
			15	8,46	0,11	0,075	0,043022933	1750,58
			15	7,74	0,11	0,075	0,039361407	1601,59
			2	2,55	0,11	0,075	0,012967905	70,35
			2	3,29	0,11	0,075	0,016731141	90,77
			2	2,91	0,11	0,075	0,014798669	80,29
2	2,64	0,11	0,075	0,013425596	72,84			
2	1,53	0,11	0,075	0,007780743	42,21			
Elementi	Materijal	Zapreminska težina [kg/m ³]	Komad [kom]	Površina [m ²]	Debljina [m]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	
Pokrov	Aluminij	2700		32	3,37	0,003	0,01011	873,504
			16	6,6200	0,003	0,01986	857,95	
			16	6,6300	0,003	0,01989	859,25	
			16	9,6300	0,003	0,02889	1248,05	
			16	9,6700	0,003	0,02901	1253,23	
			16	12,3100	0,003	0,03693	1595,38	
			16	12,3500	0,003	0,03705	1600,56	
	Staklo	2600,276	16	15,5300	0,01	0,1553	6461,17	
			15	14,5800	0,01	0,1458	5686,80	
			15	16,2000	0,01	0,162	6318,67	
			1	22,09	0,01	0,2209	574,40	
			1	7,69	0,01	0,0769	199,96	
			2	2,23	0,01	0,0223	115,97	
Elementi			Komad [kom]					
Spojevi	Aluminijska čvorna kugla		81					
	Spoj sa temeljem		16					

Tablica 8: Ukupni iskaz materijala za Schwedlerovu kupolu u aluminijskoj izvedbi

Materijal	Volumen	Masa	Komad
	[m ³]	[kg]	[kom]
Aluminijska legura EN AW-6082 T6	7,27	19708,57	-
Aluminij	3,07	8287,92	-
Staklo	7,44	19356,97	-
Aluminijska čvorna kugla	-	-	81
Spoj sa temeljem	-	-	16
UKUPNO:	17,78	47353,46	97

6.2. SCHWEDLEROVA KUPOLA U ČELIČNOJ IZVEDBI

6.2.1. Nosiva konstrukcija

Nosiva konstrukcija izvedena je od hladno valjanih čeličnih cijevnih profila vanjskog promjera 11 cm, te debljine stjenke od 1,5 cm. Odabrana je kvaliteta čelika S355. Čelični cijevni profili se spajaju, kao i kod aluminijske izvedbe, KK sustavima. U ovoj izvedbi KK sustav je čvorna kugla od čelika te se spajanje profila provodi na isti način kao i kod prethodno spomenutih aluminijskih profila.

6.2.2. Pokrov

Odabran je isti pokrov kao i kod aluminijske izvedbe; aluminij debljine 3 mm u gornjem dijelu kupole i staklene ploče debljine 10 mm kao obodni dio kupole.

6.2.3. Zaštita od korozije

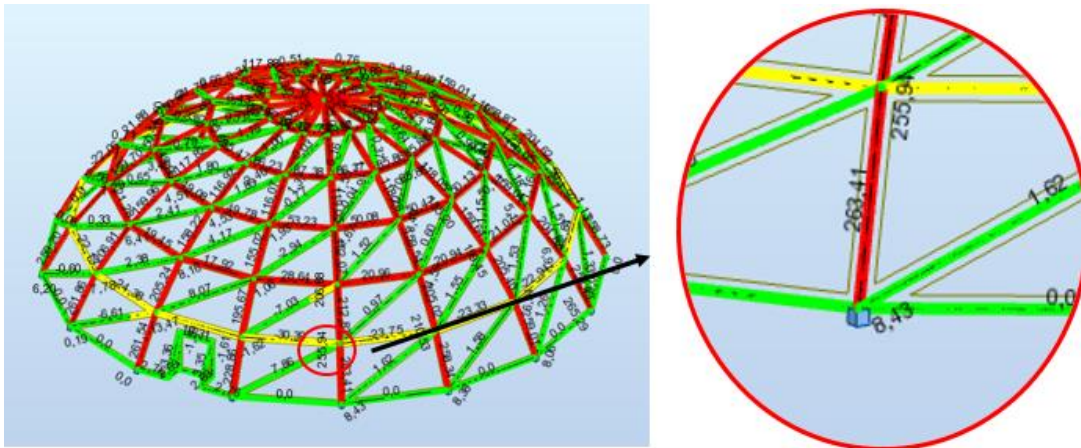
Prema odredbama „Pravilnika o tehničkim mjerama i uvjetima za zaštitu čeličnih konstrukcija od korozije“ svi dijelovi čelične konstrukcije moraju biti zaštićeni od korozije. Kao vrsta zaštite od korozije odabrana je zaštita vrućim pocinčavanjem i zaštitnim premazom.

6.2.4. Doprema i montaža konstrukcije

Čelični cijevni profili izrađuju se u radionici te se s obzirom na male dimenzije dopremaju na gradilište redovnim prijevozom. Na gradilištu se čelični profili, kao i prethodno spomenuti aluminijski, spajaju pomoću patentiranih čeličnih KK sustava.

6.2.5. REZULTATI STATIČKOG PRORAČUNA

Statički proračun za Schwedlerovu kupolu u čeličnoj izvedbi proveden je na isti način kao i kod aluminijske izvedbe. Dobivene maksimalne vrijednosti sila i progiba prikazane su u tablici 9.



Slika 45: Prikaz elementa u kojem se javlja maksimalna tlačna sila

Tablica 9: Rezultati statičke analize Schwedlerove kupole u čeličnoj izvedbi

Maksimalna vlačna sila	90,64	kN
Kombinacija u kojoj se javlja maksimalni vlak:		
"stalno"+"vjetar B"		
Maksimalna tlačna sila	263,41	kN
Kombinacija u kojoj se javlja maksimalni tlak:		
"stalno"+"snijeg"		
Duljina štapa	4,21	m
Maksimalni progib tjemena	3	mm
Kombinacija u kojoj se javlja maksimalni progib:		
"stalno"+"snijeg"		

6.2.6. PROVJERA KONSTRUKCIJE PREMA GRANIČNOM STANJU NOSIVOSTI (GSN)

KLASIFIKACIJA PRESJEKA

Klasifikacija presjeka provedena je prema EN 1993-1-1_2005 te je prikazana u tablici 10.

Tablica 10: Klasifikacija čeličnog presjeka

Razred čelika: S355		
f_y	35,5	kN/cm ²
d	110	mm
t	15	mm
ϵ	0,81	
Okrugle cijevi s tankom stjenkom za jednolik tlak ili savijanje		
Uvjet za klasu 1	$d/t \leq 50\epsilon^2$	
d/t	7,333333	
$50\epsilon^2$	32,8050	
$7,3333 < 32,8050$		
Poprečni presjek je klasa 1!		

6.2.6.1. Provjera nosivosti elemenata

Odabrani poprečni presjek je kružni šuplji presjek vanjskog promjera 110 mm i unutarnjeg 95 mm (slika 46). Provjere nosivosti elemenata provedene su u skladu s EN 1993-1-1_2005 te su prikazane u nastavku rada (tablice 11,12 i 13).



Slika 46: Izgled poprečnog presjeka izvedenog od čelika

OTPORNOST PRESJEKA:

Otpornost presjeka na uzdužnu vlačnu silu:

Ovim proračunom se uspoređuje maksimalna vlačna uzdužna sila N_{ed} , koja se javlja kao učinak djelovanja, i proračunska otpornost poprečnog presjeka na uzdužnu vlačnu silu $N_{t,Rd}$ te njihov omjer ne smije biti već od 1. Proračun je prikazan u tablici 11.

Tablica 11:Otpornost čeličnog presjeka na vlak

Razred čelika: S355		
f_y	35,5	kN/cm ²
ϵ	0,81	
E	21000	kN/cm ²
D	11	cm
t	1,5	cm
d=D-t	9,5	cm
A	24,15099	cm ²
γ_{M0}	1	
Ned	90,64	kN
Nt,Rd=Afy/ γ_{M0}		
Nt,Rd	857,3603	kN
Ned/Nt,Rd	0,10572	<1
ZADOVOLJAVA		

Otpornost presjeka na uzdužnu tlačnu silu:

Proračun otpornosti presjeka na uzdužnu tlačnu silu kod čeličnih presjeka provodi se na isti način kao i otpornost presjeka na uzdužnu vlačnu silu. Razlika je u tome što se umjesto vlačnih vrijednosti uspoređuju proračunska tlačna sila Ned i proračunska tlačna otpornost Nc,Rd. Proračun je prikazan u tablici 12.

Tablica 12: Otpornost čeličnog presjeka na tlak

f_y	35,5	kN/cm ²
ϵ	0,81	
E	21000	kN/cm ²
D	11	cm
t	1,5	cm
d=D-t	9,5	cm
A	24,15099	cm ²
γ_{M0}	1	
Ned	263,41	kN
Nc,Rd=Afy/ γ_{M0}		
Nc,Rd	857,3603	kN
Ned/Nc,Rd	0,307234	<1
ZADOVOLJAVA		

STABILNOST ELEMENATA:

Otpornost elemenata na izvijanje:

Kao i kod aluminijski presjeka, tako se i kod čeličnih presjeka izloženih centričnom tlaku treba provesti proračun elemenata na izvijanje. Proračun je proveden za element u kojem se javlja maksimalna tlačna sila (slika 45) te je prikazan u tablici 13.

Tablica 13: Otpornost elemenata izvedenih od čelika na izvijanje

Razred čelika: S355		
f_y	35,5	kN/cm ²
ϵ	0,81	
E	21000	kN/cm ²
L	421	cm
L_{cr}	421	cm
D	11	cm
t	1,5	cm
$d=D-t$	9,5	cm
A	24,15099	cm ²
I	318,8686	cm ⁴
γ_{M0}	1	
α	0,49	krivulja c
N_{ed}	263,41	kN
$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M0}$		
$N_{b,Rd}$	265,178	kN
χ	0,309296	≤ 1
ϕ	1,972158	
λ	1,516346	
N_{cr}	372,8778	
$N_{ed}/N_{b,Rd}$	0,993333	< 1
ZADOVOLJAVA		

Odabrani kružni šuplji poprečni presjek, kvalitete čelika S355, zadovoljava provjeru, sa iskoristivosti 99,33%.

6.2.7. PROVJERA KONSTRUKCIJE PREMA GRANIČNOM STANJU UPORABLJIVOSTI (GSU)

Maksimalni dopušteni konačni progib tjemena kupole isti je kao i kod aluminijske izvedbe, te on iznosi:

$$u_{fin} \leq \frac{l}{200} = \frac{3000 \text{ cm}}{200} = 15 \text{ cm} \quad (27)$$

Kritična kombinacija opterećenja je „stalno“ + „snijeg“ i za nju pomak tjemena iznosi 3 mm.

$$u_{fin} = 3 \text{ mm} < 15 \text{ mm} \quad (29)$$

6.2.8. ISKAZ MATERIJALA

U nastavku je prikazan iskaz materijala za Schwedlerovu kupolu u čeličnoj izvedbi (tablica 14) te ukupni utrošak materijala i ukupna težina konstrukcije (tablica 15).

Tablica 14: Iskaz materijala za Schwedlerovu kupolu u čeličnoj izvedbi

Elementi	Materijal	Zapreminska težina [kg/m ³]	Broj komada [kom.]	Duljina [m]	Poprečni presjek		Volumen [m ³]	Masa [kg]
					d[m]	d1 [m]		
Nosivi štapovi	Čelik S355	7850	96	4,21	0,11	0,095	0,010167568	7662,28
			16	1,63	0,11	0,095	0,003936612	494,44
			16	4,79	0,11	0,095	0,011568326	1452,98
			16	3,20	0,11	0,095	0,007728318	970,68
			16	5,71	0,11	0,095	0,013790217	1732,05
			16	4,65	0,11	0,095	0,011230212	1410,51
			16	6,72	0,11	0,095	0,016229468	2038,42
			16	5,92	0,11	0,095	0,014297388	1795,75
			16	7,68	0,11	0,095	0,018547963	2329,62
			16	6,93	0,11	0,095	0,016736639	2102,12
			15	8,46	0,11	0,095	0,020431741	2405,84
			15	7,74	0,11	0,095	0,018692869	2201,09
			2	2,55	0,11	0,095	0,006158503	96,69
			2	3,29	0,11	0,095	0,007945677	124,75
			2	2,91	0,11	0,095	0,007027939	110,34
2	2,64	0,11	0,095	0,006375862	100,10			
2	1,53	0,11	0,095	0,003695102	58,01			
Elementi	Materijal	Zapreminska težina [kg/m ³]	Komad [kom]	Površina [m ²]	Debljina [m]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	
Pokrov	Aluminij	2700						32
			16	6,6200	0,003	0,01986	857,95	
			16	6,6300	0,003	0,01989	859,25	
			16	9,6300	0,003	0,02889	1248,05	
			16	9,6700	0,003	0,02901	1253,23	
			16	12,3100	0,003	0,03693	1595,38	
			16	12,3500	0,003	0,03705	1600,56	
	Staklo	2600,276	16	15,5300	0,01	0,1553	6461,17	
			15	14,5800	0,01	0,1458	5686,80	
			15	16,2000	0,01	0,162	6318,67	
			1	22,09	0,01	0,2209	574,40	
			1	7,69	0,01	0,0769	199,96	
			2	2,23	0,01	0,0223	115,97	
Elementi			Komad [kom]					
Spojevi	Čelična čvorna kugla		81					
	Spoj sa temeljem		16					

Tablica 15: Ukupni iskaz materijala za Schwedlerovu kupolu u čeličnoj izvedbi

Materijal	Volumen	Masa	Komad
	[m ³]	[kg]	[kom]
Čelik S355	3,45	27085,67	-
Aluminij	3,07	8287,92	-
Staklo	7,44	19356,97	-
Čelična čvorna kugla	-	-	81
Spoj sa temeljem	-	-	16
UKUPNO:	13,96	54730,57	97

6.3. USPOREDBA DOBIVENIH VRIJEDNOSTI

U tablici 16 prikazane su vrijednosti dobivene analizom za Schwedlerovu kupolu u čeličnoj i aluminijskoj izvedbi.

Poprečni presjeci se, osim u materijalu, razlikuju u unutarnjem promjeru. Kod aluminijske izvedbe je unutarnji promjer poprečnog presjeka za 133% veći od unutarnjeg promjera poprečnog profila kod čelične izvedbe. Klasifikacijom je ustanovljeno da su oba poprečna presjeka klasa 1, te im je iskoristivost gotovo maksimalna.

Zanimljivo je da se za obje varijante kao kritična kombinacija pokazala kombinacija „stalno“ + „snijeg“ te se maksimalna tlačna sila javila u istome elementu (slike 43 i 45). Razlika u progibu tjemena je neočekivano malena. Progib u aluminijskoj izvedbi je veći, ali samo za 1 mm.

Čelična izvedba Schwedlerove kupole pokazala se težom od aluminijske izvedbe što je bilo za pretpostaviti obzirom da je aluminij znatno lakši od čelika.

Tablica 16: Usporedni prikaz dobivenih vrijednosti

	ČELIK	ALUMINIJ
D	110 mm	110 mm
t	15 mm	35 mm
A	24,15 cm ²	50,85 cm ²
Vlak	90,64 kN	119,88 kN
Tlak	263,41 kN	234,38 kN
Iskoristivost presjeka	99,33 %	97%
Težina nosivih štapova	27085,67 kg	19708,57 kg
Ukupna težina kupole	54730,57 kg	47353,46 kg
Progib tjemena	3 mm	4 mm
Duljina štapa	4,21 m	4,21 m
Kritična kombinacija	"stalno"+"snijeg"	"stalno"+"snijeg"
Klasifikacija presjeka	Klasa 1	Klasa 1

7. DETALJI SPOJEVA

U nastavku su dani primjeri tipičnih rješenja izvedbi čvorova kod kupola.

7.1. T-STAR SUSTAV

T-STAR sustav sastoji se od glave u obliku zvijezde povezane vijcima s elementima okvira. Za ovakav spoj najčešće se koriste T profili iako su moguće izvedbe i sa profilima u obliku slova U, C, H, kutnim i HEB profilima. Sustav je pogodan za gotovo sve vrste kupola, te je njegova izvedba moguća u čeliku i aluminiju (VikingDome, 2018).



Slika 47: Primjeri T-STAR sustava (VikingDome, 2018)

7.2. SPOJ NA PREKLOP

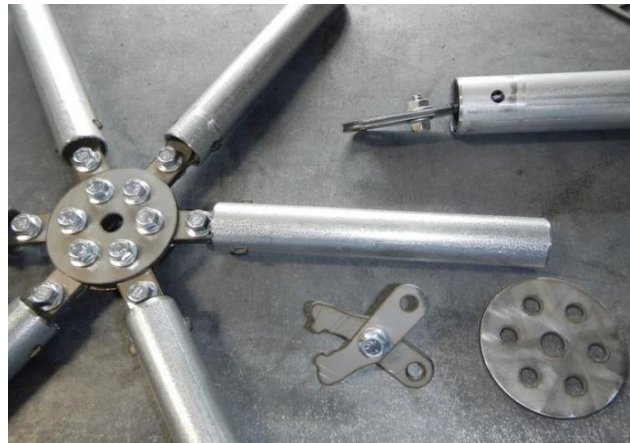
Za ovakvu vrstu spoja potrebne su okrugle metalne cijevi koje se na krajevima spljošte i povežu vijcima (sklop s jednim vijkom). Cijevni profili bi trebali biti duži za 8 cm kako bi se krajevi mogli spljoštiti, a rupa za vijak bi se trebala nalaziti na $\frac{3}{4}$ od ruba spljoštenog dijela. Osim što ovakav spoj iziskuje dodatnu količinu radova, jedan od najvećih nedostataka je što cijevne profile nije moguće spojiti pod određenim kutom (VikingDome, 2018, Jovanović-Verbanac i dr., 2019).



Slika 48: Primjer spoja na preklop (lijevo) i prikaz spljoštenog kraja profila (desno) (VikingDome, 2018)

7.3. SPOJ PREKO LIMA

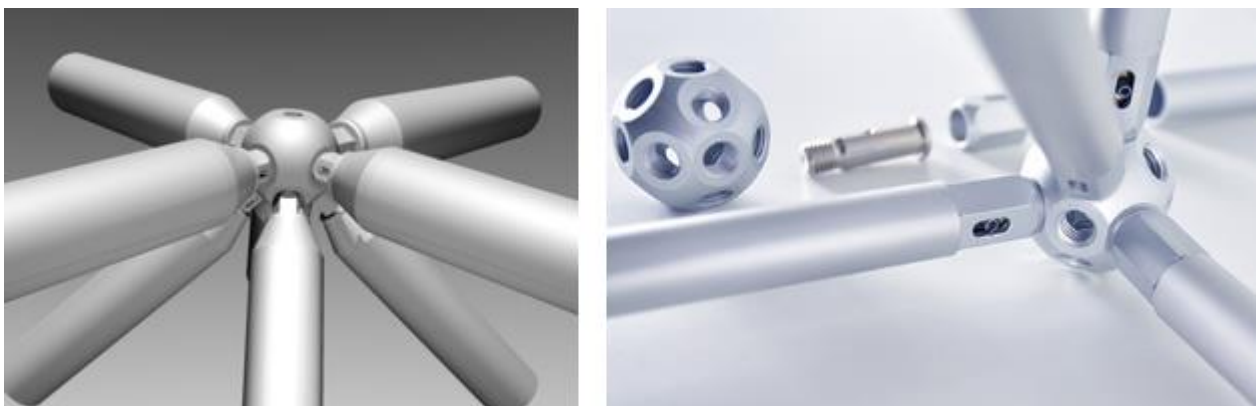
Ovakav spoj se sastoji od pločice s rupama preko koje se povezuju štapni elementi preko limova koji su u njih umetnuti (mehanički spojeni) te je sve međusobno povezano vijcima. Sustav ima sličnosti s prethodnim, a razlikuju se u tome što je ovo posredni spoj te se elementi ne moraju oslabljivati bušenjem rupa i moguće je izvesti spojeve pod kutem (Jovanović-Verbanac i dr., 2019). Ova vrsta spoja tipična je za Američko područje.



Slika 49: Prikaz spoja preko lima (Instructables workshop, 2019)

7.4. KK SUSTAV

KK sustav je sferni čvor koji može imati do 18 otvora s navojem za zglobno spajanje s cijevnim profilima. Dozvoljava raspone do 100 m te je izuzetno lagan. Čvor se može napraviti od čelika ili aluminija, ima zaštitu od korozije i serijske je proizvodnje (Jovanović-Verbanac i dr., 2019, MERO-TSK, 2008). Ova vrsta sustava spajanja odabrana je kao rješenje spojeva u ovom diplomskom radu.



Slika 50: Primjeri KK sustava (MERO-TSK, 2008)

8. ZAKLJUČAK

Kupole su svuda oko nas, a da ih nismo ni svjesni; od oblika voća, prirodnih brežuljaka pa sve do arhitektonski čuda. Iako djeluju jednostavnog oblika, one su sve samo ne jednostavne. Po pitanju njihovog proračuna, osim Eurokoda za djelovanje vjetra i snijega (korištenih i u ovome radu), u kojemu su dani naputci za kupole, ne postoje propisi i norme koje daju upute za projektiranje. Potrebno je dosta snalažljivosti, logike i kombiniranja stečenog znanja da bi se proveo proračun kupole što bi se moglo znatno pojednostaviti kada bi postojali propisi i norme za ovakve konstrukcije.

Schwedlerova kupola, iako je bila popularna tijekom povijesti, danas nema preveliku upotrebu. Iako je dizajn kupole jednostavno i praktično osmišljen, postoje kupole koje omogućuju savladavanje znatno većih raspona. Kako današnje konstrukcije teže ka savladavanju sve većih raspona, Schwedlerova kupola izlazi iz upotrebe te je izvedene primjere takvih konstrukcija podosta teško pronaći.

Cilj ovog rada bio je usporediti utroške materijala čelika i aluminija za izvedbu Schwedlerove kupole, odabrati optimalno rješenje te ustanoviti je li aluminij adekvatan za ovakvu vrstu konstrukcije. Provedenom analizom kupola u čeliku i aluminiju dobiveni su neočekivano slični rezultati. Razlike u dimenzijama odabranih profila su minimalne, kao i iskoristivost presjeka koja se, između čelika i aluminija, razlikuje u svega 2 %. Obzirom da je aluminij znatno lakši i mekši materijal od čelika, očekivali su se i veći progibi. Međutim razlika u progibima tjemena iznosi svega 1 mm. Po pitanju uzdužnih sila koje je se javljaju u konstrukciji možemo zaključiti da su isti elementi u obje varijante bili maksimalno opterećeni, a vrijednosti sila se kod oba materijala kreću u istome rasponu; tlačna sila je veća kod čelika za 30ak kN, dok je vlačna sila veća u aluminiju za 20ak kN. Ni u težini nosivih štapova nema prevelike razlike. Težina čeličnih profila je 27085,67 kg, a aluminijskih 19708,57 kg što daje razliku od 13,75%.

Obzirom na dobivene rezultate i pozitivna svojstva aluminija dolazimo do zaključka da za ovakvu vrstu konstrukcija aluminij može konkurirati čeliku. Iako se Schwedleova kupola kroz povijest pretežno izvodila kao čelična konstrukcija, te bi za optimalno rješenje bilo logično odabrati upravo čelik, dobiveni rezultati nam ukazuju da bi i aluminiju trebali dati priliku.

LITERATURA

Knjige

- Müller, W., Vogel, G., *Atlas arhitekture 1*, Golden marketing, Zagreb, 1999.
- Radić, J., *Uvod u graditeljstvo*, Školska knjiga, Zagreb, 2016.
- Boko, I., Skejić, D., Torić, N., *Aluminijske konstrukcije*, Sveučilište u Splitu, Split, 2017.

Radovi

- Jovanović-Verbanac, Mužić, Rojnić, *Štapasti sustavi kupola-geodetska i Schwedlerova*, seminarski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, 2019.

Propisi i norme

- EN 1991-1-3:2003, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije-Dio 1-3: Opća djelovanja-Opterećenja snijegom
- nHRN EN 1991-1-3:2012/NA, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije-Dio 1-3: Opća djelovanja-Opterećenje snijegom-Nacionalni dodatak
- EN 1991-1-4:2005, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije-Dio 1-4: Opća djelovanja-Djelovanja vjetra
- nHRN EN 1991-1-4:2012/NA, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije-Dio 1-4: Opća djelovanja-Djelovanja vjetra-Nacionalni dodatak
- EN 1991-1-1:2007, Eurocode 9: Design of aluminium structures-Part 1-1: General structural rules
- EN 1993-1-1:2005, Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija-Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade

Internetski izvori

- National Geographic (2011), *Dome*,
<<https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/dome/>> pristupljeno 08.04.2019.
- WPClipart, *Laccolith diagram*,
<https://www.wpclipart.com/geography/volcano/laccolith/Laccolith_diagram.png.html>, pristupljeno 11.04.2019.

- Wikipedia (2014), *Dijapir*,
<https://sh.wikipedia.org/wiki/Dijapir#/media/File:ZagrosMtns_SaltDome_ISS012-E-18774.jpg>, pristupljeno 11.04.2019.
- Hrvatska enciklopedija (2012), *kupola*,
<<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=34680>>, pristupljeno 08.04.2019.
- Makkar, A., Abbas, S., Haslin, M. (2016): *Finite element analysis of Diamatic, Schwedler and Diamatic- Schwedler hybrid domes*,
<https://pdfs.semanticscholar.org/ac44/4553ea715ce3022f98b2d5476cdca094a660.pdf>,
pristupljeno 03.04.2019.
- Wikipedia (2019), *Dome* < <https://en.wikipedia.org/wiki/Dome> >, pristupljeno 11.04.2019.
- Zoltán, F. (2014): *Elemes felületszerkezet kifejlesztése és információs modellezése*,
http://doktori.nyme.hu/440/19/FeketeZ_DOI.pdf , pristupljeno 06.04.2019.
- Antenam.net, *Aja Sofija*,
<<https://www.antenam.net/uploads/6/6/e/66e7d52c9d8c39bc6e4b1f96493c3a9c.jpg>>,
pristupljeno 19.04.2019.
- Slike i prilike (2019), Milovanović, J.: *Jedan tekst o kupoli katedrale u Firenci i Kozimu Medičiju (realnom i onom u zadruzi)*, <<http://slikeiprilike.com/2019/01/16/jedan-tekst-o-kupoli-katedrale-u-firenci-i-kozimu-mediciju-realnom-i-onom-u-zadruzi/>>, pristupljeno 19.04.2019.
- Duhos (2017), *Bazilika Svetog Petra*, <<https://duhos.com/wp-content/uploads/2017/05/bazilika-svetog-petra.jpg>>, pristupljeno 19.04.2019.
- Img.locationscout (2015), *Basilica di Santa Maria della Salute*,
<https://img.locationscout.net/images/2015-02/basilica-di-santa-maria-della-salute-italy_1.jpeg>, pristupljeno 19.04.2019.
- Wikimedia, *Panteon*,
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f3/Pant%C3%A9on_%28Francia%29.jpg/300px-Pant%C3%A9on_%28Francia%29.jpg>, pristupljeno 19.04.2019.
- Svblaz (2013), *Župa Svetog Blaža*, <<http://www.svblaz.hr/wp-content/uploads/2013/09/zupa-sv-blaz-5.jpg>>, pristupljeno 19.04.2019.

- Enciklopedija.hr, <http://www.enciklopedija.hr/Ilustracije/HOL_3835.jpg>, pristupljeno 19.04.2019.
- Wikimedia, *Millennium Dome*, <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/15/Millennium_Dome_%28zakgollop%29_version.jpg>, pristupljeno 19.04.2019.
- Hunker (2019), Smyth, D.: *What are different types of domes?*, <<https://www.hunker.com/12375785/what-are-different-types-of-domes>>, pristupljeno 10.05.2019.
- Designing Buildings Wiki (2018), Designing Buildings Ltd, *Types of dome*, <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Types_of_dome>, pristupljeno 05.05.2019.
- Geo-dome (2014), *Ten amazing facts about domes*, <<http://geo-dome.co.uk/article.asp?uname=amazing>>, pristupljeno 05.05.2019.
- Architen Landrell (2019), *Qatar Inflatable Fabric Dome*, <<http://www.architen.com/projects/qatar-inflatable-fabric-dome/>>, pristupljeno 13.05.2019
- Wikimedia, <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/Klostervalv.png>>, pristupljeno 10.05.2019.
- Camel76 (2012), <<https://camel76.files.wordpress.com/2012/04/the-dome-of-the-mezqitas-maqsuras-2-cordoba.jpg>>, pristupljeno 10.05.2019.
- Gradjevinarstvo.rs (2010), *Armiranobetonske kupole Monolithic Dome-originalno konstruktivno rješenje*, <<https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/1140/820/armiranobetonske-kupole-monolithic-dome-originalno-konstruktivno-resenje>>, pristupljeno 13.05.2019.
- Bava (2013), <<https://www.bava.com/new-wine-trails-vini-bava-mosca-san-pietroburgo/>>, pristupljeno 13.05.2019.
- Wikipedia (2019), *Kupola na stijeni*, <[https://hr.wikipedia.org/wiki/Kupola_na_stijeni#/media/File:Jerusalem-2013\(2\)-Temple_Mount-Dome_of_the_Rock_\(SE_exposure\).jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Kupola_na_stijeni#/media/File:Jerusalem-2013(2)-Temple_Mount-Dome_of_the_Rock_(SE_exposure).jpg)>, pristupljeno 13.05.2019.
- Momentum magazine (2013), Kurrer, K.-E.: *Das Fachwerk erobert die dritte Dimension: 150 Jahre Schwedler-Kuppel*, <<https://momentum-magazin.de/de/150-jahre-schwedler-kuppel/>>, pristupljeno 12.09.2019.
- Wikipedia (2017), *Fichte-Bunker*, <<https://en.wikipedia.org/wiki/Fichte-Bunker>>.

pristupljeno 15.06.2019.

- Wikipedia (2019), *Johann Wilhelm Schwedler*,
<https://en.wikipedia.org/wiki/Johann_Wilhelm_Schwedler#Schwedler_truss>,
pristupljeno 15.06.2019.
- I1.wp, *Fichte bunker*,
<https://i1.wp.com/ichef.bbc.co.uk/wwfeatures/wm/live/1280_640/images/live/p0/4n/gk/p04ngk2q.jpg>, pristupljeno 15.06.2019.
- BTU (2017), *Veliki inženjeri- Internetska enciklopedija katedre za građevinarstvo, inženjering, povijest i očuvanje građevine, Johann Wilhelm Schwedler*,
<https://translate.googleusercontent.com/translate_c?depth=1&hl=hr&prev=search&rurl=translate.google.com&sl=de&sp=nmt4&u=https://www.b-tu.de/great-engineers-lexikon/ingenieure/schwedler-johann-wilhelm-1823-1894/projekte&xid=17259,15700021,15700043,15700186,15700191,15700256,15700259,15700262,15700265&usg=ALkJrhhrObZHAeTG5V_JFqmnN_tRp05AZg#c149_040>,
pristupljeno 13.09.2019.
- Abandoned Berlin (2013), *Güterbahnhof Pankow (End of the line for the railroad yard)*,
<<https://www.abandonedberlin.com/2013/07/guterbahnhof-pankow-end-of-line-for.html>>, pristupljeno 13.09.2019.
- The urbanite (2019), *Rundlokschuppen Rummelsburg Oh how the tables have turned*,
<<http://theurbanite.mystrikingly.com/blog/rundlokschuppen-rummelsburg>>, pristupljeno 13.09.2019.
- Dobraszczyh, P., Sealy, P. (2016): *Function and Fantasy Iron Architecture in the Long Nineteenth Century*,
<https://books.google.hr/books?id=GS2TDAAAQBAJ&pg=PT12&lpg=PT12&dq=atlas+zur+zeitschrift+f%C3%BCr+bauwesen+neue+synagoge&source=bl&ots=kAd4I_9xxM&sig=ACfU3U0vo7t2QsDxLTyrS8fms7X_LOyNxQ&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwip5aWg2dfkAhXJepoKHU4ABjwQ6AEwEHoECAkQAQ#v=onepage&q=atlas%20zur%20zeitschrift%20f%C3%BCr%20bauwesen%20neue%20synagoge&f=false>, pristupljeno 17.09.2019.
- Museumsportal Berlin (2019), *New Synagogue Berlin-Centrum Judaicum*,
<<https://www.museumsportal-berlin.de/en/museums/neue-synagoge-berlin-centrum->

[judaicum/](#)>, pristupljeno 17.09.2019.

- Wikipedia (2019), *Michaelertrakt*, <<https://de.wikipedia.org/wiki/Michaelertrakt>>, pristupljeno 17.09.2019.
- Aguilar, R., Torrealva, D., Moreira, S., Pando, M., A., Ramos, L. F. (2019), *Structural Analysis of Historical Constructions*, <<https://books.google.hr/books?id=-ypqDwAAQBAJ&pg=PA895&lpg=PA895&dq=new+synagogue+dome+in+berlin-mitte+1863&source=bl&ots=Td7RJosUiH&sig=ACfU3U3oIFAoPXxKvLSB6Ib9jf6UovdLKA&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKewjjmsmXzc3kAhUPAhAIHQ2fAsQQ6AEwC3oEACQAQ#v=snippet&q=schwedler%20dome&f=false>>, pristupljeno 17.09.2019.
- Indermühle Bauingenieure (1999), *Sports Center Telfs*, <https://www.i-b.ch/hallen/eishalle-telfs>, pristupljeno 02.09.2019.
- KSi structural engineers (2014), *McCamish Pavilion wins SEAOG Outstanding Project Award*, <https://ksise.wordpress.com/tag/schwedler/>, pristupljeno 17.09.2019.
- VikingDome (2018), *Dome frame systems*, <https://www.vikingdome.com/domes/dome-frame-systems/#toggle-id-2>, pristupljeno 20.10.2019.
- Instructables workshop (2019), *Dome Connection Clip*, <https://www.instructables.com/id/Dome-Connection-Clip-1/>, pristupljeno 20.10.2019.
- MERO-TSK (2008), *KK-Ball Node System*, <https://www.mero.de/index.php/en/construction-systems/nodes/kk-ball-node-system-en>, pristupljeno 20.10.2019.