

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:

Zelenec, P., 2015. Prednapeta membranska konstrukcija za prekritje kolesarnice. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B.): 84 str.

Datum arhiviranja: 19-11-2015

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:

Zelenec, P., 2015. Prednapeta membranska konstrukcija za prekritje kolesarnice. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B.): 84 pp.

Archiving Date: 19-11-2015

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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
GRADBENIŠTVO
SMER GRADBENE
KONSTRUKCIJE**

Kandidat:

PRIMOŽ ZELENEC

**PREDNAPETA MEMBRANSKA KONSTRUKCIJA ZA
PREKRITJE KOLESARNICE**

Magistrsko delo št.: 14/II.GR

**PRESTRESSED MEMBRANE STRUCTURE FOR
BICYCLE PARKING**

Graduation – Master Thesis No.: 14/II.GR

Mentor:

prof. dr. Boštjan Brank

Ljubljana, 03. 11. 2015

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Primož Zelenec izjavljam, da sem avtor magistrske naloge z naslovom »Prednapeta membranska konstrukcija za prekritje kolesarnice«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 13.10.2015

Primož Zelenec

BIBLOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.074.43:72.051.6(497.4)(043.2)
Avtor:	Primož Zelenec, dipl. inž. grad. (VS)
Mentor:	prof. dr. Boštjan Brank
Naslov:	Prednapeta membranska konstrukcija za prekritje kolesarnice
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	84 str., 6 pregl., 102 sl., 8 pril.
Ključne besede:	prednapeta membrana, tekstilna membrana, iskanje oblike, nelinearna analiza, določitev krojnih pol, projektiranje, dimenzioniranje

Izvleček

Magistrska naloga je projekt prednapete membranske konstrukcije za prekritje kolesarnice pred Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Najprej so opisane prednapet membranske konstrukcije in njihovi glavni gradniki. Opisan je tudi proces načrtovanja, od iskanja oblike in statične analize do krojenja. Sledi projekt prednapete konstrukcije. Najprej so predstavljene idejne zasnove in opis izbrane ideje. V nadaljevanju sta podrobneje prikazana analiza in dimenzioniranje membranskega dela konstrukcije. Nato je predstavljeno še projektiranje podporne konstrukcije, izbranega priključnega detajla in projektiranje temeljev. Na podlagi analize membranskega dela konstrukcije in izbranih priključnih detajlov obravnavamo izdelava krojnih pol membrane. Predstavljen je tudi potek gradnje. Na koncu je projekt cenovno ovrednoten na podlagi popisa del in delnih delavniških načrtov.

BIBLIOGRAPHICAL – DOCUMENTATION INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	624.074.43:72.051.6(497.4)(043.2)
Author:	Primož Zelenec, B.Sc
Supervisor:	Prof. Boštjan Brank, Ph.D.
Title:	Prestressed membrane structure for bicycle parking
Document type:	M. Sc. Thesis
Scope and tools:	84 p., 6 tab., 102 fig., 8 ann.
Keywords:	prestressed membrane, textile membrane, form finding, nonlinear analysis, cutting pattern, design

Abstract

The master thesis is related to design of a prestressed membrane structure for a bicycle parking in front of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering of University of Ljubljana. We start with a brief general presentation of prestressed membrane structures and their structural elements. We describe the processes of form finding, nonlinear static analysis and cutting patterns determination. Next, we focus on design of a particular prestressed membrane structure. The presented design of prestressed membrane comprises conceptual design, form finding and detailed analysis. We continue with design of supporting structure, connection details and the foundation. Finally, the membrane cutting pattern was computed on the basis of the membrane geometry and connection details. All the constructing phases are presented as well. Lastly, considering the materials list and general drawings, the project was financially evaluated.

ZAHVALA

Za vso pomoč in vodenje pri izdelavi magistrskega dela se zahvaljujem mentorju prof. dr. Boštjanu Branku. Zahvaljujem se tudi podjetju Meliar Design, ki mi je omogočilo uporabo njihove programske opreme.

Posebna zahvala pa gre mojima staršema, bratu, sestri ter dekletu Špeli, ki so mi skozi vsa ta leta študija stali ob strani ter me spodbujali.

Na koncu pa se zahvaljujem vsem prijateljem in sošolcem, ki so poskrbeli za nepozabna študijska leta.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE.....	I
IZJAVA O AVTORSTVU	II
BIBLOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHICAL – DOCUMENTATION INFORMATION AND ABSTRACT.....	IV
ZAHVALA.....	V
1 UVOD	1
1.1 Opis prednapetih membranskih konstrukcij	1
1.2 Razvoj in uveljavitev prednapetih membranskih konstrukcij.....	3
2 GRADNIKI PREDNAPETIH MEMBRANSKIH KONSTRUKCIJ.....	6
2.1 Membrane.....	6
2.2 Podporne konstrukcije	7
2.3 Pritrdilni sistemi za membranske konstrukcije.....	8
3 POSTOPEK NAČRTOVANJA PREDNAPETIH MEMBRANSKIH KONSTRUKCIJ.	
.....	10
3.1 Iskanje oblike.....	10
3.2 Statična analiza	12
3.3 Določitev krojnih pol.....	12
4 PROJEKT KOLESARNICE.....	14
4.1 Splošno	14
4.2 Idejna zasnova konstrukcije.....	15
4.2.1 Opis izbrane idejne zasnove	18
4.3 Projektiranje konstrukcije.....	19
4.3.1 Izbira materiala	19
4.3.1.1 Membrana.....	19
4.3.1.2 Jeklo.....	25
4.3.1.3 Jekleni kabli.....	25
4.3.2 Določitev karakterističnih obtežb in obtežnih kombinacij	26

4.3.3	Varnostni faktorji	28
4.4	Projektiranje membranskega dela konstrukcije.....	30
4.4.1	Iskanje oblike	30
4.4.2	Statična analiza membranskega dela.....	34
4.4.2.1	Nanos obtežb in kombinacije	35
4.4.2.2	Rezultati analize	38
4.4.2.3	Kontrola rezultatov in dimenzioniranje membranskega dela konstrukcije	49
4.5	Dimenzioniranje podporne konstrukcije in detajlov	54
4.5.1	Podporna konstrukcije.....	54
4.5.2	Pritrdilni sistemi	59
4.6	Krojenje membrane	65
4.6.1	Kompenzacija.....	65
4.6.2	Izdelava krojnih pol.....	66
4.7	Dimenzioniranje temeljev	68
4.7.1	Kontrola nosilnosti temeljnih tal	70
4.7.1.1	Kontrola prevrnitve temelja	72
4.7.1.2	Kontrola zdrsa temelja	72
4.8	Potek gradnje.....	74
4.9	Ocena investicije	76
5	ZAKLJUČEK	77
VIRI	79

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Kombinacije vplivov s kombinacijskimi faktorji	38
Preglednica 2: Rezultati sil v membrani in kabljih, za dimenzioniranje	49
Preglednica 3: Obtežne kombinacije za analizo jeklene podkonstrukcije	55
Preglednica 4: Pomiki v točki A pri kombinacijah MSU, s kontrolo	59
Preglednica 5: Vplivi, povzeti iz reakcij statične analize podkonstrukcije na mestu vpetja za temelj T1	69
Preglednica 6: Vplivi, povzeti iz statične analize membranskega dela konstrukcije na mestu vpetja za temelj T3.....	70

KAZALO SLIK

Slika 1: O ₂ Arena v Londonu (Big.org.ua, 2015).....	2
Slika 2: Predstavitev prednapetja in stabilizacije vrvi za obešanje perila (Mellon, 2015).....	3
Slika 3: Shematski prikaz sestavljanja vrvi v prednapeto mrežno konstrukcijo (Mellon, 2015).....	3
Slika 4: Beduinski šotor v puščavi (Elizabeth, 2014)	4
Slika 5: Slika amfiteatra z membransko strešno konstrukcijo (levo) in detajl prekrivanja (desno) (Ruth, 2015).....	4
Slika 6: Pogled na olimpijski park v Münchnu (Hostel, 2015).....	4
Slika 7: Maneži v iranskem hribovju (Mehler technologies, 2008).....	5
Slika 8: Yas Marina, Abu Dhabi, ZAE (Emiratesyoo, 2015).....	5
Slika 9: Stadion v Varšavi (levo) in prikaz odprte strehe (desno) (Gorgolewski, 2014)	5
Slika 10: Prerez membrane z nosilnimi vlakni (levo) in prerez tehnične folije (desno) (Seidel, 2009)..	6
Slika 11: Sestava PET/PVC membrane (CI Structures, 2015).....	7
Slika 12: Prikaz različnega načina tkanja PET matrice (Seidel, 2009)	7
Slika 13: Tenda sedlaste oblike, podprta z jambori (Diba, 2015)	8
Slika 14: Primer lesene ločne dvorane prekrite z membrano (Inspired structures, 2015).....	8
Slika 15: Primeri pritrdilnih detajlov pri membranskih konstrukcijah (Seidel, 2009 in Füzes, 2015)....	9
Slika 16: Primer zahtevnega detajla (Füzes, 2015)	9
Slika 17: Eksperimentalno iskanje oblike z milnico na levi sliki (Forster in sod, 2004) in z elastično tkanino (Institute for computational ..., 2015) na desni sliki.....	11
Slika 18: Iskanje oblike na podlagi fizičnega modela, kjer kamere odčitavajo obliko konstrukcije (Symeonidou, 2014).....	11
Slika 19: Mreža linijskih elementov za iskanje oblike (Brank, 2014)	11
Slika 20: Statična analiza Expo 2010 paviljona Norveške (Str.ucture, 2015).....	12
Slika 21: Krojne pole za membrano konusne oblike (NDN Software, 2015).....	13
Slika 22: Primer kompenzacije jadra (Seidel, 2009).....	13
Slika 23: Pogled na lokacijo postavitve pred UL FGG, označeno z rdečim poljem (Atlas okolja, 2015)	14
Slika 24: Obstoječe stanje	14
Slika 25: Pogled s stopnišča UL FGG na območje postavitve nadstreška	15
Slika 26: Idejna zasnova št.1, 3D pogled.	16
Slika 27: Idejna zasnova št. 1, stranski pogled.....	16
Slika 28: Idejna zasnova št. 2, 3D pogled	16
Slika 29: Idejna zasnova št. 2, stranski pogled.....	17
Slika 30: Primer modernega nadstreška za avtomobile proizvajalca Goka (Goka, 2015)	17

Slika 31: Idejna zasnova št. 3, 3D pogled.....	18
Slika 32: Idejna zasnova št. 3, stranski pogled.....	18
Slika 33: Idejna zasnova št. 3, pogled od spredaj.....	18
Slika 34: Graf z legendo za odčitavanje napetosti in deformacij v odvisnosti od časa (Syrovátka, 2015)	20
Slika 35: Napetosti v odvisnosti od časa za membrano VALMEX FR 900 (Syrovátka, 2015).....	21
Slika 36: Deformacije v odvisnosti od časa za membrano VALMEX FR 900 (Syrovátka, 2015).....	21
Slika 37: Napetosti v odvisnosti od deformacij za membrano VALMEX FR 900 (Syrovátka, 2015)..	23
Slika 38: Razpored nenakopičenega (i) in nakopičenega (ii) snega na cilindrični strehi (SIST EN 1991-1-3:2004).....	27
Slika 39: Diagram faktorja izpostavljenosti (SIST EN 1991-1-4:2004).....	28
Slika 40: Tloris (levo) in prerez podpor (desno).....	30
Slika 41: 3D pogled na podpore z dodanimi linijam kablov.....	31
Slika 42: Model za iskanje oblike.....	31
Slika 43: Model brez robnih jader.....	31
Slika 44: Relaksacija robnih jader z uporabo linkov (v zeleni barvi).....	32
Slika 45: Potek osnovnih in votkovnih vlaken po konstrukciji.....	32
Slika 46: Prikaz določitve robne linije kabla.....	33
Slika 47: Poročilo o iskanje oblike, kjer preverimo končno napako.....	33
Slika 48: Končna oblika membrane, ki je primerna za statično analizo.....	34
Slika 49: Potek analize v več iteracijah.....	34
Slika 50: Koeficienti tlakov pri delovanju vetra iz sprednje strani prikazani na grafični način (levo), ter izmerjene vrednosti (desno) (Forster in sod., 2004).....	36
Slika 51: Nanos obtežbe po membrani za obtežni primer veter s sprednje strani.....	36
Slika 52: Koeficienti tlakov pri delovanju vetra iz zadnje strani prikazani na grafični način (levo), ter izmerjene vrednosti (desno) (Forster in sod., 2004).....	37
Slika 53: Nanos obtežbe po membrani za obtežni primer veter z zadnje strani.....	37
Slika 54: Pozicije posameznih polj za opisovanje rezultatov statične analize.....	39
Slika 55: Pomiki, sile in reakcije pri prednapetju 3 kN/m.....	40
Slika 56: Pomiki, sile in reakcije pri obtežni kombinaciji 1.....	41
Slika 57: Pomiki, sile in reakcije pri obtežni kombinaciji 2.....	42
Slika 58: Pomiki, sile in reakcije pri obtežni kombinaciji 3.....	43
Slika 59: Pomiki, sile in reakcije pri obtežni kombinaciji 4.....	44
Slika 60: Minimalne napetosti pri kombinaciji 4 nakazujejo lokalna gubanja.....	45
Slika 61: Prikaz minimalnih napetosti v membrani pri 4,2 kN/m prednapetju.....	45
Slika 62: Pomiki, sile in reakcije pri obtežni kombinaciji 5.....	46
Slika 63: Minimalne napetosti pri kombinaciji 5.....	46

Slika 64: Pomiki, sile in reakcije pri obtežni kombinaciji 6	47
Slika 65: Pomiki, napetosti in reakcije pri obtežni kombinaciji 7.....	48
Slika 66: Prikaz doseženega varnostnega faktorja po membrani pri K1	50
Slika 67: Prikaz doseženega varnostnega faktorja za vse robne kable pri K4	50
Slika 68: Shematski prikaz pozicije zvarov na konstrukciji označeno z rdečimi linijami	51
Slika 69: Prikaz doseženega varnostnega faktorja po celotni membrani pri K1 za kontrolo zvarov	52
Slika 70: Prerez konstrukcije na mestu največjega pomika pri štirikratni povečavi deformirane lege (levo) ter mesto prereza (desno).....	52
Slika 71: Prikaz gradientov pri kombinaciji K4.....	52
Slika 72: 3D pogled (levo) in stranski pogled (desno) statičnega.....	54
Slika 73: Shematski prikaz pretvorbe reakcij iz membranske analize za vplive na robni steber pri kombinaciji K1	55
Slika 74: Nadomestne globalne nepopolnost ϕ	56
Slika 75: Ovojnica notranjih statičnih količin N [kN] (levo) in V_y [kN] (desno).....	57
Slika 76: Ovojnica notranjih statičnih količin V_z [kN] (levo) in M_x [kNm] (desno)	57
Slika 77: Ovojnica notranjih statičnih količin M_y [kNm] (levo) in M_z [kNm] (desno)	58
Slika 78: Izkoriščenost prerezov na podlagi kontrole nosilnosti (levo) in bočne zvrnitve (desno).....	58
Slika 79: Točka A na robnem nosilcu	59
Slika 80: Kotni detajl na vrhu stebra (slika je simbolična)	60
Slika 81: Pozicija detajlov	60
Slika 82: Tlorisni pogled na detajl D1 z dimenzijami in letvico za sidranje membrane.....	61
Slika 83: Način izvedbe sidranja s keder vrvico (zgoraj) (Seidel, 2009), zaključek robnega kabla z navojem (spodaj) (Tennect, 2015)	61
Slika 84: Model detajla D1 za analizo	62
Slika 85: Prikaz podpiranja na mestu sidranja kablov (levo) in primer verižnega člena (desno) (Kovinocrom, 2015).....	62
Slika 86: Nanos karakterističnih vplivov na model.....	63
Slika 87: Prikaz Von Misesovih napetosti v detajlu (levo) in na območju vpenjanja (desno).....	63
Slika 88: Karakteristična obtežba na sidrno letvico	64
Slika 89: Napetosti v odvisnosti od deformacij za izbrano membrano, z določitvijo kompenzacije v osnovni (rdeča) in votkovni (modra) smeri (Syrovátka, 2015)	66
Slika 90: Modificiran model za izdelavo krojnih pol.....	67
Slika 91: Neobdelane krojne pole iz relaksiranega modela	67
Slika 92: Izris panela 4 s koordinatnimi točkami brez vnesenih detajlov	67
Slika 93: Izris panela 4, primerne za strojni izrez z označbam	68
Slika 94: Pozicije krojnih pol.....	68
Slika 95: Pozicija temeljev	69

Slika 96: Oznake.....	71
Slika 97: Točka prevrnitve in delovanje momentov.....	72
Slika 98: Vplivi pri kontroli zdrsa	72
Slika 99: Kontrole dimenzioniranj temeljev za temelj T1 in T2.....	73
Slika 100: Končne dimenzije temeljev T1 in T2 (levo), ter T3 (desno).....	74
Slika 101: Tritočkovni merilec (levo) (Dillon/Quality, 2015) in dinamometer (na sredini) (Balances-Online.com , 2015) za merjenje sil v kablu. Ugrezni bat za merjenje napetosti v membrani (desno) (Seidel, 2009)	75
Slika 102: Končna postavitve membranske konstrukcije.....	75

1 UVOD

Prednapete membranske konstrukcije so po svetu že zelo uveljavljene. Možno jih je uporabljati za prekrivanje objektov kot tudi za fasadne elemente objektov. Njihova nenavadna in razgibana oblika privlači človeško oko. Pozornost pritegnejo predvsem reprezentativni objekti kot so stadioni in letališča. V Sloveniji so prednapete membranske konstrukcije še dokaj neznane, najdemo jih le za vzorec, pa še te se pojavljajo kot manjše nadstrešnice za zaščito pred soncem in dežjem. Povpraševanje po njih pa tudi v Sloveniji počasi narašča. Zato se v okviru te naloge želimo naučiti, kako se projektira prednapete membranske konstrukcije. V ta namen izvedemo projekt nadstreška z vsemi detajli.

Vodstvo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani že nekaj časa razmišlja o pokritju kolesarnice pred stavbo fakultete na Jamovi cesti 2. Ena od možnosti je tudi nadstrešek v obliki prednapete membranske konstrukcije. Takšna konstrukcija bi prekrivala desni del prostora, namenjenega za parkiranje koles. Atraktivna membranska konstrukcija bi lahko reklamirala fakulteto in njene študente.

V prvem delu magistrske naloge so predstavljeni zgodovina, principi načrtovanja, postopki analize in teoretično ozadje membranskih konstrukcij iz prednapetih tkanin. Podamo osnovna znanja s področij načrtovanja in gradnje prednapetih membranskih konstrukcij. V drugem delu naloge je narejen projekt z vsemi izračuni in dimenzioniranjem posameznih sestavnih elementov konstrukcije, vključno s temelji. V nalogi so uporabljena različna računalniška orodja, standardi in priporočila proizvajalcev. Izdelani so tudi delni delavniški načrti za izvedbo projekta. Na koncu naloge sta podana popis del in ocena investicijskih stroškov projekta.

1.1 Opis prednapetih membranskih konstrukcij

Prednapete membranske konstrukcije so za proizvajalce in uporabnike zanimiv produkt. Seveda ima vsak produkt svoje prednosti in slabosti. Ključne prednosti membranskih konstrukcij so predvsem estetika, hitra izdelava in montaža, prilagodljivost glede na geometrijo in nizki investicijski stroški. Takšna konstrukcija je lahko zelo živahna in lahka. Največja pomanjkljivost prednapetih membran pa je predvsem dokaj kratka življenjska doba membran v primerjavi s konvencionalnimi gradbenimi materiali. Življenjska doba standardne PET/PVC membrane, na primer, je okoli 10 let (Forster in sod., 2004). Kvalitetnejše membrane, kot so FG/PTFE membrane, pa imajo življenjsko dobo okoli 25 let. Z razvojem materialov, z izboljševanjem lastnosti tkanin ter z nanašanjem raznih premazov, kot je PVDF prevleka, se življenjska doba membran lahko podaljša. Dober primer je Arena O₂ v Londonu, slika 1, ki je bila zgrajena leta 1999 ter načrtovana le za kratek rok uporabe. Objekt pa je v uporabi še danes in sodi med najbolj prepoznavne objekte v Londonu (Wikipedia, 2015).



Slika 1: O₂ Arena v Londonu (Big.org.ua, 2015)

Zaradi majhne lastne teže membrane, ki je okoli 1 kg/m^2 , ter majhnega prednapetja, potrebujemo vitke tlačne in natezne podporne elemente, ki prenašajo sile iz membrane na temelje. Posledično so tudi dimenzija temeljev lahko relativno majhne. Prednost prednapete membranske konstrukcije je tudi, da zaradi nizke lastne teže ni občutljiva na potres.

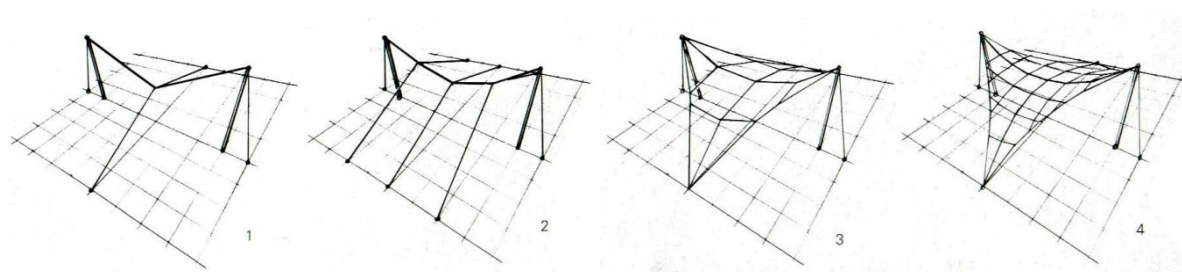
Omenili smo, da je prednapetih membranskih konstrukcij v Sloveniji le za vzorec, služijo pa predvsem za prekrivanje teras ali kot nadstrešek. Za javnost so zanimive, saj so nevsakdanje in drugačne od ostalih objektov. Drugačno je tudi načrtovanje in projektiranje. Bistveno se razlikujeta od tistega, kar se uporablja npr. za armiranobetonske ali jeklene konstrukcije. Za analizo potrebujemo sofisticirano računalniško opremo in znanje, ki ga tekom študija gradbeništva nismo osvojili. Zato je mogoče, da tudi zaradi pomanjkanja znanja na področju načrtovanja, prednapete membranske konstrukcije v Sloveniji niso tako uveljavljene, kot bi bile lahko. Potrebno je tudi omeniti, da se prednapete membranske konstrukcije uvrščajo med specialne konstrukcije, torej se z njimi ukvarja le ozek krog specializiranih inženirjev in načrtovalcev.

Da membrana lahko prenaša površinske obremenitve, jo je potrebno prednapeti. Pri tem se jo podpre tako, da prednapetje membrano ukrivi. Princip delovanja membrane lahko opišemo na preprostem primeru vrvi za obešanje perila (slika 2). Ko je perilo obešeno, se vrv ukrivi in napne. Če zapiha bočni veter, perilo in vrv zanihata. Tega ne želimo, zato je potrebna stabilizacija še z eno vrvjo in vmesnimi nateznimi elementi, kot je prikazano na sliki 2 desno. Dobimo konstrukcijo iz prednapetih vrvi, ki je stabilizirana.

Na sliki 3 je prikazana konstrukcija iz prednapetih vrvi v obeh smereh, kar tvori stabilno mrežasto konstrukcijo. Če si namesto vrvi zamislimo trakove membrane, dobimo prednapeto membransko konstrukcijo, ki je v eni smeri ukrivljena konkavno, v drugi pa konveksno. To je tipična sedlasta konstrukcija. Takšni ukrivljenosti pravimo antiklastična. Z zgornjim primerom smo prikazali, da je bistvenega pomena, da je konstrukcija sposobna prenašati obremenitve to, da je stabilizirana z ukrivljenostjo v različnih smereh in s prednapetjem.



Slika 2: Predstavitev prednapetja in stabilizacije vrvi za obešanje perila (Mellon, 2015)



Slika 3: Shematski prikaz sestavljanja vrvi v prednapeto mrežno konstrukcijo (Mellon, 2015)

1.2 Razvoj in uveljavitev prednapetih membranskih konstrukcij

Uporaba prednapetih konstrukcij sega daleč v zgodovino. Preproste šotorske konstrukcije so bile prekrte z živalskimi kožami, kasneje pa s tkaninami, ki so jih spletli iz različnih naravnih materialov. Naši predniki so prednapet je uporabljali za različne namene, kot so šotori, brvi, jadra in še bi lahko naštevali (slika 4).

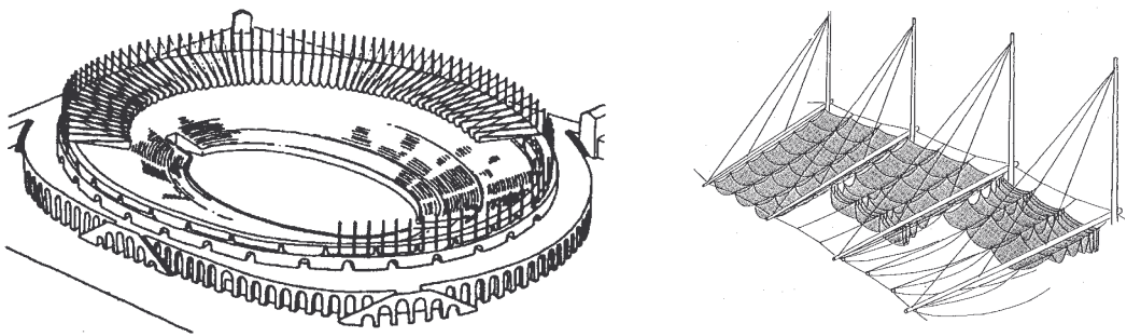
Z razvojem pletenja in tkanin se je pričela uporaba vrvi in jader. Močne pletene vrvi so omogočile uporabo vrvi za premoščanje sotesk in dolin. Rimljani so kasneje jadra in sistem škripčevja uporabljali za prekrivanje tribun amfiteatrov pred žgočim soncem (slika 5). Tovrstne konstrukcije so ene prvih prednapetih konstrukcij, ki so podobne današnjim modernim prednapetim konstrukcijam (Ruth, 2015).

Z razvojem kemične industrije v 20. stoletju je nastopil razmah membranskih konstrukcij. Tkanine, prevlečene z umetnimi masami ter ojačane z različnimi vlakni, so prinesle nove možnosti uporabe. Za začetnika modernih prednapetih konstrukcij štejemo vojnega pilota, Nemca Otta Freia, ki je po vojni končal študij arhitekture. Vse svoje življenje je posvetil lahkim konstrukcijam in njihovem razvoju. Njegov največji dosežek je olimpijski kompleks v Münchnu iz leta 1972 (slika 6). Površina strehe meri 74.800 m², za kar je bilo potrebno izdelati kar 3800 m² delavniških risb (Mollaert, 2015).

V nadaljevanju, slike 7 - 9, so prikazane še nekatere druge konstrukcije, ki dokazujejo večnamensko uporabo tkaninskih materialov za različne tipe objektov ter postavitve v najrazličnejših atmosferskih pogojih.



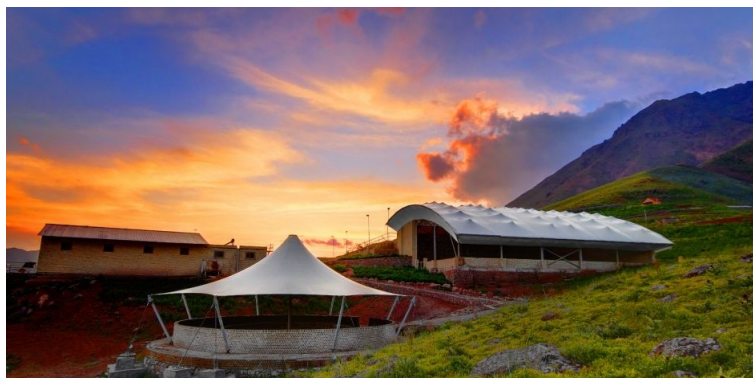
Slika 4: Beduinski šotor v puščavi (Elizabeth, 2014)



Slika 5: Slika amfiteatra s plateno strešno konstrukcijo (levo) in detajl prekrivanja (desno) (Ruth, 2015)



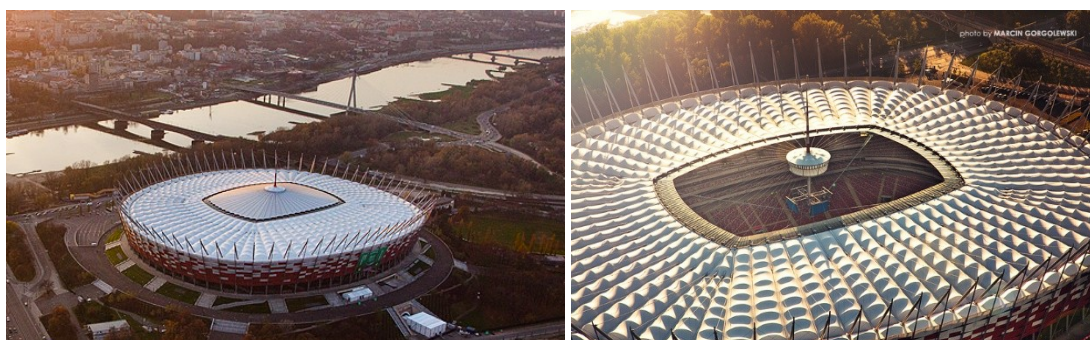
Slika 6: Pogled na olimpijski park v Münchnu (Hostel, 2015)



Slika 7: Maneži v iranskem hribovju (Mehler technologies, 2008)



Slika 8: Yas Marina, Abu Dhabi, ZAE (Emiratesyoo, 2015)



Slika 9: Stadion v Varšavi (levo) in prikaz odprte strehe (desno) (Gorgolewski, 2014)

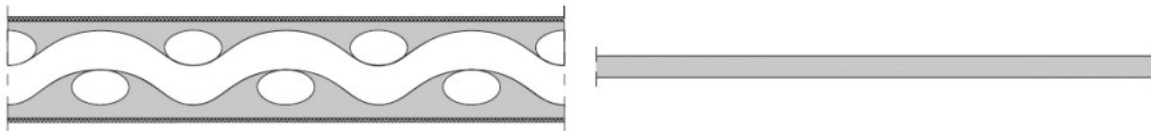
2 GRADNIKI PREDNAPETIH MEMBRANSKIH KONSTRUKCIJ

V tem poglavju bomo na kratko opisali glavne gradnike prednapetih membranskih konstrukcij.

2.1 Membrane

Membrana predstavlja pokrivalo konstrukcije, ki štiti uporabnike pred zunanjimi vplivi. Poleg zaščite opravlja tudi nosilno funkcijo, ki obremenitve, ki vplivajo nanjo, prenese na podkonstrukcijo.

Membrane oziroma tehnične tkanine lahko delimo v dve skupini: tehnične tkanine in tehnične folije. Tehnične tkanine so kompozit, sestavljen iz nosilne tkanine in matrice, ki štiti tkanino pred različnimi poškodbami. Glavna predstavnika tehničnih tkanin sta PET/PVC membrana (polietilen tereftalat / polivinil klorid) in FG/PTFE membrana (steklena vlakna / politetrafluoretilen). Obstajajo še druge vrste membran, ki pa niso najbolj primerne za prednapete konstrukcije. Glavna razlika med tehničnimi folijam in tkaninami je, da tehnične folije nimajo nosilnih vlaken (slika 10).

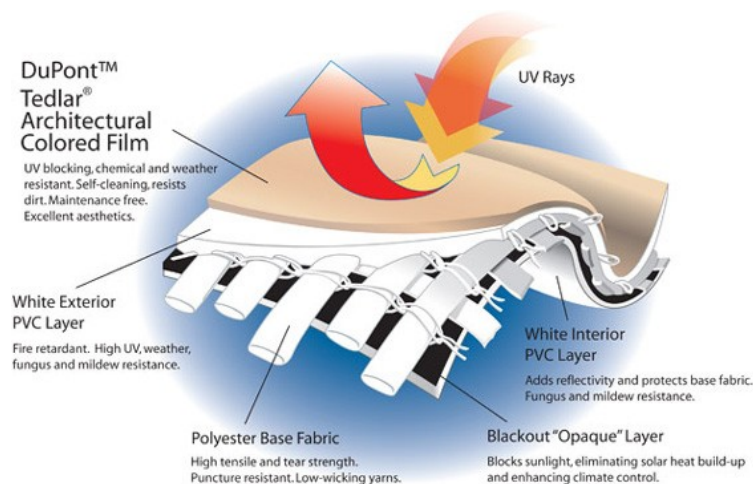


Slika 10: Prerez membrane z nosilnimi vlakni (levo) in prerez tehnične folije (desno) (Seidel, 2009)

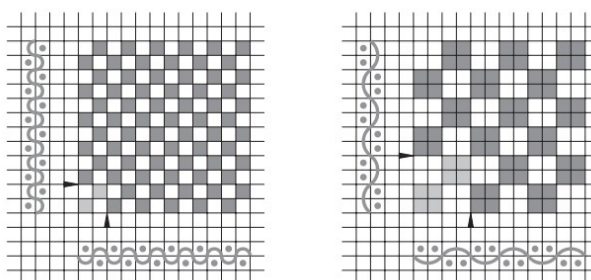
FG/PTFE membrana je najboljša membrana. Ima visoko nosilnost, odpornost na zunanje vplive, negorljivost in dolgo življenjsko dobo. Nosilna steklena vlakna so prekrita s kvalitetno PTFE matrico, ki zagotavlja predvideno življenjsko dobo 25 let. FG/PTFE membrane se uporabljajo za objekte z velikimi razponi, kjer je potrebna visoka nosilnost. Njihova slaba lastnost je predvsem visoka cena, ki je, v primerjavi z PET/PVC membrano, osemkrat višja. Prav tako je zelo občutljiva na prepogibanje zaradi krhkih steklenih vlaken. Posebno pozornost ji je potrebno posvetiti pri priključkih, detajlih, izdelavi in transportu, da se ne poškoduje, kar podraži investicijo (Seidel, 2009).

PET/PVC membrana je zaradi fleksibilnosti PET vlaken in nizke cene materiala najbolj razširjena membrana. Njeni slabi lastnosti sta nizka življenjska doba, ki sega do 10 let, in najnižja požarna odpornost med membranami za prednapete konstrukcije. Vendar se z razvojem tehnologij in novih zaščitnih premazov, kot je PVDF premaz, življenjska doba PET/PVC membrane lahko bistveno podaljša. PET/PVC membrana ima nižjo požarno odpornost od FG/PTFE, vendar večina membran doseže zahtevan kriterij požarne odpornosti. PET/PVC membrane dosega do 22% svetlobne prepustnosti, ki pa je odvisna od debeline in barvnega pigmenta. Obstajajo tudi membrane s transparentno matrico, ki pa imajo bistveno nižje mehanske lastnosti in niso najbolj primerne za prednapete konstrukcije (Seidel, 2009).

Kot smo že omenili, je PET/PVC membrana sestavljena iz PET nosilnih vlaken in zaščitne matrice PVC (slika 11). Vlakna so med sabo tkana po različnih postopkih (slika 12), kar posledično povzroči različne mehanske lastnosti v osnovni in votkovni smeri vlaken. V večini primerov imajo vlakna v osnovni smeri boljše mehanske lastnosti, kot sta meja nosilnosti in elastični modul.



Slika 11: Sestava PET/PVC membrane (CI Structures, 2015)



Slika 12: Prikaz različnega načina tkanja PET matrice (Seidel, 2009)

2.2 Podporne konstrukcije

Da membrana dobi načrtovano obliko, jo je potrebno pritrditi na podkonstrukcijo. Podkonstrukcija je sestavljena iz fleksibilnih (nateznih) in togih (tlačnih in upogibnih) elementov. Najbolj razširjeni in ekonomični elementi so jambori, stabilizirani z jeklenimi kabli, ki so v večini primerov obremenjeni osno, ter pritrjeni na armirano betonske temelje (slika 13). Med fleksibilne priključke uvrščamo jeklene kable, ki so nepogrešljivi del vsake prednapete konstrukcije. Razširjena je tudi uporaba ločnih nosilcev (slika 14) iz lesa ali jekla. Loke uporabljamo takrat, ko ne želimo, da nas jambori ali drugi podporni elementi ovirajo.

Za podporne konstrukcije se najpogosteje uporablja jeklo, ki omogoča najrazličnejše oblike in natančno izdelavo. Jeklo je tudi lahko ter z majhnimi prerezi prenaša velike obremenitve, kar se ujema

s filozofijo prednapetih membranskih konstrukcij, ki jih stroka uvršča med lahke konstrukcije. Možna je tudi uporaba aluminijastih podpornih konstrukcij, ki pa zaradi visoke nabavne cene aluminija niso tako razširjene.



Slika 13: Tenda sedlaste oblike, podprta z jambori (Diba, 2015)



Slika 14: Primer lesene ločne dvorane prekrive z membrano (Inspired structures, 2015)

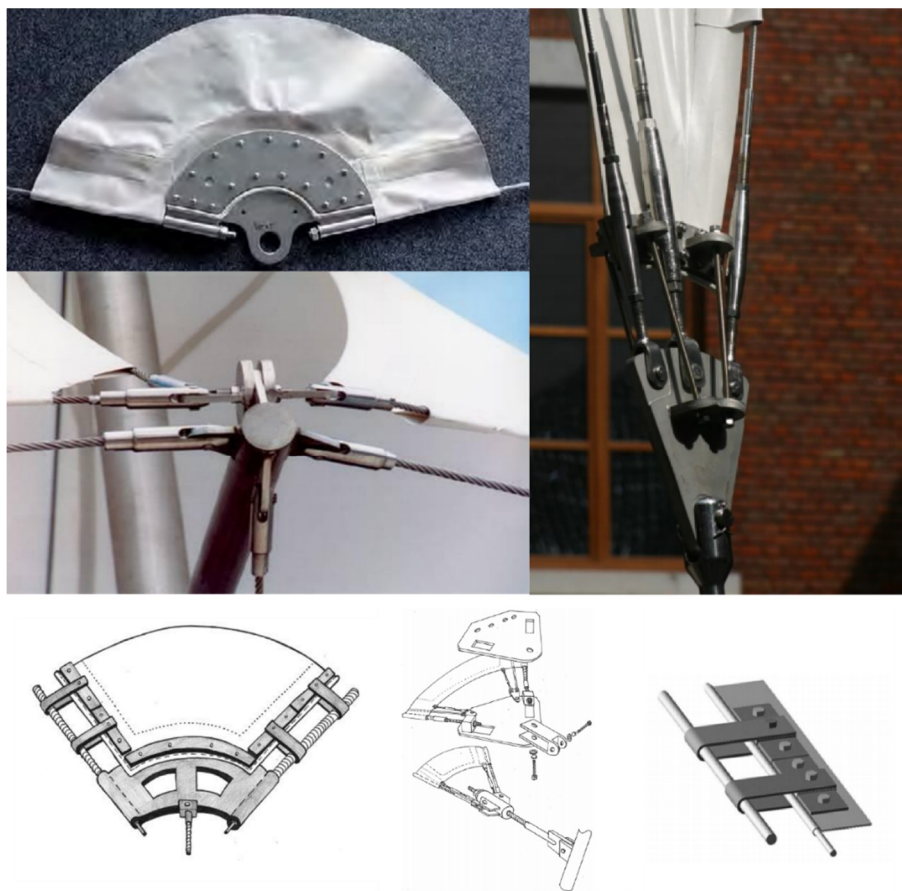
2.3 Pritrdilni sistemi za membranske konstrukcije

Posebno pozornost pri prednapetih membranskih konstrukcijah je potrebno nameniti pritrdilnim sistemom, ki jih bomo v nadaljevanju naloge imenovali detajli. Te ločimo na kotne detajle (angl. corner details) in robne detajle (angl. edge details). To so elementi, ki povezujejo membrano s podkonstrukcijo ali drugimi sidrišči. Gre za relativno majhne elemente, ki pa so ključni del celotne konstrukcije.

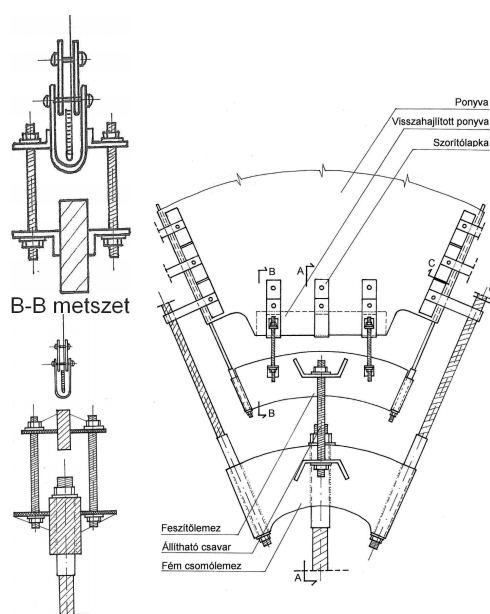
To so zapleteni elementi, ki jih je potrebno načrtovati sočasno s konstrukcijo in morajo omogočati sidranje membrane in robnih kablov. Omogočati morajo pomike in rotacije v različnih smereh, da sovpadajo z obliko konstrukcije. Običajno so detajli izvedeni tako, da omogočajo tudi fine nastavitve in napenjanje v fazi postavitve. Na sliki 15 in 16 so prikazani primeri pritrdilnih detajlov.

Poleg zgoraj naštetih funkcij, ki jih morajo detajli omogočati, je potrebno upoštevati še izgled, izvedljivost in ceno. V večini primerov gre za detajle, narejene po naročilu, zato predstavljajo velik

strošek pri prednapetih membranskih konstrukcijah. Na trgu že obstajajo univerzalni detajli, ki pa so bolj primerno za manjše konstrukcije, kot so tende za senčenje.



Slika 15: Primeri pritrdilnih detajlov pri membranskih konstrukcijah (Seidel, 2009 in Füzes, 2015)



Slika 16: Primer zahtevnega detajla (Füzes, 2015)

3 POSTOPEK NAČRTOVANJA PREDNAPETIH MEMBRANSKIH KONSTRUKCIJ

Pri projektiranju prednapetih membranskih konstrukcij je potrebno najprej najti obliko membrane pri vnaprej predpisanem prednapetju in robnih pogojih. Nato je potrebno analizirati odziv najdene oblike na projektne vplive in preveriti napetosti in pomike. Sledi določitev krojev membrane. Pri tem procesu ukrivljeno membransko površino preslikamo na dvodimenzionalno ploskev, nato pa to razčlenimo na manjše posamezne kose. Proces načrtovanja je torej sestavljen iz treh bistvenih korakov: iskanje oblike, nelinearna statična analiza in določitev krojev.

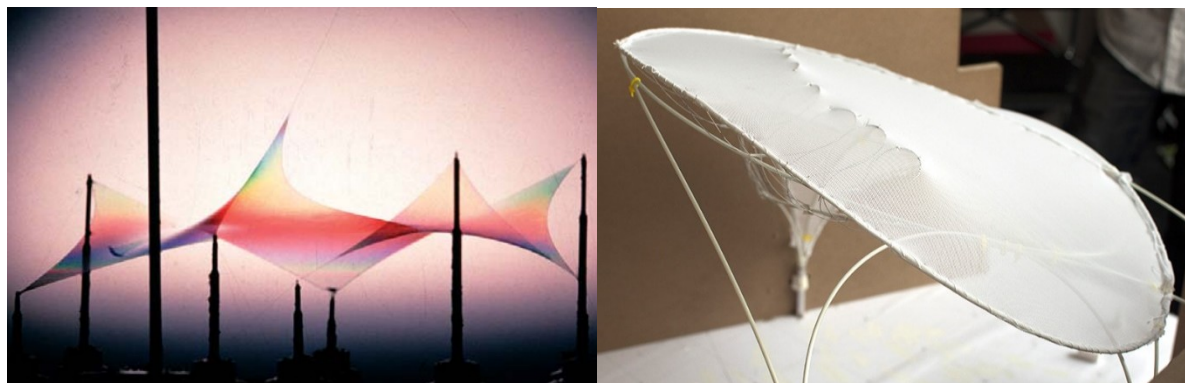
3.1 Iskanje oblike

Za razliko od klasičnih konstrukcij, kjer arhitekti določijo obliko konstrukcije, ta pri prednapetih konstrukcijah ni poljubna. Ker membrana ni sposobna prenašati upogibnih in tlačnih napetosti, mora biti tako zasnovana, da pri vseh vplivih v njej nastopajo le natezne napetosti. Zato je proces iskanja oblike ključen za nadaljnjo analizo in projektiranje.

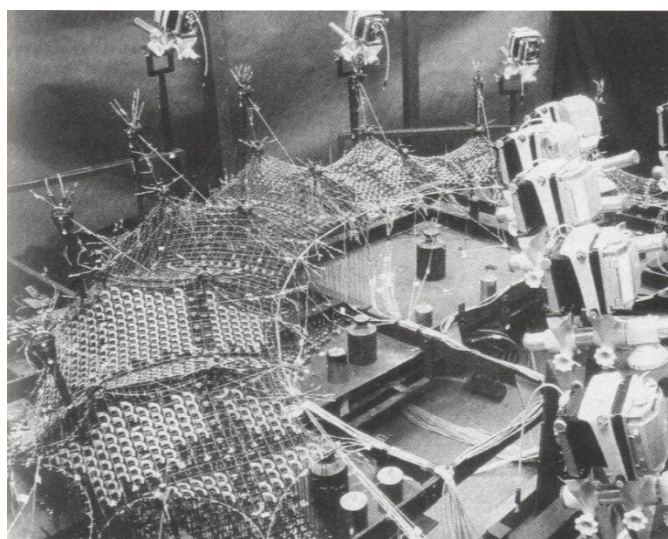
Iskanje oblike lahko izvedemo s pomočjo fizičnih modelov, kot so to počeli nekdanje, ali pa uporabimo analitične metode in računalniške programe za iskanje oblike, ki so danes dostopni konstrukterjem. Vhodni podatki pri iskanju oblike so robni pogoji ter stopnja prednapetja, ki je lahko različna v osnovni in votkovni smeri.

Za eksperimentalno iskanje oblike, oziroma iskanje oblike z uporabo fizičnih modelov, se lahko uporablja milnica ali elastično tkanino (slika 17), kot je najlon. Milnica tvori, med danimi fiksnimi robovi, ki jih oblikujemo iz žice, opno, v kateri je površinska napetost v vseh smereh enaka. Slabost modelov iz milnic je lastna teža, zato oblike niso najbolj pravilne. Pri modelih z elastičnimi tkaninami te lahko poljubno napenjamo v različnih smereh. Pred razvojem primernih računalniških orodji so bili fizični modeli ključni pri iskanju primerne oblike membrane. Na sliki 18 je prikazan fizični model za iskanje oblike, ki so ga uporabili pri načrtovanju olimpijskega stadiona v Münchnu.

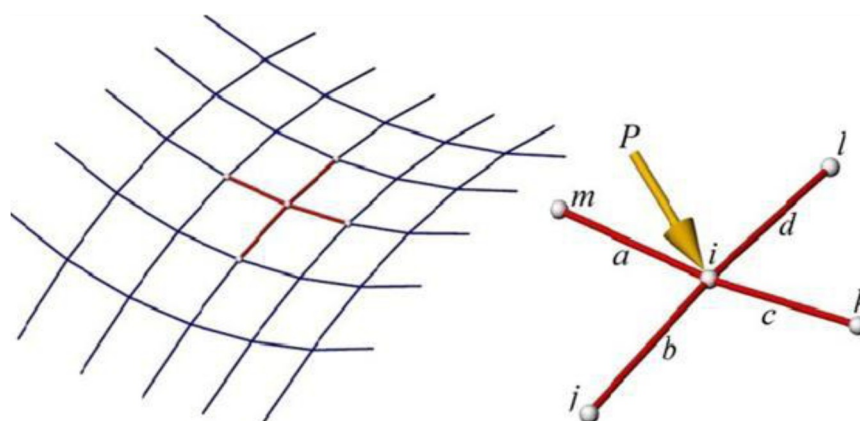
Računalniško iskanje oblike poteka na osnovi iskanja ravnotežja v tkanini pri podani vrednosti prednapetja ter pri podanih položajih nepomičnih podpornih točk. V fazi iskanja oblike ne upoštevamo zunanjih vplivov, tudi lastno težo zanemarimo. Obstajajo različne metode iskanje oblike. Med najbolj razširjenimi je metoda gostote sil (slika 19).



Slika 17: Eksperimentalno iskanje oblike z milnico na levi sliki (Forster in sod, 2004) in z elastično tkanino (Institute for computational ..., 2015) na desni sliki



Slika 18: Iskanje oblike na podlagi fizičnega modela, kjer kamere odčitavajo obliko konstrukcije (Symeonidou, 2014)

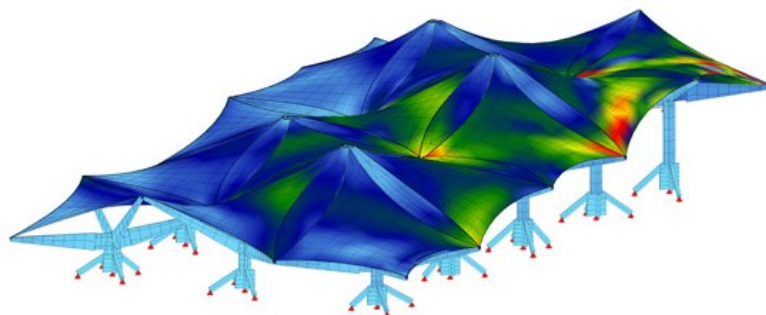


Slika 19: Mreža linijskih elementov za iskanje oblike (Brank, 2014)

3.2 Statična analiza

Ko najdemo primerno geometrijsko obliko membrane, jo je potrebno analizirati na vplive, ki jih pričakujemo v načrtovani življenjski dobi konstrukcije. Pri analizi preverjamo napetosti in deformacije. Pri kontroli napetosti je potrebno preveriti, da ne pride do tlačnih (negativnih) napetosti oziroma da natezne (pozitivne) napetosti niso prekoračene glede na izbrani material. Pri pomikih pa je ključnega pomena kontrola deformiranih oblik, da ne pride do kopičenja padavin. Z geometrijsko nelinearno statično analizo preverimo ali je začetna oblika membrane primerna. Na podlagi te analize lahko konstrukcijo preoblikujemo ter jo ponovno analiziramo.

Pri statični analizi je ključen podatek elastični modul membrane, ki pa ga proizvajalci ne podajo. Določiti ga moramo sami na podlagi testov. Določitev elastičnega modula ni preprosto opravilo, saj je različen v votkovni in osnovni smeri membrane, poleg tega je odvisen od stopnje prednapetja, smeri in razmerja prednapetja med votkovno in osnovno smerjo.



Slika 20: Statična analiza Expo 2010 paviljona Norveške (Str.ucture, 2015)

3.3 Določitev krojnih pol

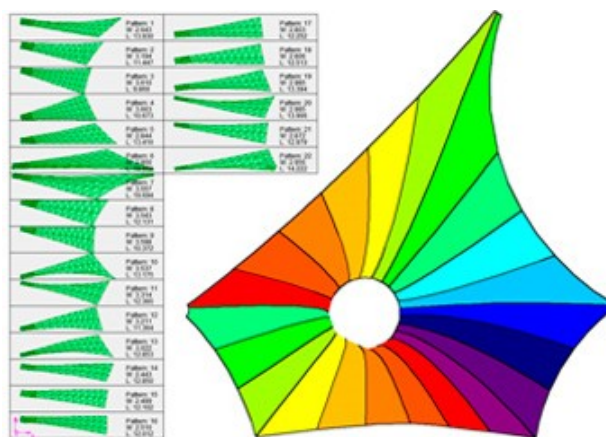
Ko izbrana oblika zadovolji vsem obtežnim stanjem, ki jih preverimo s statično analizo, sledi naslednji korak - krojenje membrane. Krojenje membrane bi lahko primerjali z izdelavo delavniških načrtov. Dobljeno obliko membrane razdelimo na več manjših delov, ki jih projiciramo na dvodimenzionalno površino. Dobimo tako imenovane krojne pole, okrajšano kroj. Krojne pole nato izrežemo iz dobavljene tkanine, jih med seboj zvarimo in dobimo varjeno membrano, ki je pripravljena za namestitvev.

Določitev krojev je zelo zahteven postopek, ki bi ga brez pravega računalniškega programa zelo težko opravili. Če bi membrana lahko bila samo enojno ukrivljena, bi bilo nalogo mogoče opraviti na enostaven način. Preslikava antiklastične površine na ravno ploskev pa je nemogoča brez napake. Ker razdelimo antiklastično ploskev na več delov in naredimo preslikavo za vsak kroj posebej, imamo pri

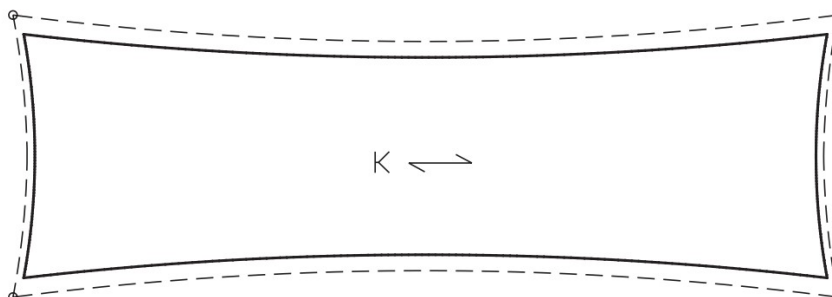
takšnih preslikavah le manjša popačenja. Velikost posameznega kroja diktira širina dobavljenega materiala, ki je v večini primerov 250 cm. Na sliki 21 so prikazane krojne pole za prednapeto membrano konusne oblike.

Običajno vare razporejamo v smeri maksimalnih napetosti. Na spoju dveh krojev dobimo dvojni material, ki ima skoraj dvakrat večjo nosilnost. Izogibamo pa se postavitvi krojev, ki bi potekali prečno na maksimalne napetosti, saj so stiki tudi šibka mesta varjene membrane. Prav tako je pri krojenju treba paziti, da stikov krojev ne pozicioniramo na mestih maksimalnih napetosti.

V fazi krojenja je potrebno upoštevati še umestitev detajlov, predvidene spoje, sidrne žepe za robne kable in ostale morebitne detajle. Zanimariti ne smemo tudi zmanjšanje krojev, saj oblika, ki jo preslikamo na ravno ploskev, že vsebuje prednapetje. Zato je potrebno kroje zmanjšati. Postopek zmanjšanja krojev se imenuje kompenzacija (slika 22).



Slika 21: Krojne pole za membrano konusne oblike (NDN Software, 2015)



Slika 22: Primer kompenzacije jadra (Seidel, 2009)

4 PROJEKT KOLESARNICE

4.1 Splošno

Predvidena membranska konstrukcija naj bi stala na desni strani površine za parkiranje koles (slika 23) pred stavbo UL FGG. Z izbrano prednapeto membransko konstrukcijo bi torej prekrili del površine, ki je namenjen parkiranju koles.

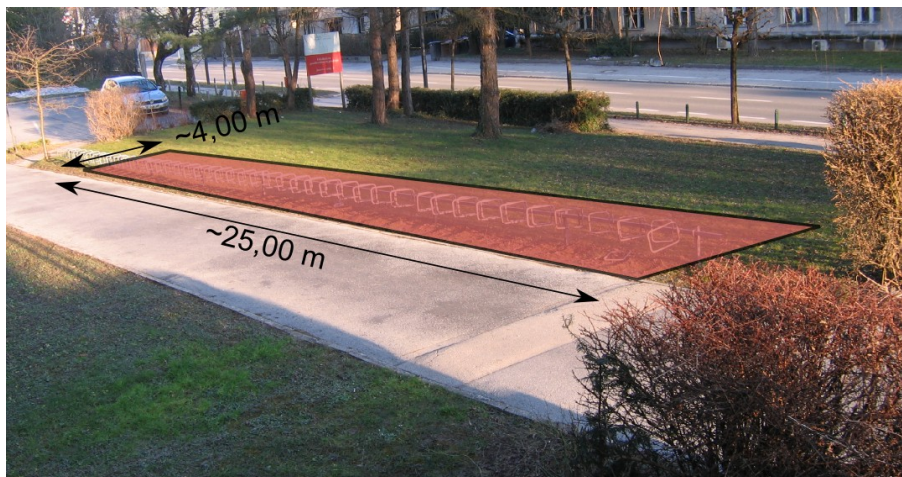


Slika 23: Pogled na lokacijo postavitve pred UL FGG, označeno z rdečim poljem (Atlas okolja, 2015)

Dimenzije razpoložljive površine smo pridobili z lastnimi izmerami ter s pomočjo katastrskega načrta. Na podlagi izmer smo določili okvirne gabarite nadstreška, ki bi bili najbolj primerni za podano lokacijo in namen. Najbolje si lahko predstavljamo dejansko stanje s slike 24. Nadstrešek bi se nahajal na robu asfaltirane poti, ki vodi do vhoda v stavbo (slika 25). Za nadstrešek imamo na voljo površino v velikosti 25 m krat 4 m.



Slika 24: Obstoječe stanje



Slika 25: Pogled s stopnišča UL FGG na območje postavitve nadstreška

4.2 Idejna zasnova konstrukcije

Prednapete membranske konstrukcije dopuščajo dokaj prosto zasnovo. Vendar moramo vedeti kje in kako lahko posegamo na določeni lokaciji. Problem lahko predstavlja podporna konstrukcija. Zatege omejuje prostor okoli konstrukcije, zato je pri zasnovi potreben temeljit premislek.

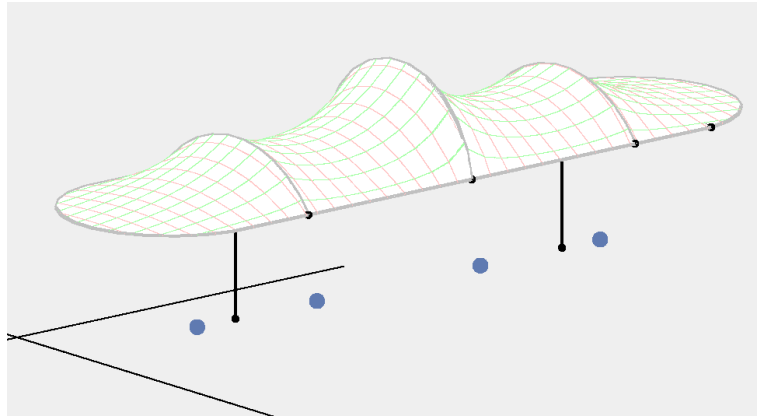
Pri zasnovi smo si postavili naslednje smernice:

- poseg v okolico nadstreška naj bo minimalen,
- izogibanje visokim jamborjem in visokim podpornim elementom,
- minimalna uporaba zateg,
- lega membrane naj bo čim nižja, da ne oviramo pogleda na objekt.

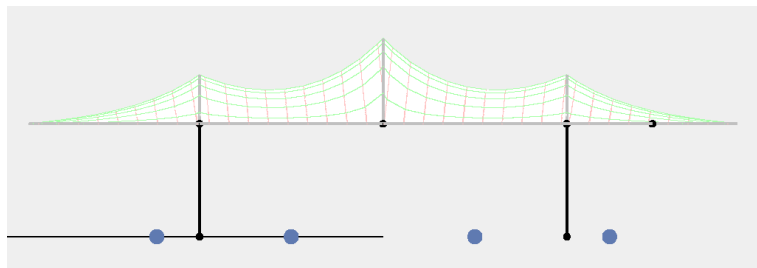
Najbolj optimalne oblike prednapetih konstrukcij so tiste, pri kateri sta tlorisni dimenziji v podobnem razmerju in je razmerje glavnih radijev ukrivljenosti čimbolj enako 1. V našem primeru ne izpolnjujemo teh pogojev, vendar gre za majhno in relativno enostavno konstrukcijo.

Idejna zasnova št.1: dvignjena prednapeta nadstrešnica

Pri prvi idejni zasnovi predvidimo horizontalni jekleni okvir na višini 2.30 m ter prečne loke v rastru 3.75 m. Krajši stranici jeklenega okvirja bi bili zaključeni v obliki polkrožnice. Celotno konstrukcijo bi nato postavili na dva toga vpeta stebra. Gre za dokaj enostavno in nevpadljivo rešitev. Zasnova je prikazana na slikah 26 in 27.



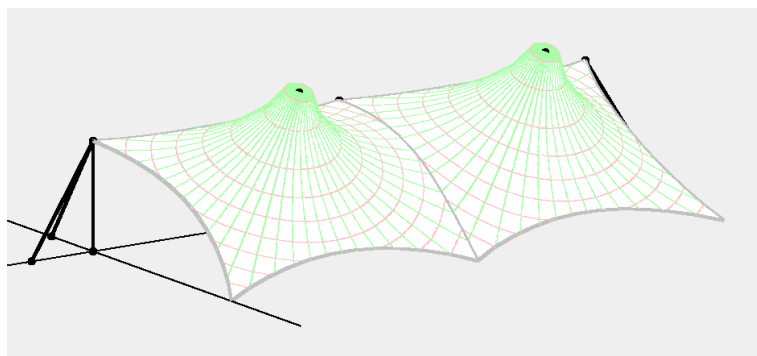
Slika 26: Idejna zasnova št.1, 3D pogled.



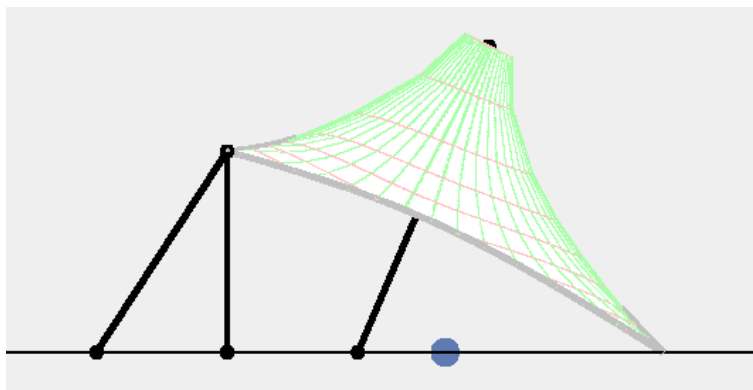
Slika 27: Idejna zasnova št. 1, stranski pogled.

Idejna zasnova št.2: dva povezana konusa

Pri drugi idejni zasnovi smo uporabili konusno obliko. Površino smo prekrili z dvema konusnima membranama. Na eni strani je daljša stranica membrane fiksirana v teren na drugi strani pa je nameščena podporna konstrukcija s stebri in zategami. Širino konstrukcije smo morali povečati na 5 m, da smo lahko formirali konusno obliko. Konusa sta podprta s poševnimi stebri, ki niso dodatno bočno stabilizirani. Na slikah 28 in 29 je predstavljena ta idejna zasnova.



Slika 28: Idejna zasnova št. 2, 3D pogled



Slika 29: Idejna zasnova št. 2, stranski pogled.

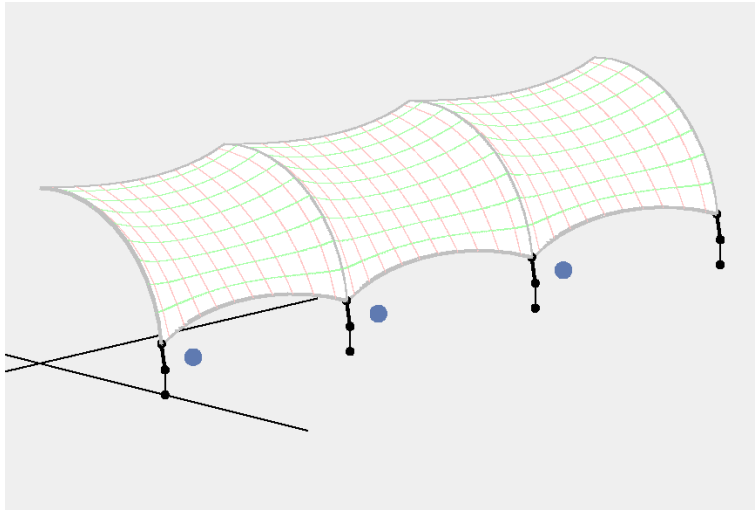
Idejna zasnova št.3: membranska konstrukcija, podprta s konzolnimi loki

Tretja ideja, ki je po našem mnenju najbolj primerna, je najbolj enostavna za izvedbo (slika od 31 do 33). Gre za podobno obliko, kot se uporablja pri modernih nadstreških za avtomobile (slika 30), le da v tem primeru za prekrivanje uporabimo membrano. Podporna konstrukcija je sestavljena iz 4 konzolnih lokov. Membrana je napeta čez loke. Zadnja dva loka morata prenesti vse horizontalne obremenitve v daljši smeri konstrukcije. Pri statični analizo bomo preverili, kako velike bodo sile zaradi prednapetja in, če bo potrebno, dodali zatege ali pa membrano na koncih zaključili v teren.

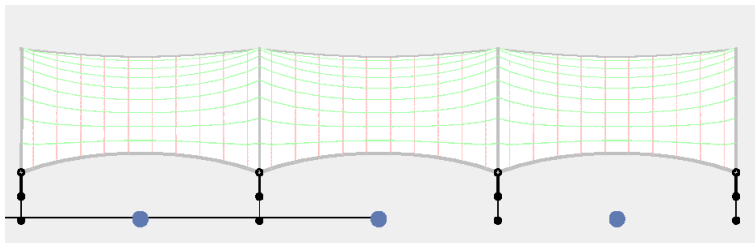
Izmed zgoraj predstavljenih idej smo se odločili za tretjo verzijo. Glavni razlog za izbiro je preprosta izvedba ter estetska privlačnost. Poleg naštetega bi se lahko na membrano navarilo ali natisnilo logotip fakultete, ki bi bil jasno viden z bližnje ceste.



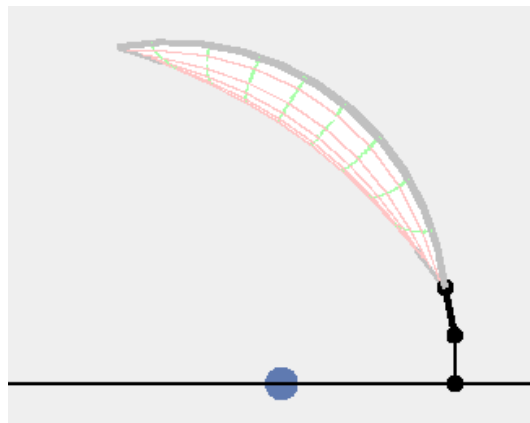
Slika 30: Primer modernega nadstreška za avtomobile proizvajalca Goka (Goka, 2015)



Slika 31: Idejna zasnova št. 3, 3D pogled



Slika 32: Idejna zasnova št. 3, stranski pogled.



Slika 33: Idejna zasnova št. 3, pogled od spredaj.

4.2.1 Opis izbrane idejne zasnove

Izhodišče za izbrano idejno zasnovo je bilo predstavljeno v zgornjem poglavju, kjer smo se odločili za idejno zasnovo št. 3. Glede na kompleksnost načrtovanja prednapetih membranskih konstrukcij in močne povezave med vsemi procesi načrtovanja, je bilo potrebno konstrukcijo večkrat modificirati. Modifikacije so se izvedle predvsem pri obliki membrane in pri podporah. Z dodatnimi posegi smo

konstrukcijo optimirali, pri tem smo se izognili koncentracijam napetosti, uporabi dragih in zapletenih detajlov ter tehnološke zahtevnosti izvedbe projekta.

Membrana

Membrana bo izdelana v enem kosu iz posameznih krojnih pol. Membrana in robni kabli bodo fiksirani na kotne detajle, ki bodo členkasto pritrjeni na podporne elemente. Membrana bo nalegala na jekleno konstrukcijo kjer dodatna vezna sredstva niso predvidena. Na obeh krajših stranicah, pa se membrana v obliki jadra pripenja na temelj.

Podporna konstrukcija

Podporno konstrukcijo sestavljajo štiri konzolni loki, na katere se pripenja membrano z detajli. Prez stebrov, ki se proti vrhu zožijo, je I oblike. Na krajših stranicah je robni detajl membrane podprt z jeklenimi vrvi, ki so sidrane na bočni temelj. Za zagotavljanje bočne stabilnosti in povezanosti konstrukcije, je na spodnjem in zgornjem robu nameščena jeklena konstrukcijska cev, ki povezuje loke.

Temelji

Za pritrditev podporne konstrukcije in jeklenih kablov je predvideno plitvo temeljenje v armirano betonski izvedbi. Točkovni temelji bodo vgrajeni pod stebri in na robovih krajše stranice konstrukcije.

4.3 Projektiranje konstrukcije

V naslednjem poglavju bomo opisali proces statične analize prednapetih membranskih konstrukcij. Vzporedno s tem opisom bomo načrtovali izbrano konstrukcijo. Kot smo že omenili, smo izbrano konstrukcijsko zasnovo večkrat spreminjali. Prikazani bodo rezultati končne rešitve. Predstavili bomo tudi vzroke za modifikacije, ki so pripomogle k boljši končni rešitvi.

4.3.1 Izbira materiala

Preden pričnemo s statično analizo se je potrebno odločiti, katere materiale bomo uporabili. Predvsem je pomembna izbira materiala membrane.

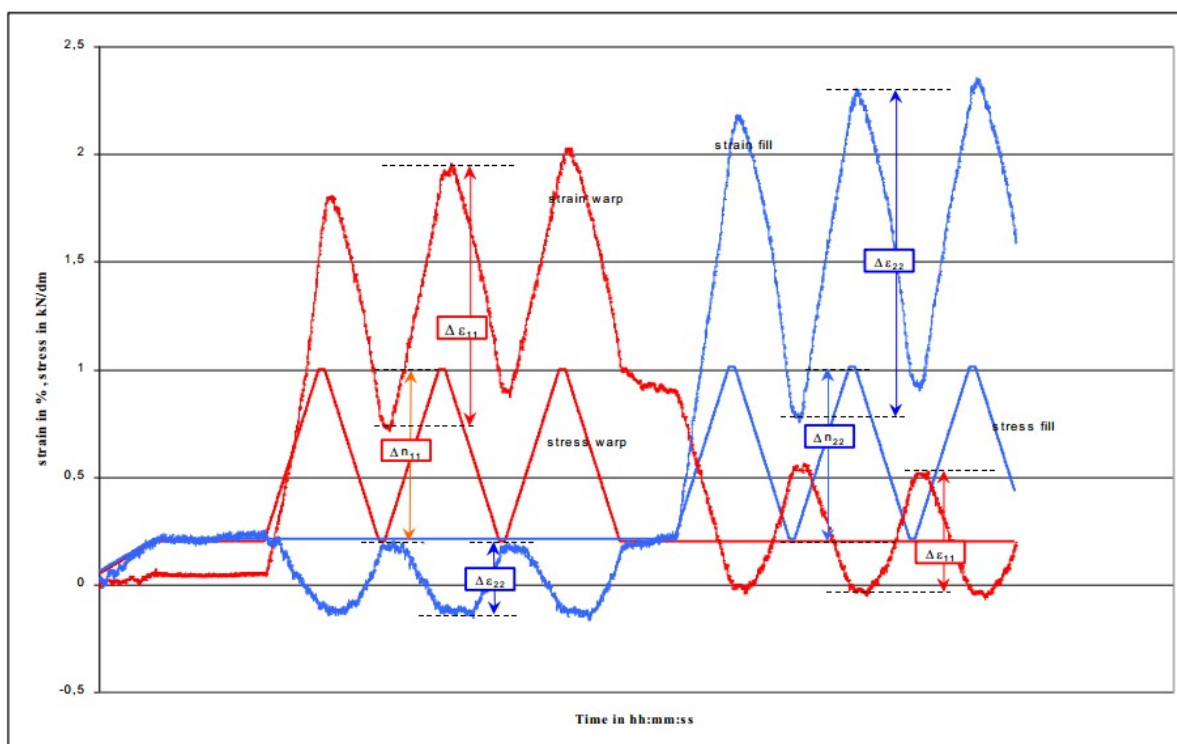
4.3.1.1 Membrana

Za našo konstrukcijo smo izbrali PET/PVC membrano, saj ne potrebujemo visoke nosilnosti. Uporaba FG/PTFE membrane zaradi daljše življenjske dobe ni smiselna, saj je zamenjava PET/PVC membrane smotrnejša kot uporaba PTFE membrane. Odločili smo se za uporabo membrane tipa II, VALMEX FR 900 MEHATOP-F, za katero smo pridobili rezultate dvoosnih testov, na podlagi katerih lahko določimo elastični in strižni modul. Proizvajalci v tehničnem listu navajajo le maksimalno nosilnost v osnovni in votkovni smeri ter druge lastnosti, ki niso pomembne za statično analizo (Mehler technologies, 2013). Ne podajo vseh materialnih karakteristik, ker ne želijo razkriti vseh tehničnih

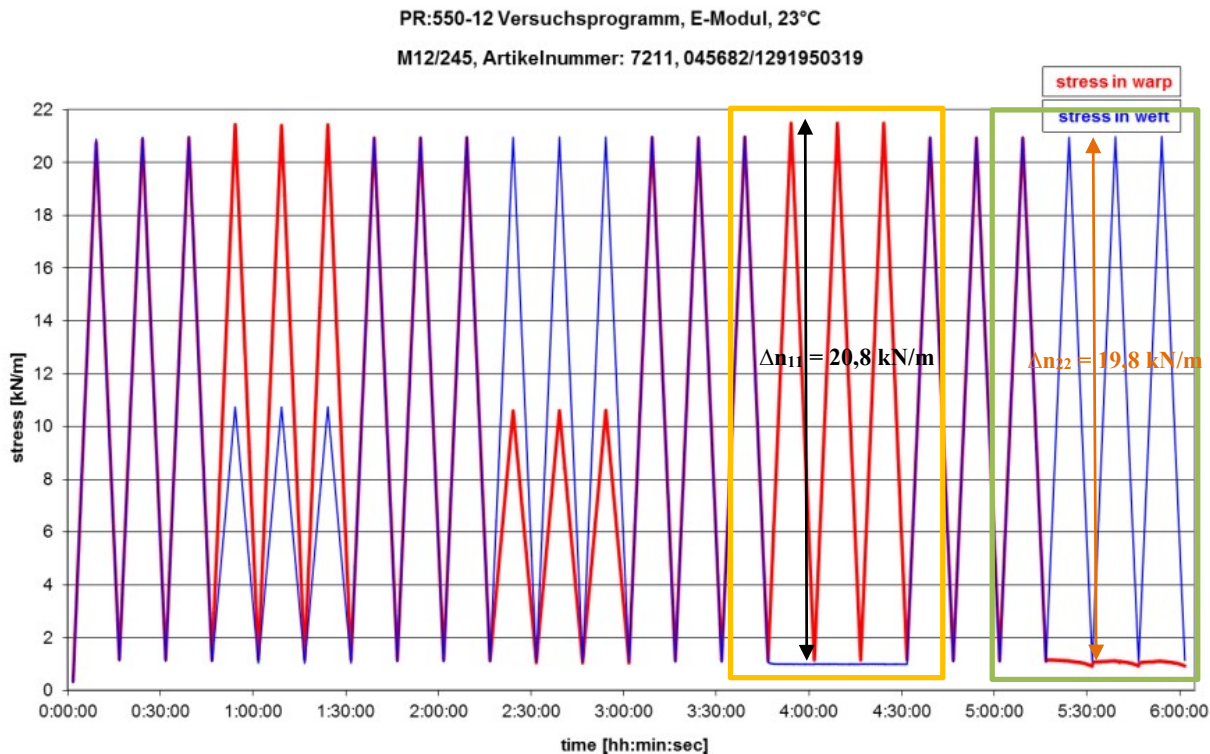
lastnosti njihovih tkanin zaradi tekmovalnosti med proizvajalci (Syróvátka, 2015), kar projektantom predstavlja oviro.

Določitev modula elastičnosti na podlagi dvoosnih preiskav

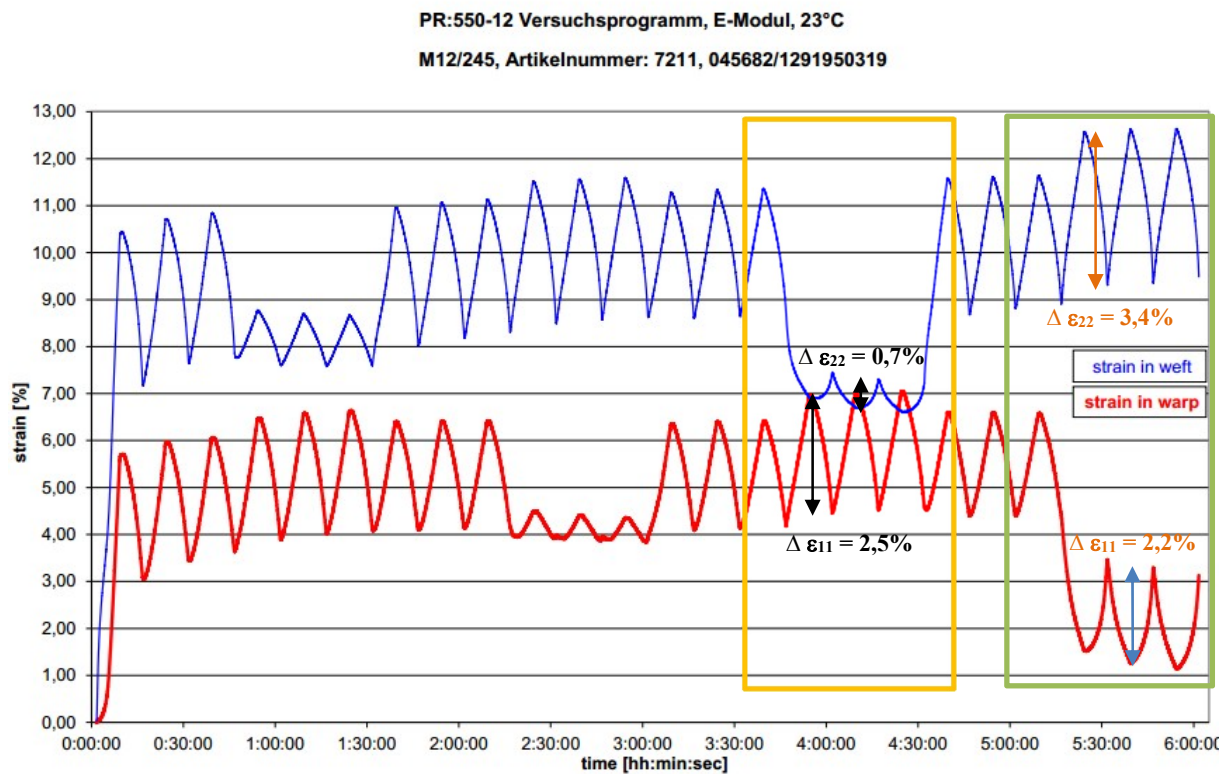
Karakteristike membrane smo določili na podlagi metode in enačb, ki so podana v Evropskem priročniku za projektiranje konstrukcij (Forster in sod., 2004). Iz dvoosnih testov za izbrano membrano (Syróvátka, 2015) razberemo deformacije in napetosti za posamezen interval obremenjevanja. Pri določitvi parametrov za enačbi (4.1) in (4.2) razberemo vrednosti iz intervala, kjer je sila v votkovni smeri enaka 1 kN/m (sliki 35 in 36, območje označeno z oranžno). Pri določitvi parametrov za votkovno smer pa velja, da razberemo vrednosti v tistem intervalu, ko je sila v osnovni smeri enako 1 kN/m (sliki 35 in 36, območje označeno z zeleno). Slika 34 prikazuje postopek odčitavanja posameznih količin, katere nato odčitamo za izbrano membrano iz slik 35 in 36, ter jih nato vstavimo v enačbe 4.1, 4.2, 4.3 in 4.4, kjer izračunamo koeficiente togosti.



Slika 34: Graf z legendo za odčitavanje napetosti in deformacij v odvisnosti od časa (Syróvátka, 2015)



Slika 35: Napetosti v odvisnosti od časa za membrano VALMEX FR 900 (Syróvátka, 2015)



Slika 36: Deformacije v odvisnosti od časa za membrano VALMEX FR 900 (Syróvátka, 2015)

Obremenjevanje v smeri osnovnih vlaken:

$$\Delta n_{11} = E_{1111} \Delta \varepsilon_{11} + E_{1122} \Delta \varepsilon_{22} \rightarrow 20,8 = E_{1111} 0,025 + E_{1122}(-0,007), \quad (4.1)$$

$$0 = E_{1122} \Delta \varepsilon_{11} + E_{2222} \Delta \varepsilon_{22} \rightarrow 0 = E_{1122} 0,025 + E_{2222}(-0,007). \quad (4.2)$$

Obremenjevanje v smeri votkovnih vlaken:

$$0 = E_{1111} \Delta \varepsilon_{11} + E_{1122} \Delta \varepsilon_{22} \rightarrow 0 = E_{1111}(-0,022) + E_{1122} 0,034, \quad (4.3)$$

$$\Delta n_{22} = E_{1122} \Delta \varepsilon_{11} + E_{2222} \Delta \varepsilon_{22} \rightarrow 19,8 = E_{1122}(-0,022) + E_{2222} 0,034. \quad (4.4)$$

Ko rešimo zgornji sistem enačb z metodo najmanjših kvadratov, dobimo vrednosti za posamezne koeficiente togosti:

$$E_{1111} = 894 \text{ kN/m},$$

$$E_{1122} = 437 \text{ kN/m},$$

$$E_{2222} = 833 \text{ kN/m}.$$

Zdaj lahko izračunamo Poissonova količnika (Kovačević, 2012):

$$\nu_{12} = \frac{E_{1122}}{E_{1111}} = \frac{437}{894} = 0,48,$$

$$\nu_{21} = \frac{E_{1122}}{E_{2222}} = \frac{437}{833} = 0,52.$$

Poissonov količnik ν_{12} pove, kolikšen del raztezka v smeri 2, pri obremenjevanju v smeri 2, je skrček v smeri 1. Podobno, Poissonov količnik ν_{21} pove, kolikšen del raztezka v smeri 1, pri obremenjevanju v smeri 1, je skrček v smeri 2. Vrednosti Poissonovih količnikov kažeta na visoko stopnjo interakcije med osnovnimi in votkovnimi vlakni (Mollaert, 2007).

Sedaj lahko izračunamo elastična modula v osnovni smeri (smer 1) in votkovni smeri (smer 2):

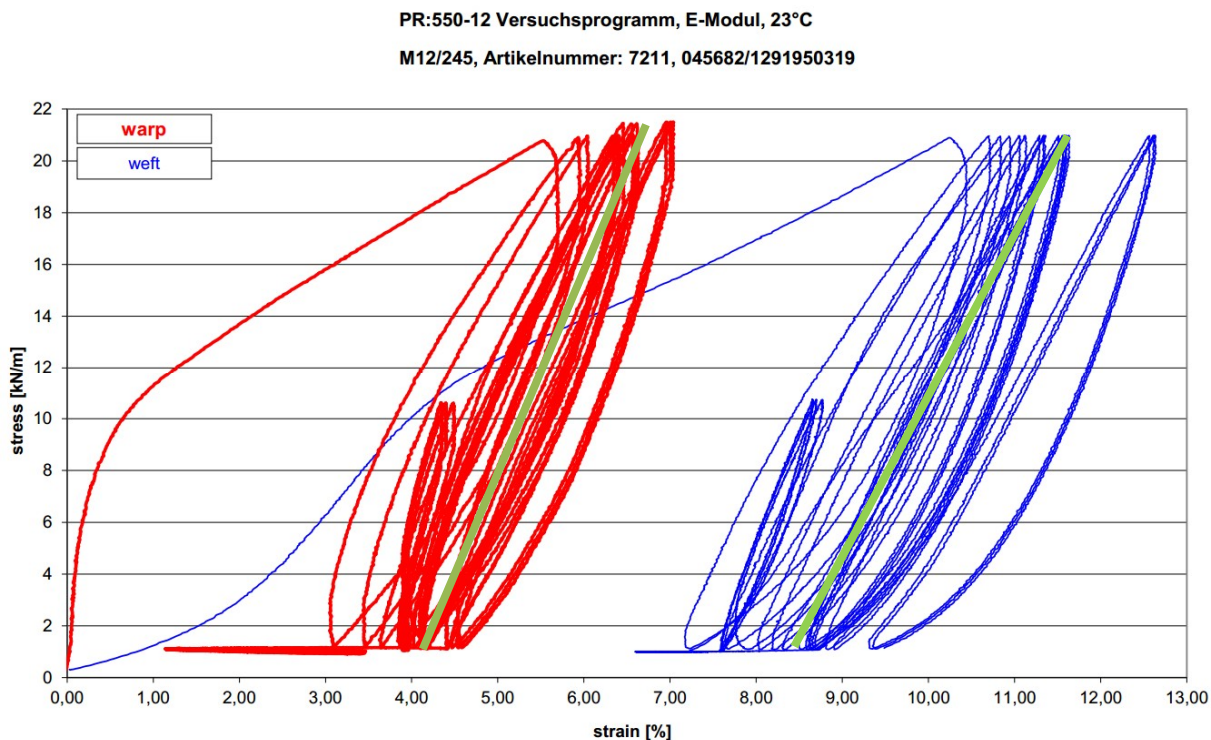
$$E_1 = E_{1111}(1 - \nu_{12}\nu_{21}) = 894 (1 - 0,48 \cdot 0,52) \cong 665 \text{ kN/m},$$

$$E_2 = E_{2222}(1 - \nu_{12}\nu_{21}) = 833 (1 - 0,48 \cdot 0,52) \cong 617 \text{ kN/m}.$$

Določitev modula elastičnosti na podlagi grafa napetosti v odvisnosti od deformacij

Pri naslednjem načinu bomo določili elastična modula iz grafa napetosti v odvisnosti od deformacij, po postopku, ki ga predlagajo razvijalci programa (Meliar design, 2015b). Iz grafa (slika 37) odčitamo spremembo napetosti Δn_i in spremembo deformacije $\Delta \varepsilon_i$, za obremenjevalno krivuljo v osnovni in votkovni smeri. Ker gre za dvoosni preizkus, je potrebno pri izračunu elastičnega modula deformacije reducirati, saj sta v grafu (Slika 37) zajeta dva efekta. Raztezek v osnovni smeri zaradi

obremenjevanja v osnovni smeri reduciramo s Poissonovim koeficientom, zaradi skrčka v votkovni smeri. Enako velja za raztezek v votkovni smeri (Meliar design, 2015b). Za Poissonov koeficient ν upoštevamo 0,26 (Galliot, 2010).



Slika 37: Napetosti v odvisnosti od deformacij za membrano VALMEX FR 900 (Syrovátká, 2015)

$$E_1 = \frac{\Delta n_1 (1-\nu^2)}{\Delta \varepsilon_1 (1+\nu)} = \frac{20,7 \text{ kN/m} (1-0,26^2)}{2,5\% (1+0,26)} = 723 \text{ kN/m},$$

$$E_2 = \frac{\Delta n_2 (1-\nu^2)}{\Delta \varepsilon_2 (1+\nu)} = \frac{20 \text{ kN/m} (1-0,26^2)}{3,1\% (1+0,26)} = 477 \text{ kN/m}.$$

Modula elastičnosti iz strokovnega članka

Za izbrano membrano, smo našli podatke o elastičnem modulu in Poissonovem količniku, kateri so bili določeni na podlagi posplošenega nelinearnega modela in dvoosnih preiskav, na inštitutu Empa v Švici (Mollart, 2007). Preizkušane so obremenjevali na pet različnih razmerji obremenjevanja (5:1, 2:1, 1:1, 1:2 in 1:5), med katerimi je sledil cikel razbremenjevanja. 5:1 pomeni obremenjevanje v osnovni smeri vlaken z enoto 5 in obremenjevanje v votkovni smeri z enoto 1.

Za membrano VALMEX FR 900 so določili:

$$E_x^{1:1} = 882 \text{ kN/m},$$

$$E_y^{1:1} = 680 \text{ kN/m},$$

$$\nu_{xy} = 0,26,$$

$$\Delta E_x = 804 \text{ kN/m},$$

$$\Delta E_y = 438 \text{ kN/m}.$$

Razlaga kratic:

$E_x^{1:1}$... elastični modul v osnovni smeri membrane, pri razmerju obremenjevanja 1:1,

$E_y^{1:1}$... elastični modul v votkovni smeri membrane, pri razmerju obremenjevanja 1:1,

ν_{xy} ... Poissonov količnik,

ΔE_x ... variacija elastičnega modula v osnovni smeri na osnovi $E_x^{1:1}$, pri različnih razmerjih obremenjevanja,

ΔE_y ... variacija elastičnega modula v votkovni smeri na osnovi $E_y^{1:1}$, pri različnih razmerjih obremenjevanja.

Variacija elastičnega modula je bila določena na podlagi vseh razmerji obremenjevanja membrane. Kot vidimo, pride do velikih variacij elastičnih karakteristik membrane, kar nakazuje na izrazito ortotropnost in nelinearnost.

Karakteristike membrane za analizo

Elastični modul za izbrano membrano smo določili na podlagi različnih metod, katere vrednosti, če jih primerjamo se opazno razlikujejo. Za analizo bomo uporabili elastični modul in Poissonov količnik iz strokovnega članka (Mollaert, 2007).

Strižni modul G_{12} določimo na podlagi priporočila razvijalcev programa FEA MPanel, da naj za strižni modul upoštevamo 10% vrednost večjega strižnega modula (Meliar design, 2015b).

$$G_{12} = \frac{E_1}{10} = \frac{882}{10} \cong 88 \text{ kN/m}.$$

Nosilnost membrane razberemo iz tehničnega lista (Mehler technologies, 2013).

Karakteristike membrane VALMEX FR 900, ki smo jih upoštevali pri analizi, so naslednje:

$$E_x = E_x^{1:1} = 882 \text{ kN/m},$$

$$E_y = E_y^{1:1} = 860 \text{ kN/m},$$

$$\nu = \nu_{xy} = 0,26,$$

$$G = G_{12} = 88 \text{ kN/m},$$

$$f_{u,x} = 86 \text{ kN/m},$$

$$f_{u,y} = 84 \text{ kN/m}.$$

Razlaga ostalih kratic karakteristik:

$f_{u,x}$... mejna nosilnost membrane v osnovni smeri vlaken,

$f_{u,y}$... mejna nosilnost membrane v votkovni smeri vlaken.

4.3.1.2 Jeklo

Jeklo in vezna sredstva bomo uporabili za podporno konstrukcijo in izdelavo raznih priključkov in detajlov. Karakteristike smo razbrali iz priložnika za projektiranje gradbenih konstrukcij (Beg in Pogačnik, 2009):

Podporna konstrukcija: S275, JR, $f_y = 27,5 \text{ kN/cm}^2$,

Detajli: S355, JR, $f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$,

Vijaki kvalitete 8.8, $f_{ub} = 80 \text{ kN/cm}^2$,

Sidrni vijaki za temelje, kvalitete 8.8, $f_{ub} = 80 \text{ kN/cm}^2$.

Razlaga kratic karakteristik:

S ... kvaliteta jekla,

JR ... podkvaliteta jekla,

f_y ... napetost na meji elastičnosti jekla,

f_{ub} ... projektna trdnost vijaka.

4.3.1.3 Jekleni kabli

Jeklene vrvi ali kable bomo uporabili za fleksibilne linijske elemente prednapete membrane. Natezne sile iz membrane se prenesejo v kable, te pa v sidrišča oziroma na podporno konstrukcijo. Jekleni kabli so sestavljeni iz snopa 19 žic, ki so prepletene. Ker se pri kablilih uporablja visoko kvalitetna jekla, je potrebno kable korozijsko zaščititi s cinkanjem, barvanjem ali plastičnim ovojem. Odločili smo se za uporabo nerjavečih kablov proizvajalca Ronstan.

Karakteristike jeklenice DI 10 1x19 (Ronstan ..., 2015):

$$\phi_c = 10 \text{ mm},$$

$$E_c = 107,5 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2,$$

$$A_c = 59,7 \text{ mm}^2,$$

$$F_{u,c} = 71 \text{ kN}.$$

Razlaga kratic karakteristik:

ϕ_c ... prerez kabla,

E_c ... elastični modul kabla,

A_c ... površina prereza kabla,

$F_{u,c}$... mejna nosilnost kabla.

4.3.2 Določitev karakterističnih obtežb in obtežnih kombinacij

Lastna, stalna in koristna

Lastno in stalno obtežbo prednapetih membranskih konstrukcij predstavlja prednapetje in lastna teža membrane. Ker je lastna teža membrane zelo majhna, $0,9 \text{ kg/m}^2$, je zanemarljiva. Prednapetje v membrani se giblje med $1 \text{ kN/m} - 3 \text{ kN/m}$. Pri večjih konstrukcijah je lahko stopnja prednapetja tudi večja (Forster in sod., 2004).

Za našo konstrukcijo bomo velikost prednapetja določili pri statični analizi, saj je stopnja prednapetja odvisna od velikosti konstrukcije, ukrivljenosti membrane in jakosti obtežbe, katero mora membrana prenesti.

Lastno težo jeklene konstrukcije bomo upoštevali z avtomatskim generatorjem lastne obtežbe, ki nam jo omogoča programska oprema, ki jo bomo uporabili za analizo in dimenzioniranje podporne konstrukcije. Težo jeklenih vrvi smo v analizi zanemarili, zaradi majhne lastne teže, ki je le $0,5 \text{ kg/m}$ (Ronstan ..., 2015).

Obtežba snega

Vpliv snežne obremenitve določimo skladno s standardoma SIST EN 1991-1-3. Karakteristično obtežbo snega na tleh določimo na podlagi karte in enačb, ki so podane v Nacionalnem dodatku.

Naš objekt se nahaja v Ljubljani na nadmorski višini $A = 300 \text{ m}$ in coni A2. Torej je karakteristična obtežba snega na tleh:

$$s_k = 1,293 \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{728} \right)^2 \right] = 1,293 \cdot \left[1 + \left(\frac{300}{728} \right)^2 \right] = 1,51 \text{ kN/m}^2.$$

Obtežbo snega na streho določimo z naslednjim izrazom:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k,$$

kjer je μ_i oblikovni koeficient, C_e koeficient izpostavljenosti in C_t toplotni koeficient. Koeficient μ_i določimo na podlagi opisa nanosa snega za cilindrične strehe iz SIST EN 1991-1-3. Oblika našega nadstreška se približno ujema z obliko cilindra. Priporočene vrednosti oblikovnega koeficienta brez snegobranov so podani z naslednjimi izrazi.

$$\text{Za } \beta > 60^\circ, \quad \mu_i = 0$$

$$\text{Za } \beta \leq 60^\circ, \quad \mu_i = 0,2 + 10h/b \leq 2$$

Za porazdelitev obtežbe snega na konstrukcijo upoštevamo samo obtežni primer (i) s slike 38. Obtežnega primera z nakopičenjem ne bomo upoštevali, saj menimo, da se zaradi oblike konstrukcije kopičenje snega ne bo pojavilo. Membrane, premazane s PVDF oblogo, so namreč izredno gladke, kar onemogoča zadrževanja snega na nagnjeni površini.

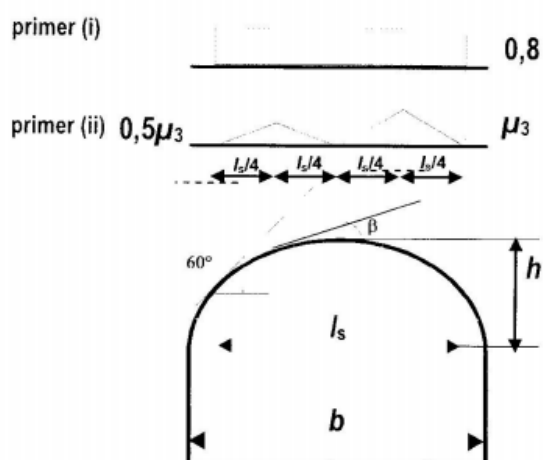
S toplotnim koeficientom C_t , upoštevamo zmanjšanje obtežbe pri strehah z veliko toplotno prevodnostjo. Membrana je toplotno zelo prevodna, vendar naš objekt ni ogrevan, zato upoštevamo priporočeno vrednost $C_t = 1$.

S koeficientom C_e se upošteva stanje okoli objekta. Odvisen je od izpostavljenosti vetra. Naš objekt je dokaj zaščiten pred vetrom, zato privzamemo običajno vrednost $C_e = 1$.

Obtežba snega torej znaša za nenakopičeno stanje:

$$s_n = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,51 = 1,21 \text{ kN/m}^2.$$

Nanos obtežbe snega po konstrukciji je prikazan v poglavju 4.4.2.



Slika 38: Razpored nenakopičenega (i) in nakopičenega (ii) snega na cilindrični strehi (SIST EN 1991-1-3:2004)

Obtežba vetra

Referenčna hitrost vetra za Ljubljano je $v_{b,0} = 20$ m/s (SIST EN 1991-1-4:2005/A101). Smerni faktor $C_{dir} = 1$ in faktor letnega časa $C_{season} = 1$. Obe vrednosti sta priporočeni vrednosti. Torej je osnovna hitrost vetra:

$$v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 20 = 20 \text{ m/s.}$$

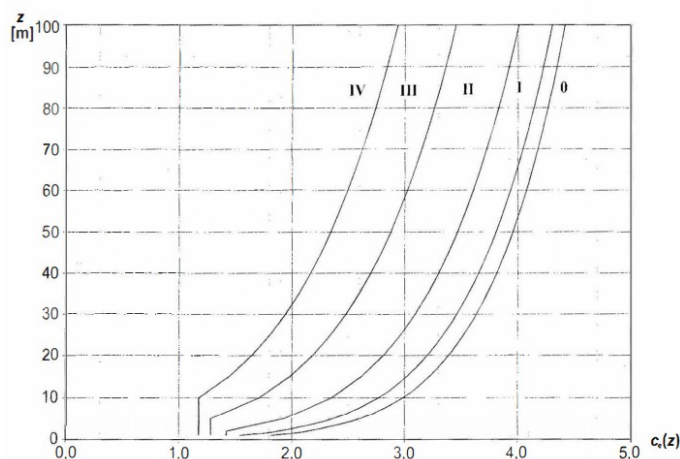
Osnovni tlak vetra q_b tako znaša:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 20^2 = 250 \text{ N/m}^2 = 0,25 \text{ kN/m}^2.$$

Tlak vetra v_k pri največjih hitrosti ob sunkih vetra je:

$$v_k = C_e(z) \cdot q_b = 1,2 \cdot 0,25 = 0,30 \text{ kN/m}^2,$$

kjer je $C_e(z)$ faktor izpostavljenosti in ga odčitamo iz slike 39, glede na kategorijo terena IV .



Slika 39: Diagram faktorja izpostavljenosti (SIST EN 1991-1-4:2004)

Potrebno je še določiti oblikovne koeficiente neto tlakov, ki delujejo na površino membrane $c_{p,neto}$. Ti so odvisni od oblike strehe. Ker Evrokod ne podaja vrednosti za obliko obravnavane strehe, bomo koeficiente določil na podlagi testov opravljenih v vetrnem tunelu, ki nam jih je uspelo najti za podobno obliko. Določitev faktorjev in nanos obtežbe je prikazan v poglavju št. 4.4.2.

4.3.3 Varnostni faktorji

Velika razlika pri dimenzioniranju prednapetih membranskih konstrukcij glede na klasične konstrukcije se opazi tudi pri uporabi varnostnih faktorjev. Evrokod standardi pri projektiranju predpisujejo kontrolo na mejna stanja, katera pa ni v uporabi pri prednapetih membranskih konstrukcijah.

Za kontrolo prednapete membrane princip mejnih stanj ni priporočljiv zaradi velike geometrijske nelinearnosti problema, ki se izraža predvsem pri togosti. Pristop z delnimi varnostnimi faktorji na materialnih karakteristikah in obtežbi ni primerna, ker je oblika membrane močno odvisna od jakosti in porazdelitve obtežbe. Spremembe geometrije membrane so predvsem velike pri neenakomernemu nanosu obtežb. Drugi ključni dejavnik je tudi izrazita nelinearnost materiala, ki se kaže v veliki variaciji karakteristik membran (Forster in sod., 2004). Na podlagi zgornjih trditvah, strokovnjaki priporočajo kontrolo na karakteristične vplive, kjer celotno varnost upoštevamo na materialnih karakteristikah. Kontrola temelji na metodi dopustnih stanj.

Vrednosti varnostnih faktorjev, katero upoštevamo na materialnih karakteristikah se gibljejo med 5 in 7 za natezno trdnost membrane in za jeklene kable okoli 2,5. Pri določitvi teh vrednosti so avtorji upoštevali razne dejavnike, kot so onesnaženje, neenakost materiala, točnost izračuna, velikost konstrukcije, reološke pojave, trajanje in vrsto obtežbe, visoke temperature in še druge dejavnike, ki vplivajo na obnašanje membrane (Forster in sod., 2004).

Posebno pozornost je potrebno nameniti raztrganinam, ki so se izkazale kot eden glavnih vzrokov za porušitve prednapetih konstrukcij. Na podlagi enosnega preizkusa na vzorcu dimenzije 40 cm x 100 cm, pri 4 cm dolgi zarezi pravokotno na obremenjevanje, znaša redukcijski faktor 3 do 4 (Forster in sod., 2004). Priporočena je torej uporaba varnostnega faktorja vsaj 4, da zagotovimo zadostno odpornost proti pretrgu membrane (Forster in sod., 2004).

Pri dimenzioniranju membranskega dela konstrukcije bomo za membrano uporabili varnostni faktor 5, za jeklene robne kable pa 2,5.

Pri dimenzioniranju podpornih elementov, temeljev, jeklenih priključkov in detajlov bomo upoštevali Evrokode za posamezni nosilni sklop. Da bomo pridobili projektne vrednosti vplivov, bomo posamezne kombinacije notranjih sil (ali napetosti) pomnožili z ustreznim varnostnim faktorjem, ki je odvisen od prevladujoče obtežbe. Če prevladuje snežna obremenitev, upoštevamo faktor 1,5, v primeru vetra pa 1,6 (Forster in sod., 2004). Ta varnostna faktorja, sta definirana v nemškem standardu DIN 4134.

Pri dimenzioniranju membrane je potrebno preveriti tudi nosilnost zvarov, saj so to šibka mesta membrane. Za izdelavo bomo uporabili standardni zvar s prekrivanjem obeh tkanin. Obstajajo še drugi načini izvedbe zvarov, ki jih v tem projektu ne bomo uporabljali. Pri preučitvi literature smo ugotovili, da strokovnjaki priporočajo testiranje zvara, ki se ga bo uporabilo za konstrukcijo, saj splošne metode za določitev nosilnosti zvara ne navajajo (Forster in sod., 2004). Nosilnost zvara je predvsem odvisna od kvalitete PVC matrice oziroma adhezije materiala, širine in smeri obremenjevanja. Nekateri testi kažejo, da kvaliteten zvar po postopku visokofrekvenčnega varjenja lahko dosežejo nosilnosti do 90% glede na osnovni material pri sobni temperaturi, pri temperaturi 70°C pa samo do 60% (Seidel, 2009).

Torej nosilnost zvara varira glede na osnovno nosilnost membrane med 60 in 90%. Odločili smo se, da bomo pri analizi upoštevali 70% nosilnost zvarov glede na osnovni material, ločeno za zware v glavni smeri in ločeno za zware v vtokovni smeri membrane.

4.4 Projektiranje membranskega dela konstrukcije

Kot smo že omenili, proces načrtovanja membranskega dela konstrukcije zajema iskanje oblike, nelinearno statično analizo in krojenje membrane. Podroben postopek načrtovanja smo opisali v poglavju št. 3.

4.4.1 Iskanje oblike

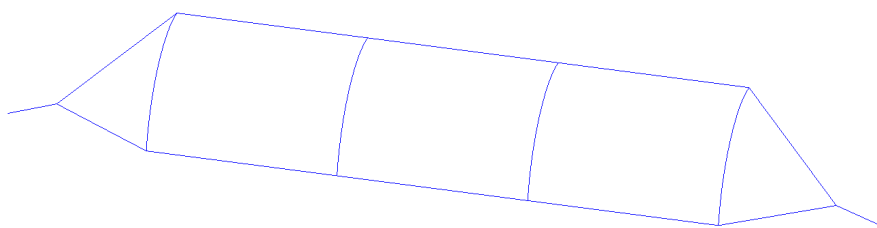
Postopek iskanja oblike smo izvedli s programom MPanela (Meliar design, 2015a), ki deluje kot vmesnik programa Rhinoceros 5 (McNeel, 2015). Iskanje oblike z računalniško opremo v splošnem poteka v treh korakih. Najprej je potrebno definirati vse robne pogoje in točke vpetja. Sledi modeliranje površin/mrež in določitev pozicije kablov. Ko imamo vse pripravljeno, uporabimo za iskanje oblike metodo dinamične relaksacije.

Modeliranje

Na sliki 40 so prikazane podpore membranske konstrukcije. V tlorisu bo konstrukcija zavzela prostor 23 m krat 3,42 m, njena višina pa je 2,89 m. Črte predstavljajo ukrivljene stebre, robni točki pa sta točki vpetja jeklene vrvi. Na sliki 41 smo konstrukciji dodali še robne kable in oba bočna kabla. Pred pripravo mreže ploskovnih elementov moramo paziti, da smo predhodno uporabili prave komponente za modeliranje robnih pogojev. 3D lomljenka (angl. 3D polyline) definira fiksne toge podpore konstrukcije. 3D lomljenka mora biti sestavljena iz enakega števila kontrolnih ali vmesnih točk, kot jih bomo uporabili pri modeliranju mreže. Črta (angl. line) predstavlja kable, jamborje in palice. Če črto uporabimo za jambor ali palico, je potrebno to posebej definirati pred relaksacijo.

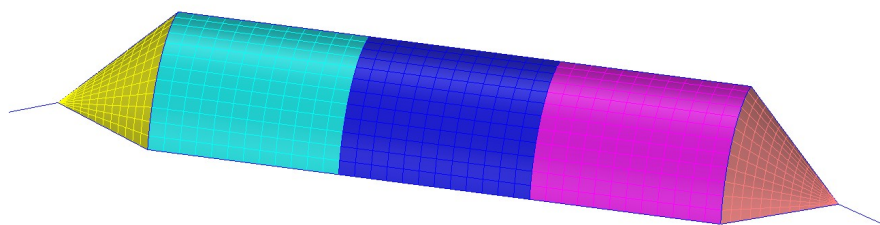


Slika 40: Tloris (levo) in prerez podpor (desno)



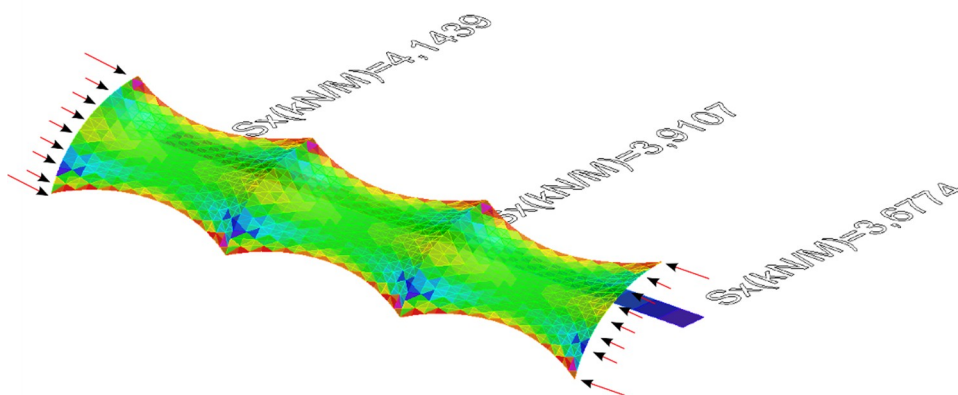
Slika 41: 3D pogled na podpore z dodanimi linijam kablov

Membrano modeliramo z eno ali več mrežami ploskovnih elementov. Vse mreže smo razčlenili v obeh smereh v enakem razmerju $M_{surf} = N_{surf} = 15$, kar pomeni 15 ploskev v M smeri in 15 ploskev v N smeri. Na sliki 42 so prikazane posamezne mreže v različnih barvah.



Slika 42: Model za iskanje oblike

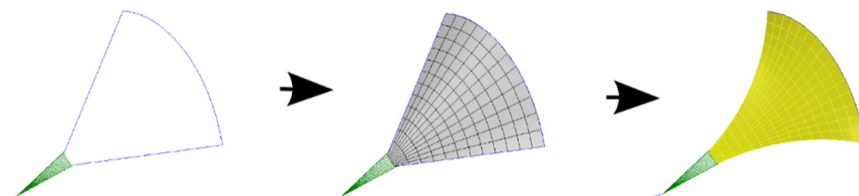
Prvotno smo konstrukcijo načrtovali brez robnih jader. Pri analizi smo dobili velike reakcije na robnih stebrih (slika 43), kar bi močno povečalo prereze teh stebrov oziroma bi jih bilo potrebno dodatno horizontalno podpreti. Pokazala se je tudi težava pri detajlih za priključitev membrane na ukrivljene robne stebre. Priključki pa bi morali imeti tudi funkcijo napenjanja, kar bi občutno podražilo konstrukcijo.



Slika 43: Model brez robnih jader

Težava se je pojavila tudi pri modeliranju robnih jader, saj se jadro proti tlom zaključuje v izrazito koničasto obliko. Problem nastane, ker program pri iskanju oblike uporabi mrežo pravokotne oblike.

Po navodilih proizvajalca MPanel se je potrebno izogibati koničastim oblikam, saj v tem primeru ni nujno, da bo najdena oblika tudi prava. V takih primerih priporočajo izdelavo mreže na ročni način na območjih konic z uporabo funkcije linkov (Meliar design, 2015a), ki je sestavljena z zelenimi črtami na sliki 44. Sedaj smo zagotovili robne pogoje za izdelavo mreže, ki ima štiri stranice (slika 44, modra črta). Na sliki 44 je prikazan potek izdelave modela z uporabo linkov.

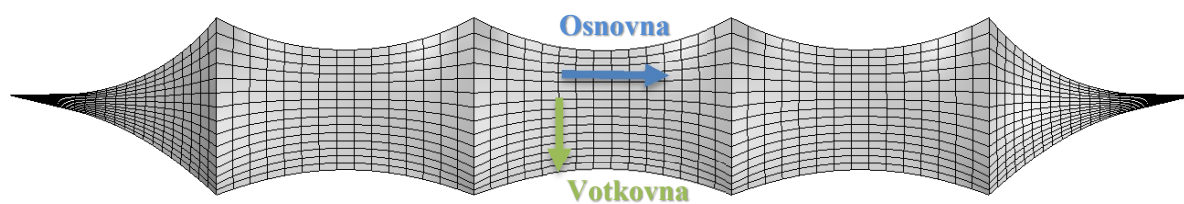


Slika 44: Relaksacija robnih jader z uporabo linkov (v zeleni barvi)

Iskanje oblike

Iskanje oblike v programu MPanela poteka po algoritmu CSA (angl. constant stress algorithm) oziroma po metodi dinamične relaksacije. Algoritem poišče takšno obliko membrane, pri kateri so vse napetosti v vsaki točki membrane v vseh smereh enake. Rezultati so podobni, kot jih da eksperimentalni preizkus z milnico (Meliar design, 2015a).

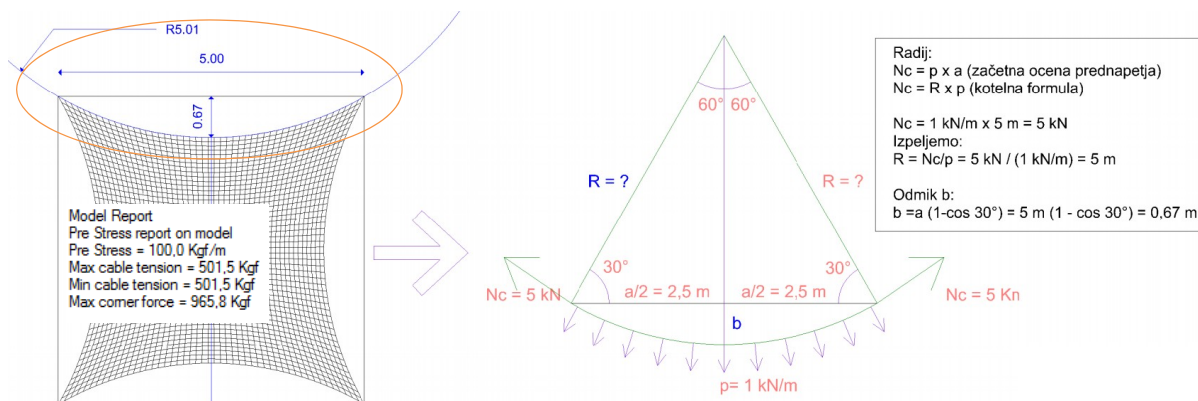
Pred relaksacijo mreže je potrebno določiti, potek osnovnih vlaken. V našem primeru potekajo vzdolž konstrukcije (slika 45). Definirati moramo tudi razmerje prednapetja. Izbrali smo razmerje $k_p = 1$, kar pomeni enakost prednapetja v votkovni in osnovni smeri. Z izbranim razmerjem, izkoristimo nosilnost membrane v obeh smer, kar zagotavlja optimalno izkoriščenost materiala, glede na nosilnost. Spreminjanje razmerja parametra, je predvsem izrazito pri membranah konusne oblike, kjer se sprememba pokaže na vizualnem izgledu.



Slika 45: Potek osnovnih in votkovnih vlaken po konstrukciji

Podati je potrebno tudi razmerje prednapetja robnih kablov, ki je v našem primeru enako $k_c = 1$. To pomeni, če razložimo na primeru z silami; če predpostavimo prednapetje v membrani 1 kN/m, ki je pritrjena na robni kabel dolžine 5 m, program pri iskanju oblike upošteva prednapetje robnega kabla v velikosti 5 kN, kar je enako $1 (k_c) \times 1 \text{ kN/m} \times 5 \text{ m} = 5 \text{ kN}$. Če bi uporabili $k_c = 2$ pri enakem prednapetju membrane, bi ta upošteval začetno prednapetje kabla v velikosti 10 kN, kar je $2 (k_c) \times 1$

$\text{kN/m} \times 5 \text{ m} = 5 \text{ kN}$. Gre za grobo začetno oceno prednapetja robnih kablov pri relaksaciji modela, zato je posledično potrebno mrežo večkrat relaksirati (MPanel, 2015a). Torej koeficient opisuje dodatno prednapetje robnih kablov, s čimer povečujemo radij ukrivljenosti robnega kabla. Na sliki 46 (levo) je prikazana primer jadra dimenzije $5 \times 5 \text{ m}$, v katerega smo vnesli prednapetje v membrano 100 Kg/m . Program oceni prednapetje v robnem kablu na $501,5 \text{ Kg}$ pri razmerju $k_c = 1$, ter odmik $0,67 \text{ m}$. Velikost količine Kg (kilogram force) je enaka količini kg (kilogram). Na sliki 46 (desno) je problem prikazan na analitični način, kjer izračunamo enak odmik $b = 0,67 \text{ m}$.

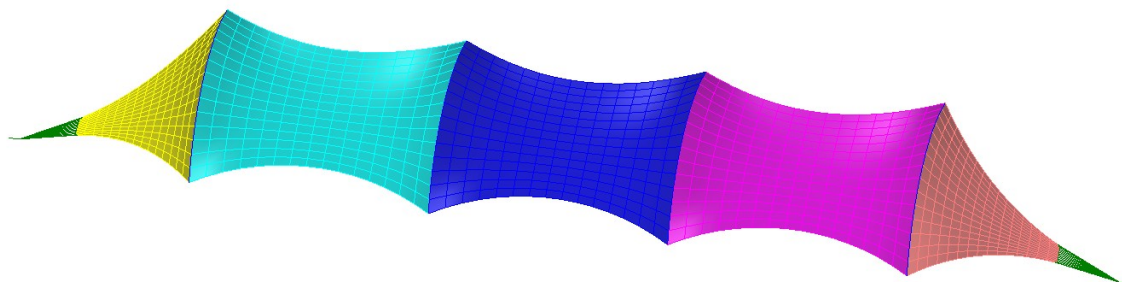


Slika 46: Prikaz določitve robne linije kabla

Model je potrebno sedaj še relaksirati toliko časa, dokler ne dosežemo napake manjše od $0,0002$, ki jo priporoča razvijalec. V postopku relaksacije program opravi več sto iteracij, da doseže manjšo napako od zahtevane. Na slikah 47 in 48 je prikazano poročilo o relaksaciji in izračunana oblika, ki je osnova za nadaljnjo statično analizo.

```
Relaxing joined edge mesh  
found 5 meshes and 62 lines and 6 3Dpolys  
modeled with 1406 nodes and 2462 links  
average warp spacing =0,281623  
average weft spacing =0,166588  
average cable tension =4,922381  
Iteration 251 residual 0,00001293127
```

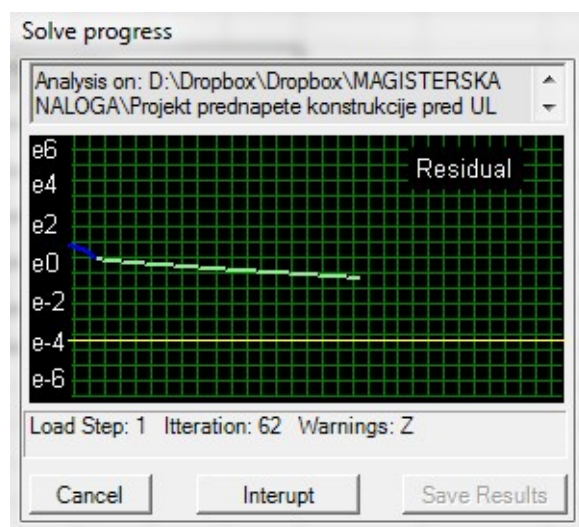
Slika 47: Poročilo o iskanje oblike, kjer preverimo končno napako



Slika 48: Končna oblika membrane, ki je primerna za statično analizo

4.4.2 Statična analiza membranskega dela

Kot smo že omenili, je statična analiza prednapetih membranskih konstrukcij zahtevna naloga, saj gre za analizo, kjer se pojavljajo veliki pomiki in deformacije, kar pomeni obvezno uporabo programov, ki omogočajo nelinearne analize. Za analizo našega primera smo uporabili program MPanela FEA, ki predhodno relaksirani model pretvori v model za analizo s končnimi elementi. Analiza poteka iterativno. Obtežba se nanaša postopoma, v posameznih manjših inkrementih. Za vsak inkrement se iterativno išče rešitev. V vsaki iteraciji program reši sistem linearnih enačb (slika 49). Pri linearni statični analizi lahko rezultate posameznih vplivov kombiniramo po končanem izračunu, medtem ko pri nelinearni analizi to ni mogoče. Zato je ključno, da pred analizo določimo ustrezne kombinacije vplivov. Ključna je tudi dobra ocena stopnje začetnega prednapetja in uporaba pravih karakteristik materialov.



Slika 49: Potek analize v več iteracijah

4.4.2.1 Nanos obtežb in kombinacije

Prednapetje

Kot smo že omenili, je jakost prednapetja odvisna od ukrivljenosti in obtežbe. Za oceno prednapetja bi lahko v osnovi uporabili kotelno formulo, ki bi nam pokazala približno vrednost potrebnega prednapetja, vendar se pojavi težava zaradi različnih porazdelitev obtežb ter kombinacij. Prednapetje smo zato določili na podlagi več analiz, kjer smo preverjali morebitna gubanja membrane, ki so posledica premajhnega prednapetja. Seveda je potrebno paziti tudi, da prednapetje ni preveliko, kar bi posledično pomenilo uporabo membrane boljših karakteristik in močnejšo podkonstrukcijo, ki bi lahko prenesla obremenitve.

Najnižji nivo prednapetja naj bi bila 1,3% nosilnosti PET/PVC membran. Glede najvišjega prednapetja v membrani pa viri priporočajo različne jakosti. Forster in sodelavci omenjajo prednapetja od 2 kN/m do 5 kN/m, V Evropskem priročniku pa navajajo, da naj bi se prednapetje gibalo nekje od 2% do 6% nosilnosti membrane.

Na koncu smo se odločili za prednapetje v velikosti $g_{m,pr} = 3$ kN/m, ki je zadovoljevalo naše zahteve. Dopuslili smo manjša lokalna gubanja pri nekaterih kritičnih obtežnih kombinacijah.

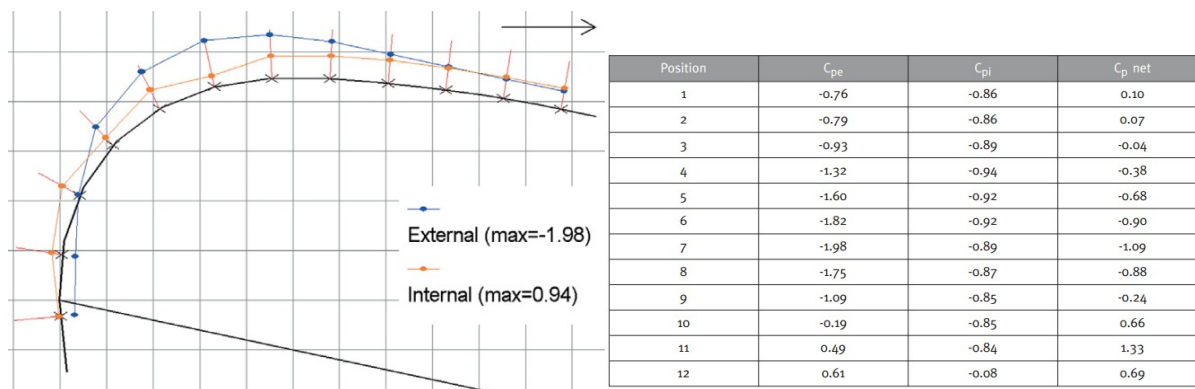
Enakomerni srk vetra

Pri prvem obtežnem primeru smo po lastni presoji odločili vrednost oblikovnega koeficienta za srk $c_{p,net,s}$. Ta obtežna kombinacija ponazarja enakomerni srk vetra v_s po celotni površini, kjer obtežba deluje pravokotno na površino membrane. Karakteristično vrednost vetrne obtežbe v_k smo določili v poglavju št. 4.3.2. Upoštevali smo jo pri vseh obtežnih primerih z vetrom.

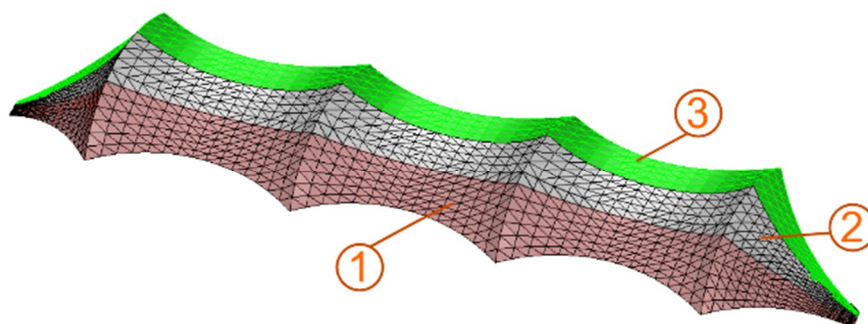
$$c_{p,net,s} = 1,2; v_s = c_{p,net,s} \cdot v_k = 1,2 \cdot 0,3 = 0,36 \text{ kN/m}^2.$$

Veter s sprednje strani

Uspeli smo pridobiti koeficiente za notranje $c_{pi,i}$ in zunanje tlake $c_{pe,i}$ konstrukcije podobne oblike (Forster in sod., 2004), saj v tem primeru koeficienti, ki so podani v Evrokodu, ne pridejo v poštev. S seštetjem koeficientov notranjih in zunanjih tlakov smo določili neto vrednost koeficienta $c_{p,net,fi}$. Za analizo smo koeficiente prilagodili tako, da smo razbrane vrednosti neto koeficientov tlakov razdelili na tri območja, kjer smo za posamezno območje določili vrednosti neto koeficiente tlakov. Na sliki 50 je prikazana razdelitev modela na tri območja (levo) ter izmerjene vrednosti (desno). Na sliki 51 so prikazane posamezne cone, za našo obravnavano konstrukcijo.



Slika 50: Koeficienti tlakov pri delovanju vetra iz sprednje strani prikazani na grafični način (levo), ter izmerjene vrednosti (desno) (Forster in sod., 2004)



Slika 51: Nanos obtežbe po membrani za obtežni primer veter s sprednje strani

Pri določitvi koeficientov neto tlakov $c_{p,net,fi}$ za našo konstrukcijo smo upoštevali tiste vrednosti, ki vplivajo bolj neugodno na konstrukcijo, s čimer zagotovimo večjo varnost konstrukcije.

$$c_{p,net,f1} = 1,1; v_{f1} = c_{p,net,f1} \cdot v_k = 1,1 \cdot 0,30 = 0,33 \text{ kN/m}^2,$$

$$c_{p,net,f2} = -0,95; v_{f2} = c_{p,net,f2} \cdot v_k = -0,95 \cdot 0,30 = -0,29 \text{ kN/m}^2,$$

$$c_{p,net,f3} = -0,4; v_{f2} = c_{p,net,f3} \cdot v_k = -0,4 \cdot 0,30 = -0,12 \text{ kN/m}^2.$$

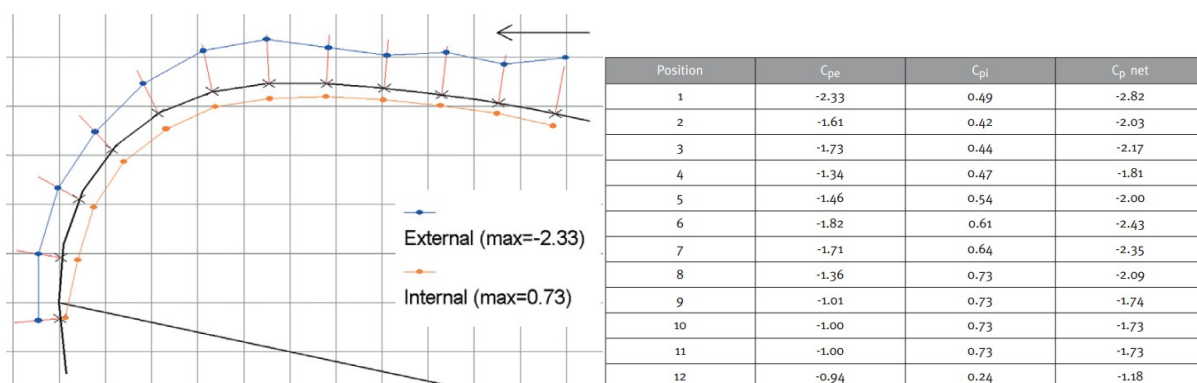
Razlaga količin v enačbah:

$c_{p,net,fi}$... koeficient neto tlaka za območje i

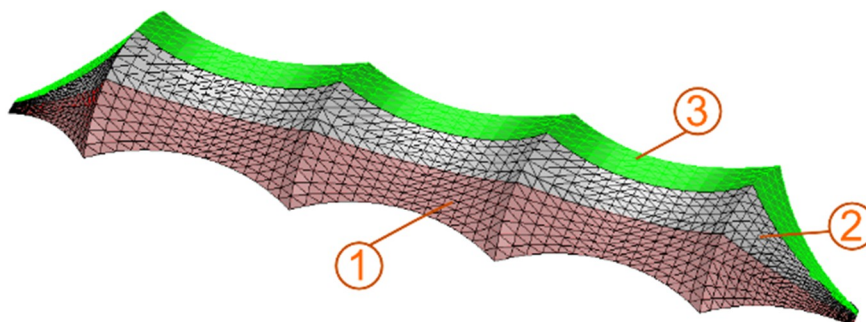
v_{fi} ... karakteristična obtežba, za veter iz sprednje strani za območje i

Veter z zadnje strani

Na enak način, kot za obtežbo vetra s sprednje strani, smo določili koeficiente zunanjih in notranjih tlakov za obtežbo vetra z zadnje strani (slika 52 in 53).



Slika 52: Koeficienti tlakov pri delovanju vetra iz zadnje strani prikazani na grafični način (levo), ter izmerjene vrednosti (desno) (Forster in sod., 2004)



Slika 53: Nanos obtežbe po membrani za obtežni primer veter z zadnje strani

$$c_{p,net,b1} = -1,7; v_{b1} = c_{p,net,b1} \cdot v_k = -1,7 \cdot 0,30 = -0,51 \text{ kN/m}^2,$$

$$c_{p,net,b2} = -2,3; v_{b2} = c_{p,net,b2} \cdot v_k = -2,3 \cdot 0,30 = -0,69 \text{ kN/m}^2,$$

$$c_{p,net,b3} = -2,2; v_{b3} = c_{p,net,b3} \cdot v_k = -2,2 \cdot 0,30 = -0,66 \text{ kN/m}^2.$$

Razlaga količin v enačbah:

$c_{p,net,bi}$... koeficient neto tlaka za območje i

v_{bi} ... karakteristična obtežba, za veter iz sprednje strani za območje i

Sneg

Kot smo že omenili v poglavju 4.3.2, kjer smo določili karakteristično obtežbo snega s_n , kombinacije s kopičenjem v analizi nismo upoštevali.

$$s_n = 1,21 \text{ kN/m}^2.$$

Obtežne kombinacije vplivov

Pri določitvi obtežnih kombinacijah upoštevamo kombinacijske faktorje ψ_0 skladno s SIST EN 1990-1-1. Ker v vseh primerih prevladuje obtežba s snegom, bomo za kombinacijski faktor za veter upoštevali vrednost $\psi_0 = 0,6$. Kot smo omenili v poglavju 4.3.3 upoštevamo pri analizi membranskega dela karakteristične vrednosti vplivov pomnožene z ustreznim kombinacijskim faktorjem. Varnosti faktorji so v celoti aplicirani le na materialnih karakteristikah. V preglednici 1 so prikazane kombinacije vplivov in kombinacijski faktorji, ki jih bomo uporabili pri dimenzioniranju membrane in kablov.

Preglednica 1: Kombinacije vplivov s kombinacijskimi faktorji

Vplivi	Kombinacije vplivov						
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
prednapetje [$g_{m,pr}$]	1	1	1	1	1	1	1
veter srk [v_s]		1			0,6		
veter spredaj [v_f]			1			0,6	
veter zadaj [v_b]				1			0,6
sneg [s_n]	1				1	1	1

4.4.2.2 Rezultati analize

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati analiz za posamezne obtežene kombinacije. Prikazani so pomiki, sile v glavni in votkovni smeri, maksimalne sile, reakcije sidrišč in sile v posameznih kabljih.

Negativni vertikalni pomik ima smer gravitacije. Pri vseh analizah so se pojavljale koncentracije sil pri levem in desnem vpenjanje obeh jader, kar je posledica modeliranja mreže na ročni način in formiranja trikotnih končnih elementov, ki imajo na teh območjih koničasto obliko. Sile v teh območjih zanemarimo, saj bomo v teh predelih uporabili kotne detajle za pritrjevanje membrane, kateri omogočajo enakomeren raznos sil. Na sliki 54 so prikazane pozicije posameznih polj za lažje opisovanje rezultatov.

Legenda za branje rezultatov:

d_z ...vertikalni pomiki membrane v metrih (Disp),

n_x ...sile v osnovni smeri membrane v kN/m (S_x),

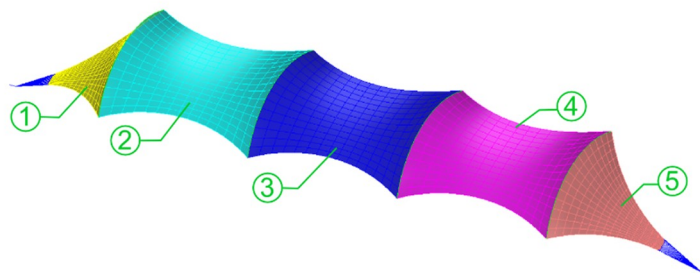
n_y ...sile v votkovni smeri membrane v kN/m (S_y),

R ...reakcije v smeri delovanja reakcije v kN (R),

F_c ...osne sile v robnih kablji v kN (T),

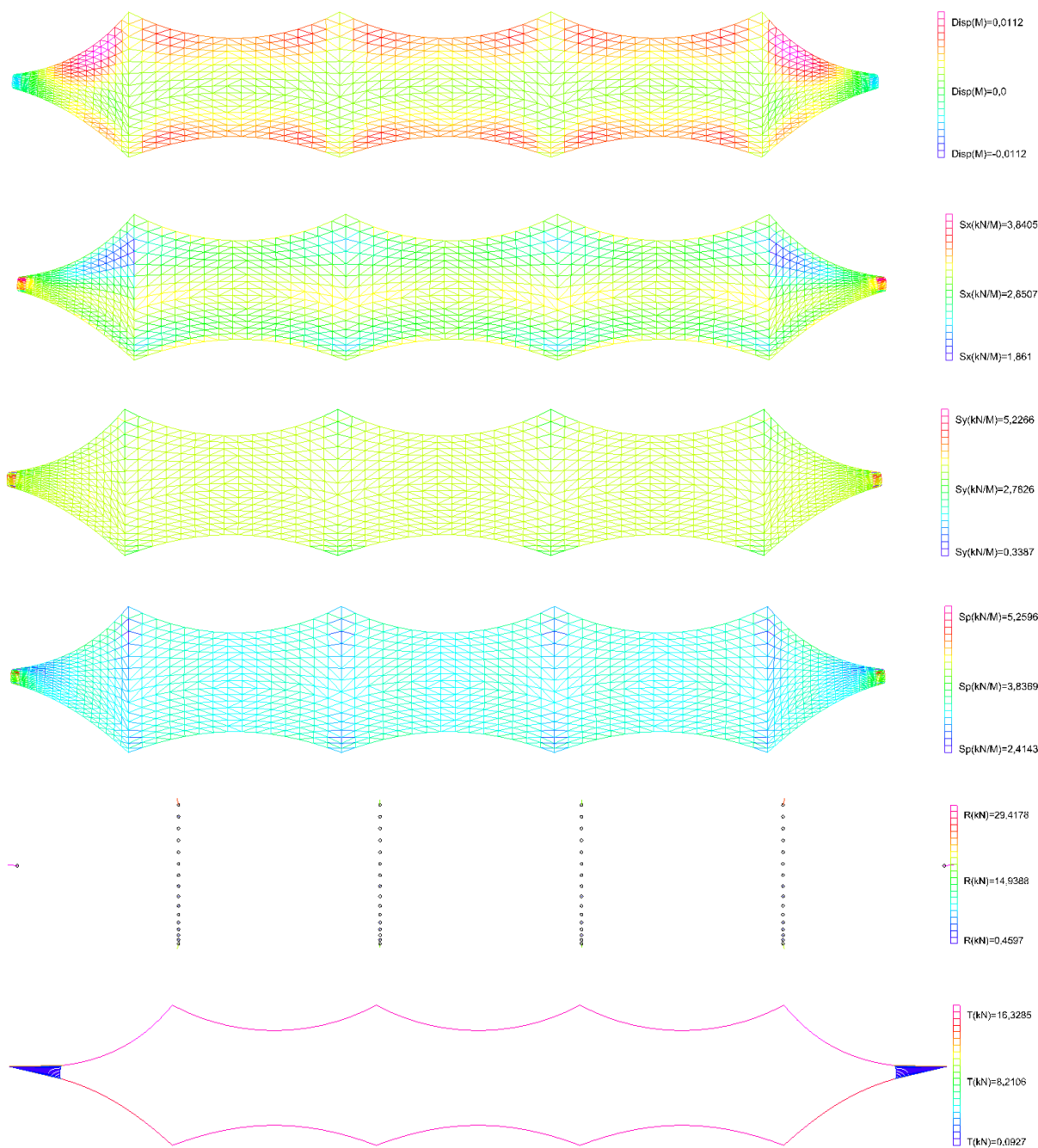
n_p ... maksimalne napetosti v kN/m (Sp),

n_{p2} ... minimalne napetosti v kN/m (Sp2).



Slika 54: Pozicije posameznih polj za opisovanje rezultatov statične analize

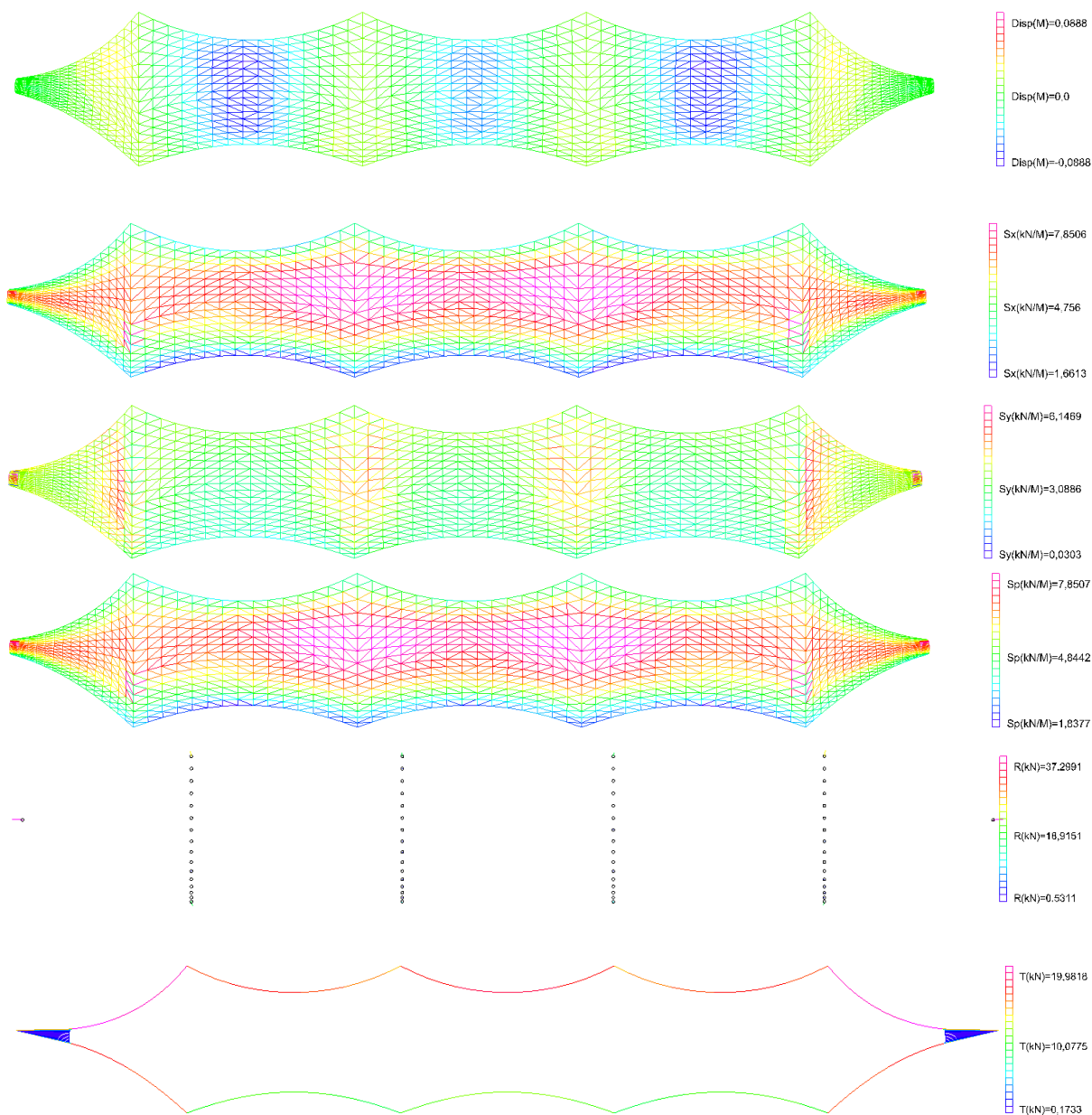
Prednapetje



Slika 55: Pomiki, sile in reakcije pri prednapetju 3 kN/m

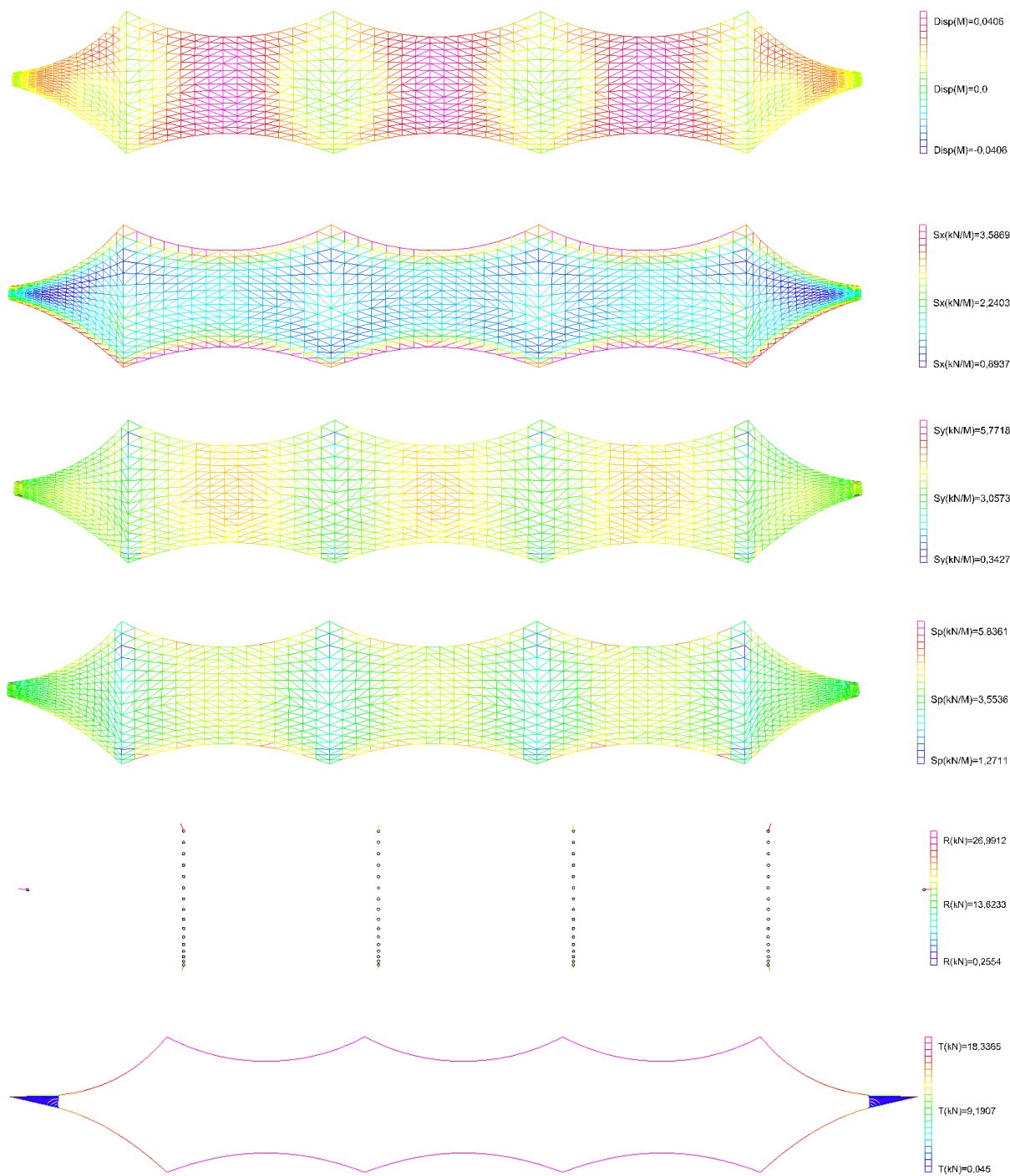
Pri pregledu pomikov ugotovimo, da je model v fazi iskanje oblike bil dovolj dobro relaksiran, saj se pri vnosu prednapetja pojavijo majhni pomiki. Skladno z manjšo spremembo oblike membrane in razgibanimi robnimi pogoji dobimo v začetni fazi napetosti, ki se gibljejo med 2 in 3 kN/m. Največje reakcije se pričakovano pojavijo na obeh robnih sidriščih $R = 29,4$ kN. V fazi prednapetja so najbolj obremenjeni kabli v glavnih poljih, saj so na teh mestih najdaljši, kar posledično povzroča največje sile v njih $F_c = 16,33$ kN. Zgornje obtežno stanje ni merodajno za dimenzioniranje, vendar s prikazom rezultatov želimo preveriti, da je model dobro zastavljen in primeren za nadaljnjo analizo.

Kombinacija 1: prednapetje + sneg



Slika 56: Pomiki, sile in reakcije pri obtežni kombinaciji 1

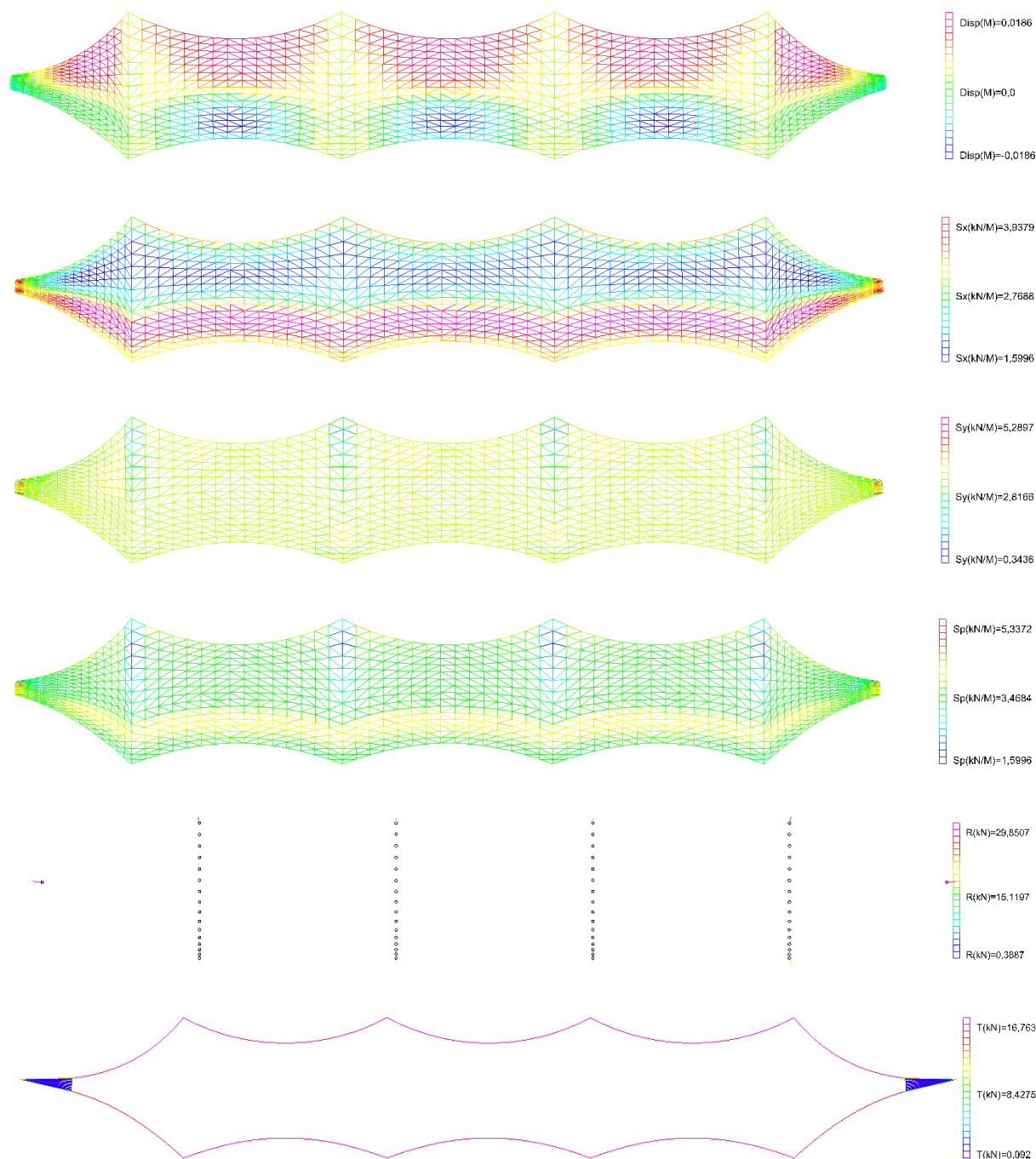
Pri kombinacij z obtežbo snega se največji pomiki pojavijo v prvem in drugem polju $d_z = 8,9$ cm. Pomiki so dokaj majhni, kar je posledica višjega začetnega prednapetja, kot smo ga prvotno načrtovali. Največje sile v membrani so: v glavni smeri nad sredinskima lokoma $n_x = 7,85$ kN/m in v vtokovni smeri nad stranskima lokoma $n_y = 6,15$ kN/m. Največje sile v robnih kabljih se pojavijo v polju ena in pet na zgornjem robu $F_c = 19,98$ kN/m.

Kombinacija 2: prednapetje + srk vetra

Slika 57: Pomiki, sile in reakcije pri obtežni kombinaciji 2

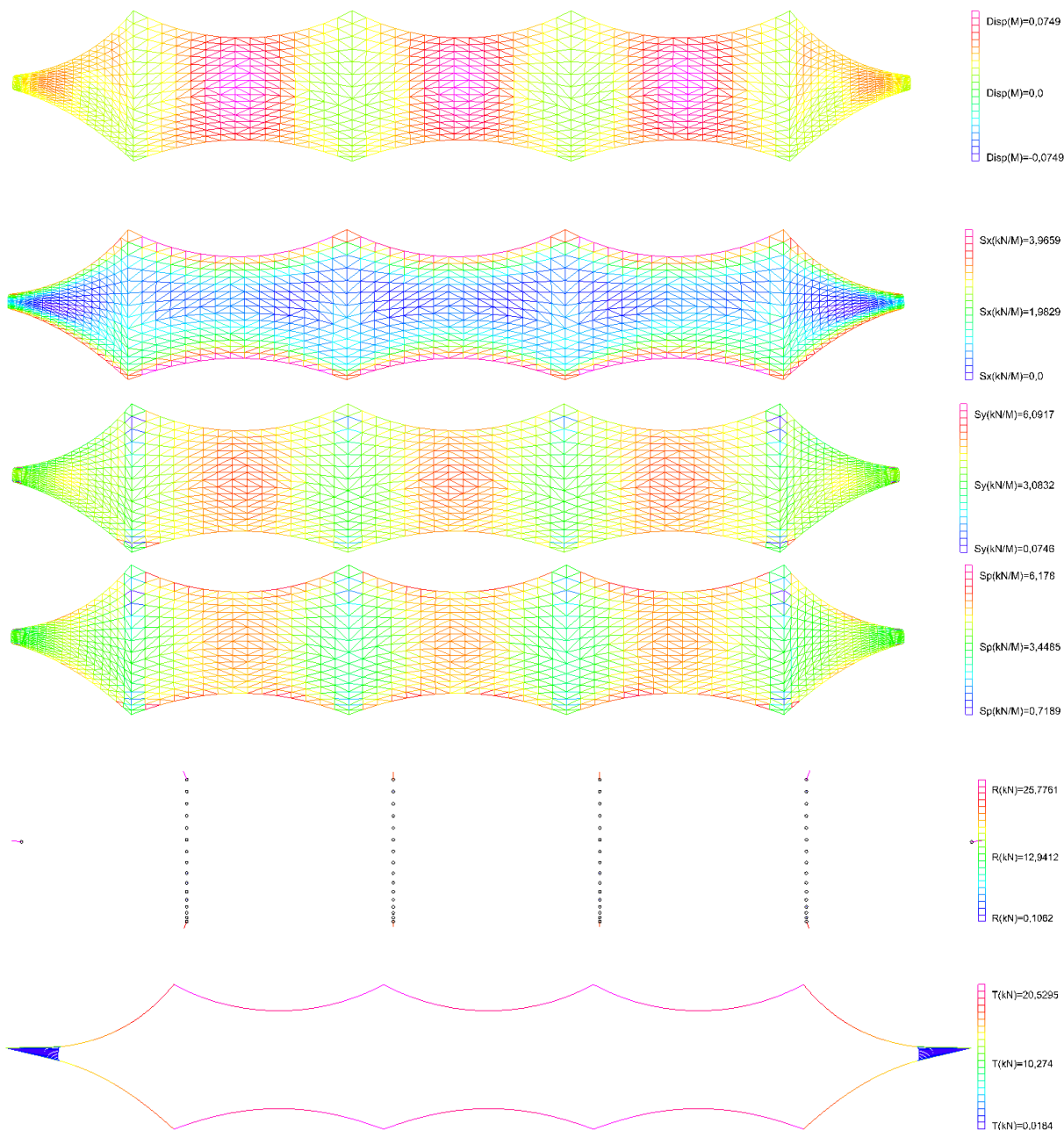
Pri kombinacij z enakomernim srkom vetra so pričakovano največji pomiki v drugem, tretjem in četrtem polju $d_z = 4,1$ cm. Največje sile v membrani se pojavijo v vtokovni smeri na sredini polj $n_y = 4,98$ kN/m. Zanimivo je tudi, da je koncentracija sile v osnovni smeri v okolici robnih kablov $n_x = 3,59$ kN/m, kar je posledica prenosa obtežbe iz vtokovne smeri na robne kable. Največje sile v robnih kabliah se pojavijo v treh sredinskih poljih $F_c = 18,34$ kN/m.

Kombinacija 3: prednapetje + veter spredaj



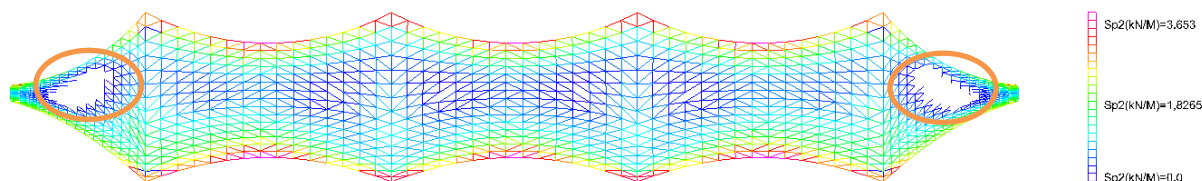
Slika 58: Pomiki, sile in reakcije pri obtežni kombinaciji 3

Pri kombinaciji, kjer smo upoštevali veter spredaj, dobimo največje pomike v polju ena in pet $d_z = 1,9$ cm. Največje sile v membrani so pojavijo v votkovni smeri na sredini polj $n_y = 4,24$ kN/m. V glavni smeri pa se ekstremi pojavijo na dnu, kar je razumljivo, saj so na spodnjem območju tlaki najvišji $n_x = 3,94$ kN/m. Pri danem primeru se največje sile v kabljih pojavijo na spodnjem robu treh sredinskih polj $F_c = 16,76$ kN/m.

Kombinacija 4: prednapetje + veter zadaj

Slika 59: Pomiki, sile in reakcije pri obtežni kombinaciji 4

Membrano pri tej kombinaciji močno dviguje zaradi visokega notranjega tlaka, kar povzroči vertikalne pomike do $d_z = 7,5$ cm. Največje napetosti se zopet pojavijo v votkovni smeri na sredini polj $n_y = 6,09$ kN/m. V glavni smeri se membrana močno razbremeni, kar je posledica notranjih tlakov, le na robovih kablov se pojavijo večje napetosti $n_x = 3,97$ kN/m. Pričakovano so robni kabli v večjih poljih najbolj obremenjeni, saj prevzemajo največje sile iz votkovne smeri $F_c = 20,53$ kN/m.

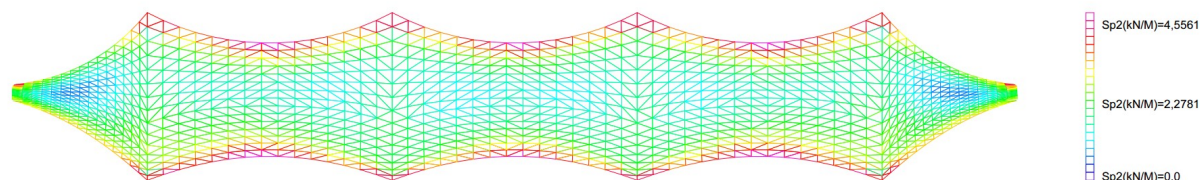


Slika 60: Minimalne napetosti pri kombinaciji 4 nakazujejo lokalna gubanja

Zaradi močnih srkov vetra se pojavijo lokalne nične napetosti, kar pomeni, da se bo membrana na teh mestih gubala, saj nima sposobnosti prevzema tlačnih obremenitev (slika 60, označeno z oranžno).

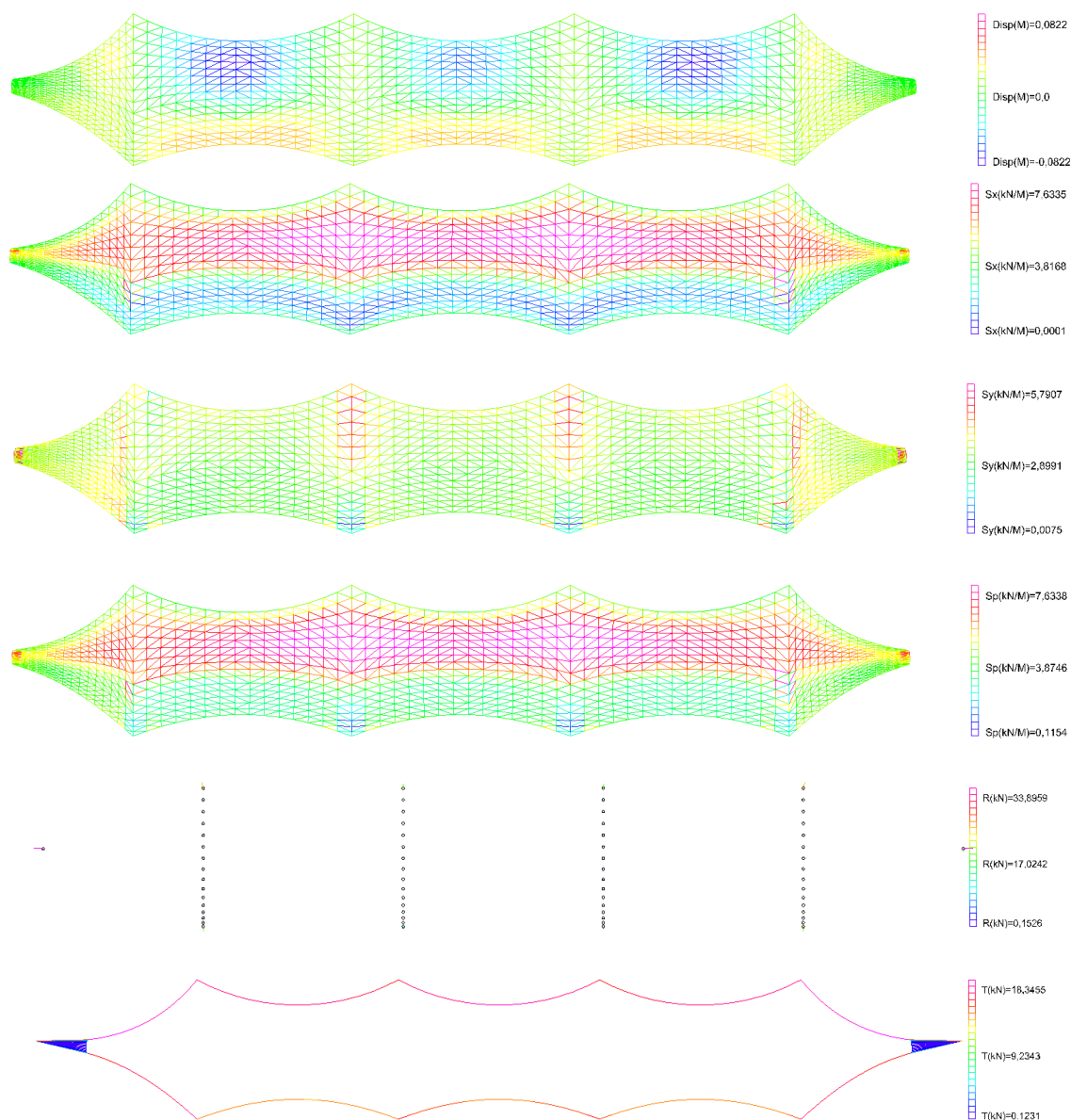
Površina gubanja je približno velika 1 m^2 .

Težavo bi najlažje rešili z vnosom večjega prednapetja, kar smo tudi preizkusili in ugotovili, da bi bilo potrebno prednapetje povečati na minimalno $4,2 \text{ kN/m}$, kar je prikazano na sliki 61.



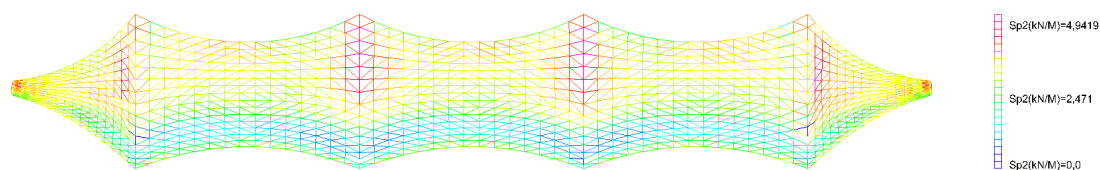
Slika 61: Prikaz minimalnih napetosti v membrani pri $4,2 \text{ kN/m}$ prednapetju

Vendar lahko rečemo, da so obtežbe zaradi srka velike, saj so koeficienti neto tlakov $c_{p,net,b}$ ekstremni, saj segajo do $-2,3$. Poleg tega bo konstrukcija postavljena v zavetrju, ki ga nudi stavba fakultete za gradbeništvo, zato menimo, da do pojava manjših lokalnih gubanj zaradi srka vetra ne bo prišlo. Tudi če se bodo pri visokih sunkih vetra pojavila gubanja, s tem ne bo ogrožena stabilnost konstrukcije.

Kombinacija 5: prednapetje + sneg + 0,6 srk vetra

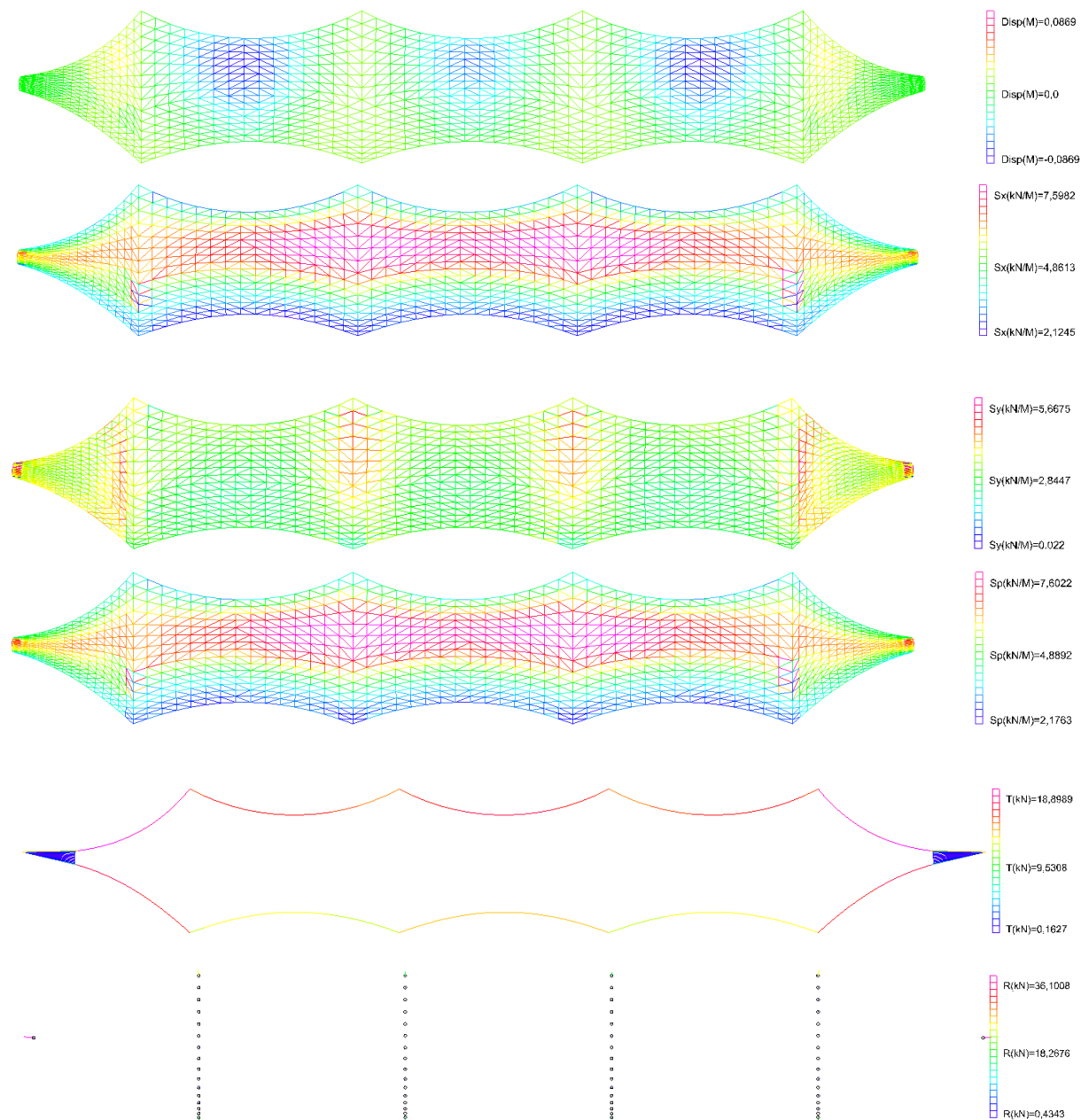
Slika 62: Pomiki, sile in reakcije pri obtežni kombinaciji 5

Pri kombinaciji snega in srka vetra dobimo na sredini polj vertikalne pomike $d_z = 8,2$ cm. Največje napetosti nastopijo nad sredinskim podporniki, v glavni smeri $n_x = 7,63$ kN/m in v vtokovni smeri $n_y = 5,79$ kN/m. Zopet so najbolj obremenjeni zgornji robni kabli $F_c = 18,34$ kN/m. Na spodnjem robu konstrukcije se v glavni smeri prednapetje skorajda izniči, vendar ni nevarnosti gubanja (slika 63).



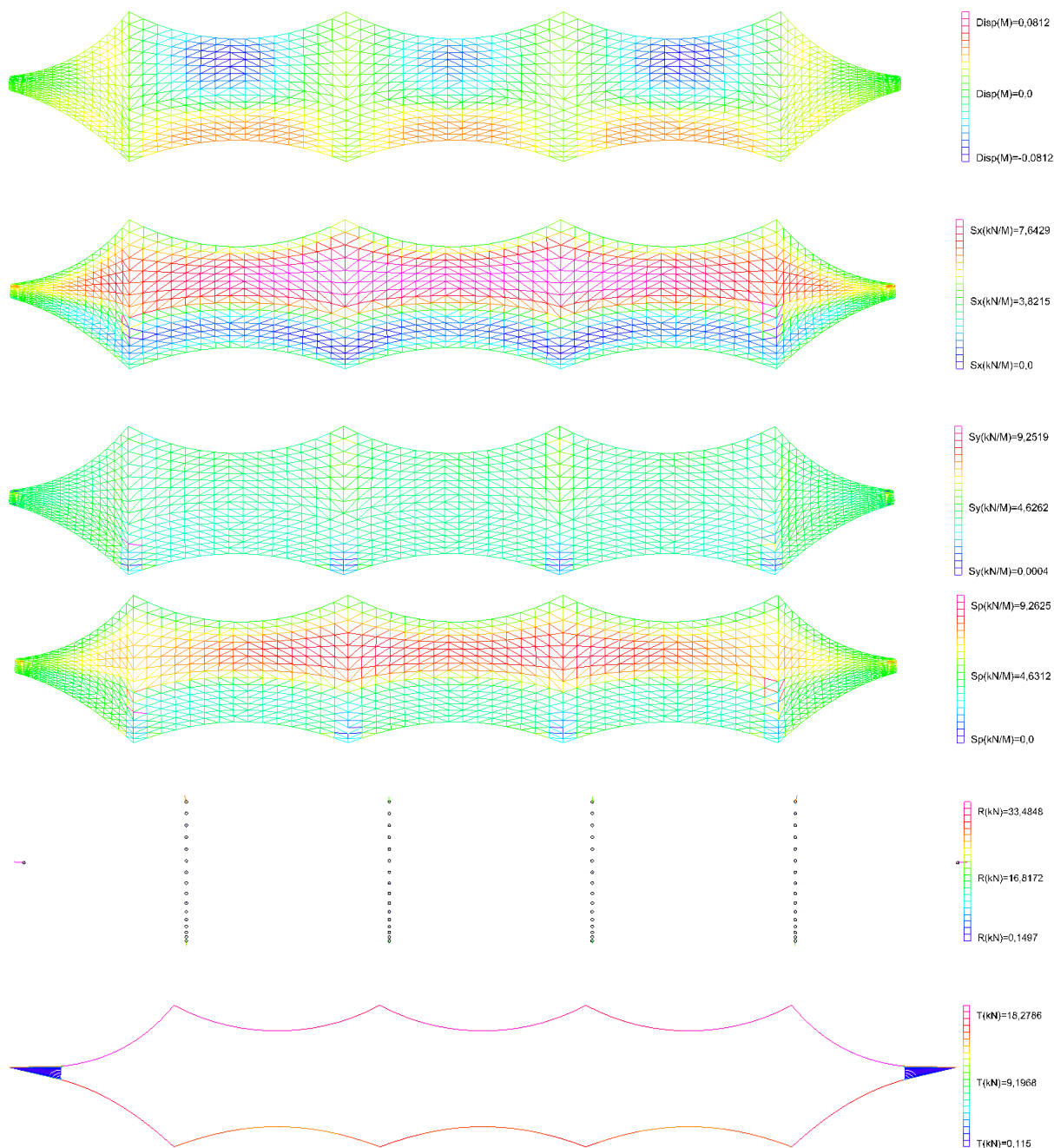
Slika 63: Minimalne napetosti pri kombinaciji 5

Kombinacija 6: prednapetje + sneg + 0,6 veter spredaj



Slika 64: Pomiki, sile in reakcije pri obtežni kombinaciji 6

Pri kombinaciji snega in vetra spredaj se na zgornjem delu polj pojavijo pomiki $d_z = 8,7$ cm. Največje napetosti nastopijo nad sredinskima podpornikoma $n_x = 7,60$ kN/m in v votkovni smeri $n_y = 5,67$ kN/m. Največji sili nastopita v zgornjem kablu v prvem in zadnjem polju $N_c = 18,90$ kN/m. Pri podanem obtežnem primeru ni prišlo do ničnih napetosti.

Kombinacija 7: prednapetje+ sneg + 0,6 veter zadaj

Slika 65: Pomiki, napetosti in reakcije pri obtežni kombinaciji 7

Zaradi delovanja srka se na spodnjem robu pojavijo dvigi, na zgornjem delu pa posedki $d_z = 8,1$ cm. Največje napetosti nastopijo nad sredinskima podpornikoma $n_x = 7,64$ kN/m in v votkovni smeri $n_y = 5,03$ kN/m. V spodnjem delu membrane se prednapetje zniža, kar pa ne povzroča gubanje membrane. Najbolj obremenjeni so zgornji kabli $F_c = 18,28$ kN/m.

4.4.2.3 Kontrola rezultatov in dimenzioniranje membranskega dela konstrukcije

V preglednici 2 so prikazani rezultati sil za dimenzioniranje membranskega dela konstrukcije. Iz vsake kombinacije smo izpisali merodajne vrednosti za dimenzioniranje, na podlagi katerih bomo preverili nosilnost membrane in jeklenih robnih kablov. V preglednici 2 zeleno barvo so označene maksimalne napetosti.

Preglednica 2: Rezultati sil v membrani in kablji, za dimenzioniranje

Kombinacija vplivov	Membrana		Robni kabli
	Napetosti v osnovni smeri n_x [kN/m]	Napetosti v vtokovni smeri n_y [kN/m]	Sile v kablju F_c [kN]
K1: prednapetje + sneg	7,85	6,15	19,98
K2: prednapetje + veter srk	3,59	4,98	18,34
K3: prednapetje + veter spredaj	3,94	4,24	16,76
K4: prednapetje + veter zadaj	3,97	6,09	20,53
K5: prednapetje + sneg + 0,6 veter srk	7,63	5,79	18,34
K6: prednapetje + sneg + 0,6 veter spredaj	7,60	5,67	18,90
K7: prednapetje + sneg + 0,6 veter zadaj	7,64	5,03	18,28

Največje napetosti v membrani povzročajo snežna obremenitev, kar je po svoje logično, saj ima najvišjo jakost, kljub temu, da deluje vertikalno samo na tlorisni površini konstrukcije. Pri primerjavi obtežnih kombinacij za različne smeri in obtežbe vetra dobimo zelo podobne rezultate iz vidika napetosti. Obtežna primera veter zadaj in spredaj smo nanegli v treh conah, srk vetra pa enakomerno po celotni membrani. Za dano konstrukcijo lahko rečemo, da če bi upoštevali le obtežbo enakomernega srka vetra, ne bi naredili velike napake.

Največja sila v kablju se pojavi pri obtežni kombinaciji štiri, kar je zelo zanimivo, saj dobimo največje napetosti v vtokovni smeri pri kombinaciji snežne obremenitve. Čeprav ni velike razlike, le 0,55 kN, je zadeva razumljiva, saj so v sredinskih poljih pri obtežbi snega napetosti v vtokovni smeri manjše, kot je prikazano v preglednici 2, saj smo to silo razbrali iz predela robnega jadra.

Kontrola nosilnosti membrane

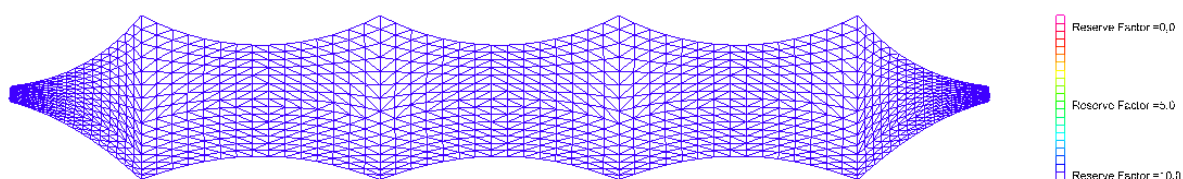
Potrebno je preveriti nosilnost membrane in kablov. Pričakovano je membrana iz vidika nosilnosti predimenzionirana oziroma je njena projektna nosilnost višja od napetosti, ki smo jih dobili v analizi. Enako velja za robne kable, ki zadovoljijo projektni varnosti. Robnim kablom bi lahko zmanjšali prerez, vendar zaradi konstrukcijskih razlogov oziroma pojava zarezne učinka kabla, ki bi lahko poškodoval membrano, prerezov kablov ne spreminjamo. Spodaj so predstavljene projektne nosilnosti membrane v glavni in vtokovni smeri ter robnih kablov. Na slikah 66 in 67 je prikazana dosežena

vrednost varnostnega faktorja po posameznem območju za membrano pri obtežni kombinaciji 1 in za robne kable pri obtežni kombinaciji 4.

Določitev projektne nosilnosti membrane v osnovni $n_{x,Rd}$ in vtokovni $n_{y,Rd}$ smeri:

$$n_x \leq n_{x,Rd} = \frac{f_{u,x}}{5} = \frac{86}{5} = 17,2 \text{ kN/m},$$

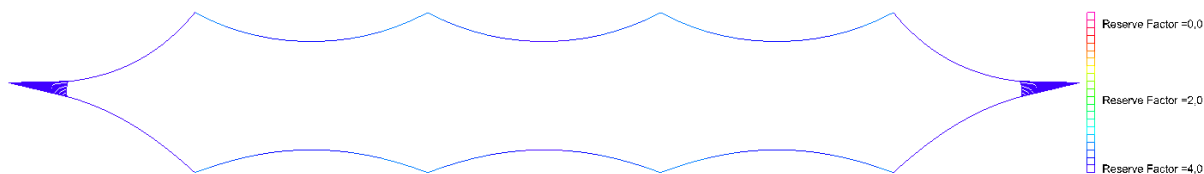
$$n_y \leq n_{y,Rd} = \frac{f_{u,y}}{5} = \frac{84}{5} = 16,8 \text{ kN/m}.$$



Slika 66: Prikaz doseženega varnostnega faktorja po membrani pri K1

Določitev projektne nosilnosti robnih kablov $F_{c,RD}$:

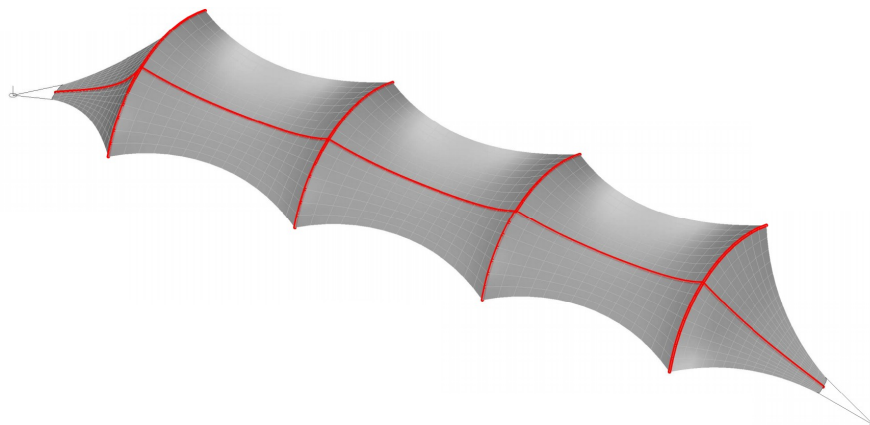
$$F_c \leq F_{c,Rd} = \frac{F_{u,c}}{2,5} = \frac{71}{2,5} = 28,4 \text{ kN/m}.$$



Slika 67: Prikaz doseženega varnostnega faktorja za vse robne kable pri K4

Kontrola nosilnosti zvarov

Ločeno bomo opravili še kontrole nosilnosti zvarov glede na napetosti iz posameznih obtežnih kombinacij. Kot smo že omenili, je nosilnost zvarov manjša od osnovnega materiala. Strokovnjaki priporočajo testiranje zvarov, ki se jih bo uporabilo pri izdelavi. Ker za našo konstrukcijo nimamo testov, smo varnostni faktor določili na osnovi inženirske presoje. Pri kontroli bomo upoštevali varnostni faktor 5, kot smo ga upoštevali pri membrani, vendar bomo nosilnost osnovnega materiala zmanjšali za 30% v posameznih smereh. Za širino zvara smo upoštevali priporočeno vrednost 6 cm za membrane tipa 2 (Forster in sod., 2004). Na sliki 68 je shematsko prikazan potek zvarov po konstrukciji, na podlagi katere bomo preverili doseženo varnost.



Slika 68: Shematski prikaz pozicije zvarov na konstrukciji označeno z rdečimi linijami

Določitev projektne nosilnosti zvara v vtokovni $n_{xw,Rd}$ in osnovni $n_{yw,Rd}$ smeri:

$$f_{uw,x} = f_{u,x} \cdot 0,7 = 86 \cdot 0,7 = 60,2 \text{ kN/m},$$

$$f_{uw,y} = f_{u,y} \cdot 0,7 = 84 \cdot 0,7 = 58,8 \text{ kN/m},$$

$$n_{x,w} \leq n_{xw,Rd} = \frac{f_{uw,x}}{5} = \frac{60,2}{5} = 12,0 \text{ kN/m},$$

$$n_{y,w} \leq n_{yw,Rd} = \frac{f_{uw,y}}{5} = \frac{58,8}{5} = 11,7 \text{ kN/m}.$$

Razlaga količin v enačbah:

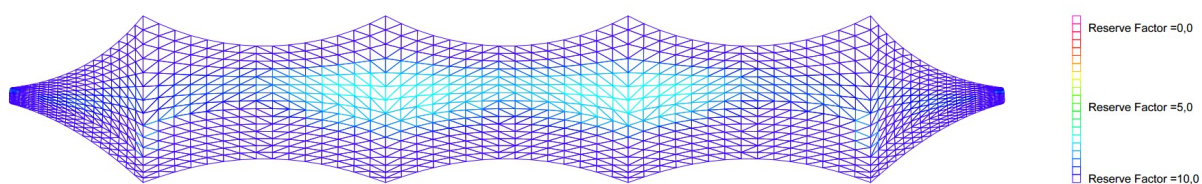
$f_{uw,x}$... prečna nosilnost zvara, ki poteka v osnovni smeri vlaken,

$f_{uw,y}$... prečna nosilnost zvara, ki poteka v vtokovni smeri vlaken,

$n_{x,w}$... obremenitve na zvara, prečno na osnovno smer vlaken,

$n_{y,w}$... obremenitve na zvara, prečno na vtokovno smer vlaken.

Za celovito kontrolo smo zamenjali karakteristike membrane v programu z novo določenimi karakteristikami zvarov ($f_{uw,x}$ in $f_{uw,y}$) ter na novo analizirali vse obtežne kombinacije. Na sliki 69 je prikazan doseženi varnostni faktor po območju membrane pri kritični kombinaciji prednapetja in snega.

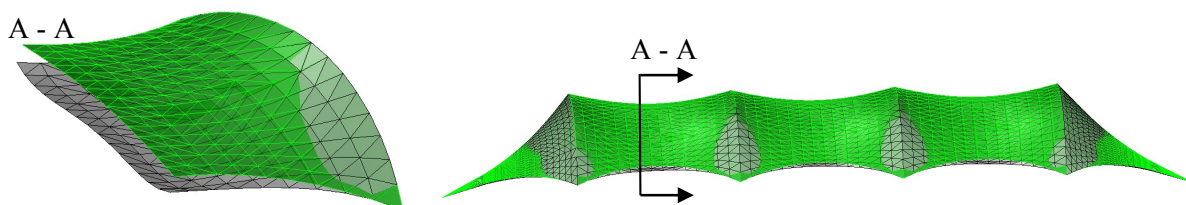


Slika 69: Prikaz doseženega varnostnega faktorja po celotni membrani pri K1 za kontrolo zvarov

Pri kontroli zvarov ugotovimo, da se največje napetosti v zvarih pojavijo nad sredinskima lokoma, kjer dosežemo minimalno vrednost varnostnega faktorja 7,5. Če bi uporabili membrano tipa I, ne bi dosegli zahtevane varnosti.

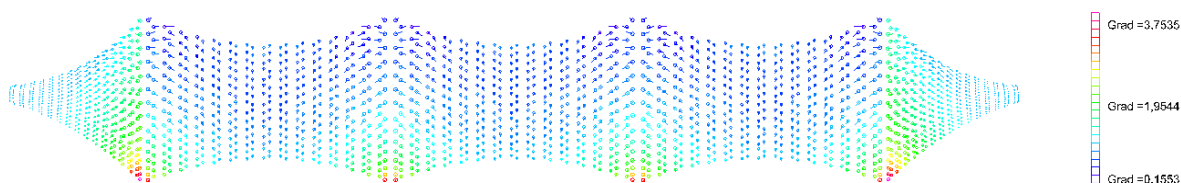
Kontrola pomikov

Pri prednapetih membranskih konstrukcijah se v membrani pojavijo veliki pomiki, zato je kontrola pomikov po pravilih EN 1990, kjer so v nacionalnem dodatku definirane mejne vrednosti pomikov nesmiselna. Pri pomikih je smiselno preveriti le, da ti pri ekstremnih vrednostih ne ovirajo ali ogrožajo uporabnikov. Največji vertikalni pomik se pojavi pri kombinaciji K 1 snega in prednapetja, ki znaša 8,8 cm, kar pa ne bo oviralo uporabnikov, saj imamo zadostno svetlo višino (slika 70).



Slika 70: Prerez konstrukcije na mestu največjega pomika pri štirikratni povečavi deformirane lege (levo) ter mesto prereza (desno)

Preverili bomo tudi velikost in usmerjenost gradientov pomikov, ki nam pokažejo morebitna območja kopičenja padavin. Na sliki 71 je prikazano polje gradientov pomikov za kritično obtežno kombinacijo K4. Vsi gradienti so pozitivni, kar pomeni, da kažejo navzdol ter izven konstrukcije. Gradient velikosti 0,3 pomeni, da ima membrana 30 % naklon proti tlu. Lahko zaključimo, da do kopičenja vode ali snega ne pride.



Slika 71: Prikaz gradientov pri kombinaciji K4

Komentar

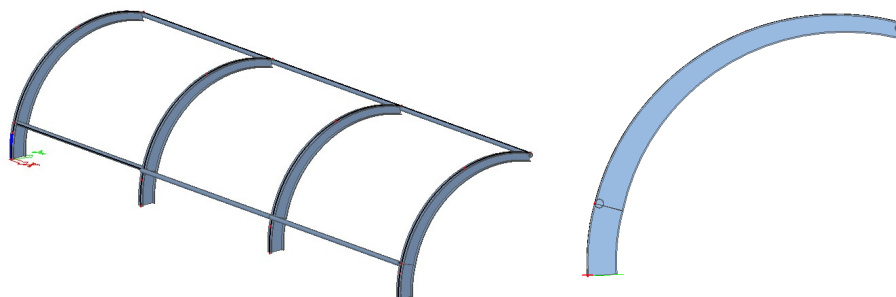
S statično analizo membranskega dela konstrukcije smo dokazali, da izbrana membrana in zvari izpolnjujejo vse projektne zahteve. Sledi dimenzioniranje podporne konstrukcije in detajlov, saj potrebujemo točne dimenzije posameznih detajlov za izdelavo krojnih pol membrane.

4.5 Dimenzioniranje podporne konstrukcije in detajlov

4.5.1 Podporna konstrukcije

Pri zasnovi podporne konstrukcije smo razmišljali tudi o uporabi lesenih lameliranih lokov, vendar smo se na koncu odločili za uporabo jeklene konstrukcije zaradi več razlogov. Nekateri leseni deli konstrukcije bi bili direktno izpostavljeni vremenskim vplivom, oziroma bi jih bilo potrebno dodatno zaščiti z posebnimi pločevinami, kar bi uničilo lepoto lesa. Zaradi majhnega radija ukrivljenosti nosilca, bi za izdelavo morali uporabiti tanjše lamele, kar bi konstrukcijo dodatno podražilo. Višina prereza lameliranega nosilca bi morala biti večja kot pri jeklenem nosilcu. To bi oviralo uporabnike nadstreška, poleg tega bi pokvarili videz lahke konstrukcije.

Odločili smo se za uporabo jeklene konstrukcije, ki je pri prednapetih membranskih konstrukcijah tudi najbolj razširjena. Podporna konstrukcija bo sestavljena iz štirih jeklenih ločnih konzol, ki bodo togo vpete v betonske temelje, ter horizontalnimi vezmi za večjo stabilnost (slika 72). Za analizo in dimenzioniranje jeklene konstrukcije smo uporabili računalniški program SCIA Engineer (Nemetschek group, 2015).



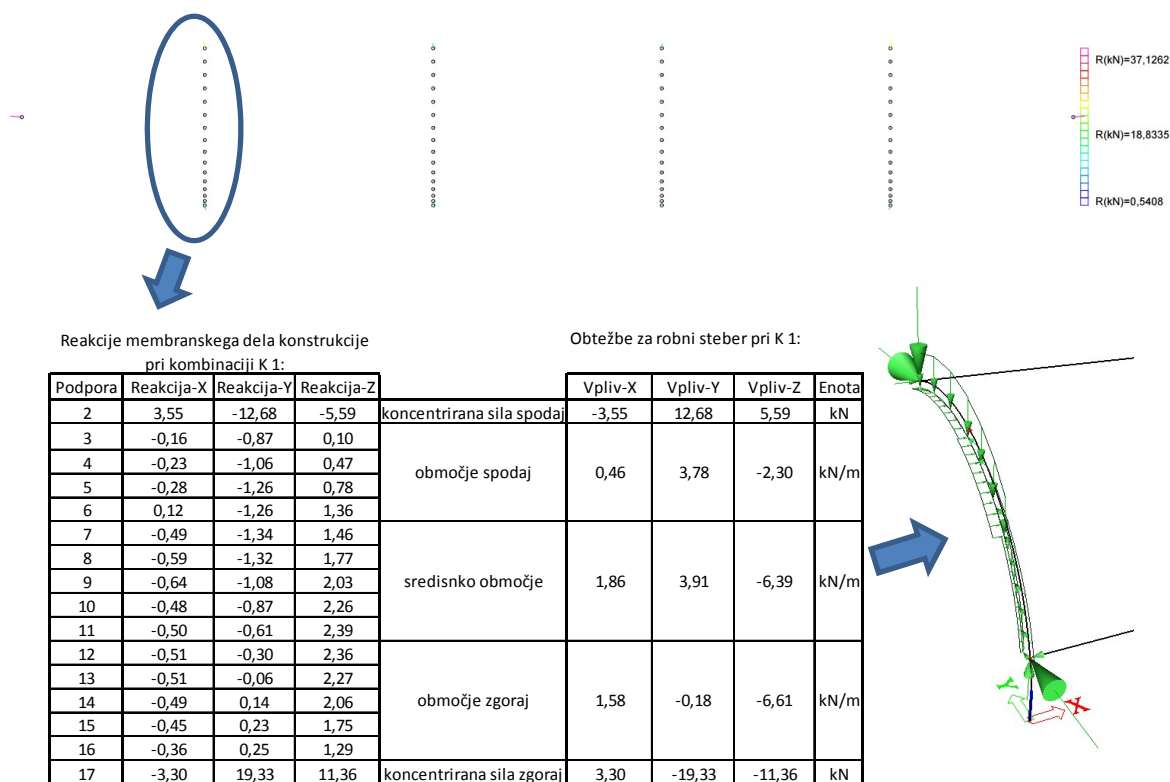
Slika 72: 3D pogled (levo) in stranski pogled (desno) statičnega

Konstrukcijo bomo dimenzionirali po standardu, ki obravnava jeklene konstrukcije SIST EN 1993-1-1. Za obremenitve konstrukcije, bomo uporabili reakcije iz nelinearne analize membranskega dela konstrukcije. Kot smo že omenili, je potrebne rezultate membranske analize pomnožiti z ustreznim varnostnim faktorjem, ki je odvisen od prevladujoče obtežbe (sneg $\gamma_s = 1,5$, veter $\gamma_v = 1,6$), da dobimo projektne vrednosti vplivov, za dimenzioniranje po Evrokodu. V preglednici 3 so prikazane posamezne obtežne kombinacije in uporabljeni varnostni faktorji. Preverili bomo tudi pomike konstrukcije, kjer bomo upoštevali nefaktorirane vrednosti vplivov.

Preglednica 3: Obtežne kombinacije za analizo jeklene podkonstrukcije

Obtežna kombinacija
MSN 1: 1,35 (1,00) x lastna + (prednapetje + sneg) x 1,5
MSN 2: 1,35 (1,00) x lastna + (prednapetje + veter srk) x 1,6
MSN 3: 1,35 (1,00) x lastna + (prednapetje + veter spredaj) x 1,6
MSN 4: 1,35 (1,00) x lastna + (prednapetje + veter zadaj) x 1,6
MSN 5: 1,35 (1,00) x lastna + (prednapetje + sneg + 0,6 veter srk) x 1,5
MSN 6: 1,35 (1,00) x lastna + (prednapetje + sneg + 0,6 veter spredaj) x 1,5
MSN 7: 1,35 (1,00) x lastna + (prednapetje + sneg + 0,6 veter zadaj) x 1,5

Zaradi velikega števila reakcij in posledično podatkov, ki smo jih dobili iz programa MPanela FEA, smo te smiselno preuredili. Pri posamezni obtežni kombinaciji smo dobili reakcije za 66 podpor, saj program pri linijskem podpiranju nad loki upošteva več točkovnih podpor. Točkovne reakcije smo pretvorili v linijske obtežbe po treh območjih, kjer vsako območje zajema tretjino ločne dolžine. Pri vsakem območje smo upoštevali povprečno vrednost, katero smo pretvorili v linijsko obtežbo. Na mestih sidranja membrane in kablov smo vnesli točne vrednosti vplivov, saj tam nastopijo največje sile. Prave in poenostavljene vrednosti vplivov smo nato še preverili na podlagi skupne reakcije, ki smo jo dobili pri membranski analizi z rezultati reakcij iz modela za podkonstrukcijo, kjer je prišlo do manjšega odstopanja $\pm 2\%$. Na sliki 73 je prikazan postopek pretvorbe reakcij iz membranske analize za robni nosilec pri kombinaciji K 1, v linijske in koncentrirane vplive, katere smo nanесли na robni steber. Nanos obtežbe za ostale vplive v magistrski nalogi nismo prikazali.



Slika 73: Shematski prikaz pretvorbe reakcij iz membranske analize za vplive na robni steber pri kombinaciji K1

Pri izdelavi modela smo upoštevali simetrijo konstrukcije, saj smo pri kontroli reakcij opazili enakost vplivov, ki delujejo na desnem ali levem delu konstrukcije. Zato smo modelirali le levi del konstrukcije, ki zajema notranji in zunanji lok. Za prečni prerez smo uporabili zvarjen profil oblike I spodnje višine 324 mm in širine 150 mm. Proti vrhu konstrukcije se višina enakomerno zmanjša na višino 178 mm, širina pa ostane enaka.

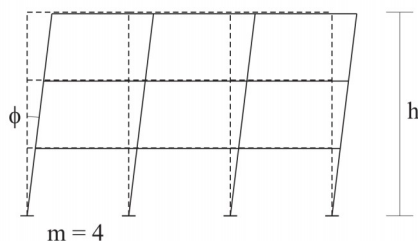
Pri analizi podkonstrukcije smo uporabili teorijo drugega reda kjer smo upoštevali globalne nepopolnosti ϕ_i in lokalne nepopolnosti, ki so zajete v uklonskih redukcijskih faktorjih χ . Za uklonske koeficiente smo upoštevali $k_y = k_z = k_\omega = 1$ (Beg, 2009), na podlagi katerih program sam izračun χ . Vrednosti ϕ_i vnesemo v program za analiz, ki jih izračunamo z izrazi (slika 74):

$$\phi_i = \phi_0 \alpha_h \alpha_m,$$

$$\phi_0 = \frac{1}{200},$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \text{ vendar } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{2}{m}\right)}.$$



Slika 74: Nadomestne globalne nepopolnost ϕ

Razlaga količin v enačbah:

m ... število stebrov v obravnavani ravnini okvira,

h ... višina okvira v metrih.

Kjer za globalne nepopolnosti v vzdolžni ϕ_x in prečni ϕ_y smeri, za našo konstrukcijo velja:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{2,79}} = 1,2 \rightarrow \text{upoštevamo } \alpha_h = 1,$$

$$\phi_x = \frac{1}{200} \cdot 1 \cdot \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{2}{4}\right)} = 4,33 \cdot 10^{-3} = 4,33 \text{ mm/m},$$

$$\phi_y = \frac{1}{200} 1 \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{2}{1}\right)} = 6,12 \cdot 10^{-3} = 6,12 \text{ mm/m.}$$

Na slikah od 75 do 77 so prikazani rezultati notranjih statičnih količin ovojnic vseh kombinacij MSN za geometrijsko nelinearno analizo. Ključne količine pri dimenzioniranju so predstavljale osne sile in momenti.

Legenda za branje rezultatov notranjih statičnih količin:

N ...osne sile,

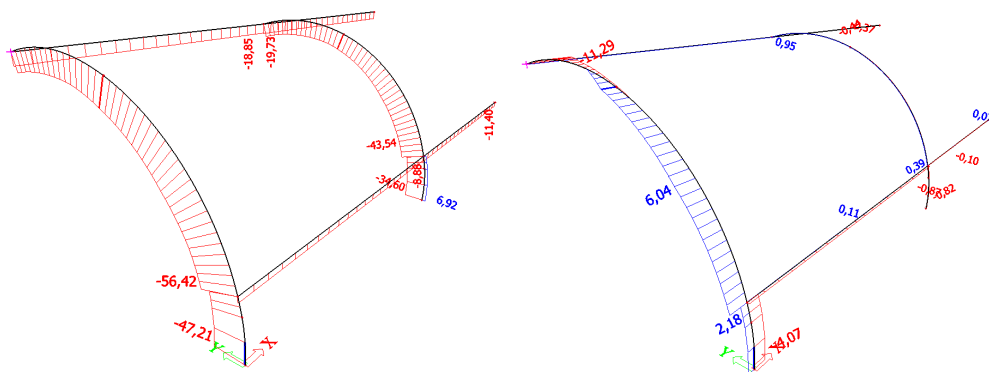
V_y ...prečne sile v lokalni y smeri,

V_z ...prečne sile v lokalni z smeri,

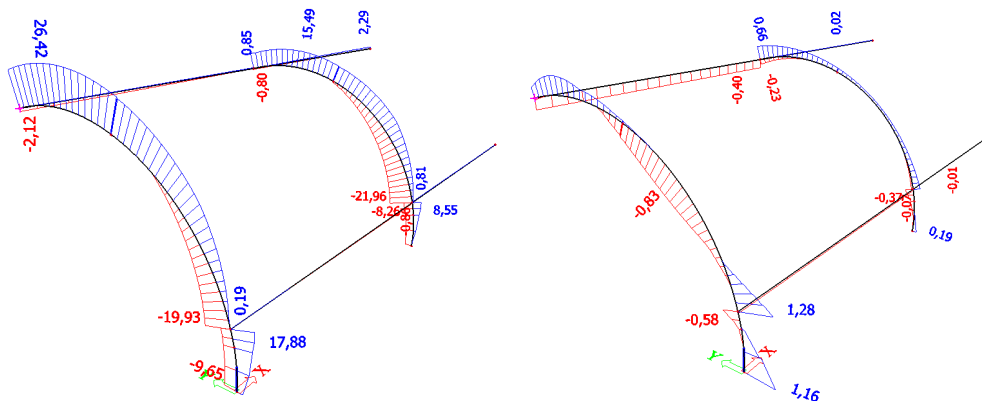
M_x ...torzijski moment,

M_y ...moment okoli osi y ,

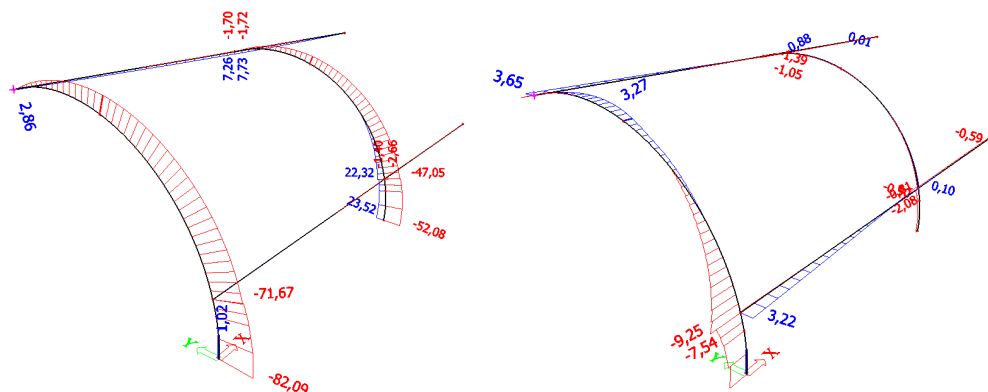
M_z ...moment okoli osi z .



Slika 75: Ovojnica notranjih statičnih količin N [kN] (levo) in V_y [kN] (desno)

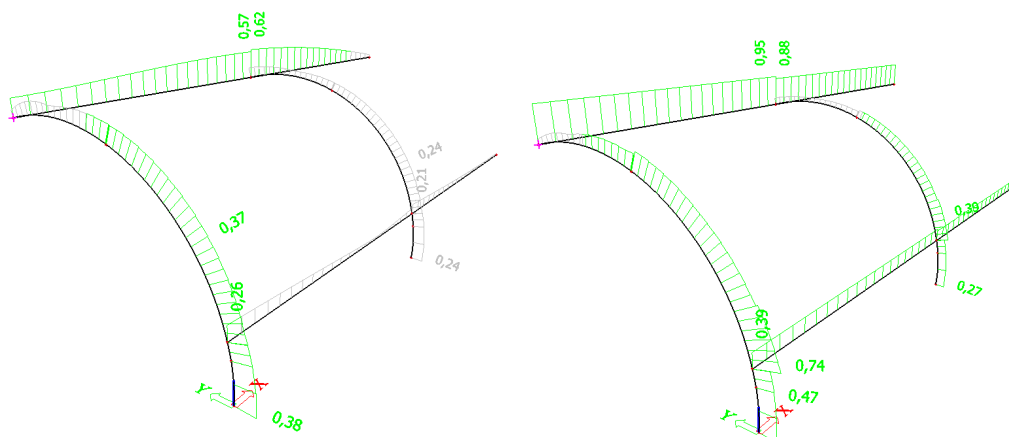


Slika 76: Ovojnica notranjih statičnih količin V_z [kN] (levo) in M_x [kNm] (desno)



Slika 77: Ovojnica notranjih statičnih količin M_y [kNm] (levo) in M_z [kNm] (desno)

Opravili smo še kontrolo nosilnosti in lokalne stabilnosti elementov, ki jo omogoča program SCIA Engineer, ki upošteva pravila evrokodov. Pričakovano je pri dimenzioniranju bočna zvrnitev imela ključno vlogo (slika 78, desno). Dosegli smo 74 % izkoriščenost robnega stebra glede na stabilnost, ter 38 % izkoriščenost notranjega stebra. Ker smo dosegli le 74 % izkoriščenost, bi lahko prereze stebrov še zmanjšali, vendar to ni bilo mogoče zaradi prevelikih pomikov, kateri ne bi izpolnjevali kontrole.



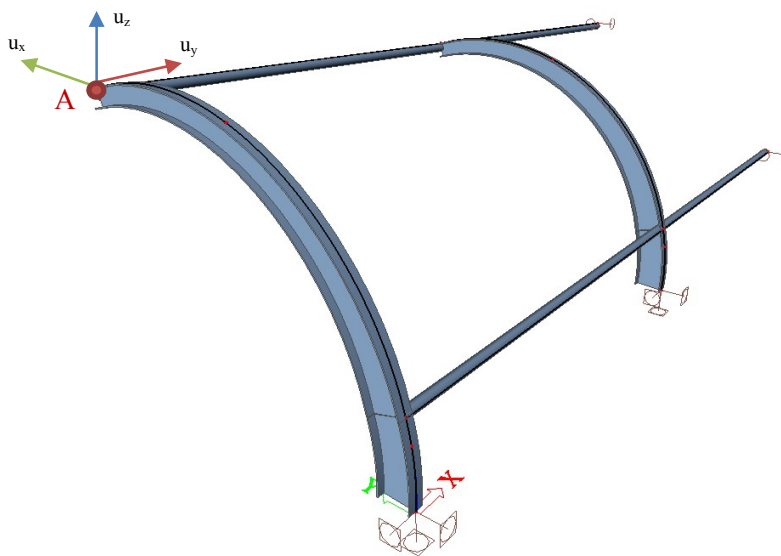
Slika 78: Izkoriščenost prevezov na podlagi kontrole nosilnosti (levo) in bočne zvrnitve (desno)

Preveriti je potrebno še pomike konstrukcije pri nefaktoriranih obtežnih kombinacijah. Kontrolirali bomo vertikalne in horizontalne pomike konstrukcije na podlagi mejnih vrednosti pomikov $u_{i,MSU,d}$, ki smo jih določili na podlagi SIST EN 1990:2005/A101. Pri omejitvi vertikalnih pomikov bomo za dolžino konzole uporabili tlorisno dolžino, ki je enaka $L = 3,50$ m, višina konstrukcije je enaka $H = 2,89$ m. Višina Spodaj so izračunane mejne vrednosti horizontalnih in vertikalnih pomikov. Podana je kontrola pomikov zgornje točke robnega nosilca (slika 79), kjer so pomiki največji (preglednica 4).

$$u_z \leq u_{z,MSU,d} = \frac{2L}{250} = \frac{2 \cdot 3500}{250} = 28 \text{ mm}$$

$$u_x \leq u_{x,MSU,d} = \frac{H}{300} = \frac{2890}{300} = 9,6 \text{ mm}$$

$$u_y \leq u_{y,MSU,d} = \frac{H}{300} = \frac{2890}{300} = 9,6 \text{ mm}$$



Slika 79: Točka A na robnem nosilcu

Preglednica 4: Pomiki v točki A pri kombinacijah MSU, s kontrolo

Kombinacija vplivov	Pomiki			Kontrola
	u_x [mm]	u_y [mm]	u_z [mm]	
MSU 1: lastna + prednapetje + sneg	0,2	9	-21,6	✓
MSU 2: lastna + prednapetje + veter srk	0,1	2,9	-9,1	✓
MSU 3: lastna + prednapetje + veter spredaj	0	4,4	-11,6	✓
MSU 4: lastna + prednapetje + veter zadaj	0,2	2,1	-7,5	✓
MSU 5: lastna + prednapetje + sneg + 0,6 veter srk	0,8	7,7	-19,2	✓
MSU 6: lastna + prednapetje + sneg + 0,6 veter spredaj	0,1	8,5	-20,5	✓
MSU 7: lastna + prednapetje + sneg + 0,6 veter zadaj	0,3	7,7	-19,3	✓

Končne dimenzije stebrov in prečk so prikazane na načrtu jeklene podkonstrukcije v prilogi E.

4.5.2 Pritrdilni sistemi

Pritrdilni sistemi oziroma detajli so ključni del prednapete membranske konstrukcije. Preko njih se obremenitve iz membrane in robnih kablov prenesejo na podkonstrukcijo oziroma sidrišča. Zasnovani morajo biti tako, da se čim bolj prilagodijo obliki membrane in linijam robnih kablov, katerih obliko smo določili v fazi iskanja oblike. Na tržišču so ponudniki, ki ponujajo razne univerzalne detajle, vendar je njihova uporabnost zelo odvisna od velikosti in oblike konstrukcije. Pri večini konstrukcij se uporabljajo detajli narejeni po naročilu, oziroma jih izdelajo po projektantovih navodilih (Forster in sod., 2004).

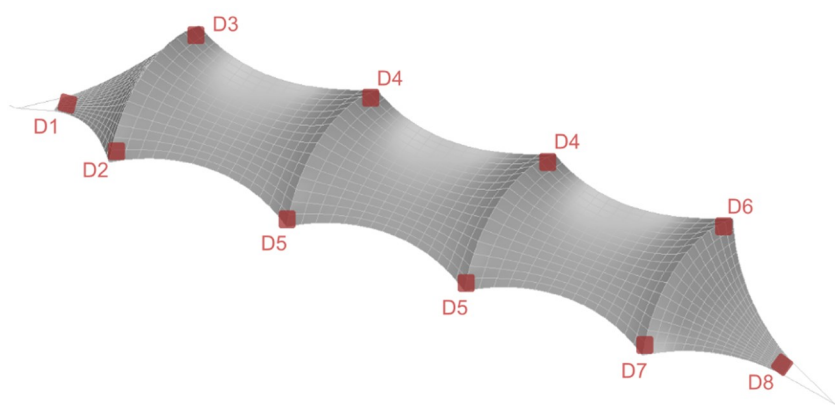
Detajli morajo omogočati pomike in rotacije v predpisanih smereh. Ponavadi preko detajlov vnašamo prednapetje v membrano, zato morajo biti izvedeni tako, da omogočajo napenjanje, nastavljanje in

kasnejše dodatno napenjanje membrane. Detajli so ponavadi nameščeni na robovih membran, kjer so izpostavljeni vremenskim pogojem. Pri dizajniranju detajlov je potrebno strmeti k preprostosti izdelave, da so majhni ter da se čim bolj približajo končni obliki membrane. Vse zgoraj opisano je v velikim meri povezano tudi s stroški, saj gre za elemente z veliko različnimi komponentami in zapletene oblike (Forster in sod., 2004). Za primerjavo nam je preko programa Formfinder uspelo pridobiti približno ceno kotnega detajla, ki vsebuje vse komponente za pritrditev na vrhu stebra in je primeren za manjše tende, namenjene senčenju (Formfinder, 2015). Okvirna cena detajla bi bila 520€ (slika 80).



Slika 80: Kotni detajl na vrhu stebra (slika je simbolična)

Pri naši konstrukciji bomo uporabili detajle izdelane po meri. Število vseh detajlov na naši konstrukciji je 10 (slika 81). Nekateri so si zelo podobni. Za analizo smo si izbrali najbolj obremenjen detajl, ki ga bomo preverili na nosilnost.

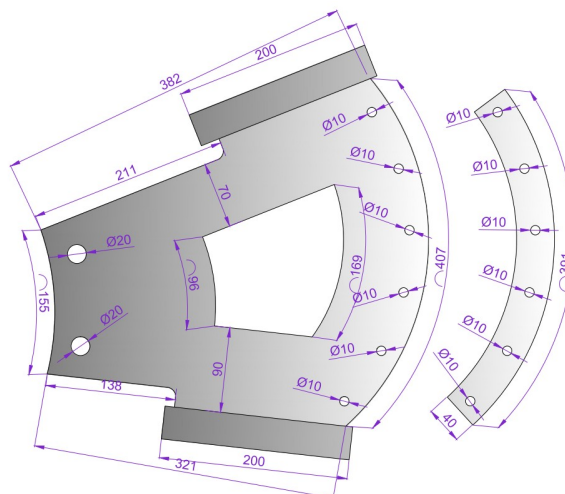


Slika 81: Pozicija detajlov

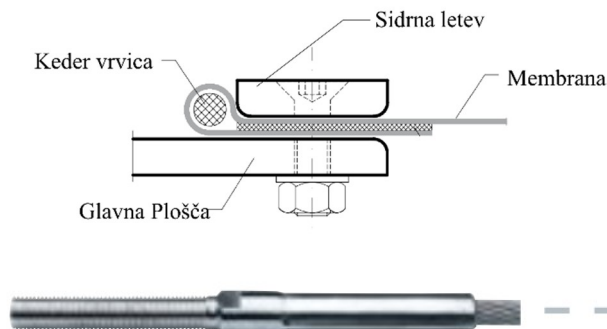
Detajl D1

Geometrijo detajla smo določili na podlagi relaksiranega modela, saj želimo detajl čim bolj približati končni obliki membrane. Obliko in sestavne komponente (slika 82) detajlov smo izbrali na podlagi že

uporabljenih detajlov v praksi, katere primere smo našli na spletu. Kot vidimo, geometrija detajla ni simetrična zaradi različnih kotov priključevanja robnih kablov in membrane. Robna kabla z navojem (slika 83, spodaj) bomo sidrali v stranski sidrišči, izvedeni iz konstrukcijske cevi, ki omogoča napenjanje z matico. Membrano, ojačeno z keder vrvico bomo sidrali na detajl z dodatno letvico, ki bo pritrjena z vijaki (slika 81, zgoraj).

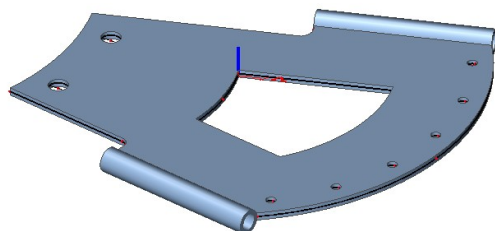


Slika 82: Tlorisni pogled na detajl D1 z dimenzijami in letvico za sidranje membrane



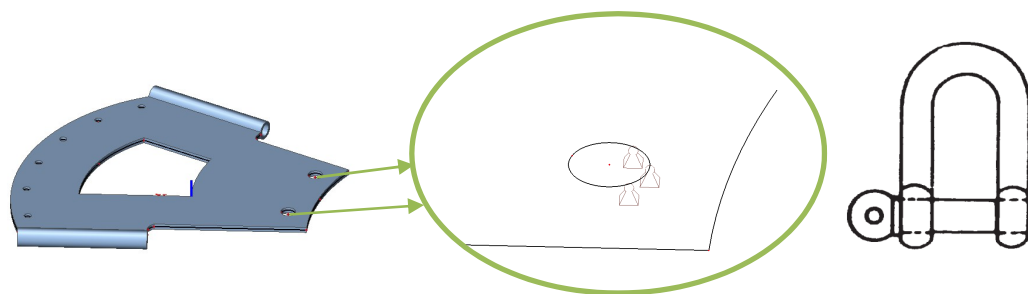
Slika 83: Način izvedbe sidranja s keder vrvico (zgoraj) (Seidel, 2009), zaključek robnega kabla z navojem (spodaj) (Tennect, 2015)

Za analizo detajla uporabimo program SCIA Engineer. Za pločevinasti del smo uporabili končne elemente za lupine, na mestih vpetja pa smo uporabili linijske končne elemente za modeliranje sidrne cevi (slika 84). Mrežo končnih elementov program izdela sam, kjer smo omejili velikost lupinastih elementov na največ 2 mm, ter linijskih končnih elementov na povprečno 60 elementov na eno cev.

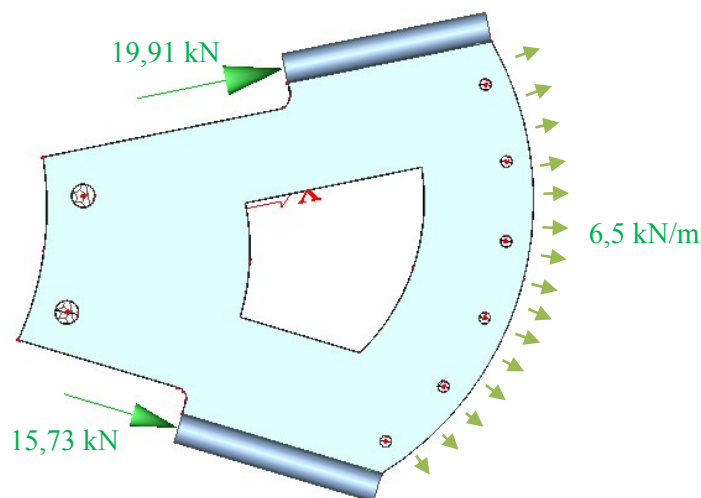


Slika 84: Model detajla D1 za analizo

Za podpiranje smo uporabili členkaste podpore, katere smo zmodelirali na mestu vpetja sidrnih kablov, ki se priklopita na bočna temelja. Podpore smo namestili le na mestu, kjer bo bosta nalegala vijaka verižnega člana (slika 85).

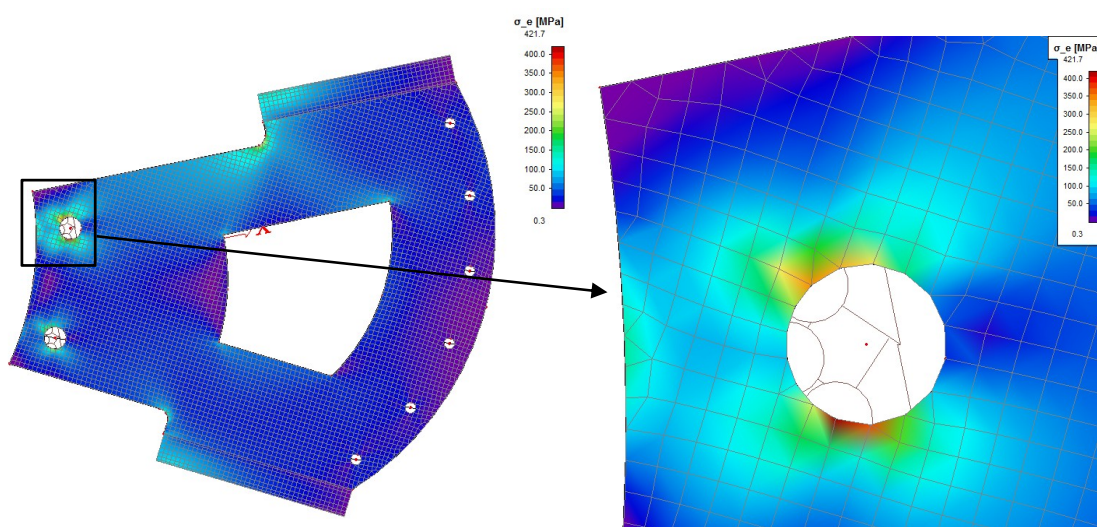
Slika 85: Prikaz podpiranja na mestu sidranja kablov (levo) in primer verižnega člana (desno)
(Kovinocrom, 2015)

Kritični obtežni primer na mestu detajla je pričakovano prednapetje + sneg, katerega vplive pomnožimo z varnostnim faktorjem 1,5, da dobimo projektne vrednosti. Na sliki 86 je prikazan nanos obtežbe na model, ter vrednosti karakterističnih vplivov, katere smo povzeli iz membranske analize. Za natančnejšo analizo bi linijsko obtežbo morali razčleniti na šest območji, ter jo vnesti na model, kot koncentrirane sile na mestu sidranja zgornje letvice. Ker je linijska obtežba majhne jakosti smo to nanesli na desni rob modela.



Slika 86: Nanos karakterističnih vplivov na model

Na sliki 87 so prikazane Von Misesove napetosti. Pričakovano se največje napetosti pojavijo v okolici podpor, ter na mestih kjer sidramo robne kable. Največja koncentracija napetosti je na mestih vpenjanja verižnega člena, ki dosega vrednost 421,7 MPa (slika 87, desno). Kot vidimo, bi lahko za izdelavo detajla uporabili jeklo S 275, ki ima napetost na meji tečenja $f_y = 275$ MPa. Zaradi varnosti bomo uporabili jeklo kvalitete S 355, $f_y = 355$ MPa. V okolici pripenjanja verižnega člena dopustimo delno plastifikacijo jekla, saj se po plastifikaciji jekla, poveča naležna površina verižnega člena. Poleg tega smo v analizi upoštevali na mestu vpetja 3 točkaste podpore, katere v modelu povzročajo povečanje koncentracije napetosti.



Slika 87: Prikaz Von Misesovih napetosti v detajlu (levo) in na območju vpenjanja (desno)

Kontrola napetosti v pločevini:

$$\sigma_e \leq f_y \gamma_{M0} \rightarrow 421,7 \leq 355 \cdot 1,00,$$

$421,7 \text{ MPa} \leq 355 \text{ MPa} // \rightarrow$ Kontrola pogojno spremljiva.

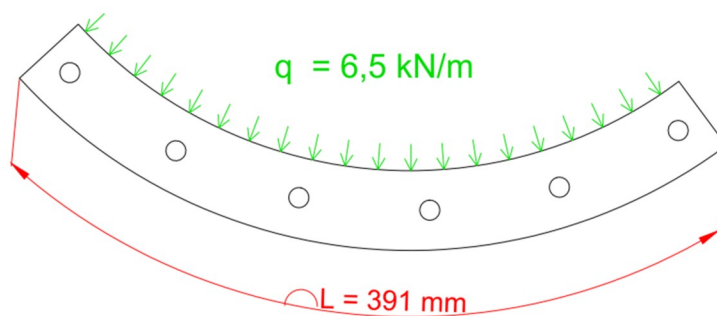
Razlaga simbolov v enačbi:

γ_{M0} ... delni varnostni faktor za jeklo

Kot smo omenili, zgoraj dopustimo manjšo plastifikacijo pločevine v okolici pritrjevanja.

Preveriti je potrebno še strižno nosilnost vijaka velikosti M8, ki ga uporabimo za pritrjevanje letvice.

Nanos obtežbe je prikazan na sliki 88.



Slika 88: Karakteristična obtežba na sidrno letvico

Kontrola nosilnosti vijaka:

$$F_{V,ED} = \frac{q \cdot L \cdot \gamma_s}{6} = \frac{6,5 \text{ kN/m} \cdot 0,39 \text{ m} \cdot 1,5}{6} = 0,64 \text{ kN},$$

$$A_s = 0,36 \text{ cm}^2,$$

$$F_{V,ED} \leq F_{V,RD} = \frac{0,5 \cdot f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 80 \text{ kN/cm}^2 \cdot 0,36 \text{ cm}^2}{1,25} = 11,25 \text{ kN},$$

$$0,67 \text{ kN} \leq 11,25 \text{ kN} \checkmark$$

Razlaga količin v enačbi:

γ_{M0} ... delni varnostni faktor za jeklo,

γ_s ... faktor obtežbe,

$F_{V,ED}$... projektna sila na vijak,

A_s ... površina strižne površine vijaka,

f_{ub} ... projektna natezna trdnost vijaka,

γ_{M2} ... delni faktor odpornosti za vijake.

Detajlna risba detajla D1 se nahaja v prilogi D.

4.6 Krojenje membrane

Sledi izdelava krojnih pol, kjer je najprej potrebno smiselno celotno površino razdeliti na manjše posamezne kroje. Širino krojev določimo na podlagi dobavljene širine membrane, da imamo čim manj odpadka. Kroji pa po velikosti ne smejo biti preveliki, da ne presežemo dovoljenih strižnih deformacij, ki so 5% (Meliar design, 2015a). Tkanine niso sposobne prenesti velikih strižnih deformacij, poleg tega te deformacije povzročijo gubanje (Forster in sod., 2004). Spoje oziroma zware postavimo tako, da največje napetosti nastopijo v smeri zvarov in ne prečno na zvar. Ker pa so zvari vidni elementi membrane, je potrebno upoštevati tudi estetski vidik postavitve zvarov. Dodatno pri krojenju upoštevamo še kompenzacijo, žepe za robne kable in ostale priključitvene detajle.

4.6.1 Kompenzacija

Membrana ima na splošno nizek elastični modul v primerjavi s konvencionalnimi materiali, kot sta beton ali jeklo. Da lahko membrana prevzame obremenitve, na katero smo jo projektirali, jo je potrebno prednapeti. Ko vnesemo prednapetje v membrano, že nastopijo raztezki v membrani. Pri postopku iskanja oblike smo našli obliko za že napeto membrano, torej je potrebno pri izdelavi krojev te ustrezno zmanjšati, da ko membrano namestimo in napnemo, dobimo enako obliko. Postopek zmanjšanja krojev imenujemo kompenzacija.

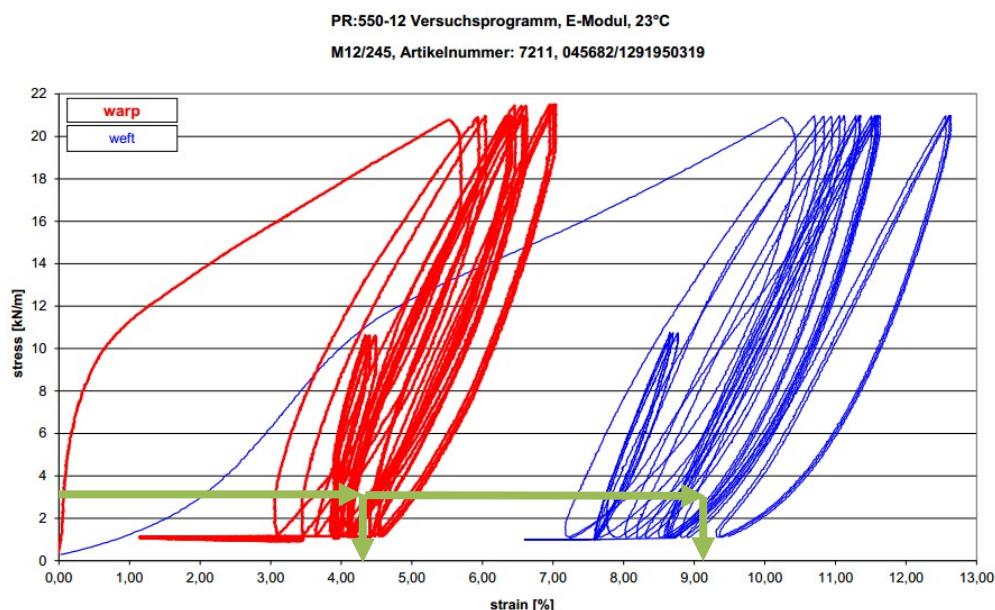
Membrane imajo različne materialne lastnosti v osnovni in votkovni smeri nosilnih vlaken. V osnovni smeri se pri prednapetju manj raztegnejo kot v votkovni smeri, zato je pri kompenzaciji zelo pomembno, da jo izvedemo pravilno. Kompenzacijski faktorji se običajno gibljejo med 1-10% (Kovačević, 2012).

Raztezki so na robovih manjši, saj so na robovih nameščene razne ojačitve, kot so kabli in zvari membran. Prav tako se pri predpostavljenem prednapetju v membrani ne pojavijo enake vrednosti napetosti zaradi geometrije in robnih pogojev. Zaradi nelinearnega obnašanja membrane in ostalih zgoraj navedenih razlogov je določitev kompenzacije zahteven proces, ki ga je nemogoče povsem točno upoštevati. Razvijalci programa MPanel v svojem priročniku za uporabo navajajo, da je nesmiselno računati in določevati kompenzacijske faktorje s preveliko natančnostjo (Meliar design, 2015c).

V preteklosti so se tudi pojavile težave zaradi neupoštevanja kompenzacije oziroma nepravilne izvedbe kompenzacije. Zaradi prevelikih zunanjih deformacij so se v membrani pojavili večji pomiki,

kot so bili predvideni. Membrana se je naslonila na notranje podporne elemente in opremo, katera se je pretrgala in porušila.

Na sliki 89 je prikazan postopek določitev kompenzacijskih faktorjev za našo membrano na podlagi dvoosnega preizkusa za vlakna v osnovni in votkovni smeri pri osnovnem prednapetju 3 kN/m. Kompenzacijske faktorje smo določili na podlagi priporočil razvijalcev Meliar Design (Meliar design, 2015c).



Slika 89: Napetosti v odvisnosti od deformacij za izbrano membrano, z določitvijo kompenzacije v osnovni (rdeča) in votkovni (modra) smeri (Syróvátka, 2015)

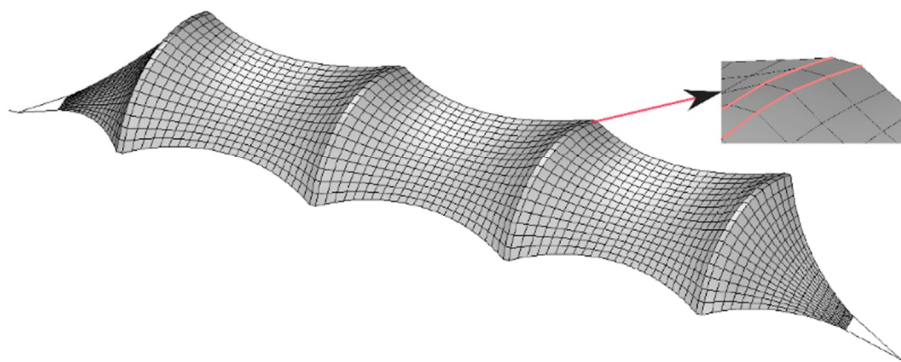
Kompenzacijski faktorji, ki jih razberemo iz slike 89 za krojenje membrane:

osnovna smer: 4,3 %,

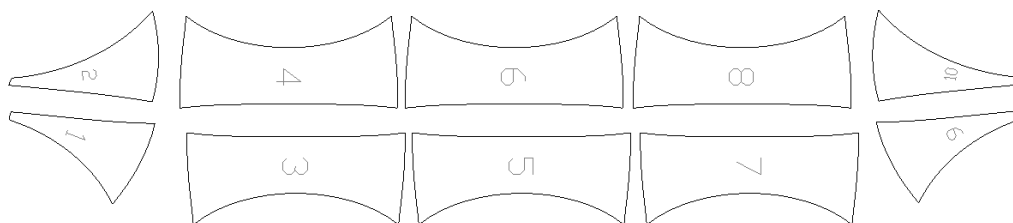
votkovna smer: 9,2 %.

4.6.2 Izdelava krojnih pol

Za izdelavo krojnih pol smo prvotni relaksirani model modificirali, saj smo nad podporami dodatno modelirali širino pasnice nosilca, da dobimo točne dimenzije krojnih pol (slika 90).

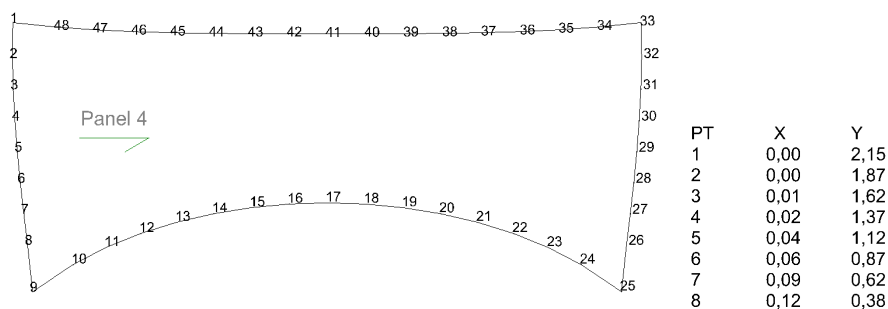


Slika 90: Modificiran model za izdelavo krojnih pol

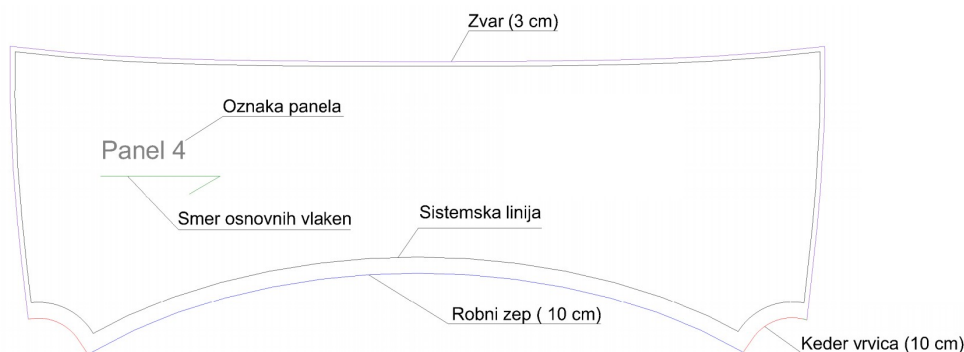


Slika 91: Neobdelane krojne pole iz relaksiranega modela

Najprej je potrebno dobljene kroje iz relaksiranega modela (slika 91) kompenzirati po prej določenih faktorjih. Na mestih zvarov dodamo na obeh stikovanih membranah 3 cm membrane za zvar širine 6 cm. Na mestih robnih kablov dodamo 10 cm pas membrane za sidrni žep jeklenih kablov. Enako upoštevamo 10 cm pas v okolici detajlov za sidrni žep keder vrvice. Ko vnesemo vse parametre, program omogoča izpis krojnih pol za ročni razrez, kjer poda koordinatne točke, ali strojni razrez, kjer definiramo krivulje za razrez. Na sliki 92 in 93 je prikazana krojna pola 4, primerna za ročni ter strojni razrez.

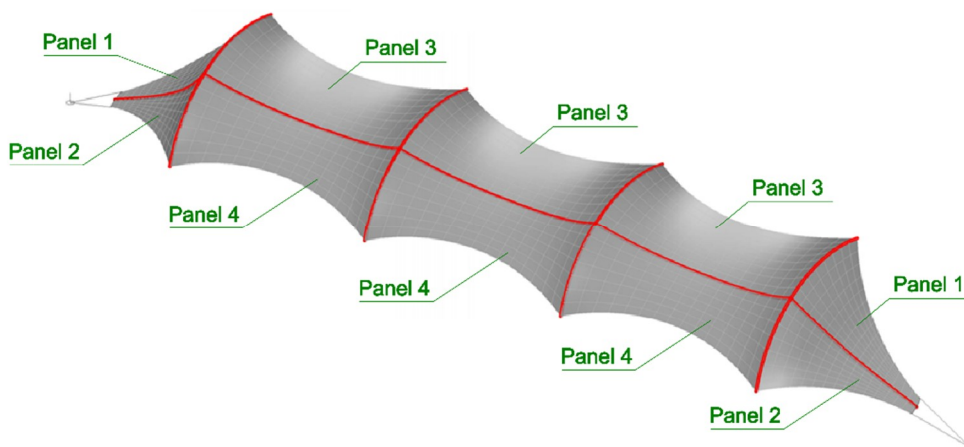


Slika 92: Izpis panela 4 s koordinatnimi točkami brez vnesenih detajlov



Slika 93: Izris panela 4, primernega za strojni izrez z označbam

Na sliki 93 so posamezne linije označene z različnimi barvami. Črne linije so sistemske linije, ki morajo biti med sabo poravnane, ko varimo. Prav tako sistemska linija označuje pozicijo kablov in keder vrvic. Modre in rdeče linije označujejo sidrne žepe za objetje keder vrvic in robnih kablov. Zelena puščica pa označuje potek osnovnih vlaken. Ker je konstrukcija simetrična, so tudi nekatere krojne pole enakih dimenzij, le pri razrezu je potrebno paziti, da je potrebno membrano za desno jadro razrezati na hrbtni strani membrane. Na sliki 94 so prikazane končne pozicije posameznih krojnih pol. Imamo 10 krojnih pol, ki so sestavljene iz štirih dimenzijsko različnih krojev. Načrti krojnih pol so predstavljeni v prilogi C.



Slika 94: Pozicije krojnih pol

Na mestih detajlov je priporočljivo dodati ojačitvene zaplate membrane zaradi koncentraciji napetosti. V našem računskem modelu nismo dobili prekoračitev napetosti v okolici detajlov zato ojačitvene zaplate niso potrebne, so pa priporočljive.

4.7 Dimenzioniranje temeljev

Za temeljenje konstrukcije smo si izbrali točkovne temelje, ki jih Evrokod uvršča med plitka temeljenja. Temelje bomo preverili glede na nosilnost tal, odpornost na preveritev in zdrs. Po pravilih

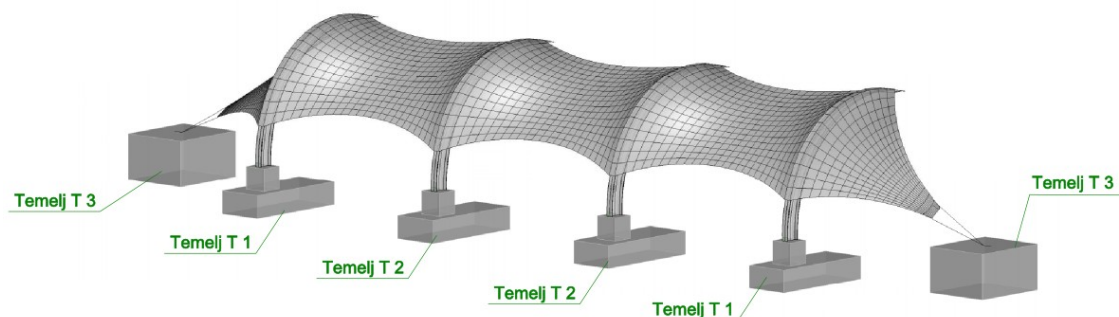
bi bilo potrebno opraviti tudi kontrolo mejnih stanj uporabnosti oziroma preveriti pomike. Ker za analizo pomikov nismo imeli točnih podatkov, te nismo opravili, kar je v našem primeru deloma sprejemljivo, saj prednapete membranske konstrukcije niso tako občutljive na pomike kot klasične konstrukcije. Za temeljna tla smo uporabili karakteristike zemljine za srednje nosilna tla.

Vhodni podatek za temeljna tla:

Strižni kot zemljine: $\varphi_t = 36^\circ$,

Prostorninska teža: $\gamma_t = 20 \text{ kN/m}^3$.

Na sliki 95 so prikazane pozicije obravnavanih temeljev.



Slika 95: Pozicija temeljev

Vplive za temelj smo povzeli iz analize podporne konstrukcije jeklenih nosilcev (preglednica 5) ter iz analize membranskega dela za bočna temelja, kjer sidramo robni jadri (preglednica 6).

Preglednica 5: Vplivi, povzeti iz reakcij statične analize podkonstrukcije na mestu vpetja za temelj T1

Kombinacija vplivov	Temelj T1				
	$M_{x,d}$ [kNm]	$M_{y,d}$ [kNm]	V_d [kN]	$H_{x,d}$ [kN]	$H_{y,d}$ [kN]
MSN 1: lastna + (prednapetje + sneg) * 1,5	88,07	2,61	46,76	2,55	-4,45
MSN 2: lastna + (prednapetje + veter srk) * 1,6	16,23	-2,33	5,94	-1,46	9,25
MSN 3: lastna + (prednapetje + veter spredaj) * 1,6	43,96	-2,71	23,74	-0,68	-5,94
MSN 4: lastna + (prednapetje + veter zadaj) * 1,6	12,42	-2,34	11,35	-2,12	1,37
MSN 5: lastna + (prednapetje + sneg + 0,6 veter srk) * 1,5	78,57	-5,3	37,28	4,2	-2,73
MSN 6: lastna + (prednapetje + sneg + 0,6 veter spredaj) * 1,5	89,23	-2,87	43,48	1,92	-6,66
MSN 7: lastna + (prednapetje + sneg + 0,6 veter zadaj) * 1,5	74,5	-2,5	36,82	1,37	-1,07

Preglednica 6: Vplivi, povzeti iz statične analize membranskega dela konstrukcije na mestu vpetja za temelj T3

Kombinacija vplivov	Temelj T3		
	V _d [kN]	H _{x,d} [kN]	H _{y,d} [kN]
MSN 1: (prednapetje + sneg) * 1,5	-23,13	-50,40	4,37
MSN 2: (prednapetje + veter srk) * 1,6	-18,19	-39,15	4,14
MSN 3: (prednapetje + veter spredaj) * 1,6	-19,79	-43,26	4,51
MSN 4: (prednapetje + veter zadaj) * 1,6	-17,44	-37,33	4,13
MSN 5: (prednapetje + sneg + 0,6 veter srk) * 1,5	-21,26	-45,90	4,14
MSN 6: (prednapetje + sneg + 0,6 veter spredaj) * 1,5	-22,38	-48,92	4,50
MSN 7: (prednapetje + sneg + 0,6 veter zadaj) * 1,5	-21,05	-45,33	4,07

Temelja na poziciji T2 nismo analizirali, saj predpostavimo enako dimenzijo, kot jo imata temelja na poziciji T1. Za analizo temeljev smo si izdelali program, kjer smo na podlagi kontrole nosilnosti, zdrsa in prevrnitve določili končno dimenzijo temeljev. V nadaljevanju so prikazani postopki in enačbe, ki smo jih upoštevali v analizi. Na koncu so predstavljeni rezultati in dimenzije temeljev. Izračun za oba temelja se nahaja v prilogi B.

4.7.1 Kontrola nosilnosti temeljnih tal

Za preverjanje nosilnosti tal pod temeljem je potrebno preveriti pogoj odpornosti (nosilnost tal) R_d na navpični projektni vpliv V_d :

$$V_d \leq R_d. \quad (4.5)$$

Za izračun nosilnosti uporabimo metodo iz Evrokoda 7 za drenirane pogoje, ki je definirana v EN 1997-1: Dodatek D:

$$R_d = A' (c' \times N_c \times b_c \times s_c \times i_c + q' \times N_q \times b_q \times s_q \times i_q + \gamma' \times B'/2 \times N_\gamma \times b_\gamma \times s_\gamma \times i_\gamma) / \gamma_{R,v}. \quad (4.6)$$

Razlaga kratic v enačbi:

R_d ... projektna odpornost tal,

A' ... ploščina računske površine centrično obremenjenega temelja,

q' ... efektivni navpični tlaki ob temelju na globini temeljne ploskve,

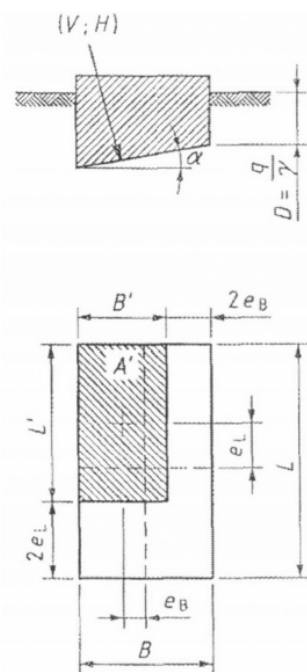
c' ... efektivna kohezija,

γ' ... efektivna prostorninska teža zemljine pod dnom temelja.

N_c, N_q, N_γ ... koeficienti nosilnosti, odvisni od strižnega kota,

b_j, s_j, i_j ... koeficienti nagiba in oblike temelja ter naklon rezultante,

$\gamma_{R,v}$... delni varnostni faktor za nosilnost tal 1,4.



Slika 96: Oznake

Enačbe za izračun koeficientov:

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right),$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi',$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \varphi' \text{ pri } \delta \geq \varphi' \text{ (strižno dober stik),}$$

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \tan \varphi')^2,$$

$$b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \tan \varphi'},$$

$$s_q = 1 + (B'/L') \sin \varphi',$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3(B'/L'),$$

$$s_c = \frac{s_q \times N_q - 1}{N_q - 1},$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \tan \varphi'},$$

$$i_q = [1 - H/(V + A' c' \cot \varphi')]^m,$$

$$i_\gamma = [1 - H/(V + A' c' \cot \varphi')]^{m+1},$$

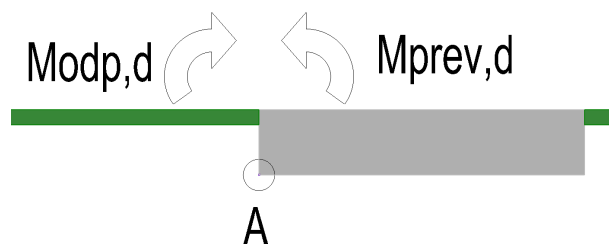
$$m_b = [2 + (B'/L')]/[1 + (B'/L')],$$

$$m_L = [2 + (L'/B')]/[1 + (L'/B')],$$

$$m = m_\theta = m_L \cos^2 \theta + m_b \sin^2 \theta.$$

4.7.1.1 Kontrola prevrnitve temelja

Kontrolo preveritve preverimo na možno točko preveritve. V našem primeru v točki A, ki je označena na sliki 97.



Slika 97: Točka prevrnitve in delovanje momentov

Za dokaz statičnega ravnovesja (EQU) mora veljati:

$$M_{prev,d} \leq M_{odp,d}. \quad (4.7)$$

Razlaga kratic:

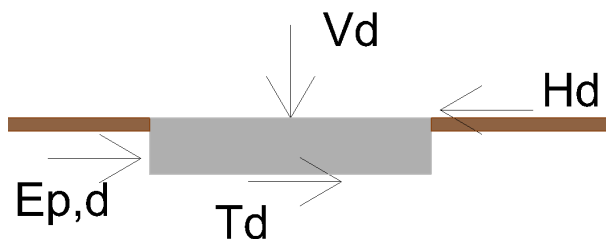
$M_{prev,d}$... moment vplivov, ki povzročajo prevrnitev konstrukcije,

$M_{odp,d}$... moment odpora temelja na prevrnitev.

Za $M_{dst,d}$ upoštevamo vplive povzete iz preglednice 6 in 7, ki jih preuredimo, da delujejo v točki A. Pri izračunu $M_{stb,d}$ upoštevamo varnostni faktor $\gamma_{G,stb} = 0,9$ za lastno težo temelja G in pasivni zemeljski pritisk $E_{p,k}$, katera zagotavljata odpor na prevrnitev.

4.7.1.2 Kontrola zdrsa temelja

Pri kontroli odpornosti na zdrs upoštevamo strižni odpor in pasivne zemeljske pritiske slika 98.



Slika 98: Vplivi pri kontroli zdrsa

Odpornost zdrsa temelja preverimo po naslednjih enačbah:

$$H_d \leq R_d = T_d + R_{p,d} = \frac{V_d \tan \delta_d}{\gamma_{R,h}} + \frac{E_{p,k}}{\gamma_{R,e}} \quad (4.8)$$

Razlaga kratic:

H_d ... učinek horizontalnih vplivov, ki delujejo neugodno na zdrs,

R_d ... odpor konstrukcije na zdrs,

T_d ... strižni odpor na stiku temelj zemljina,

δ_d ... projektni strižni kot na stiku zemljina/temelj ($\delta_d = \varphi'_{t,d}$),

$\gamma_{R,h}$... delni varnostni faktor za odpornost proti zdrsu 1,1,

$\gamma_{R,e}$... delni varnostni faktor za pasivne zemeljske pritiske 1,4,

$E_{p,k}$... karakteristični pasivni zemeljski pritiski.

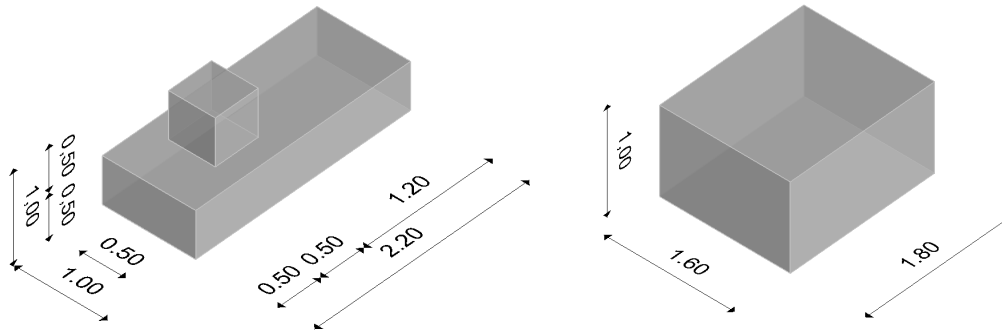
Na sliki 99 je prikazan izpis vseh kontrol za oba analizirana temelja. Kritična kombinacija za dimenzioniranje temelja T1 je bila MSN 6, za temelj T2 pa MSN 1.

Temelj T1			Temelj T3		
Kontrola nosilnosti tal za drenirane pogoje			Kontrola nosilnosti tal za drenirane pogoje		
Obtežba na temelj:	$V_d =$	<u>92,98 kN</u>	Obtežba na temelj:	$V_d =$	<u>48,87 kN</u>
Nosilnost tal:	$R_d = R/A' \times A' \times \gamma_{R,v}$	<u>201,31 kN</u>	Nosilnost tal:	$R_d = R/A' \times A' \times \gamma_{R,v}$	<u>369906,23 kN</u>
	$R_d > V_d$	<u>ok</u>		$R_d > V_d$	<u>ok</u>
Kontrola prevrnitve temelja			Kontrola prevrnitve temelja		
Moment prevrnitve:	$M_{prev,d} =$	56,48 kNm	Moment prevrnitve:	$M_{prev,d} =$	45,82 kNm
Moment odpora:	$M_{odp,d} =$	73,52 kNm	Moment odpora:	$M_{odp,d} =$	48,37 kNm
	$M_{prev,d} < M_{odp,d}$	<u>ok</u>		$M_{prev,d} < M_{odp,d}$	<u>ok</u>
Kontrola zdrsa zidu v daljši smeri			Kontrola zdrsa zidu v daljši smeri		
		PP2-I			PP2-I
Horizontalne obremenitve:	$H_d =$	6,93 kN/m	Horizontalne obremenitve:	$H_d =$	50,59 kN/m
Odpor temelja na zdrs:	$R_d =$	83,39 kN/m	Odpor temelja na zdrs:	$R_d =$	62,35 kN/m
	$H_d < R_d$	<u>ok</u>		$H_d < R_d$	<u>ok</u>

Slika 99: Kontrole dimenzioniranj temeljev za temelj T1 in T2

Končne dimenzije, ki izpolnjujejo vse zahtevane kontrole, so prikazane na sliki 100. Temelj T1 smo določili na podlagi reakcij robnega nosilca, ki je bolj obremenjen kot sredinska dva. Preverili smo tudi sredinska dva temelja, ki bi lahko bila krajša za 0,5 m. Vendar zaradi enakosti opažev in armature tukaj bistveno ne bi privarčevali. Problem se je pojavil pri bočnih temeljih, na katere delujeta veliki

dvižna in horizontalna sila. Ključno za prenos takšnih sil je velika masa, kar potrjuje tudi izbrana dimenzija. Alternativno bi lahko na mestu bočnih temeljev uporabili pilote ali zemeljske vijake. Vendar gre samo za dva temelja, zato je še vedno bolj smiselna uporaba plitvega temelja.



Slika 100: Končne dimenzije temeljev T1 in T2 (levo), ter T3 (desno)

4.8 Potek gradnje

Na mestu postavitve je najprej potrebno izvesti vse zemeljska in betonerska dela. Pred betoniranjem je potrebno na vseh mestih vpetja namestiti sidrne nastavke za sidranje podkonstrukcije in kablov na bočnih temeljih. Ko temelji dosežejo zadostno trdnost, se opravi zasip ter namesti željeno končno oblogo terena. Pri tem morajo vsi sidrni nastavki biti ustrezno zaščiteni pred morebitnimi poškodbami.

Sledi pritrditev predhodno pripravljenih jeklenih lokov in povezovalnih prečk. Ko končamo z namestitvijo podporne konstrukcije, je potrebno gradbišče ustrezno pripraviti za fazo namestitve membrane.

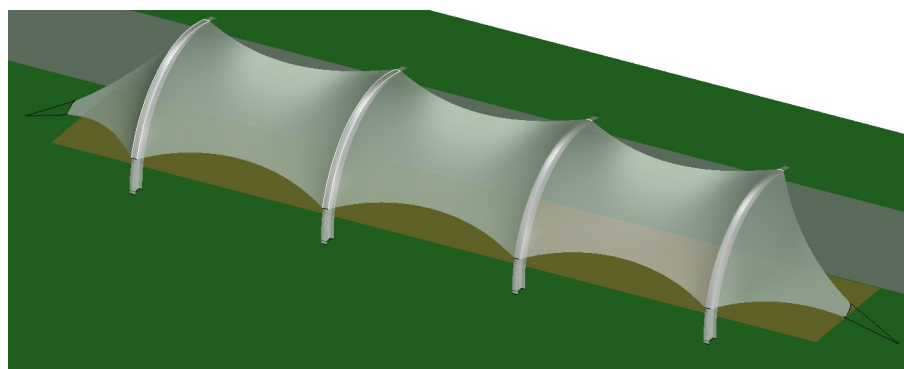
Membrana je predhodno zvarjena v delavnici, kjer se tudi že namesti kotne detajle. Kotne detajle je potrebno prekriti za zaščitnim ovojem, da med zlaganjem za prevoz detajli ne poškodujejo membrane. Na mestu montaže membrano raztegnemo na predhodno položeni zaščitni foliji, kjer namestimo vse robne kable in jih začasno stabiliziramo na robnih detajlih. Membrano nato pritrdimo na zgornjih točkah stebrov ter nato šele na spodnjih točkah in nazadnje na bočna temelja. Nato membrano pričenno zategovati na krajši stranici ter nato še na daljši stranici. Začasno stabilizirane robne kable napnemo iz sredinskega polja enakomerno proti zunanjim jadrom. Ko dosežemo predvideno obliko, dodatno še zategnemo detajle na robnih jadrih. Sledi kontrola oblike in fine nastavitve na detajlih. Z natančno kontrolo oblike prednapete membrane ocenimo ali smo dosegli željeno prednapetje v membrani in kabljih, kar je pri manjših konstrukcijah običajno edini kriterij za ocenitev prednapetja (Seidel, 2009). V primeru, da imamo na voljo orodja za merjenje sil v kabljih in napetosti v membrani, je kontrola priporočljiva.

Za kontrolo sil v kablji lahko uporabimo dinamometer in tritočkovni merilec za merjenje sil (slika 101). Dinamometer uporabimo za merjenje sil v robni kablji, kjer ga fiksiramo na koncu kabla. Tritočkovni merilec uporabimo za sidrne kable, kjer membrano sidramo na bočna temelja. Meritev prednapetja v membrani je bolj težavna in zahtevna. Za merjenje napetosti bi se lahko uporabi merilne lističe, ki merijo deformacije, ki pa so neprimerni saj v membrani nastopajo velike deformacije, na podlagi katerih je težko določiti dejansko napetost v membrani (Seidel, 2009). Za preverjanje napetosti v membrani se lahko uporabi ugrezni bat (slika, 101), kateri se vakuumsko pritrdi na membrano ter izmeri ugrez na podlagi katerega se odčita napetost v membrani. Gre za podoben sistem, kot pri tritočkovnem merilcu za kable. Pri kontroli napetosti v membrani ima na koncu največjo vlogo izkušeni montažerji, kateri na podlagi ugreza z rokami preverjajo prednapetje (Seidel, 2009).



Slika 101: Tritočkovni merilec (levo) (Dillon/Quality, 2015) in dinamometer (na sredini) (Balances-Online.com , 2015) za merjenje sil v kablu. Ugrezni bat za merjenje napetosti v membrani (desno) (Seidel, 2009)

Na sliki 102 je prikazana še končna postavitev prednapete membranske konstrukcije za prekritje kolesarnice.



Slika 102: Končna postavitev membranske konstrukcije

4.9 Ocena investicije

Z membranskimi konstrukcijami ukvarjajo le specializirana podjetja. Nekaj podjetij smo kontaktirali ter jih povprašali po informativni ponudbi za izvedbo projekta.

Sestavili smo okvirni popis del, kjer so podane informativne količine postavk za posamezna dela. Na podlagi popisa smo pridobili cene za posamezni sklop del. Popis se nahaja v prilogi št. A.

Uspelo nam je pridobiti informativno ponudbo podjetja, ki se ukvarja z membranskimi konstrukcijami. Ponudba zajema projektiranje, dobavo varjene membrane in dobavo vroče galvanizirana jeklene konstrukcije z vsem pritrtilnim materialom. Končna cena ponudbe z montažo brez ddv-ja 9.900,00 €.

Za izvedbo zemeljskih in betonerskih del smo pridobili ločeno ponudbo ki zajema zavarovanje gradbišča, izkop III. kategorije, podložni beton, opaženje, armaturo, sidrne nastavke, betoniranje z betonom kvalitete C 25/30, zasutje, odvoz odvečnega materiala ter končno izravnavo. Končna cena zemeljskih in betonerskih del znaša brez ddv-ja 3.200,00 €.

V zgornjih ponudbah niso zajete pridobitve soglasij in morebitnih dovoljenj. Zaradi konkurenčnosti ter prepovedi razmnoževanja ponudb imena ponudnikov v magistrski nalogi niso navedena.

Končna cena investicije je ocenjena na 13.100,00 € brez ddv-ja.

5 ZAKLJUČEK

Skozi magistrsko nalogo smo se seznanili s prednapetimi membranskimi konstrukcijami in sprojektirali prednapeto membransko konstrukcijo za prekritje kolesarnice pred Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Z nalogo želimo prikazati inovativnost in estetskost takšnega objekta, ki bi dobro služil študentom fakultete, ne le pri praktični uporabi, ampak tudi pri razvoju znanja o prednapetih membranskih konstrukcij v Sloveniji.

V uvodnem delu želimo bralca na kratko seznaniti s prednapetimi membranskimi konstrukcijami, njihovimi prednostmi, slabostmi ter njihovim razvojem. V nadaljevanju smo opisali bistvene gradnike konstrukcij, membrane, podporne konstrukcije in pritrdilne sisteme membrane. Opisali smo tudi proces načrtovanja, ki se bistveno razlikuje od klasičnega projektiranja, kar od inženirja zahteva dobro poznavanje ter izkušnje s področja projektiranja prednapetih membranskih konstrukcij.

Sledi projekt prednapete membranske konstrukcije, kjer smo najprej snovali idejno zasnovo na podlagi že izdelanih projektov, danih dimenzij, izvedljivosti, uporabnosti, umestljivosti v prostor in estetike objekta. Na podlagi treh idejnih zasnov, ki smo jih snovali s programom FormFinder. To smo si izbrali najprimernejšo, katero smo skozi projekt večkrat spreminjali, da smo konstrukcijo, optimalno sprojektirali.

Preden smo se lahko lotili izdelave projekta, smo morali preučiti obsežno literaturo, spoznati osnovne principe projektiranja prednapetih konstrukcij in se naučiti novih programskih orodji. Kritična presoja, inženirsko znanje in izkušnje so ključne za dobro projektiranje prednapetih konstrukcij, saj ne moremo slepo verjeti vsem rezultatov, ki jih nam poda računalniška analiza. Na težavo smo naleteli tudi pri določitvi obtežb vetra, saj Evrokod ne podaja koeficientov tlakov za izbrano obliko konstrukcije. Po večkratnem modeliranju nam je uspelo najti primerno konstrukcijo, ki zadostuje vsem projektnim vplivom. Membranski del konstrukcije z robnimi kabli smo dimenzionirali na podlagi karakterističnih vplivov, kjer smo vso varnost upoštevali na materialnih karakteristikah. Kritična obtežba za dimenzioniranje je bila v večini primerov kombinacija s snežno obremenitvijo. Lokalno se nam je zaradi srka vetra pojavilo tudi gubanje, ki pa ne ogroža varnosti in stabilnosti konstrukcije. Z gradienti smo tudi dokazali, da je kopičenje padavin po membrani preprečeno. Prvotno smo za prekrivno membrano želeli uporabiti PVC membrano tipa 1. Po priporočilih smo nato uporabili PVC membrano tipa 2, ki se je na koncu izkazala kot pravilna izbira, kar smo ugotovili pri kontroli zvarov, kjer smo uporabili višji varnostni faktor, kot je za samo membrano.

Sledilo je dimenzioniranje jeklene podkonstrukcije, temeljev in detajlov skladno z Evrokod standardi, kjer je bilo potrebno vplive iz membranskega dela analize ustrezno povečati na podlagi prevladujoče obremenitve, da so bili primerni za analizo po metodi mejnih stanj. Pri dimenzioniranju jeklene konstrukcije smo bili primorani dodati prečne nosilce, da smo zagotovili zadostno stabilnost glavnih

lokov. Za dimenzioniranje detajlov smo si izbrali robni detajl, na katerega delujejo največji vplivi. Za dimenzioniranje detajla smo izdelali lupinasti model s programom SCIA Engineer, kjer smo preverjali napetosti v detajlu. Sledila je izdelava krojnih pol, pri kateri smo upoštevali dodatke materiala zaradi zvarov, robnih kablov in keder vrvic v okolici detajlov. Opravili smo tudi kompenzacijo krojev, ki je bila različna v votkovni in osnovni smeri membrane zaradi izrazite ortotropnosti membrane. Pri dimenzioniranju temeljev smo naleteli na velike dimenzije obeh bočnih temeljev, na katere delujejo vertikalni in horizontalni vplivi. Strokovnjaki za sidranje kablov priporočajo uporabo zemeljskih sider, kar bi seveda lahko uporabili, vendar bi iz stroškovnega vidika konstrukcije pomenilo to še dodatni finančni zalogaj, saj morajo proizvajalci zemeljskih sider predhodno opraviti izvlečne teste, da določijo optimalno sidro, kar za samo dva sidra ne bi bilo smotno. Opisali smo tudi postopek montaže, ki predvideva postopno napenjanje membrane tekom montaže, da dosežemo enakomerno prednapetje po celotni membrani.

Ker nas je zanimalo, koliko bi okvirno stala konstrukcija, smo na podlagi popisa del in informativnih ponudb proizvajalcev investicijo ocenili na 13,100 €. Na koncu smo izdelali še delne delavniške načrte podkonstrukcije ter krojnih pol membrane, ki so del priloge.

VIRI

Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1077str.

Forster, B., Mollaert, M. 2004. European Design Guide for Tensile Surface Structures. TensiNet: 355 str.

Seidel, M. 2009. Tensile Surface Structures: A practical Guide to Cable and Membrane Construction. Berlin, Ernst & Sohn: 243 str.

Kovačević, D. 2012. Prednapete membranske konstrukcije. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Kovačević): 221 str.

Galliot, C., Luchsinger, R.H. 2010. The shear ramp: a new test method for the investigation of coated fabric shear behaviour – part II: experimental validation.

http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/107159 (Pridobljeno 6. 5. 2015.)

Syrovátka, P. 2015. Request for test reports of fabrics and discuss about material characteristics. Osebna komunikacija (16. 6. 2015.)

Syrovátka, P. 2015. Test report of Valmex fabric VALMEX FR 900 MEHATOP-F. Osebna komunikacija (18. 6. 2015.)

Mollaert, M., Tensinet. 2015. Olympic Games 1972 (Munich): Olympic stadium. Tensinet.

<http://www.tensinet.com/database/viewProject/3779.html> (Pridobljeno 15. 7. 2015.)

Mollaert, M., Gosling, P. 2007. Newsletter nr. 13. Tensinet. 20, 12–15.

http://www.tensinet.com/files/TensiNet_Publications/TensiNews13-1.pdf (Pridobljeno 8. 5. 2015.)

Ronstan Tensile architecture. 2015. Structural Cables.

http://www.ronstanrigging.com/arch_au/2_02_X_PI.asp (Pridobljeno 15. 3. 2015.)

Meliar design. 2015a. MPanel.

<http://www.meliar.com/MPanel.htm> (Pridobljeno 6. 5. 2015.)

Meliar design. 2015b. FEA MPanel .

http://www.meliar.com/MPanel_FEA.htm (Pridobljeno 6. 5. 2015.)

Meliar design. 2015c. Calculating panel compensation.

<http://www.meliar.com/comp.pdf> (Pridobljeno 20. 6. 2015.)

Füzes, P. 2015. Membrane constructions – solutions for corner details, Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Architecture.

<http://www.membranedetail.com/drawings-en.pdf> (Pridobljeno 26. 5. 2015.)

Tennect. 2015. Product brochure.

http://www.carlstahl-architektur.com/fileadmin//downloads/pdf/broschueren/produkt/Carl_Stahl-Tennect.pdf (Pridobljeno 5. 5. 2015.)

SIST EN 1990: 2004. Evrokod: Osnove projektiranja konstrukcije.

SIST EN 1990: 2004/A101:2005. Evrokod: Osnove projektiranja konstrukcije – Nacionalni dodatek.

SIST EN 1991-1-1: 2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije -1-1. del: Splošni vplivi – Gostote, lastna teža, koristne obtežbe stavb.

SIST EN 1991-1-3: 2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije -1-3. del: Splošni vplivi – Obtežba snega.

SIST EN 1991-1-3: 2004/A101. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije -1-3. del: Splošni vplivi – Obtežba snega – Nacionalni dodatek.

SIST EN 1991-1-4: 2005. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije -1-4. del: Splošni vplivi – Obtežbe vetra.

SIST EN 1991-1-4: 2005/oA101. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije -1-4. del: Splošni vplivi – Obtežbe vetra – Nacionalni dodatek.

SIST EN 1992-1-1: 2005. Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij -1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

SIST EN 1993-1-1: 2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij -1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

SIST EN 1993-1-1: 2005/A101:2006. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij -1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe – Nacionalni dodatek.

SIST EN 1997-1: 2005. Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila.

SIST EN 1997-1: 2005/A101: 2006. Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila – Nacionalni dodatek

Ostali viri:

Brank, B. 2014. Lupinaste konstrukcije. Membrane. Neobjavljeno študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: loč. pag.

Srednik, T. 2015. Projekt konstrukcije iz prednapete membrane. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo : 152 str.

Formfinder. 2015. About Formfinder Professional.

<http://www.formfinder.at/main/software/about/> (Pridobljeno 20. 2. 2015.)

Mehler technologies. 2013. Engineered fabrics for extraordinary tensile architectures structures.

http://www.mehler-technologies.com/de/produktuebersicht/Brochueren/VALMEX_structure_neu_2013-05.pdf
(Pridobljeno 30. 6. 2015.)

Base structures. 2015. Technical guideline to permanent tensile architectures.

<http://www.basestructures.com/assets/PDFs/Mehler-Guideline%20to%20Tensile%20Architecture.pdf>
(Pridobljeno 14. 6. 2015.)

Ruth, J. 2015. Werkzeuge zum Entwerfen und Konstruieren leichter Flächentragwerke, Bauhaus-Universität Weimar.

http://www.uni-weimar.de/Bauing/iki/massiv/mb2/Archiv/Veroeffentlichungen/LEICHTE_FTW_IKI.pdf
(Pridobljeno 14. 6. 2015.)

Hostel. 2015. Olympic park Muenchen, galerija.

<http://www.pension-hostel-muenchen.de/en/sehenswuerdigkeiten/olympia-park-muenchen/>

(Pridobljeno 6. 3. 2015.)

Goka. 2015. Galerija izdelkov.

<http://goka.si/portfolio-item/1687/> (Pridobljeno 2. 3. 2015.)

Atlas okolja. 2015. Pogled na FGG UL, Jamova cesta 2.

http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL%40Arso&initialExtent=461313.81%2C100309.49%2C0.26458

(Pridobljeno 7. 3. 2015.)

Mellon, C. 2015. An Intro to Tensile Structures.

<http://www.basestructures.com/assets/PDFs/An%20Intro%20to%20Tensile%20Structures.pdf>

(Pridobljeno 12. 6. 2015.)

Symeonidou, I. 2014. Munich Stadium Roofs by Frei Otto & Gunther Behnisch. Design experiments with analogue and digital form finding. Ioanna Symeonidou, objavljeno 24.5.2014.

<https://iam.tugraz.at/workshop14s/2014/03/24/munich-stadium-roofs-by-frei-otto-gunther-behnisch/>

(Pridobljeno 20. 7. 2015.)

Big.org.ua. 2015. O2 Arena.

<http://big.org.ua/base/9/880.jpg> (Pridobljeno 6. 3. 2015.)

Elizabeth. 2014. Making a Bedouin tent: #1. Vonkulmbach.

<http://vonkulmbach.com/ingredients/?p=281> (Pridobljeno 6. 3. 2015.)

Kovinocrom. 2015. Katalog.

<http://www.kovinocrom.si/katalog.pdf> (Pridobljeno 7. 6. 2015.)

Stamperia Carcano Giuseppe. 2015. Products brochure.

<http://www.carcano.it/eng> (Pridobljeno 7. 6. 2015.)

Wikipedia. 2015. Millennium Dome.

https://en.wikipedia.org/wiki/Millennium_Dome (Pridobljeno 6. 3. 2015.)

Inspired structures. 2015. Galery of wooden structures.

<http://inspiredstructures.com/wp-content/uploads/2012/04/wooden.png> (Pridobljeno 21. 7. 2015.)

Institute for computational design. 2015. Fizični model iz elastične tkanine.

http://icd.uni-stuttgart.de/wp-content/gallery/m1_research/0-10_physical-form-finding-design-model-9296_sa.jpg (Pridobljeno 21. 7. 2015.)

Str.ucture lightweight design. 2015. Norway pavilion EXPO Shanghai.

<http://www.str-ucture.com/en/what/construction-projects/reference/norway-pavilion-expo-shanghai-china-2010/> (Pridobljeno 19. 7. 2015.)

NDN Software. 2015. Primer krojne pole.

<http://www.ndnsoftware.com/> (Pridobljeno 25. 7. 2015.)

Robert McNeel & Associates. 2015. Rhinoceros 5.

<http://www.rhino3d.com/download/> (Pridobljeno 6. 5. 2015.)

Nemetschek group. 2015. Scia Engineer 14.

<http://www.scia.net/en/scia-engineer-scia-design-forms-students-professors> (Pridobljeno 3. 4. 2015.)

Samuel J., Armijos. 2015. FabricThe role of fabric structures in architecture (Part 1), objavljeno 1. 5. 2015.

<http://fabricarchitecturemag.com/2015/05/01/the-role-of-fabric-structures-in-architecture-part-1/> (Pridobljeno 15. 6. 2015.)

Samuel J., Armijos. 2015. FabricThe role of fabric structures in architecture (Part 2), objavljeno 1. 6. 2015.

<http://fabricarchitecturemag.com/2015/06/01/the-role-of-fabric-structures-in-architecture-part-2/> (Pridobljeno 15. 6. 2015.)

Mehler texnologies. 2008. A White Wonder in the Middle of Nowhere.

<http://www.mehler-texnologies.com/mta/Casestudies/Cases-/Horse-Riding-Hall-/Horse-Riding-Hall.php> (Pridobljeno 28. 7. 2015.)

Gorgolewski. 2014. Stadion Narodowy.

http://www.fotoblog.gorgolewski.pl/stadion_narodowy.html (Pridobljeno 27. 9. 2015.)

Emiratesyoo. 2015. Yas Marina, gallery.

http://static.emiratesyoo.com/main/data/media/galleries/48/48_26770.jpg (Pridobljeno 28. 7. 2015.)

CI structures. 2015. Sestava PET/PVC membrane

<http://www.cistructures.com/images/product/membrane.jpg> (Pridobljeno 28. 7. 2015.)

Diba. 2015. Diba products.

http://www.dibats.com/pdf/pdf_brochure_39.pdf (Pridobljeno 28. 7. 2015.)

Dillon/Quality plus. 2015. Dillon Quick Check Tension Meter.

<http://dillondynamometers.com/tension.htm> (Pridobljene 18. 9. 2015.)

Balances-Online.com. 2015. Chatillon TD5 series dinamometer.

<http://www.balances-online.com/product.php?productid=580> (Pridobljeno 18. 9. 2015.)

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: POPIS DEL

PRILOGA B: ANALIZA TEMELJEV

PRILOGA C: KROJNE POLE

PRILOGA C.1: KROJNA POLA 1

PRILOGA C.2: KROJNA POLA 2

PRILOGA C.3: KROJNA POLA 3

PRILOGA C.4: KROJNA POLA 4

PRILOGA D: DETAJL D1

PRILOGA E: JEKLENA PODKONSTRUKCIJA

(ta stran je namenoma prazna)

PRILOGA A: POPIS DEL

poz.	opis postavke	EM	kom	cena/EM	CENA
------	---------------	----	-----	---------	------

A	GRADBENA DELA
----------	----------------------

A.1	ZEMELJSKA DELA
------------	-----------------------

1	Priprava zemljišča za zemeljska dela.	m2	100		
2	Široki izkop gradbene jame, zemljina je III. Ktg., globine do 2 m, odstranitev zgornje površinske plasti, z odvozom na depo.	m3	18,5		
3	Planiranje dna izkopa s točnostjo +/- 3 cm. Komprimeranje tal do potrebne zbitosti.	m2	15,4		
4	Zasip a.b. temeljev z materialom iz depo. Izvedeno v plasteh po 30cm, s komprimeranjem do polne zbitosti.	m3	6,8		
5	Odvoz odvečnega materiala na stalno deponijo v oddaljenosti do 15 km.	m3	11,7		
6	Zakoličba objekta z višinsko navezavo	kpl	1		
7	Izdelava, postavitve, zavarovanje in demontaža gradbenih profilov.	kpl	1		

A.2	BETONERSKA DELA
------------	------------------------

7	Betoniranje podbetonov pod točkovnimi temelji, debeline 10 cm, z betonom (C 12/15)	m3	1,2		
8	Betoniranje šest točkovnih temeljev z betonom (C25/30), a.b. točkovni temelj vel 250x100x50 cm 4 kos in 150x180x100 cm 2 kos, opaž a.b. temeljev.	m3	11,9		
9	Dobava, priprava, krivljenje, polaganje in vezanje. (ocena 50kg/m3)	kg	595		
10	Montaža sidrišč in sidernih nastavkov.	kos	12		
11	Izvedba podlitja po montaži jeklene konstrukcije	kos	12		

poz.	opis postavke	EM	kom	cena/EM	CENA
------	---------------	----	-----	---------	------

C	OBRTNIŠKA DELA				
----------	-----------------------	--	--	--	--

C.1	JEKLENA KONSTRUKCIJE				
------------	-----------------------------	--	--	--	--

- | | | | |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|
| 12 | Izdelava 4 varjenih nosilcev, izdelava sidrišč za membrano, sidrne pločevine, jeklo kvalitete S 275, vroče-cinkani zaščitni sloj. | kg | 1080 |
| 13 | Dobava konstrukcijskih cevi RO 101,6x5 z navarjenimi pločevinam, jeklo kvalitete S 275, vroče-cinkani zaščitni sloj. | kg | 380 |
| 13 | Dobava sidernih nastavkov, jeklo kvalitete S 500, vroče-cinkani zaščitni sloj. | kg | 90 |
| 14 | Montažni material. | kpl | 1 |
| 15 | Montaža jeklene konstrukcije. | kpl | 1 |

C.1	MEMBRANA				
------------	-----------------	--	--	--	--

- | | | | |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|----|
| 16 | Izdelava prekrivne membrane, PET/PVC membrana tipa 2 s PVDF premazom (podobno Valmex FR 900 MEHATOP F - type II), robni ojačitveni ter bočni jekleni kabel $\phi 10$ Frd =45 kN, nastavki z navojem $\phi 10$ Frd =45 kN. | kpl | 1 |
| 17 | Izdelava detajlov za pritrjevanje membrane, z vsem pritrdilnim materialom. | kos | 12 |
| 18 | Montažni material. | kpl | 1 |
| 19 | Montaža prekrivne membrane. | kpl | 1 |

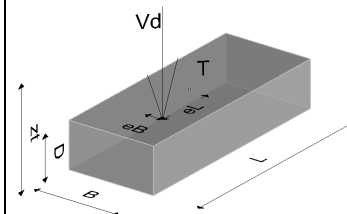
PRILOGA B: ANALIZA TEMELJEV

Temelj T1

Kontrola nosilnosti temeljnih tal

Vhodni podatki:

Kohezija:	$c =$	0,00	kPa
Strižni kot:	$\varphi =$	36,00	°
Prostorninska teža zemljine:	$\gamma =$	20,00	kN/m ³
Nivo podtalnice:	$z_v =$	5,00	m
Širina temelja:	$B =$	1,00	m
Dolžina temelja:	$L =$	2,20	m
Debelina temelja:	$D =$	0,50	m
Globina temelja:	$z_t =$	1,00	m
Razdalja od centra temelja: ($L/2 > eL$)	$eL =$	0,60	
Razdalja od centra temelja: ($B/2 > eB$)	$eB =$	0,00	
Naklon temeljne ploskve:	$\alpha =$	0,00	°
Teža temelja + nasip:	$G_k =$	49,50	kN
Procent mobilizacije pasivnega pritiska:	$\xi_p =$	60,00	%
Varnostni faktor lastne teže:		1,00	

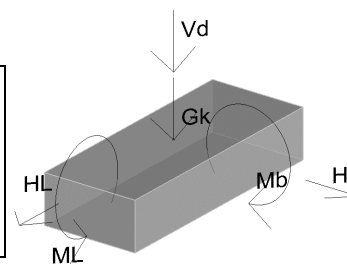


Projektne vrednosti vplivov na mestu vpetja:

Vertikalna obremenitev:	$V_d =$	43,48	kN
Moment v smeri L:	$M_{L,d} =$	-89,23	kNm
Moment v smeri B:	$M_{B,d} =$	2,87	kNm
Horizontalna obtežba v smeri B:	$H_{B,d} =$	-1,92	kN
Horizontalna obtežba v smeri L:	$H_{L,d} =$	6,66	kN

Projektne vrednosti vplivov v težišču temelja za kontrolo nosilnosti tal:

Vertikalna obremenitev:	$V_d =$	43,48	kN
Moment v smeri L:	$M_{L,d} =$	-56,48	kNm
Moment v smeri B:	$M_{B,d} =$	0,95	kNm
Horizontalna obtežba v smeri B:	$H_{B,d} =$	-1,92	kN
Horizontalna obtežba v smeri L:	$H_{L,d} =$	6,66	kN



Zemeljski pritisk po Rankinu ravno zaledje:

$$k_a = 0,26$$

$$k_p = 3,85$$

Zemeljski pritisk v smeri L:

$$E_{a,k} = 3,89 \text{ kN}$$

$$E_{p,k} = 34,67 \text{ kN}$$

$$R_{p+a,k} = 30,77 \text{ kN} \quad (\text{brez kohezije})$$

Zemeljski pritisk v smeri B:

$$E_{a,k} = 8,57 \text{ kN}$$

$$E_{p,k} = 76,27 \text{ kN}$$

$$R_{p+a,k} = 67,70 \text{ kN} \quad (\text{brez kohezije})$$

Izračun:

Projektna kohezija:	$c_d = 0,00 \text{ kPa}$	
Projektni strižni kot:	$\varphi_d = 36,00^\circ$	
	$\gamma' = 20,00 \text{ kN/m}^3$	
Ekscentričnost v smeri B:	$e_B = 0,02 \text{ m}$	
Ekscentričnost v smeri L:	$e_L = 1,30 \text{ m}$	
Teža tal ob temelju:	$q = 20,00 \text{ kPa}$	$m_b = 0,29 \text{ H v smeri B}$
Efektivna širina temelja:	$B' = 0,96 \text{ m}$	$m_L = 2,71 \text{ H v smeri L}$
Efektivna dolžina temelja:	$L' = -0,40 \text{ m}$	$m = 2,14$
Efektivna ploščina:	$A' = -0,38 \text{ m}^2$	
Vertikalne obremenitve	$\Sigma V_d = 92,98 \text{ kN}$	
Horizontalne obremenitve	$\Sigma H_d = 6,93 \text{ kN}$	
Kot horizontalne sile v smeri L:	$\theta = 29,00^\circ$	

(pravokotno na temelj)

Koeficienti:

$N_q = 37,75$	$N_c = 50,59$	$N_g = 53,40$
$b_q = 1,00$	$b_c = 1,00$	$b_g = 1,00$
$s_q = -0,41$	$s_c = -0,45$	$s_g = 1,72$
$i_q = 0,69$	$i_c = 0,68$	$i_g = 0,58$

Kontrola nosilnosti tal za drenirane pogoje

$$\text{Obtežba na temelj:} \quad V_d = \underline{\underline{92,98 \text{ kN}}}$$

$$\text{Nosilnost tal:} \quad R_d = R/A' \times A' \times \gamma_{R,V} = \underline{\underline{201,31 \text{ kN}}}$$

$$\underline{\underline{R_d > V_d}} \quad \text{ok}$$

Kontrola prevrnitve temelja

$$\text{Moment prevrnitve:} \quad M_{\text{prev,d}} = 56,48 \text{ kNm}$$

$$\text{Moment odpora:} \quad M_{\text{odp,d}} = 73,52 \text{ kNm}$$

$$\underline{\underline{M_{\text{prev,d}} < M_{\text{odp,d}}}} \quad \text{ok}$$

Kontrola zdrsa zidu v daljši smeri

PP2-I

$$\text{Horizontalne obremenitve:} \quad H_d = 6,93 \text{ kN/m}$$

$$\text{Odpor temelja na zdrs:} \quad R_d = 83,39 \text{ kN/m}$$

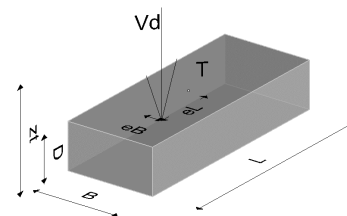
$$\underline{\underline{H_d < R_d}} \quad \text{ok}$$

Temelj T 3

Kontrola nosilnosti temeljnih tal

Vhodni podatki:

Kohezija:	$c =$	0,00	kPa
Strižni kot:	$\varphi =$	36,00	°
Prostorninska teža zemljine:	$\gamma =$	20,00	kN/m ³
Nivo podtalnice:	$z_v =$	5,00	m
Širina temelja:	$B =$	1,60	m
Dolžina temelja:	$L =$	1,80	m
Debelina temelja:	$D =$	1,00	m
Globina temelja:	$z_t =$	1,00	m
Razdalja od centra temelja: ($L/2 > e_L$)	$Le =$	0,00	
Razdalja od centra temelja: ($B/2 > e_B$)	$Lb =$	0,00	
Naklon temeljne ploskve:	$\alpha =$	0,00	°
Teža temelja + nasip:	$G_k =$	72,00	kN
Procent mobilizacije pasivnega pritiska:	$\xi_p =$	60,00	%
Varnostni faktor lastne teže:		1,00	

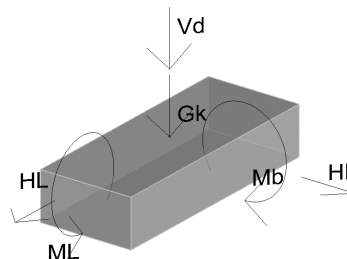


Projektne vrednosti vplivov na mestu vpetja:

Vertikalna obremenitev:	$V_{d,d} =$	-23,13	kN
Moment v smeri L:	$M_{L,d} =$	0,00	kNm
Moment v smeri B:	$M_{B,d} =$	0,00	kNm
Horizontalna obtežba v smeri B:	$H_{B,d} =$	50,40	kN
Horizontalna obtežba v smeri L:	$H_{L,d} =$	4,37	kN

Projektne vrednosti vplivov v težišču temelja za kontrolo nosilnosti tal:

Vertikalna obremenitev:	$V_d =$	-23,13	kN
Moment v smeri L:	$M_{L,d} =$	4,37	kNm
Moment v smeri B:	$M_{B,d} =$	50,40	kNm
Horizontalna obtežba v smeri B:	$H_{B,d} =$	50,40	kN
Horizontalna obtežba v smeri L:	$H_{L,d} =$	4,37	kN



Zemeljski pritisk po Rankinu ravno zaledje:

$$k_a = 0,26$$

$$k_p = 3,85$$

Zemeljski pritisk v smeri L:

$$E_{a,k} = 4,15 \text{ kN}$$

$$E_{p,k} = 36,98 \text{ kN}$$

$$R_{p+a,k} = 32,82 \text{ kN} \quad (\text{brez kohezije})$$

Zemeljski pritisk v smeri B:

$E_{a,k} = 4,67 \text{ kN}$

$E_{p,k} = 41,60 \text{ kN}$

$R_{p+a,k} = 36,93 \text{ kN} \quad (\text{brez kohezije})$

Izračun:

Projektna kohezija:	$c_d = 0,00 \text{ kPa}$	
Projektni strižni kot:	$\varphi_d = 39,00^\circ$	
	$\gamma' = 20,00 \text{ kN/m}^3$	
Ekscentričnost v smeri B:	$e_B = 2,18 \text{ m}$	
Ekscentričnost v smeri L:	$e_L = 0,19 \text{ m}$	
Teža tal ob temelju:	$q = 20,00 \text{ kPa}$	$m_b = -0,06 \text{ H v smeri B}$
Efektivna širina temelja:	$B' = -2,76 \text{ m}$	$m_L = 3,06 \text{ H v smeri L}$
Efektivna dolžina temelja:	$L' = 1,42 \text{ m}$	$m = 2,33$
Efektivna ploščina:	$A' = -3,92 \text{ m}^2$	
Vertikalne obremenitve	$\Sigma V_d = 48,87 \text{ kN}$	
Horizontalne obremenitve	$\Sigma H_d = 50,59 \text{ kN}$	
Kot horizontalne sile v smeri L:	$\theta = 29,00^\circ$	

(pravokotno na temelj)

Koeficienti:

$N_q = 55,96$	$N_c = 67,87$	$N_g = 89,01$
$b_q = 1,00$	$b_c = 1,00$	$b_g = 1,00$
$s_q = -0,22$	$s_c = -0,24$	$s_g = 1,58$
$i_q = 14,88$	$i_c = 15,13$	$i_g = 47,41$

Kontrola nosilnosti tal za drenirane pogoje

Obtežba na temelj: $V_d = \underline{\underline{48,87 \text{ kN}}}$

Nosilnost tal: $R_d = R/A' \times A' \times \gamma_{R,V} \underline{\underline{369906,23 \text{ kN}}}$

$\underline{\underline{R_d > V_d}} \quad \text{ok}$

Kontrola prevrnitve temelja

Moment prevrnitve: $M_{prev,d} = 45,82 \text{ kNm}$

Moment odpora: $M_{odp,d} = 48,37 \text{ kNm}$

$\underline{\underline{M_{prev,d} < M_{odp,d}}} \quad \text{ok}$

Kontrola zdrsa zidu v daljši smeri

PP2-I

Horizontalne obremenitve: $H_d = 50,59 \text{ kN/m}$

Odpor temelja na zdrs: $R_d = 62,35 \text{ kN/m}$

$\underline{\underline{H_d < R_d}} \quad \text{ok}$